

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN DIARIA TMPA 3B42 V7
PARA SU APLICABILIDAD EN LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA EN EL
ECUADOR UTILIZANDO DIFERENTES METODOLOGÍAS DE CORRECCIÓN
DE DATOS.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

EDGAR EFRÉN CÓRDOVA TAFUR
edgar.cordova.t@gmail.com

Director: CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS
carlos.paezb@epn.edu.ec

Quito, agosto del 2017

DECLARACIÓN

Yo, Edgar Efrén Córdova Tafur, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Edgar Efrén Córdova Tafur

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edgar Efrén Córdova Tafur, bajo mi supervisión.

Carlos Sebastián Páez Bimos
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTO

Deseo en este corto espacio, extender mi profundo agradecimiento a mi esposa Carolina y a mi hija Agustina por ser la principal motivación para alcanzar mis metas y por el apoyo y compañía incondicional brindados en todo momento.

A mis padres Edgar y Susana por todo el afecto brindado y el sacrificio realizado para poder llegar a esta etapa tan importante de formación en mi vida profesional y por haberme enseñado a confiar en mí y en mis decisiones y que con trabajo, esfuerzo y constancia, todo se consigue.

A mi hermana Stephanie por contribuir con sus conocimientos e ideas en este y muchos otros proyectos a lo largo de mi vida académica.

A mi tutor de tesis, el Ing. Sebastián Páez por el continuo acompañamiento, por brindarme sus conocimientos y encaminarme para lograr este proyecto.

A toda la comunidad Politécnica que de una u otra forma ha contribuido para la favorable consecución de este proyecto de investigación.

En general a todas las personas que se han mantenido cerca durante el desarrollo de mi trabajo final de titulación.

DEDICATORIA

Mi proyecto de investigación lo dedico con mucho amor a la persona más especial e importante para mí, mi hija Agustina por ser quien me brinda su alegría para continuar esforzándome cada día y culminar con éxito esta investigación, dedico a ella cada esfuerzo por ser una hermosa compañía.

A mi esposa Carolina por permanecer a mi lado y caminar juntos en busca del éxito. Y por apoyarme día a día para alcanzar mis metas profesionales, académicas y de vida en general.

Dedico a mis padres por ser el pilar fundamental en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo mantenido a través del tiempo.

Edgar Córdova

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| DECLARACIÓN..... | ii |
| CERTIFICACIÓN..... | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xii |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | xiii |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | xiv |
| RESUMEN..... | xvi |
| ABSTRACT..... | xvii |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 4 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.4. ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN..... | 4 |
| CAPÍTULO 2..... | 6 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. PERCEPCIÓN REMOTA..... | 6 |
| 2.1.1. Tipos de órbita..... | 7 |
| 2.1.2. Tipos de sensores..... | 8 |
| 2.1.3. Tipos de Resolución..... | 9 |
| 2.1.4. Almacenamiento de información..... | 11 |
| 2.2. METEOROLOGÍA..... | 12 |
| 2.2.1. Variables meteorológicas..... | 14 |
| 2.2.2. Observaciones meteorológicas..... | 15 |
| 2.2.3. Precipitación en el Ecuador..... | 18 |
| 2.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA..... | 26 |
| 2.3.1. Modelo hidrológico SWAT..... | 27 |
| CAPÍTULO 3..... | 30 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 30 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| 3.1. | CARACTERIZACIÓN FÍSICO – GEOGRÁFICA | 33 |
| 3.2. | CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA | 35 |
| 3.3. | DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA | 38 |
| 3.4. | COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO | 41 |
| 3.5. | SUELOS | 43 |
| CAPÍTULO 4..... | | 45 |
| 4. | METODOLOGÍA..... | 45 |
| 4.1. | CREACIÓN DE BASE DE DATOS DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA..... | 45 |
| 4.1.1. | Procesamiento de información observada | 45 |
| 4.1.2. | Procesamiento de información de precipitación satelital | 46 |
| 4.2. | EVALUACIÓN DEL PRODUCTO TMPA EN BASE A OBSERVACIONES ... | 50 |
| 4.2.1. | Indicadores cuantitativos | 50 |
| 4.2.2. | Indicadores cualitativos | 53 |
| 4.3. | PROCESOS DE CORRECCIÓN DE LOS DATOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN | 56 |
| 4.3.1. | Mean Bias Correction | 58 |
| 4.3.2. | Doble – kernel smoothing | 58 |
| 4.3.3. | Coeficiente de Corrección K | 59 |
| 4.3.4. | Kriging | 60 |
| 4.4. | EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL PRODUCTO TMPA CORREGIDO | 64 |
| CAPÍTULO 5..... | | 70 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 70 |
| 5.1. | BASE DE DATOS DE INFORMACIÓN SATELITAL Y OBSERVADA..... | 70 |
| 5.1.1. | Información de precipitación del producto TMPA 3B42 V7 | 70 |
| 5.1.2. | Información de precipitación observada..... | 72 |
| 5.1.3. | Información de temperatura observada | 76 |
| 5.1.4. | Información de caudales observados | 77 |
| 5.2. | EVALUACIÓN DEL PRODUCTO TMPA EN BASE A OBSERVACIONES ... | 79 |
| 5.2.1. | Indicadores Cuantitativos | 79 |
| 5.2.2. | Indicadores Cualitativos..... | 83 |
| 5.3. | PROCESOS DE CORRECCIÓN DE LAS ESTIMACIONES TMPA | 88 |
| 5.3.1. | Mean Bias Correction | 89 |
| 5.3.2. | Doble Kernel Smoothing | 89 |
| 5.3.3. | Coeficiente de Corrección K | 90 |
| 5.3.4. | Kriging con external drift | 90 |
| 5.4. | EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL PRODUCTO TMPA CORREGIDO | 94 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 6..... | 104 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 104 |
| 6.1. CONCLUSIONES..... | 104 |
| 6.2. RECOMENDACIONES..... | 106 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 107 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Densidad de estaciones meteorológicas por provincia en el Ecuador Continental. | 2 |
| Figura 2. Elementos involucrados en la técnica de percepción remota. | 6 |
| Figura 3. Ejemplificación de una imagen captada por un satélite con órbita geostacionaria. | 7 |
| Figura 4. Representación de una órbita polar. | 8 |
| Figura 5. Representación de órbitas no polares. | 8 |
| Figura 6. Diferentes resoluciones espaciales para una determinada zona. | 9 |
| Figura 7. Espectro electromagnético. | 10 |
| Figura 8. Arriba izquierda, imagen de resolución radiométrica de 2 bits; arriba derecha, imagen de resolución radiométrica de 4 bits, abajo izquierda, imagen de resolución radiométrica de 8 bits, abajo derecha, imagen de resolución radiométrica de 16 bits. | 11 |
| Figura 9. Representación de una variable espacial en formato raster. | 12 |
| Figura 10. Composición de la atmósfera en función de la altura y la temperatura. | 13 |
| Figura 11. Incidencia de la energía emitida por el sol hacia la atmósfera. | 13 |
| Figura 12. Diagrama conceptual de los componentes del Sistema Mundial de Observación. | 15 |
| Figura 13. Localización de estaciones meteorológicas en el Ecuador continental. | 16 |
| Figura 14. Acumulación de precipitación para la recolección de datos por parte del INAMHI. | 17 |
| Figura 15. Estación meteorológica administrada por el INAMHI ubicada en Portoviejo. | 17 |
| Figura 16. Mapa de isoyetas media anual / serie 1981 - 2010. | 19 |
| Figura 17. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del Río Coca. ... | 20 |
| Figura 18. Variabilidad de las precipitaciones medias mensuales en la cuenca del río Coca. | 21 |
| Figura 19. Ejemplos de satélites meteorológicos. | 22 |
| Figura 20. Sensores incorporados en el satélite TRMM. | 24 |
| Figura 21. Ejemplo de coberturas utilizadas para la definición de las HRU. | 27 |
| Figura 22. Fases en las que se divide la simulación del modelo SWAT. | 28 |
| Figura 23. Representación de la fase terrestre del ciclo hidrológico. | 29 |
| Figura 24. Ubicación de la cuenca hidrográfica de estudio con relación al territorio ecuatoriano. | 30 |
| Figura 25. Ubicación espacial de las ciudades dentro de la cuenca hidrográfica. | 31 |
| Figura 26. Ubicación de las Áreas Naturales Protegidas en la cuenca hidrográfica de estudio. | 33 |
| Figura 27. Variabilidad a nivel mensual de la temperatura en la cuenca hidrográfica de estudio. | 36 |
| Figura 28. Variabilidad a nivel mensual de la humedad relativa en la cuenca hidrográfica de estudio. | 37 |
| Figura 29. Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio. | 38 |
| Figura 30. Ubicación de las estaciones hidrológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 31. Variabilidad a nivel mensual de los caudales medidos en las estaciones hidrológicas de la cuenca hidrográfica de estudio..... | 40 |
| Figura 32. Caracterización de caudales líquidos por año y los caudales medios mensuales en la cuenca hidrográfica del Río Coca..... | 41 |
| Figura 33. Distribución espacial de categorías de cobertura vegetal y uso del suelo. . | 42 |
| Figura 34. Distribución espacial de suelos. | 44 |
| Figura 35. Centroides de píxeles del producto TMPA. | 49 |
| Figura 36. Parámetros que describen a un semivariograma. | 62 |
| Figura 37. Modelos teóricos de semivariograma. | 63 |
| Figura 38. Subcuencas hidrográficas delimitadas utilizando el paquete computacional SWAT. | 66 |
| Figura 39. Ubicación de puntos de entrada con valores precipitación del producto TMPA corregida..... | 67 |
| Figura 40. Resumen de resultados de precipitación a nivel anual para los píxeles considerados en la modelación hidrológica..... | 71 |
| Figura 41. Indicadores cuantitativos calculados entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. | 82 |
| Figura 42. Probabilidad de detección calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. | 84 |
| Figura 43. Falsa alarma calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. | 85 |
| Figura 44. Exactitud calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. | 85 |
| Figura 45. Frecuencia de sesgo calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados..... | 86 |
| Figura 46. Probabilidad de detección corregida entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. | 87 |
| Figura 47. Puntaje de habilidad de Heidke calculado entre las estimaciones de precipitación y los valores observados..... | 87 |
| Figura 48. Resumen del número de datos observados válidos por día. | 88 |
| Figura 49. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Mean Bias Correction. | 89 |
| Figura 50. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Doble Kernel Smoothing. | 90 |
| Figura 51. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Coeficiente de Corrección K. | 90 |
| Figura 52. Ejemplos de semivariogramas calculados con 5, 6, 7 y 8 valores. | 91 |
| Figura 53. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Kriging con external drift. | 92 |
| Figura 54. Espacialización del promedio de precipitación obtenida por los métodos de corrección. | 93 |
| Figura 55. Hidrogramas obtenidos a partir de la simulación del modelo hidrológico comparados con los datos de la estación hidrológica H0715. | 96 |
| Figura 56. Hidrogramas obtenidos a partir de la simulación del modelo hidrológico comparados con los datos de la estación hidrológica H0714. | 97 |
| Figura 57. Resultados de evaluación de caudales observados y simulados entre enero 2008 hasta diciembre 2013..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 58. Resultados de evaluación de caudales observados y simulados entre octubre 2009 hasta noviembre 2010..... | 101 |
| Figura 59. Hidrogramas de los caudales simulados con los valores corregidos del producto TMPA, valores sin corrección y caudales observados en las estaciones H0715 y H0714 desde octubre 2009 hasta noviembre 2010..... | 102 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Distribución de la red de estaciones meteorológicas del INAMHI..... | 15 |
| Tabla 2: Niveles de procesamiento de los productos TRMM..... | 25 |
| Tabla 3: Productos generados a partir de la información captada por el satélite TRMM. | 25 |
| Tabla 4: Distribución de población en la cuenca de estudio..... | 31 |
| Tabla 5: Características físico – geográficas de la cuenca de estudio. | 34 |
| Tabla 6: Estaciones meteorológicas en el área de estudio. | 35 |
| Tabla 7: Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio. | 38 |
| Tabla 8: Categorías de cobertura vegetal y uso del suelo dentro del área de estudio. | 42 |
| Tabla 9: Suelos dentro de la cuenca hidrográfica de estudio. | 43 |
| Tabla 10: Portales web para acceder a información de precipitación captada por sensores remotos. | 47 |
| Tabla 11: Clasificación de zonas altitudinales..... | 52 |
| Tabla 12: Modelo de tabla de contingencia..... | 53 |
| Tabla 13: Parámetros de calibración del modelo hidrológico | 68 |
| Tabla 14: Descripción de parámetros de calibración del modelo hidrológico. | 68 |
| Tabla 15: Porcentaje de datos válidos del producto de estimación de precipitación. .. | 70 |
| Tabla 16: Resumen de datos de precipitación observada a nivel diario periodo 1963 a 2015. | 72 |
| Tabla 17: Resumen de datos de precipitación observada a nivel diario periodo 1998 a 2014. | 73 |
| Tabla 18: Resumen a nivel anual de datos observados de precipitación. | 74 |
| Tabla 19: Porcentaje de datos válidos observados desde 1998 a 2014 de las estimaciones de meteorológicas..... | 74 |
| Tabla 20: Resumen de precipitación observada agregada a nivel anual..... | 75 |
| Tabla 21: Resumen a nivel anual de datos observados de temperatura. | 76 |
| Tabla 22: Promedio anual de datos de temperatura observados en la estación M0188. | 77 |
| Tabla 23: Resumen a nivel anual de datos observados de caudal..... | 77 |
| Tabla 24: Promedio de caudal observado en la estación H0714..... | 78 |
| Tabla 25: Promedio de caudal observado en la estación H0715..... | 78 |
| Tabla 26: Estaciones meteorológicas y centroides de píxeles correspondientes. | 79 |
| Tabla 27: Resultados del cálculo de indicadores estadísticos a nivel diario. | 80 |
| Tabla 28: Resumen de resultados de la simulación del modelo hidrológico. | 94 |
| Tabla 29: Indicadores estadísticos de los resultados de los caudales simulados comparados con los valores de caudal observados..... | 98 |
| Tabla 30: Indicadores estadísticos de los resultados de los caudales simulados comparados con los valores de caudal observados..... | 100 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| O_i | Valor observado |
| S_i | Valor simulado |
| i | Series de tiempo de los pares de valores observados y simulado |
| N | Número total de observaciones |
| n | Pares de los valores observados y simulados |
| a | Valor pronosticado y también observado |
| b | Valor pronosticado pero no observado |
| c | Valor no pronosticado pero si observado |
| d | Valor no pronosticado y tampoco observado |
| He | Número de detecciones |
| Z_G | Valores de precipitación observados |
| Z_S | Valores de precipitación estimada |
| j | Ubicación |
| ϵ_s | Residual puntual |
| ϵ_{ss} | Interpolación de primer nivel |
| $\ -\ $ | Normalización Euclidiana |
| Λ | Kernel Gausiano |
| H | Posición de los puntos y ancho de banda |
| σ^5 | Desviación estándar de la muestra |
| $K_{i,m}$ | Sesgo en una ubicación |
| $f_{i,d,m}$ | Coefficiente de desagregación temporal |
| $P_{i,d,m}$ | Precipitación total |
| $TP_{i,m}$ | Precipitación total mensual a partir de las observaciones en tierra. |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------------|---|
| ACC | Exactitud |
| CERES | Sistema de Energía Radiante y Nubes |
| COR | Coefficiente de Correlación |
| DS | Double Kernel Smoothing |
| EPMAPS | Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento |
| EPN | Escuela Politécnica Nacional |
| ESA | Agencia Espacial Europea |
| ET | Evapotranspiración |
| ETS | Probabilidad de Detección Corregida |
| FAR | Tasa Falsa Alarma |
| FBI | Frecuencia de Sesgo |
| GPCP | Global Precipitation Climatology Project |
| HSS | Puntaje de Habilidad de Heidke |
| HRU | Unidad de respuesta hidrológica |
| INAMHI | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología |
| IMERG | Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM |
| JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency |
| KCC | Coefficiente de Corrección K |
| KED | Kriging External Drift |
| LIS | Sensor de Imágenes Relámpago |
| MAE | Ministerio del Ambiente |
| MAE | Error medio absoluto |
| ME | Error Medio |
| MBC | Mean Bias Correction |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NRT | Near real time |
| NSE | Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe |

| | |
|--------------|---|
| OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| P | Precipitación |
| PBIAS | Porcentaje del Sesgo |
| PET | Evapotranspiración Potencial |
| POD | Probabilidad de detección |
| PR | Radar de Precipitación |
| Qt | Caudal Total |
| RSR | Promedio del Error Medio Cuadrático Estandarizado |
| SI | Sistema Internacional |
| SWAT | Soil Water Assessment Tool |
| TMI | Sensor Microonda |
| TMPA | TRMM Multisatellite Precipitation Analysis |
| TRMM | Tropical Rainfall Measurement Mission |
| USDA | U.S. Department of Agriculture |
| UTC | Tiempo Universal Coordinado |
| VIRS | Escáner Infrarrojo Visible |

RESUMEN

El proyecto de investigación pretende evaluar la aplicabilidad de la precipitación satelital para la modelación hidrológica. La estimación de precipitación es provista por el satélite TRMM, a través del producto TMPA3B42 V7. Esto se realiza con el propósito de complementar la disponibilidad de información de precipitación observada.

La precipitación satelital mejora la distribución espacial de la precipitación observada en pluviómetros considerando métodos de corrección para la precipitación satelital como por ejemplo el Mean Bias Correction, Double Kernel Smoothing, Coeficiente de corrección K y Kriging con External Drift.

La evaluación de los métodos de corrección de precipitación se realizó a través de la comparación de caudales simulados, con los caudales observados en la estación hidrológica Coca San Rafael. Se pudo identificar que los valores de estimación de precipitación corregidos con el método Double Kernel Smoothing al ser ingresados en el modelo hidrológico, producen los caudales más cercanos a los observados.

Lo mencionado anteriormente se sustentó por medio del cálculo de los indicadores cuantitativos. Los cuales alcanzaron un valor de 0.95 para el coeficiente de correlación de Pearson y un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.5 entre octubre 2009 y octubre 2010¹; estos valores, de acuerdo a lo determinado por Moriasi et al., (2007), corresponden a una clasificación 'Satisfactorio' para la modelación hidrológica realizada con el producto TMPA3B42 V7 corregido con el método Double Kernel Smoothing.

Palabras clave: TMPA, precipitación-satelital, métodos corrección.

¹ Los valores de los indicadores cuantitativos se obtuvieron entre el mes de octubre de 2009 hasta el mes de octubre de 2010, año en el que se pudieron observar los mejores resultados. Para el periodo comprendido entre los años 2008 y 2013 se obtuvo un NSE de -0.43.

ABSTRACT

This research evaluates the applicability of satellite-based precipitation products in hydrological modeling. The estimation is provided by the TRMM satellite through the product TMPA 3B42 V7. The aim is to complement the availability of observed precipitation.

Satellite-based precipitation improves the spatial distribution of precipitation observed in rain gauges by considering correction methods, such as Mean Bias Correction, Double Kernel Smoothing, Correction Coefficient K and Kriging with External Drift.

The evaluation of the corrected precipitation values was performed through the comparison of the discharges obtained by the simulation of the hydrological model, against observed discharges at the river gauge Coca San Rafael. It was possible to establish that the estimated precipitation values corrected with the DS method, when used in the hydrological model, are able to produce flow values closer to the observations on site.

The improvement was validated by Pearson correlation and Nash-Sutcliffe indicators. The correlation and Nash-Sutcliffe coefficients reached a value of 0.95 and 0.5 respectively between October 2009 to October 2010. This values, according to Moriasi et al., (2007), corresponds to a classification of 'Satisfactory' for the results of the hydrological modeling performed with the product TMPA3B42 V7 corrected with the Double Kernel Smoothing method.

Keywords: TMPA, satellite-precipitation, correction.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En el Ecuador el organismo responsable de proveer datos relacionados con el tiempo, clima y los recursos hídricos es el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). A pesar de la importante gestión realizada por el INAMHI existen zonas en el país donde no se cuenta con una suficiente cobertura de datos de precipitación debido principalmente a la falta de equipamiento disponible. Esto, ha causado que los estudios y las modelaciones hidrológicas tengan limitaciones en su calidad de acuerdo a lo señalado por Escobar et al., (2013).

Según el mapa de la red de estaciones meteorológicas del Ecuador publicado por el INAMHI en el año 2014, la red cuenta con 379 estaciones; 121 en la región costa, 217 en la región sierra, 36 en la región oriental, 4 en la región insular y 1 en zonas no delimitadas.

Con relación a la distribución de las estaciones, la Línea Base sobre la Gestión de la Información Agro Meteorológica en el Ecuador según Cáceres (2012) destaca que existe cobertura de estaciones en gran parte del país, sin embargo se registra regiones con escasa o nula existencia de estaciones como por ejemplo la región Amazónica. Esto se corrobora con lo señalado por Moreano (2008) y por Villacrés y Gallegos (2010) quienes señalan que en la región Oriental se encuentran el 6.9% de estaciones en operación. Es así que, la poca existencia de estaciones en la zona Amazónica se traduce en escasa información meteorológica, lo que limita el análisis de proyectos relacionado con los recursos hídricos en estas zonas.

Los valores recomendados por la Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2011) señalan que para zonas montañosas es necesaria una densidad de 250 km²/estación, 575 km²/estación para zonas de planicies internas y 900 km²/estación para zonas costeras. El análisis realizado en base a los datos de la OMM para cada una de las provincias que conforman el Ecuador continental, se presenta en la Figura 1.

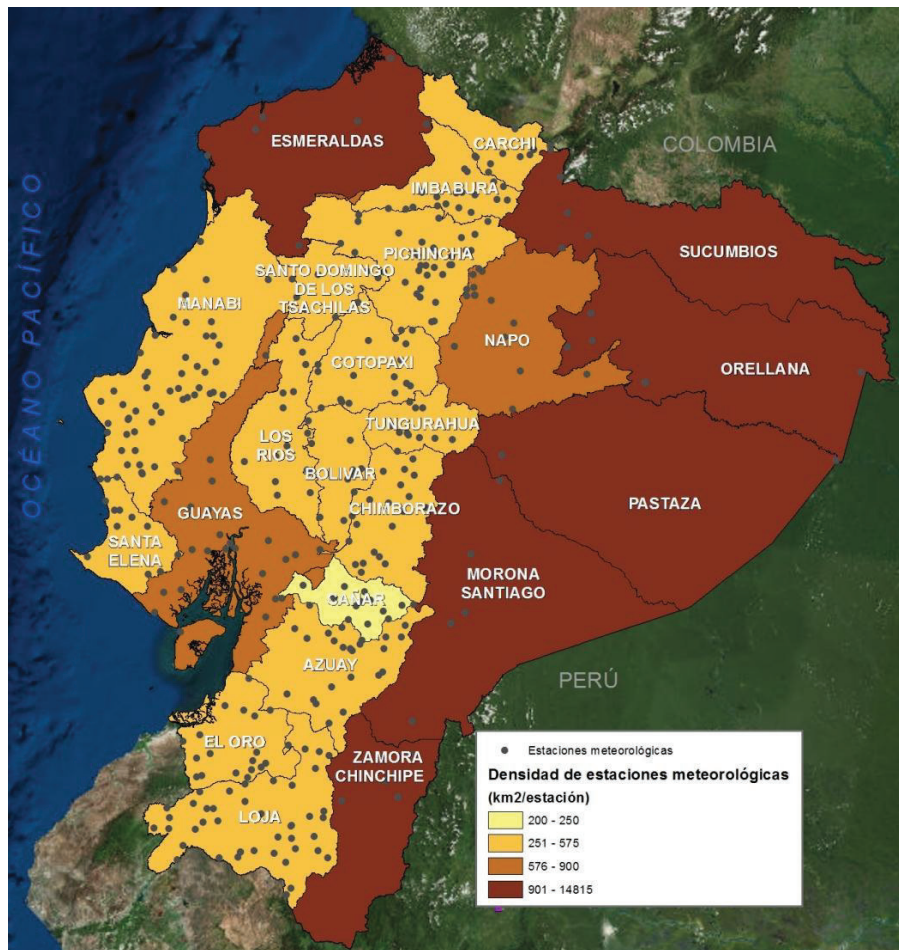


Figura 1. Densidad de estaciones meteorológicas por provincia en el Ecuador Continental.
 Fuente: INAMHI, IGM y Bing.
 Elaboración: Autor.

Se puede evidenciar que en la región Sierra, únicamente la provincia de Cañar posee el número de estaciones recomendadas por la OMM, misma particularidad que ocurre en las provincias de Manabí, Santa Elena, y El Oro en la región Costa donde las provincias restantes cuentan con un número de estaciones menor al recomendado. Por otro lado, se puede constatar que en la región Oriental ninguna de las provincias posee el número de estaciones meteorológicas recomendadas.

Con los permanentes avances tecnológicos y al apoyo de sistemas computacionales, se han desarrollado metodologías que permiten suministrar datos de precipitación a través de mediciones no directas empleando técnicas de percepción remota (Hong, Y. et al., 1989).

Uno de los primeros proyectos para la medición de variables climatológicas fue el Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (Adler et al., 2003), seguida por la misión TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) lanzada en noviembre de 1997 por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

En este sentido, los datos que se emplearán en el presente proyecto de investigación corresponden a las estimaciones de precipitación obtenidas a partir del producto TMPA 3B42 V7 de la misión TRMM. Los datos son distribuidos principalmente en formato NetCDF y HDF5 por medio de portales web (<https://pmm.nasa.gov/>, <https://mirador.gsfc.nasa.gov/>) a través de los cuales se puede descargar los diferentes productos generados, con una resolución espacial de 0,25 x 0,25 grados (aprox. 25 x 25 kilómetros) y una resolución temporal de 3 horas. Las principales ventajas del producto de la misión TRMM son las de proporcionar información en lugares donde no existen observaciones en campo complementando la existente, ofrecen cobertura casi global distribuida y continua en comparación con mediciones puntuales; como desventaja se debe mencionar que muestran sesgos altos y baja correlación al compararlos con datos de precipitación observada (Derin et al., 2016; Ward et al., 2011).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad de contar con datos de precipitación para el estudio de los recursos hídricos, se han implementado varias soluciones para la recolección y estimación de datos, entre las que se encuentra la percepción remota. Por medio de esta técnica, actualmente se puede obtener información sin necesidad de instalar equipos físicos in situ, por lo que no se tiene inconvenientes relacionados con la accesibilidad a los sitios de observación. Del mismo modo, las técnicas de captura de datos a través de la percepción remota abarcan grandes extensiones de territorio. Tienen una gran resolución temporal, lo que significa que constantemente se realiza la captura de información y permite tener registros históricos. Es importante destacar que para el procesamiento de variables climáticas en contraposición, una de las limitaciones del producto de precipitación TMPA 3B42 V7 está relacionada con el tamaño del píxel que abarca un área de 25 x 25 km. Además, este producto tiende a subestimar la precipitación, tal como lo señala Arias-Hidalgo, et al., (2013) que además, no detecta lluvia ligera menor a 0.5 mm/h (Cabrera, 2016).

La presente investigación, se enfocará en analizar métodos de corrección de datos de precipitación satelital planteados por Arias-Hidalgo, et al., (2013) y Nerini et al., (2015), para determinar la mejor alternativa para corregir la información de precipitación satelital del producto TMPA 3B42 V7. Los datos corregidos serán utilizados como información de entrada en el modelo hidrológico desarrollado por Tamayo (2017) en el marco del proyecto de investigación “Evaluación de los Caudales Líquidos y de Producción de Sedimentos Estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su Relación con los Caudales Líquidos y Sólidos Observados”.

Los resultados de esta investigación, permitirán a los usuarios de la información meteorológica, adquirir una fuente más de datos, que posee aproximadamente 17 años de observaciones de estimación de precipitación con intervalos de medición cada 3 horas. Esto ayudará a enriquecer las investigaciones relacionadas con los

recursos hídricos, sobre todo en zonas donde la información de precipitación es escasa o nula como en la región Amazónica del Ecuador.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el aporte de la precipitación corregida del producto TMPA 3B42 V7 de la misión TRMM, y validar los datos corregidos en la modelización hidrológica de la cuenca del Río Coca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Crear una base de datos de precipitación satelital y convencional para la cuenca del río Coca.
- Evaluar los datos de la estimación de la precipitación realizada con el algoritmo 3B42 V7 del producto TMPA a nivel diario.
- Realizar procesos de corrección de los datos de la estimación de la precipitación obtenidos con el algoritmo 3B42 V7 del producto con base a datos observados a nivel diario.
- Analizar el potencial uso del producto TMPA corregido como datos de entrada en la modelización de la cuenca hidrológica del Río Coca, utilizando el modelo SWAT.

1.4. ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN

Con el propósito de evaluar los diferentes productos de precipitación satelital, se han llevado a cabo varias investigaciones, entre las que se destaca la llevada a cabo por Liu et al.,(2015) donde se analizaron los productos del satélite TMPA, CMORPH y PERSIANN utilizando para su evaluación la información de precipitación de 52 estaciones. Como resultado del estudio los autores determinan que a escala mensual y anual el producto del satélite TRMM tuvo los mejores desempeños con el más alto valor de R^2 .

Ochoa et al., (2014) realizó una evaluación de los productos TMPA 3B42 versión 6 y versión 7 sobre 21 subcuencas localizadas en la región del pacífico y andes del Ecuador y Perú, como resultado del estudio los autores determinaron que la versión 7 del algoritmo utilizado para estimar la precipitación detecta mejor la precipitación ligera.

Zulkafli et al., (2015) comparó los valores de la estimación de la precipitación generados con la versión 6 y versión 7 del producto TMPA, esta evaluación se llevó a cabo en las cuencas de los ríos de los andes y amazónicos del norte de Perú, comparando los valores de la estimación de precipitación con los valores de

precipitación observada en 263 puntos. Como resultado del estudio los autores determinaron que la versión 7 del producto tiene un significativo menor sesgo y una mejor representación de la distribución de la precipitación.

Lo descrito en los párrafos anteriores fue tomado en consideración para seleccionar la versión del producto a ser utilizada en la presente investigación, debido a las ventajas que señalan las investigaciones llevadas a cabo en torno a las versiones del producto.

Entre los estudios realizados para la evaluación de métodos de corrección de productos satelitales, se encuentra la investigación realizada por Arias-Hidalgo, et al., (2013) quien indica que el producto TMPA 3B42 V6 tiende a subestimar los valores de precipitación, en este sentido el autor analiza la aplicabilidad de métodos de corrección utilizando valores de precipitación observada, obteniendo mejores resultados que al emplear solamente valores observados. Este análisis se realizó en la cuenca del río Vices. Otro estudio relacionado fue realizado en los Andes Peruanos por Nerini et al., (2015) quien menciona que existe más consistencia en los resultados cuando se realizan métodos de corrección a los datos del producto satelital.

Con relación a la modelación hidrológica en el Ecuador, se han realizado varios estudios en los años 2008, 2010 y 2015 desarrollados por Crespo et al., (2008), Vázquez, (2010), Duque y Vázquez (2015) con el propósito de determinar caudales. Además, se han realizado investigaciones con el propósito de analizar los resultados producidos por modelo hidrológico SWAT, como el desarrollado por Castillo y Ortega (2009) quienes compararon los valores de caudales observados con los valores de los caudales calculados, determinando resultados satisfactorios, por otro lado Oñate-Valdivieso y Sendra, (2014) emplearon el modelo hidrológico SWAT en la cuenca binacional Catamayo Chira ubicada en la parte sur del Ecuador, obteniendo resultados satisfactorios al comparar los caudales simulados con los caudales observados. Del mismo modo Espinosa y Rivera, (2016) emplearon el modelo SWAT en la cuenca del río El Ángel para analizar la variación en los recursos hídricos por el cambio de uso del suelo.

Por otra parte, existe documentación relacionada con la evaluación de productos de precipitación generados por medio de precipitación remota, como por ejemplo el estudio realizado por Bitew et al., (2012) donde se analizan varios productos de precipitación captada a través de sensores remotos, utilizando para ello los datos en el modelo hidrológico SWAT determinando la importancia de la calibración del modelo para la obtención de caudales. De igual manera, Lujano et al., (2015) llevó a cabo su investigación para validar la precipitación del producto TMPA y su aplicación en la modelación hidrológica, empleando datos a nivel mensual, determinando que el producto de precipitación puede ser utilizado como alternativa en zonas donde existe escasez de datos. Además Le, Al-Juaidi y Sharif, (2014) realizaron la simulación de caudal con el modelo hidrológico SWAT utilizando como datos de entrada de precipitación los valores generados por el producto TMPA 3B42 V6.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PERCEPCIÓN REMOTA

Jensen (2005) en su libro *Introductory Digital Image Processing*, cita a Cowell (1997), quien define a la percepción remota como:

“El arte, la ciencia y tecnología de obtener información fidedigna acerca de objetos físicos y el medio ambiente por medio del proceso de grabar, medir e interpretar imágenes y representaciones digitales de los patrones de energía derivados de los sistemas sensores sin contacto”.

La información provista por la percepción remota, sirve de apoyo a diversas ramas de la investigación, como es el caso del presente estudio relacionado con las ciencias medioambientales, específicamente con los recursos hídricos. En la Figura 2 se muestran los elementos que involucran la percepción remota:

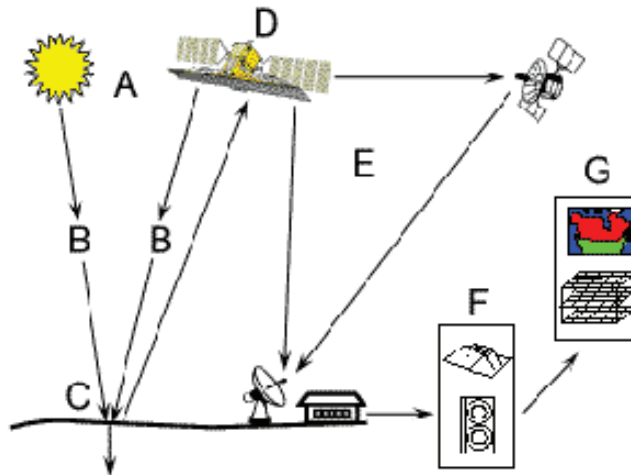


Figura 2. Elementos involucrados en la técnica de percepción remota.

Fuente: Natural Resources Canada, http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/index_e.php#tutor.

- Dónde:
- A:** fuente de energía o iluminación.
 - B:** radiación y atmósfera.
 - C:** interacción con el objetivo.
 - D:** grabación de la energía por el sensor remoto.
 - E:** transmisión, recepción y procesamiento.
 - F:** interpretación y análisis.
 - G:** aplicación.

De acuerdo al tipo de plataforma donde se encuentra instalado el sensor se clasifican en: terrestres, aéreas y espaciales.

De igual manera, los sensores remotos pueden clasificarse de acuerdo a su tipo de órbita, sensor y resolución.

2.1.1. Tipos de órbita

Las plataformas de tipo espacial se refieren a las instaladas en los satélites, los que de acuerdo a su órbita se dividen en geoestacionarias, polares y no polares (Mehta, 2015).

2.1.1.1. Órbita geoestacionaria

La órbita geoestacionaria es la que se encuentra circunvalando la línea ecuatorial. Tiene un periodo orbital igual que el periodo de rotación de nuestro planeta, por lo que un satélite que se encuentre en esta órbita observa siempre el mismo punto (Chuvieco, 1995). En la Figura 3, se muestra un ejemplo de una imagen capturada por el sensor de un satélite con órbita geoestacionaria.



Figura 3. Ejemplificación de una imagen captada por un satélite con órbita geoestacionaria.

Fuente: ARSET,

http://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/imagenes2/Remote_Sensing/span_S1P1.pdf

2.1.1.2. Órbita polar

El plano de la órbita polar es paralelo al eje de rotación de la tierra, por lo que en cada pasada del satélite, se capta información de una franja del planeta Tierra. De esta manera, en un determinado número de pasadas del satélite, se obtiene información de toda la superficie del planeta (Mehta, 2015). La Figura 4 muestra un ejemplo de una órbita polar.



Figura 4. Representación de una órbita polar.

Fuente: ARSET, <http://arset.gsfc.nasa.gov/eco/webinars/land-management>.

2.1.1.3. Órbita no polar

La NASA a través del curso impartido por Mehta, (2015), la describe como una órbita que tiene una determinada inclinación que puede variar entre los 0 y 90 grados. La cobertura no es global ya que las órbitas están determinadas para capturar datos de una región de interés y la frecuencia de mediciones es de menos de 1 por día. En la Figura 5 se indican ejemplos de órbitas no polares.

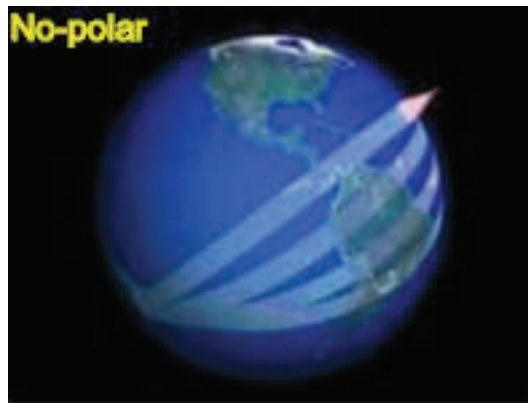


Figura 5. Representación de órbitas no polares.

Fuente: ARSET, <http://arset.gsfc.nasa.gov/eco/webinars/land-management>.

2.1.2. Tipos de sensores

2.1.2.1. Sensores activos

La principal característica de los sensores activos es que son capaces de emitir una determinada radiación hacia el objeto a ser investigado, esta radiación es reflejada por el objeto y es medida por el sensor. Un ejemplo de este tipo de sensores son los radares o los sonares (Chuvieco, 1995).

2.1.2.2. Sensores pasivos

Se refiere a sensores que no emiten ningún tipo de radiación por lo que utilizan la energía que está naturalmente disponible como la luz del sol (Chuvieco, 1995).

2.1.3. Tipos de Resolución

Uno de los principales parámetros de los productos generados a partir de la percepción remota es la resolución. Este, define el nivel de detalle con el que se pueden capturar las imágenes. Chuvieco (1995) propone la siguiente clasificación de acuerdo al tipo de resolución considerada en el uso de la percepción remota:

- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Resolución radiométrica.
- Resolución temporal.

2.1.3.1. Resolución espacial

Se refiere a la mínima distancia que puede captar un sensor. Para ello, mientras menor es la distancia que puede captar el sensor, mayor será su resolución espacial (Natural Resources Canada, 1999). En la Figura 6 se muestra, diferentes resoluciones espaciales de una determinada zona.

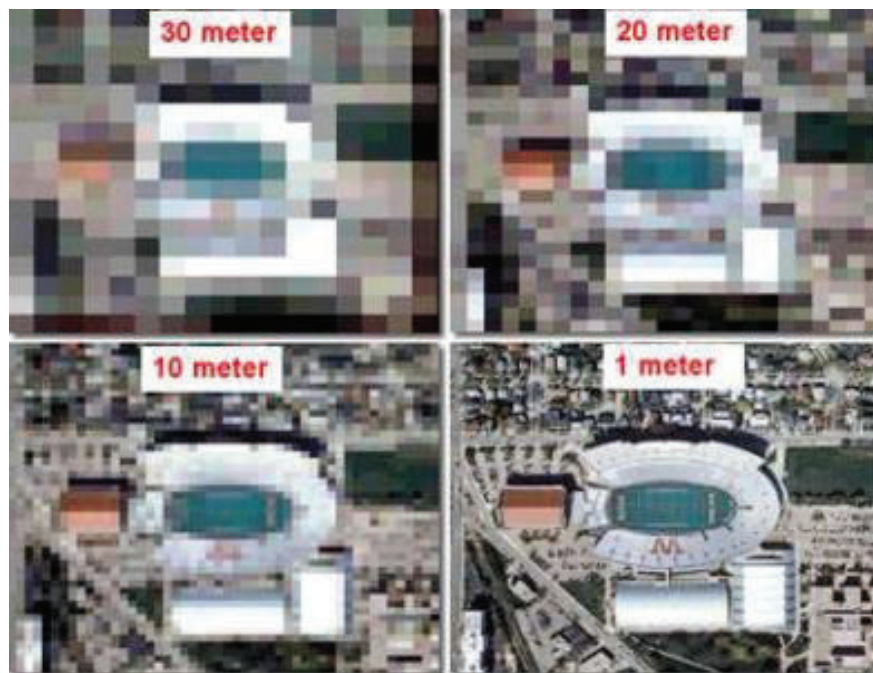


Figura 6. Diferentes resoluciones espaciales para una determinada zona.

Fuente: Natural Resources Canada, http://www.ccrs.nrcan.gc.cs/resource/index_e.php#tutor.

2.1.3.2. Resolución espectral

Está relacionada con la capacidad de los sensores para captar información en determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético. Toma en cuenta un cierto número y ancho de las bandas; mientras más pequeña sea la longitud del espectro electromagnético, mayor será su resolución espectral por lo que bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio (Chuvieco, 1995). La Figura 7 muestra la composición del espectro electromagnético.

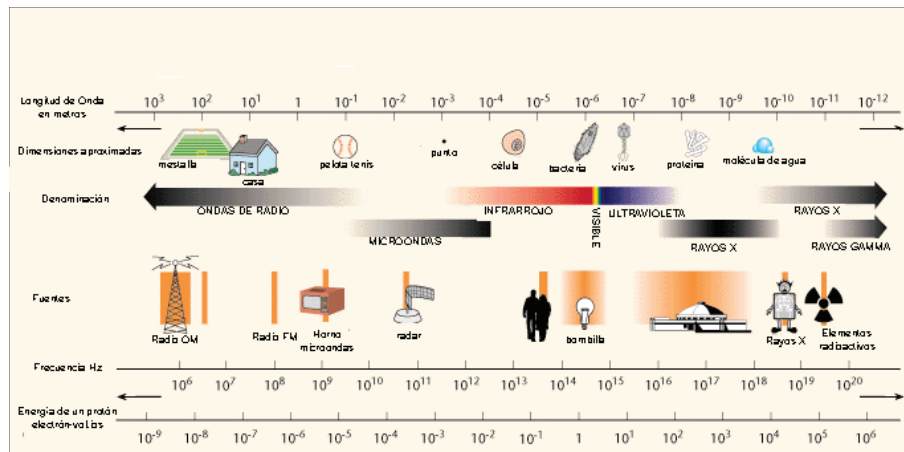


Figura 7. Espectro electromagnético

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia,
http://www.upv.es/antenas/Tema_1/espectro_electromagnetico.htm.

2.1.3.3. Resolución radiométrica

Representa la capacidad de un sensor para registrar las variaciones en la radiación que capta. El número total de valores se representan a través de una función definida por x^n , donde x corresponde al número de valores que cada dígito puede captar y n es el número de dígitos usados (bits) (Natural Resources Canada, 1999). En la Figura 8 se muestran imágenes con diferentes resoluciones radiométricas.

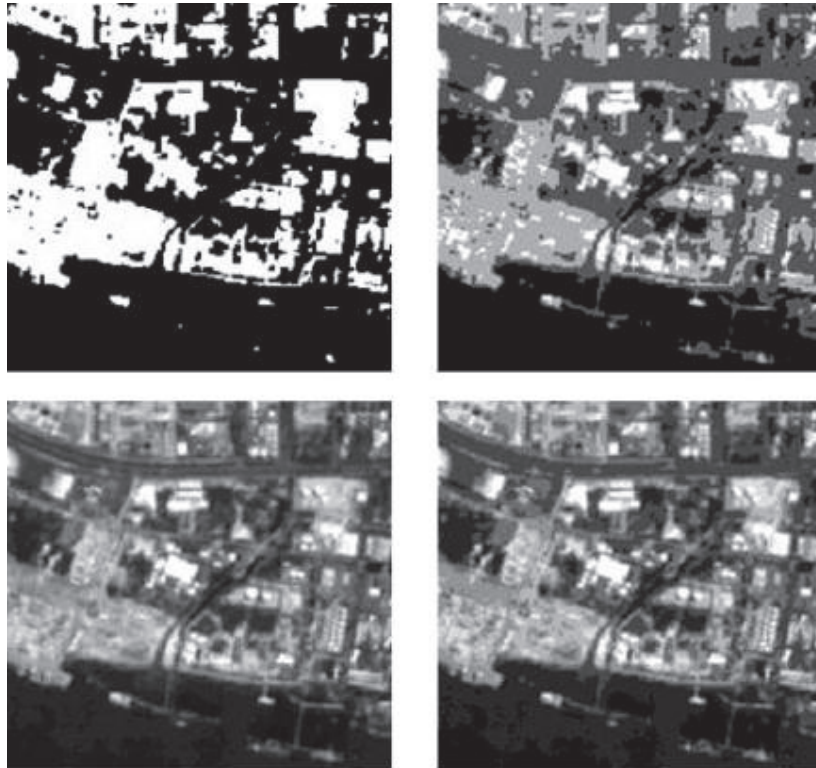


Figura 8. Arriba izquierda, imagen de resolución radiométrica de 2 bits; arriba derecha, imagen de resolución radiométrica de 4 bits, abajo izquierda, imagen de resolución radiométrica de 8 bits, abajo derecha, imagen de resolución radiométrica de 16 bits.

Fuente: ARSET, <http://rst.gsfc.nasa.gov>.

2.1.3.4. Resolución temporal

Se define como la frecuencia con la que se captan las imágenes de un mismo sitio (Chuvieco, 1995). Generalmente una alta resolución espacial se traduce en una baja resolución temporal y una baja resolución espectral debido a que a un aumento en la resolución incrementa el volumen de datos que debe capturar y transmitir el sensor.

Altas resoluciones temporales son importantes en el monitoreo de eventos que cambian en periodos relativamente cortos como inundaciones, incendios, calidad del agua, desarrollo de cosechas, entre otros.

2.1.4. Almacenamiento de información

La información captada por sensores remotos es almacenada como matrices o en formato raster de manera distribuida espacialmente. Según lo mencionado por Bosque (1997) tiene como principal función realizar una representación discreta del mundo real, a través de una matriz de celdas generalmente regulares denominadas píxeles. Cada uno de los píxeles determina una variable del mundo real como por ejemplo usos del suelo, precipitación, elevación, pendientes, entre otras. En la Figura 9 se muestra gráficamente un ejemplo de cómo se almacena la información en formato raster.

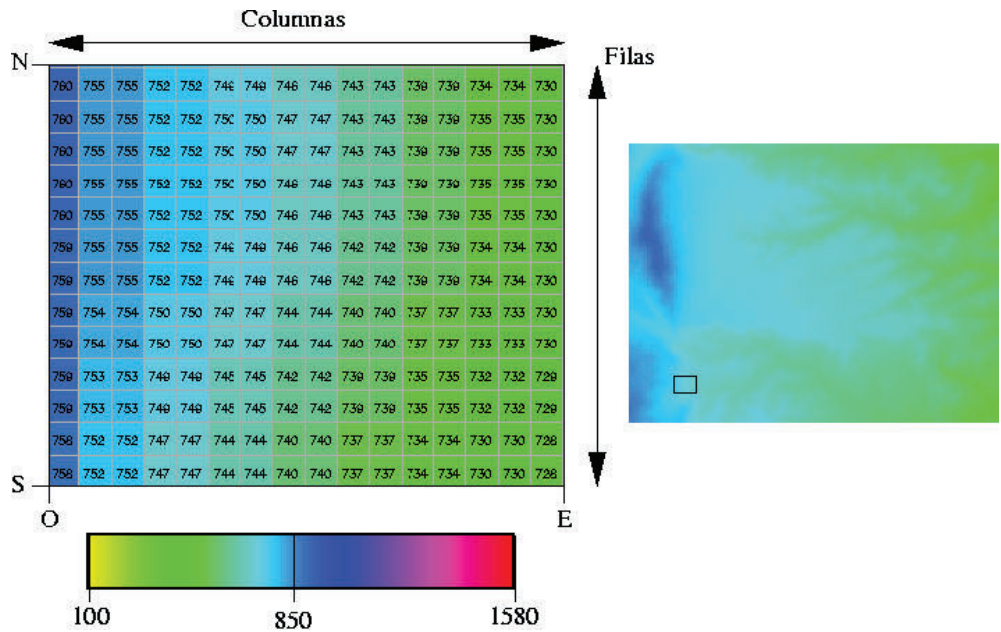


Figura 9. Representación de una variable espacial en formato raster.

Fuente: Universidad de Murcia, http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/raster_digital_1.png.

2.2. METEOROLOGÍA

La OMM define a la meteorología como la ciencia física encargada del estudio de la física, química y la dinámica de la atmósfera. Además, estudia muchos efectos directos de la atmósfera en la superficie terrestre, los océanos y la vida en general.

La atmósfera es una capa gaseosa que envuelve nuestro planeta, en la que varía la densidad, la composición y la temperatura del aire; con relación a la variación térmica de la atmósfera puede dividirse en capas tal como se muestra en la Figura 10.

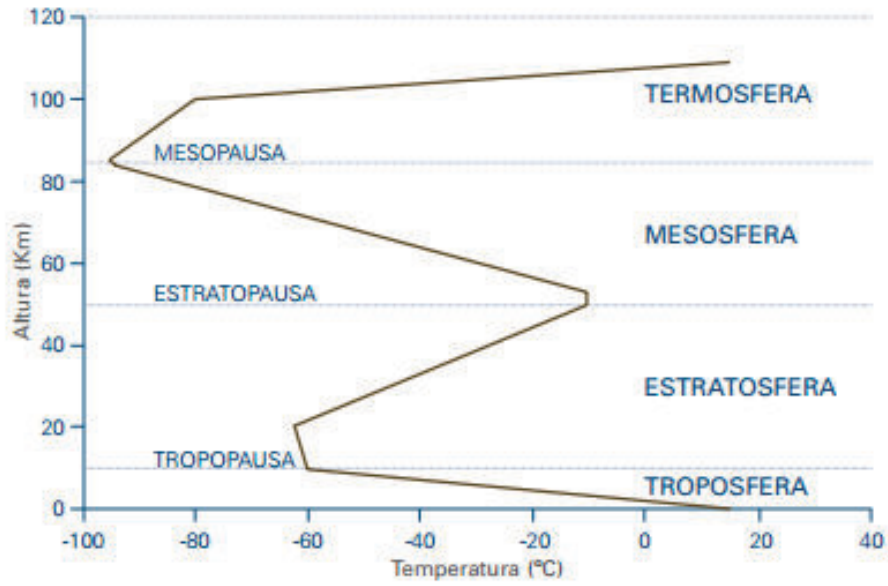


Figura 10. Composición de la atmósfera en función de la altura y la temperatura.
 Fuente: (Rodríguez, Capa, & Portela, 2004, p.9)

En la Figura 11 se puede apreciar que en la tropósfera se desarrolla la vida, así como la mayoría de los fenómenos meteorológicos, del mismo modo se observa que la energía emitida por el sol, atraviesa las diferentes capas de las que está constituida la atmósfera.

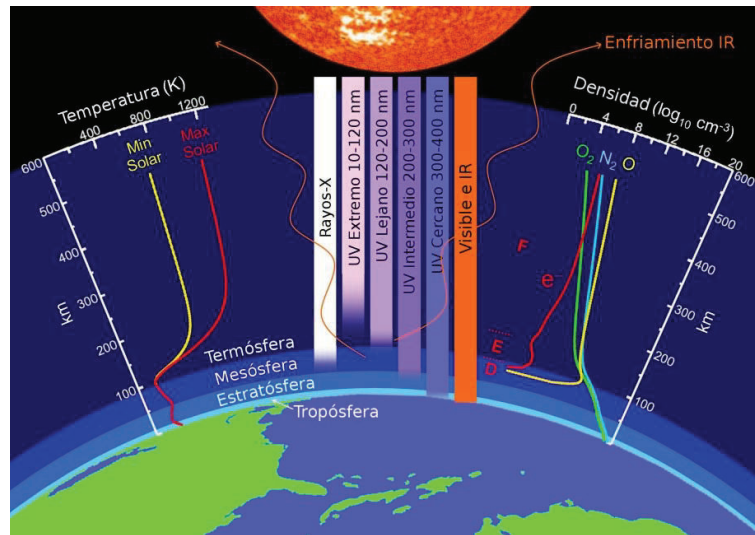


Figura 11. Incidencia de la energía emitida por el sol hacia la atmósfera.
 Fuente: (Emmert, 2010)

Se logra evidenciar que a la tropósfera ingresa radiación del rango del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo ($1000 \mu m$ a $750 \eta m$), espectro visible ($750 \eta m$ a $400 \eta m$) y al ultravioleta cercano ($400 \eta m$ a $300 \eta m$).

A la estratósfera llegan ondas correspondientes al ultravioleta intermedio (300 ηm a 200 ηm), hasta la mesosfera ingresan longitudes de onda que se encuentran en el espectro electromagnético del ultravioleta lejano (200 ηm a 120 ηm) de los rayos X, el ultravioleta extremo (120 ηm a 10 ηm) llega hasta la termósfera.

2.2.1. Variables meteorológicas

2.2.1.1. Temperatura

La OMM define a la temperatura como la condición que determina la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) mide esta variable en grados Celsius y décimas de grado.

2.2.1.2. Presión atmosférica

Se refiere a la presión sobre cualquier área de la atmósfera terrestre causada por el peso del aire de acuerdo a una síntesis realizada de lo mencionado por Rodríguez et al.,(2004). Comúnmente se mide la presión en atmósferas, milímetros de mercurio, pascales, hectopascales, milibares, entre otros. En el sistema internacional (SI), la unidad de medida es el Pascal.

2.2.1.3. Viento

Es el movimiento horizontal del aire causado por diferencia de temperatura o de presión entre dos puntos. El INAMHI toma las direcciones de donde proviene o procede el viento y las velocidades las mide en metros por segundo.

2.2.1.4. Humedad

El INAMHI define a la humedad como la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, esta institución registra tres parámetros relacionados con el contenido de vapor de agua en el aire.

- Tensión de vapor.
- Humedad relativa.
- Temperatura del punto de rocío.

2.2.1.5. Precipitación atmosférica

El INAMHI describe la precipitación atmosférica como un hidrometeoro que consiste en la caída de lluvia, llovizna, nieve, granizo, hielo granulado, etc., desde las nubes a la superficie de la tierra. Mide este parámetro en alturas de precipitación en mm, donde un mm de precipitación equivale a la altura obtenida por la caída de un litro de agua sobre la superficie de un metro cuadrado.

2.2.2. Observaciones meteorológicas

Las observaciones meteorológicas se realizan por medio de lecturas en superficie a través de instrumentos esenciales como termómetros, barómetros, pluviógrafos, pluviómetros y por medio de percepción remota realizada con el uso de sensores instalados en satélites meteorológicos. En la Figura 12, se indica una representación de los diferentes instrumentos empleados para generar datos meteorológicos.

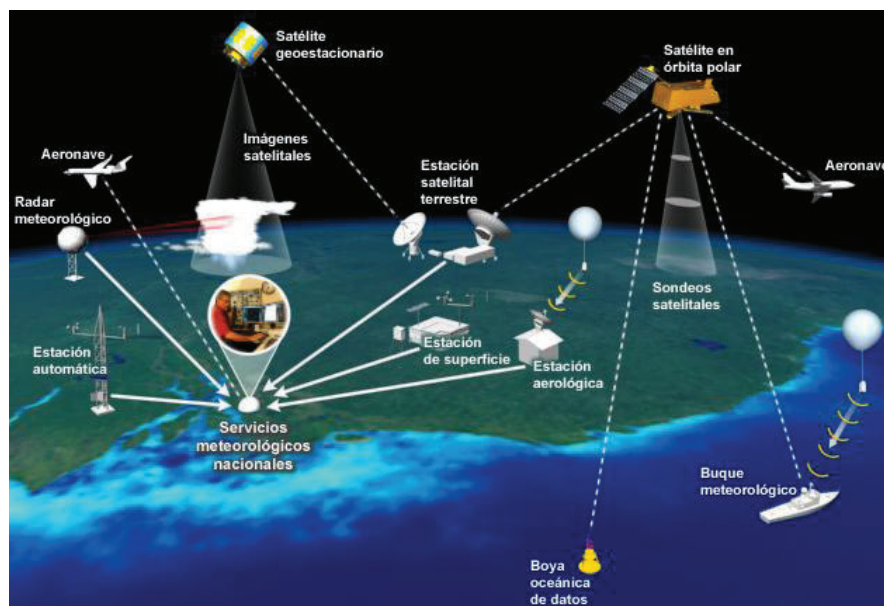


Figura 12. Diagrama conceptual de los componentes del Sistema Mundial de Observación.

Fuente: Organización Meteorológica Mundial.

2.2.2.1. Observaciones en superficie

El organismo responsable de realizar las mediciones de datos meteorológicos e hidrológicos en el Ecuador es el INAMHI. Para realizar esta labor ha implementado una red de estaciones meteorológicas que al año 2014 se encontraba constituida por 379 estaciones distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 1: Distribución de la red de estaciones meteorológicas del INAMHI.

| TIPO DE ESTACIÓN | REGIÓN | | | | |
|-------------------------|--------|---------|---------|--------|--------------------|
| | COSTA | INSULAR | ORIENTE | SIERRA | ZONA NO DELIMITADA |
| AGROMETEOROLÓGICA | 3 | | 2 | 4 | |
| AUTOMÁTICAS | 1 | | 10 | 14 | |
| CLIMATOLÓGICA ORDINARIA | 29 | 1 | 6 | 48 | |
| CLIMATOLÓGICA PRINCIPAL | 17 | 1 | 3 | 27 | |
| PLUVIOGRÁFICA | | | 1 | 3 | 1 |
| PLUVIOMÉTRICA | 71 | 1 | 14 | 120 | |
| RADIO SONDA | | 1 | | 1 | |

| TIPO DE ESTACIÓN | REGIÓN | | | | |
|------------------|------------|---------|---------|--------|--------------------|
| | COSTA | INSULAR | ORIENTE | SIERRA | ZONA NO DELIMITADA |
| Subtotal | 121 | 4 | 36 | 217 | 1 |
| Porcentaje | 31.93% | 1.06% | 9.50% | 57.26% | 0.26% |
| Total | 379 | | | | |

Fuente: INAMHI, 2014

La Red Nacional de estaciones al año 2014, contaba con 75 estaciones automáticas distribuidas de la siguiente forma: 15 climatológicas ordinarias, 13 climatológicas principales, 14 pluviométricas, 8 agrometeorológicas y 25 meteorológicas. La ubicación espacial de las estaciones mencionadas anteriormente se detalla en la Figura 13.

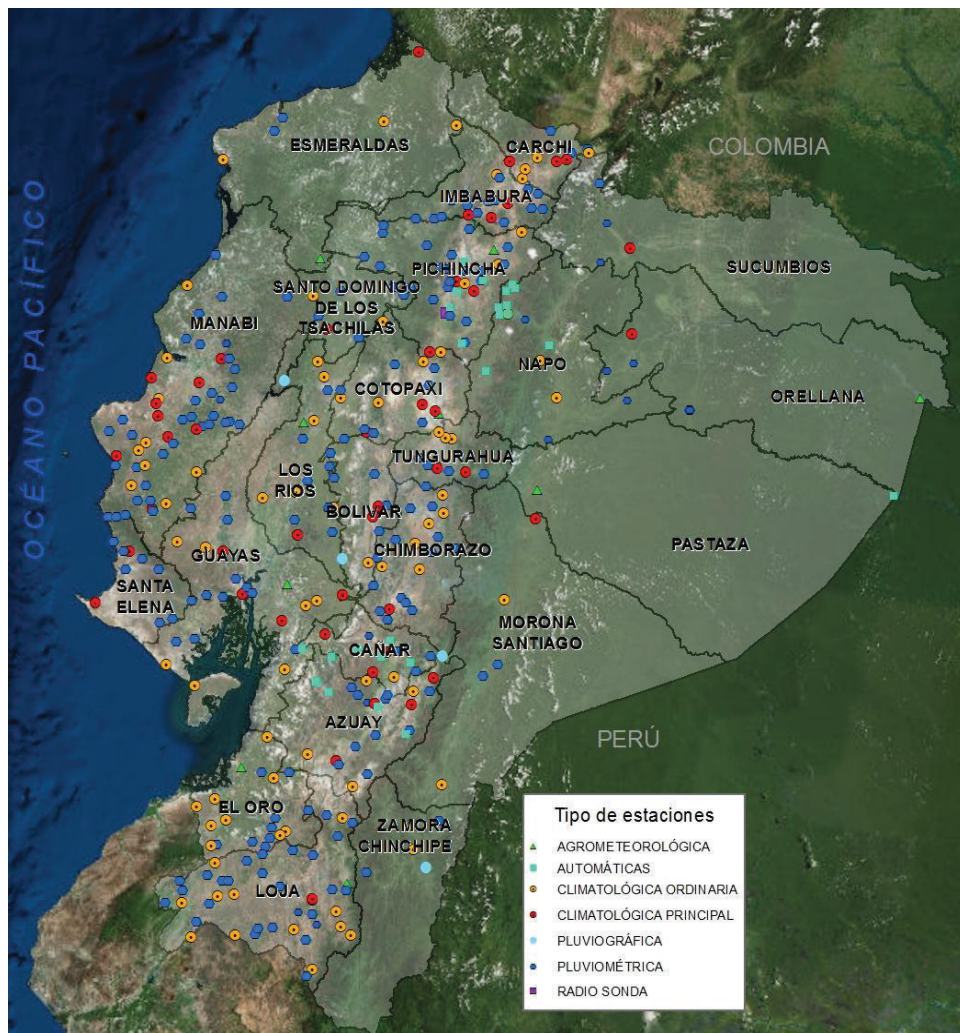


Figura 13. Localización de estaciones meteorológicas en el Ecuador continental.

Fuente: INAMHI 2014, Bing.

Elaboración: Autor.

El INAMHI registra los valores diarios de precipitación como la suma de las observaciones de las 13 y 19 horas del día en cuestión, más las de las 07 horas del día consecutivo. En el siguiente esquema se indica gráficamente lo mencionado.

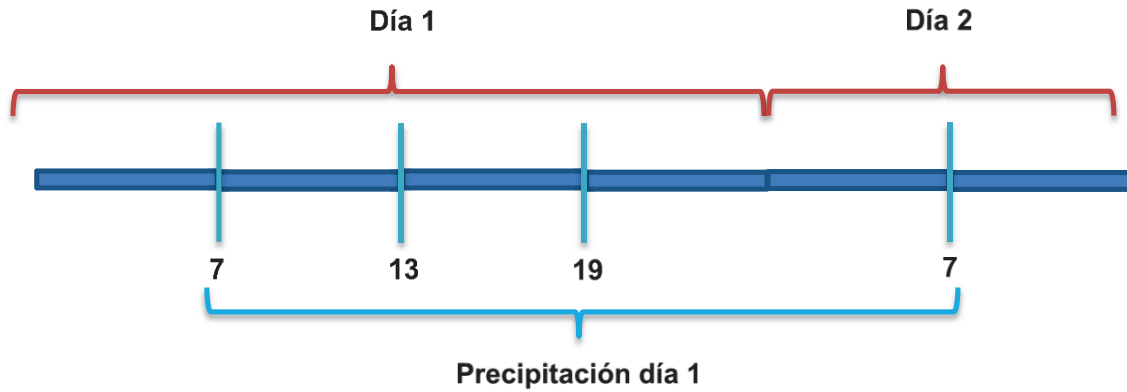


Figura 14. Acumulación de precipitación para la recolección de datos por parte del INAMHI

Fuente: INAMHI
Elaboración: Autor.

En la Figura 15 se muestra un ejemplo de estación meteorológica operada por el INAMHI.



Figura 15. Estación meteorológica administrada por el INAMHI ubicada en Portoviejo.
Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología publicado en el medio informativo La Hora.

2.2.3. Precipitación en el Ecuador

La posición geográfica del Ecuador, su topografía así como las corrientes marinas contribuyen para que exista una diversidad climatológica entre las diferentes regiones. De este modo, se distingue una diferencia en la región costa influenciada por las corrientes del Niño y de Humboldt, así como en la región sierra y amazónica lo hace la cordillera de los Andes (Vintimilla, 2014) debido a los fuertes gradientes topográficos y a los vientos alisios orientales a lo largo de los Andes orientales (Espinoza et al., 2015).

Barros et al., (2010) mencionan que el Ecuador se encuentra localizado en la Zona de Convergencia Intertropical por lo que existe una baja variación de la temperatura mensual, lo que se traduce en una distribución estacional e interanual de la precipitación que de acuerdo a lo indicado por Pourrut et al., (1995) para cada región existe una determinada tendencia estacional ya que en la costa existe una marcada época lluviosa entre diciembre y abril. En la región andina existen dos épocas lluviosas la primera entre los meses de febrero a mayo y la segunda en los meses de octubre y noviembre. En la región insular el autor manifiesta que por la falta de información no se permite concluir definitivamente un régimen pluviométrico, sin embargo se pueden diferenciar dos zonas; una litoral baja y otra alta. En la primera se observan dos estaciones relativamente regadas, una en el mes de febrero y la otra entre los meses de junio a septiembre. En la zona alta se muestra mayor pluviometría cuya época más húmeda se encuentra entre los meses de noviembre y febrero.

Con relación a la variabilidad espacial de la precipitación de acuerdo al mapa de isoyetas media anual/serie 1981 - 2010 publicado por el INAMHI, se puede evidenciar que la zona de menor precipitación se encuentra en las provincias de Santa Elena y de Manabí, alcanzando una precipitación media anual de 240 mm. Mientras que la zona de mayor precipitación, se encuentra en la región amazónica donde se puede alcanzar una precipitación media anual de 4800 mm. En la Figura 16, se muestra un mapa de isoyetas con información media anual desde 1981 hasta 2010.

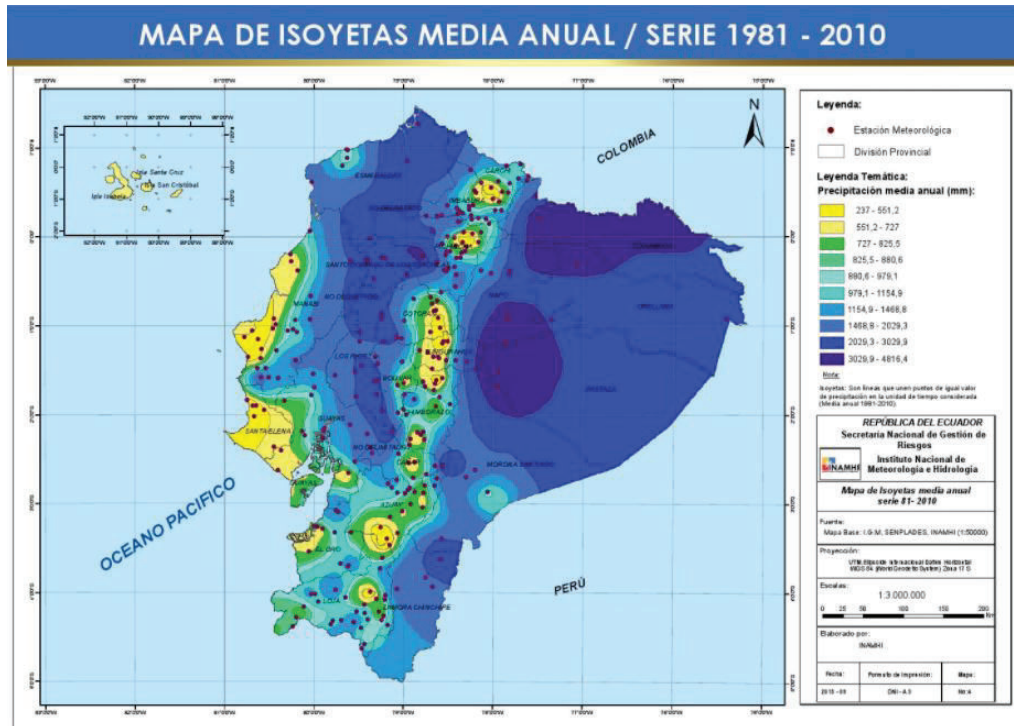


Figura 16. Mapa de isoyetas media anual / serie 1981 - 2010.
 Fuente: Atlas Hidrológico y meteorológico estudiantil 2013 INAMHI.

Particularizando la variabilidad espacial de la cuenca del Río Coca, Horna (2016) realizó el análisis de la distribución espacial de la precipitación utilizando la serie de datos interanuales de 32 estaciones, con esta información se interpolaron los valores con el método IDW obteniendo el mapa de isoyetas que se muestra en la Figura 17, donde se puede apreciar la distribución espacial de la precipitación para la cuenca del Río Coca.

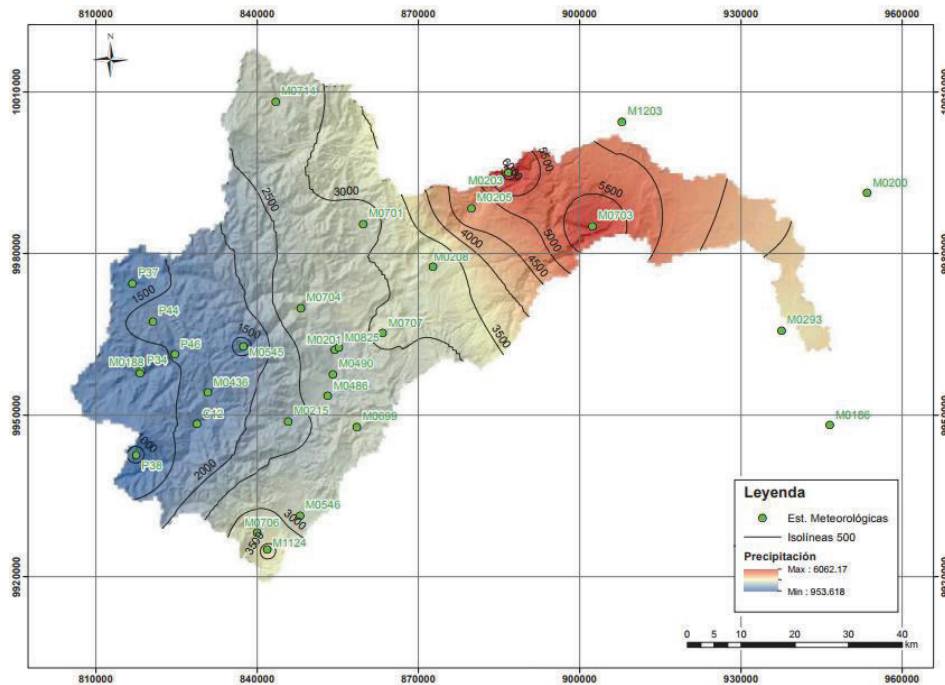


Figura 17. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del Río Coca.
Fuente: (Horna, 2016)

De lo anterior se puede indicar que en la cuenca del Río Coca la precipitación interanual oscila entre los 953 y 6000 mm, los valores más altos se encuentran próximas al sitio El Reventador y los más bajos, cercanos a Papallacta.

Con relación a la variabilidad media mensual, Horna (2016) realizó el análisis tomando en consideración los valores mensuales de precipitación en 14 estaciones meteorológicas, como se muestra en la Figura 18, donde se puede evidenciar que las estaciones que se encuentran en la zona más elevada presentan una época húmeda definida entre los meses de abril a julio como es el caso de la estación Papallacta (M0188). Mientras que en las zonas más bajas, se presentan dos épocas húmedas, la primera entre los meses de abril a junio y la segunda entre los meses de octubre y noviembre tal como se indica en la estación Palmoriente – Huashito (M0293).

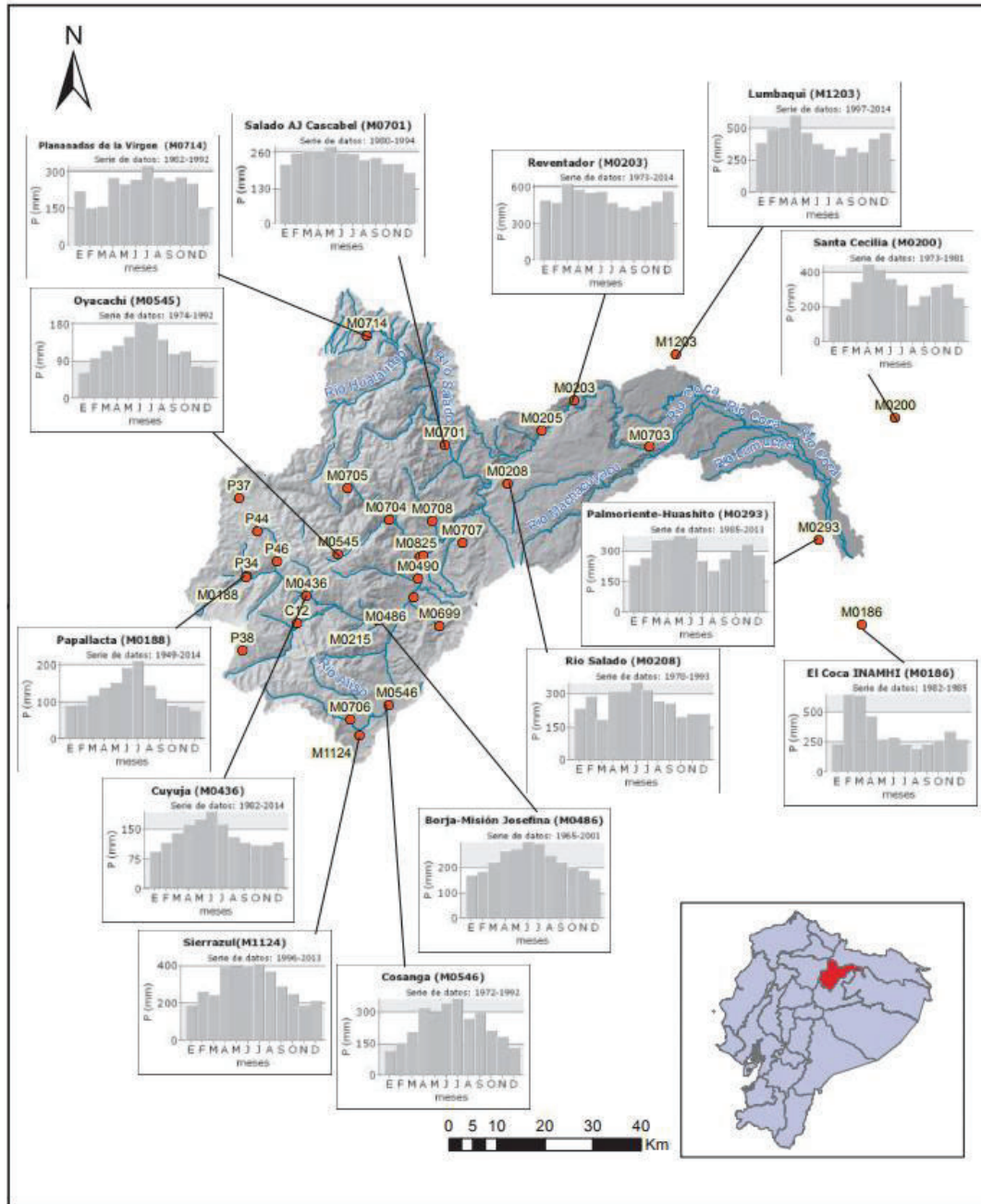


Figura 18. Variabilidad de las precipitaciones medias mensuales en la cuenca del río Coca. Fuente: (Horna, 2016)

2.2.3.1. Satélites meteorológicos

Son una herramienta de observación complementaria, especialmente cuando las observaciones in situ son escasas o inexistentes, debido a que proveen datos permanentes de información meteorológica en amplias extensiones de territorio además, proporcionan datos actualizados, permanentemente de las condiciones meteorológicas de grandes áreas geográficas (Tan, 2014).

A continuación se detallan ejemplos de satélites meteorológicos geostacionarios:

- GOES E (Este) y GOES W (Oeste) administrado por los Estados Unidos.
- GMS lanzado por Japón.
- GOMS puesto en órbita por Rusia.
- INSAT de propiedad de la India.
- METEOSAT creado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

A continuación se detallan ejemplos de satélites meteorológicos de órbita polar:

- TIROS.
- NOAA.
- METEOR.



Figura 19. Ejemplos de satélites meteorológicos

Fuente: The COMET Program / NASA

<https://www.meted.ucar.edu/>

Las nubes reflejan radiación solar visible y emiten radiación infrarroja, específicamente para la medición de precipitación, se usan microondas a 37 GHz emitida por gotas de lluvia y a 85 GHz partículas de hielo dispersadas hacia el espacio (Salmerón, 2008).

2.2.3.2. Satélite TRMM

Existen satélites que se denominan de órbita no polar como es el caso del TRMM que está posicionado a 350 km por encima de la superficie terrestre y su órbita forma un ángulo de 35° con relación a la línea del ecuador para mejorar la frecuencia de muestreo de la lluvia tropical (Caicedo, 2008).

Los satélites meteorológicos incorporan varios sensores que permiten identificar diferentes fenómenos que se producen en la atmósfera. Específicamente, el satélite TRMM incorpora 5 sensores: radar de precipitación (PR), sensor microonda (TMI), escáner infrarrojo visible (VIRS), sistema de energía radiante y nubes (CERES), sensor de imágenes relámpago (LIS).

A continuación se describen las características principales de los sensores de acuerdo a lo publicado por la NASA a través de la siguiente dirección: <https://pmm.nasa.gov/trmm/lis>.

Radar de precipitación (PR)

Proporciona información sobre la intensidad, distribución y tipo de lluvia, la profundidad de la tormenta y la altura en la que la nieve se derrite en la lluvia. Tiene una resolución horizontal de aproximadamente 5 kilómetros y un ancho de franja de 247 kilómetros. Una de sus características principales es su capacidad para proporcionar perfiles verticales de la lluvia y la nieve desde la superficie hasta una altura de aproximadamente 20 kilómetros. El radar de precipitación puede detectar tasas de lluvia bastante ligeras hasta aproximadamente 0.7 milímetros por hora y opera a 13.8 GHz.

Sensor microonda (TMI)

Es un sensor pasivo de microondas diseñado para proporcionar información de precipitación cuantitativa y cuantificar el vapor de agua, el agua de la nube y la intensidad de la lluvia en la atmósfera. Realiza mediciones de 10 a 85 GHz, de 37 a 4.6 km respectivamente.

Escáner infrarrojo visible (VIRS)

Detecta la radiación procedente de la Tierra en cinco regiones espectrales, que van desde el visible hasta el infrarrojo. La intensidad de la radiación en las diversas regiones espectrales puede ser utilizada para determinar el brillo o la temperatura de la fuente. El escáner infrarrojo es uno de los instrumentos para la medición de precipitación y sirve como un indicador indirecto. Las longitudes de onda captadas por este sensor van desde 0.62, 1.63, 3.78, 20.83 y 12,03 μm .

Sistema de energía radiante y nubes (CERES)

Instrumento utilizado para estudiar la energía que intercambia el sol, la atmósfera, las nubes de la Tierra y el espacio. Este, funcionó entre enero y marzo de 1998 y

en marzo de 2000. Capta tres canales que son: 0.3 a $>100 \mu\text{m}$, 0.3 a $5 \mu\text{m}$ y 8 a $12 \mu\text{m}$.

Sensor de imágenes relámpago (LIS).

Este instrumento detecta y localiza los rayos sobre la región tropical de la superficie de la Tierra. El campo de visión del generador de imágenes permite al sensor observar un punto en la Tierra o una nube durante 80 segundos, tiempo suficiente para estimar la tasa de parpadeo, lo que indica a los investigadores si una tormenta está creciendo o decreciendo. El sensor trabaja en una longitud de onda de $0.7774 \mu\text{m}$.

En la Figura 20 se indica la ubicación de los sensores en el satélite TRMM.

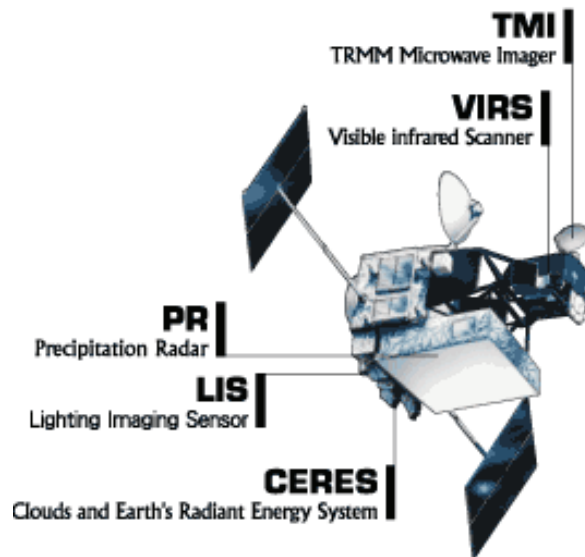


Figura 20. Sensores incorporados en el satélite TRMM.
Fuente: (NASA, n.d.)

Las mediciones captadas por los sensores son convertidas a temperaturas de brillo (microondas) y reflectividad (radar), mismas que son transformadas a intensidad de lluvia mediante algoritmos complejos ARSET NASA.

Además de los datos obtenidos por medio de los sensores incorporados en el satélite TRMM, el algoritmo Goddard Profiling Algorithm (GPROF) para la generación de estimaciones utiliza información de los satélites de órbita polar baja SSM, SSM/I, AMSR-E y AMSU-B. En un paso siguiente se utilizan los datos de precipitación de los satélites Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-E), GOES-W, Meteosat-7, Meteosat-5, GEO-IR y NOAA para de esta manera crear las estimaciones de precipitación calibradas (Puig i Polo, 2015)

Con base a los productos derivados de los sensores a bordo del satélite TRMM se tienen diferentes niveles de procesamiento, que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Niveles de procesamiento de los productos TRMM.

| NIVEL | DESCRIPCIÓN |
|--------------|--|
| 0 | Datos sin procesamiento de los instrumentos, orden de fechas, control de calidad y redundancia. |
| 1 | Proporciona datos auxiliares como la georreferenciación y las unidades físicas de la información del nivel 0. |
| 2 | Proporciona parámetros meteorológicos derivados desde los datos del nivel 1, utilizando varios algoritmos que pueden producir mapas de precipitación de 2 o 3 dimensiones. |
| 3 | Provee los resultados del mapeo de los parámetros meteorológicos obtenidos en el nivel 2 en una grilla uniforme de espacio y tiempo. |

Fuente: (Scheel et al., 2010)

A través de los datos captados por el satélite TRMM, se pueden obtener diferentes productos, como se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3: Productos generados a partir de la información captada por el satélite TRMM.

| NIVEL | NOMBRE DEL PRODUCTO | RESOLUCIÓN Y COBERTURA ESPACIAL | RESOLUCIÓN TEMPORAL |
|--------------|--|--|---|
| 2 | TMI/2A12 | 5 km x 5 km Orbital y 16 órbitas por día (38°S-38°N) | 3-horas, 2-días 15 días |
| | PR/2A25 | 5 km x 5 km Orbital y 16 órbitas por día (38°S-38°N) | 3-horas, 2-día 5 días |
| | Combinado TMI y PR /2B31 | 5 km x 5 km Orbital y (38°S-38°N) | 3-horas, 2-días 5 días |
| 3 | TMPA/3B42 RT | 0.25°x0.25° (50°S-50°N) | 3-horas(Tiempo Casi Real) Promedios diario, 10-días y 30-días |
| | TMPA/3B42 V7 (Versión Ajustada para investigación) | 0.25°x0.25° (50°S-50°N) | 3-horas, diaria |
| | TMPA/3B43 | 0.25°x0.25° (50°S-50°N) | Mensual |

Fuente: : (GODARD SPACE FLIGHT CENTER-NASA, 2015)

Uno de los principales productos generados a partir de los datos captados por el satélite TRMM es el TMPA 3B42 (Huffman et al., 2007). Este producto se obtiene en tres etapas:

- a) Las observaciones de la microonda pasiva e infrarroja de los satélites de la constelación TRMM son transformados a estimados de precipitación mediante el algoritmo GPROF2014².
- b) Los estimados de precipitación son rasterizados, calibrados en base a las mediciones de los sensores de TRMM e interpolados cada tres horas para generar el producto casi tiempo real (NRT).
- c) Finalmente las estimaciones son agregadas a nivel mensual, ajustadas el sesgo con precipitación mensual observada, creando el producto “final” el cual es el objeto de la investigación.

La descripción del producto señalado por la NASA, indica que existen ocho valores diarios generados de precipitación del producto TMPA 3B42 V7 para cada 3 horas medido en tiempo universal coordinado (UTC). Estos valores están a disposición del público en general entre 2 a 3 meses después de la colecta de información de los sensores.

2.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica ha evolucionado con el paso del tiempo desde sus inicios en el siglo XIX donde se utilizaba para el diseño de proyectos hidráulicos. En sus inicios se limitó solamente al uso de expresiones matemáticas simples para representar los procesos del ciclo hidrológico por separado. La disponibilidad de Sistemas de Información Geográfica así como la disponibilidad de información distribuida, han permitido el desarrollo de la modelación hidrológica (Jorquera & Weber, 2014). Esto, es corroborado por Hurtado J. et al., (2015) quienes destacan la importancia de los sistemas de información geográfica en el desarrollo de los modelos hidrológicos, en especial del modelo SWAT.

De acuerdo a la compilación de definiciones realizada por Tamayo (2017) se puede sintetizar que un modelo hidrológico es un modelo matemático que pretende representar el sistema hidrológico a partir de la simulación de los procesos naturales del flujo de agua. Frecuentemente considera a la cuenca hidrográfica como un hidrosistema.

Existe una amplia gama de modelos hidrológicos, entre los que se encuentran los modelos empíricos, semidistribuidos, distribuidos determinísticos, estocásticos y continuos. Entre ese gran abanico de opciones destaca el modelo hidrológico SWAT por su interoperabilidad con sistemas de información geográfica, su uso en la cuenca del río Coca así como su constante proceso de evolución (Feler et al., 2014).

² El algoritmo GPROF es una técnica bayesiana que trata de reconstruir las observaciones de las radianzas por cada campo de visión de microondas para seleccionar la mejor combinación de miles de modelos numéricos, también utiliza la asociación vertical de perfiles de hidrometeoros que son usados para proporcionar una tasa de precipitación superficial estimada (Huffman et al., 2007).

2.3.1. Modelo hidrológico SWAT

El modelo hidrológico SWAT (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998; Srinivasan, Ramanarayanan, Arnold, & Bednarz, 1998) fue desarrollado para la USDA (U.S. Department of Agriculture) con el propósito de predecir el impacto del manejo del suelo. Para tal efecto, incorpora ecuaciones para diferentes métodos para la representación de procesos hidrológicos entre las variables de entrada y las variables de salida. El modelo SWAT requiere para la simulación información de clima, propiedades del suelo, topografía, cobertura vegetal, y uso del suelo (S. Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams., 2005).

Para la simulación el modelo SWAT divide a la cuenca de estudio en subcuencas y a su vez divide estas subcuencas en unidades de respuesta hidrológica (HRU por sus siglas en inglés). Estas unidades poseen características únicas de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo y pendiente (Hurtado & Yáñez, 2015). En la Figura 21, se muestra un ejemplo de las coberturas utilizadas por el modelo SWAT para definir las unidades hidrológicas de respuesta.

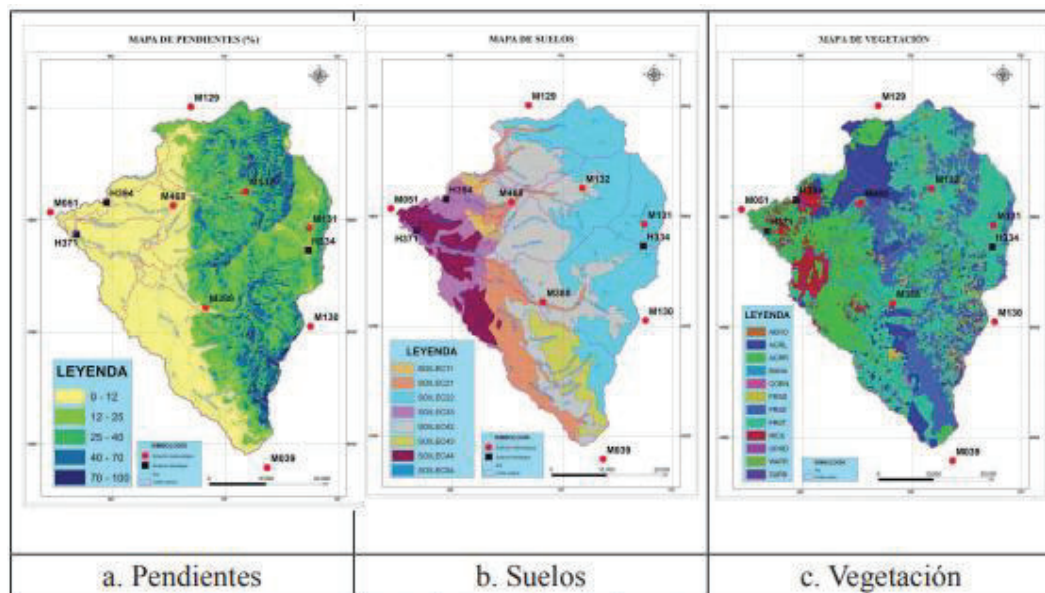


Figura 21. Ejemplo de coberturas utilizadas para la definición de las HRU.

Fuente: (Hurtado & Yáñez, 2015)

La simulación del modelo SWAT se realiza separando dos componentes. El primero corresponde a la fase terrestre del ciclo hidrológico donde se analiza la cantidad de sedimentos, nutrientes y pesticidas que ingresan al canal principal. La segunda fase corresponde al movimiento del agua, sedimentos, entre otros, a través de una red de canales, esta fase se denomina transporte en canal. En la Figura 22 se esquematizan las fases para la simulación del modelo SWAT.

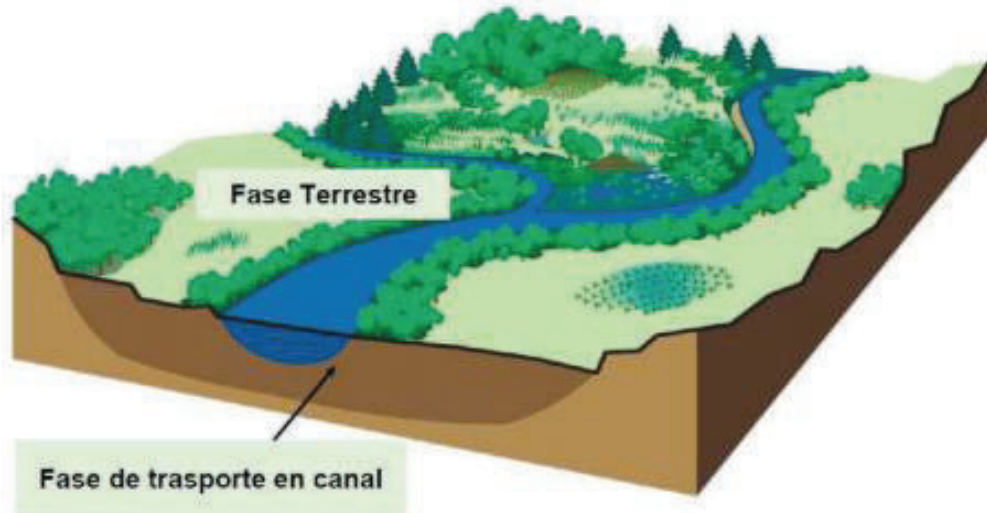


Figura 22. Fases en las que se divide la simulación del modelo SWAT.
Fuente: (Van Griensven, et al., 2008)

SWAT modela la fase terrestre del ciclo hidrológico utilizando la siguiente ecuación de balance hídrico descrita por Neitsch et al., (2005).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Dónde:

- SW_t : representa el contenido final de agua en el suelo (mmH_2O).
- SW_0 : representa el contenido inicial de agua en el suelo en un día i (mmH_2O).
- R_{day} : representa la cantidad de precipitación en un día i (mmH_2O).
- Q_{surf} : representa la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mmH_2O).
- E_a : representa la cantidad de evapotranspiración en un día i (mmH_2O).
- Q_{gw} : representa la cantidad de flujo subterráneo en un día i (mmH_2O).

Los parámetros de entrada y procesos relacionados con la fase terrestre del ciclo hidrológico se encuentran descritos en Neitsch et al., (2005). A manera de ejemplo se muestra en la Figura 23 la representación de la fase terrestre del ciclo hidrológico.

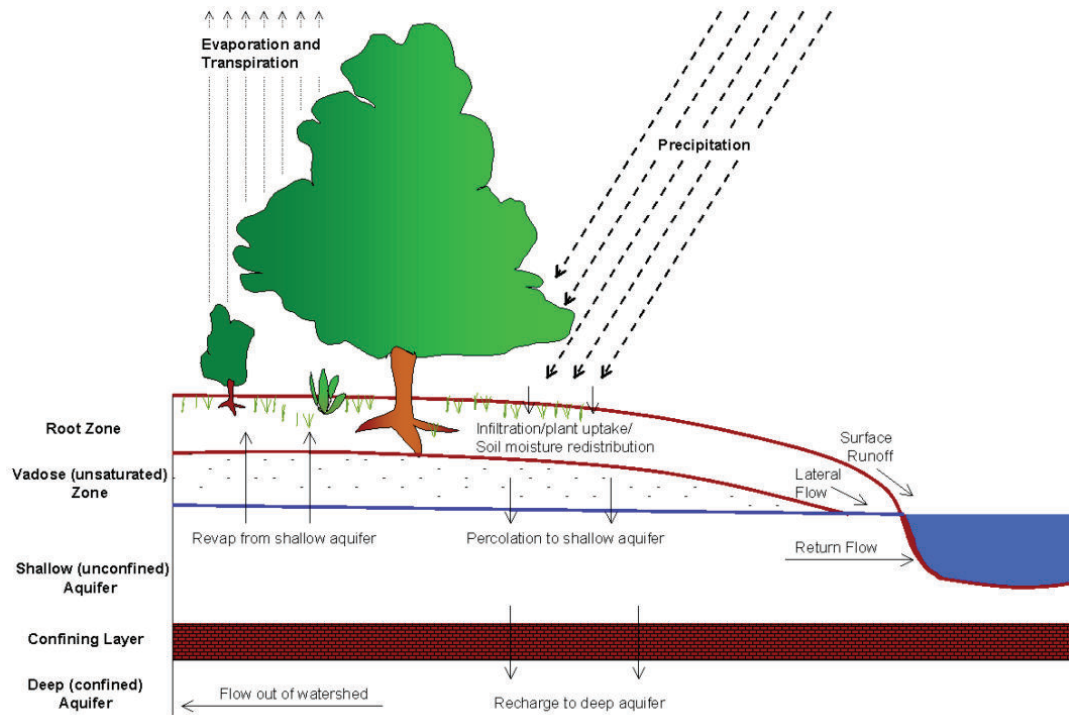


Figura 23. Representación de la fase terrestre del ciclo hidrológico
 Fuente: (Neitsch, et al., 2011).

Para la fase de transporte, el modelo hidrológico SWAT considera el flujo en canal abierto, utiliza la ecuación de Manning para definir la velocidad así como la tasa del flujo y utiliza el método de Muskingum o el de Coeficiente variable de almacenamiento para calcular la cantidad de agua que se almacena en el cauce en un tiempo determinado (Tamayo 2017). La fase de transporte se divide en cuatro componentes que son: transporte de agua, transporte de sedimentos, transporte de nutrientes y transporte de sustancias químicas. Una explicación detallada de los componentes indicados anteriormente se encuentra en Neitsch et al., (2005).

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente proyecto de investigación se desarrolla en la cuenca del río Coca delimitada en el marco del proyecto de investigación “Evaluación de los Caudales Líquidos y Producción de Sedimentos con el Modelo SWAT y su Relación de los Caudales Líquidos y Sólidos Observados” realizado por Tamayo (2017).

Del análisis espacial realizado a la cuenca hidrográfica de estudio, se puede identificar que se encuentra en las provincias de Napo y Sucumbíos en las estribaciones de la cordillera oriental del Ecuador. Tiene su punto más alto sobre los 5790 m.s.n.m. y su cota más baja se encuentra ubicada a 533 m.s.n.m., el área que abarca la cuenca es de 4596,59 km².

En la Figura 24 se indica la ubicación de la cuenca hidrográfica de estudio con relación al territorio del Ecuador continental.



Figura 24. Ubicación de la cuenca hidrográfica de estudio con relación al territorio ecuatoriano.

Fuente: IGM, Bing, INEC.

Elaboración: Autor.

Las vertientes que alimentan a la cuenca hidrográfica se originan principalmente en los volcanes Cayambe y Antisana. El río Quijos nace del volcán Cayambe y los ríos Papallacta y Cosanga nacen del volcán Antisana.

Dentro de la cuenca hidrográfica de estudio se encuentran las ciudades de Papallacta, Cuyuja, Baeza, Cosanga, San Francisco de Borja y El Chaco la ubicación espacial de estas ciudades con respecto a la cuenca de estudio se muestra en Figura 25, de las cuales, dos son las cabeceras de los cantones Quijos y El Chaco, lo que denota la importancia de la cuenca en el contexto territorial de la región amazónica. La distribución poblacional se muestra en la Tabla 4.

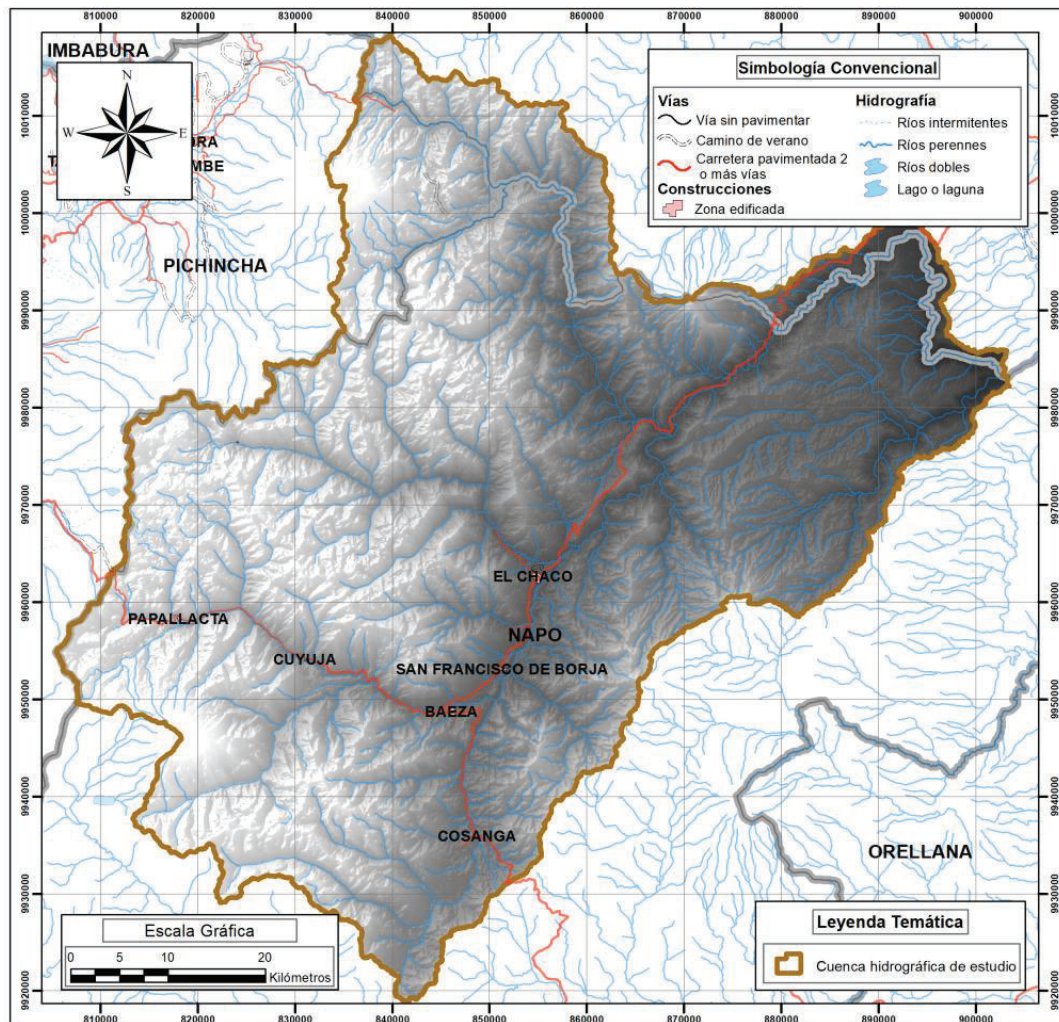


Figura 25. Ubicación espacial de las ciudades dentro de la cuenca hidrográfica

Fuente: IGM, Bing, INEC.

Elaboración: Autor.

Tabla 4: Distribución de población en la cuenca de estudio.

| LUGAR | MUJERES | HOMBRES | TOTAL | % MUJERES | % HOMBRES |
|------------|---------|---------|-------|-----------|-----------|
| Papallacta | 428 | 492 | 920 | 47% | 53% |

| LUGAR | MUJERES | HOMBRES | TOTAL | % MUJERES | % HOMBRES |
|------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Cuyuja | 299 | 315 | 614 | 49% | 51% |
| Baeza | 976 | 970 | 1946 | 50% | 50% |
| Cosanga | 217 | 288 | 505 | 43% | 57% |
| San Francisco de Borja | 1148 | 1052 | 2200 | 52% | 48% |
| El Chaco | 2386 | 2430 | 4816 | 50% | 50% |
| TOTAL | 5454 | 5547 | 11001 | | |

Fuente: INEC.
Elaboración: Autor.

Dentro de la cuenca de estudio se puede evidenciar que se encuentran 11001 habitantes. La población que más habitantes tiene es El Chaco, aquí se concentra el 43.78% de la población de la cuenca de estudio, la siguiente ciudad en cuanto a número de pobladores es San Francisco de Borja que alberga al 20% de habitantes del área de estudio. Con relación a la distribución en cuanto a género se puede mencionar que existe mayor presencia de hombres ya que en promedio en la cuenca existen 52% de hombres y 48% de mujeres.

De acuerdo a los datos de los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, la principal actividad económica en la zona de estudio es la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. La segunda actividad económica es la administración pública con mayor presencia en las cabeceras cantonales. Las siguientes actividades económicas en importancia están relacionadas con el comercio al por mayor y menor y las actividades relacionadas con el sector turístico es decir el alojamiento y el servicio de comidas, esta actividad predomina en Papallacta ya que es la que mayor empleo genera.

Cercano al punto de cierre de la cuenca de estudio se encuentra el principal proyecto hidroeléctrico del Ecuador, Coca Codo Sinclair, cuya capacidad de generación instalada es de 1500 MW, mismo que aprovecha el potencial energético de los ríos Quijos y Salado.

La cuenca hidrográfica objeto del presente estudio, no solamente tiene importancia por su potencial productivo o por su gran potencial energético, sino que además posee un gran potencial ambiental ya que el 76% del área de la cuenca corresponde a Patrimonio Natural de Áreas Protegidas, entre las que se encuentran el Parque Nacional Cayambe Coca ocupando el 50% de la cuenca, a continuación se encuentra la Reserva Ecológica Antisana que cubre el 15% del área de estudio y por último se encuentra el Parque Nacional Sumaco Napo Galeras que cubre el 11%. En la Figura 26, se indica la ubicación de las Áreas Naturales Protegidas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

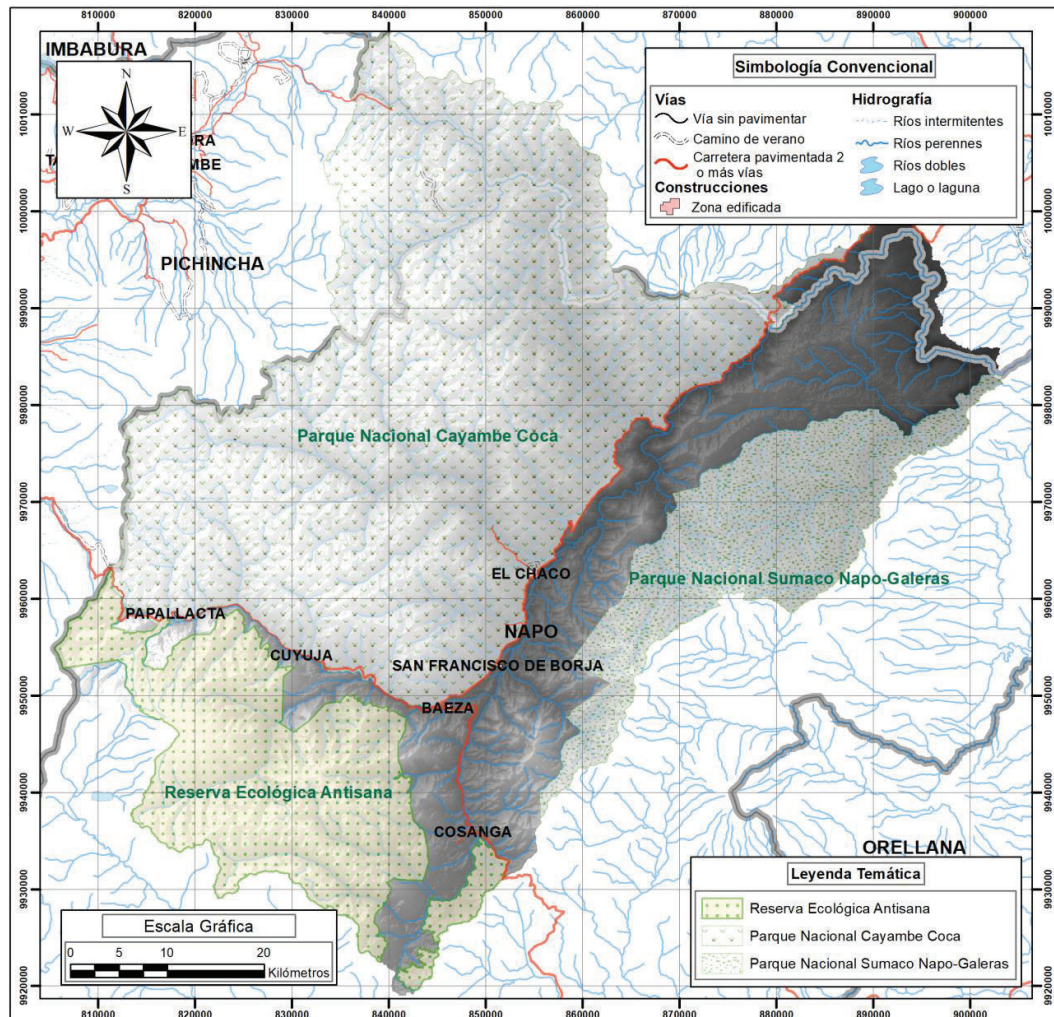


Figura 26. Ubicación de las Áreas Naturales Protegidas en la cuenca hidrográfica de estudio.
 Fuente: IGM, MAE, INEC.
 Elaboración: Autor.

Con relación al estatus de protección de Bosques y Vegetación Protectora, dentro de la cuenca hidrográfica de estudio se encuentra: La Cascada, la Parte Media y Alta del Río Tigre y Cumandá ocupando 5.74%, 0.37% y 0.01% respectivamente. De estas solamente el Bosque protector de Cumandá es privado, los demás son estatales.

3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO – GEOGRÁFICA

Como se indicó en el sección correspondiente al marco teórico, el modelo hidrológico considera como unidad fundamental de análisis la cuenca hidrográfica, que es el espacio geográfico delimitado por una línea imaginaria denominada divisoria de aguas de un sistema de arroyos y ríos que tiene una misma desembocadura. Las características físico – geográficas de una cuenca son:

- Área de drenaje.

- Perímetro.
- Longitud del cauce principal.
- Longitud total de cauces.
- Coeficiente de compacidad.
- Factor de forma.
- Densidad de drenaje.
- Sinuosidad.
- Elevación media.
- Altura máxima del cauce principal
- Altura mínima del cauce principal.

Los valores de las características físico – geométricas de la cuenca de estudio se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5: Características físico – geográficas de la cuenca de estudio.

| CARACTERÍSTICA | SÍMBOLO | UNIDAD | VALOR |
|-----------------------------------|-----------|--------------------|---------|
| Área | <i>A</i> | km ² | 4596.59 |
| Perímetro | <i>P</i> | Km | 551.79 |
| Longitud del cauce principal | <i>L</i> | Km | 163.75 |
| Longitud total de cauces | <i>Lt</i> | Km | 5314.71 |
| Coeficiente de compacidad | <i>Kc</i> | ----- | 2.28 |
| Factor forma | <i>Kf</i> | ----- | 0.17 |
| Densidad de drenaje | <i>Dd</i> | km/km ² | 1.15 |
| Sinuosidad | <i>S</i> | ----- | 1.75 |
| Altura máxima del cauce principal | <i>H</i> | M | 4856 |
| Altura mínima del cauce principal | <i>H</i> | M | 540 |

Elaboración: Autor.

De la Tabla 5, se puede mencionar que el área de la cuenca es de 4596.59 km² y el perímetro es 551.79 km, con estos valores se calcularon las características físico – geográficas de la cuenca cuyos resultados fueron analizados de acuerdo a las categorías mencionadas por Monsalve Saenz, (1999) en este sentido el coeficiente de compacidad es de 2.28, lo que indica que no tiene mayor tendencia a crecidas, con relación al valor del factor forma, se presenta un valor bajo lo que refuerza la baja tendencia de la cuenca a crecidas; el valor de densidad de drenaje de 1.15 representa que la cuenca presenta buen drenaje. Con relación al coeficiente de sinuosidad, el valor es mayor a 1.25 lo que implica que su sinuosidad no es baja, se debe señalar que mientras más sinuosa es la cuenca, las velocidades en el cauce son menores.

3.2. CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA

En la cuenca hidrográfica de estudio se han identificado 17 estaciones meteorológicas que pueden aportar con información de variables climáticas para el presente proyecto de investigación. El listado de las estaciones meteorológicas, se detalla en la Tabla 6:

Tabla 6: Estaciones meteorológicas en el área de estudio.

| CÓDIGO | NOMBRE | TIPO DE ESTACIÓN | INSTITUCIÓN | WGS 84 ZONA 17 S | | ALTITUD (m.s.n.m.) | RANGO DE DATOS | | PRECIP MEDIA ANUAL (mm) | TEMP MEDIA ANUAL (°C) |
|--------|---------------------------------|------------------|-------------|------------------|----------|--------------------|----------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| | | | | ESTE | NORTE | | PRECIP | TEMP | | |
| MC12 | QUIJOS CAMPAMENTO | PV | EPMAPS | 828843 | 9948347 | 2705 | 2011-2014 | 2011-2014 | 1514.6 | 12.2 |
| M0188 | PAPALLACTA | CO | INAMHI | 818211 | 9957879 | 3150 | 1963-2014 | 1963-2014 | 1492.5 | 9.9 |
| M0203 | REVENTADOR | Auto - PV | INAMHI | 886728 | 9994944 | 1145 | 1973-2013 | 1982-1993 | 6067.3 | 18.7 |
| M0436 | CUYUJA | Auto - PV | INAMHI | 830859 | 9954166 | 2380 | 1982-2014 | ----- | 1613.1 | ----- |
| M1124 | SIERRAZUL | CO | INAMHI | 841890 | 9925039 | 2240 | 1996-2013 | ----- | 3597.1 | ----- |
| M1203 | LUMBAQUI | Auto - CP | INAMHI | 907887 | 10004477 | 580 | 1997-2014 | ----- | 4961.2 | ----- |
| M0201 | EL CHACO INECEL | CP | INAMHI | 854443 | 9962059 | 1570 | 1976-1993 | 1982-1993 | 2500.5 | 18.4 |
| M0205 | SAN RAFAEL-NAPO | PV | INAMHI | 879887 | 9988441 | 1353 | 1975-2000 | ----- | 4693.8 | ----- |
| M0208 | RÍO SALADO-INECEL | CP | INAMHI | 872747 | 9977488 | 1310 | 1978-1993 | 1982-1993 | 3140.2 | 19.9 |
| M0215 | BAEZA | CP | INAMHI | 845820 | 9948858 | 1960 | 1974-1993 | 1982-1993 | 2338 | 16.7 |
| M0293 | PALMORIENTE-HUASHITO | CP | INAMHI | 937603 | 9965717 | 288 | 1985-2013 | 1985-2010 | 3584.9 | 25.2 |
| M0486 | BORJA-MISIÓN JOSEFINA | PV | INAMHI | 853173 | 9953599 | 1500 | 1965-2001 | ----- | 2699.9 | ----- |
| M0545 | OYACACHI | PV | INAMHI | 837451 | 9962737 | 3130 | 1974-1992 | ----- | 1423.7 | ----- |
| M0546 | COSANGA | PV | INAMHI | 847992 | 9931370 | 1930 | 1972-1992 | ----- | 2890.5 | ----- |
| M0490 | SARDINAS NAPO - INAMHI | PV | INAMHI | 854154 | 9957609 | 1573 | 1972-2015 | ----- | 2511.2 | ----- |
| M0699 | BORJA SUPERIOR - INECEL | PV | INAMHI | 858567 | 9947879 | 2038 | 1985-1988 | ----- | 2988.9 | ----- |
| M0703 | CODO SINCLAIR INFERIOR - INECEL | PV | INAMHI | 902421 | 9985116 | 875 | 1984-1988 | ----- | 5899.4 | ----- |

PV: Pluviométrica, CO: Climatológica ordinaria, CP: Climatológica principal.

Fuente: INAMHI.
Elaboración: Autor.

La precipitación media anual de la cuenca es de 2950 mm con variaciones a nivel mensual que van de 21.1 a 630.8 mm. A lo largo de toda la cuenca existe una alta fluctuación de los valores de precipitación anual que va desde los 950 mm en la

zona de Papallacta hasta los 6000 mm en la zona del Reventador. En la Figura 18 se muestran la variabilidad a nivel mensual de la precipitación en la cuenca hidrográfica de estudio.

Con relación a la información de temperatura, Horna (2016) menciona que a nivel mensual la mínima temperatura se encuentra en el mes de julio en la estación Papallacta, alcanzando temperaturas cercanas a los 9.94°C, la temperatura más calurosa en promedio mensual alcanzó 25.21 °C. En la Figura 27 se muestra la variabilidad de la temperatura en las estaciones de la cuenca hidrográfica de estudio.

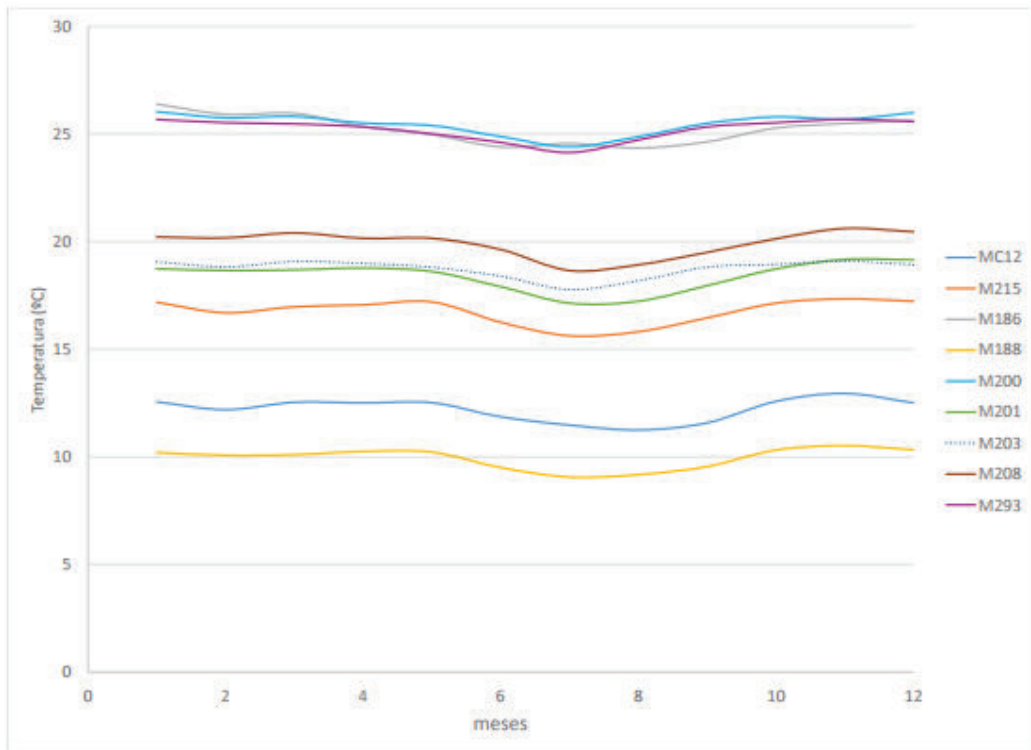


Figura 27. Variabilidad a nivel mensual de la temperatura en la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuente: Horna (2016).

Con base a los valores obtenidos por medio de investigaciones realizadas por Horna (2016) y Tamayo (2017) en la cuenca hidrográfica de estudio, se puede mencionar que la humedad relativa se encuentra entre el 84.21% y el 93.96%, como se muestra en la Figura 28.

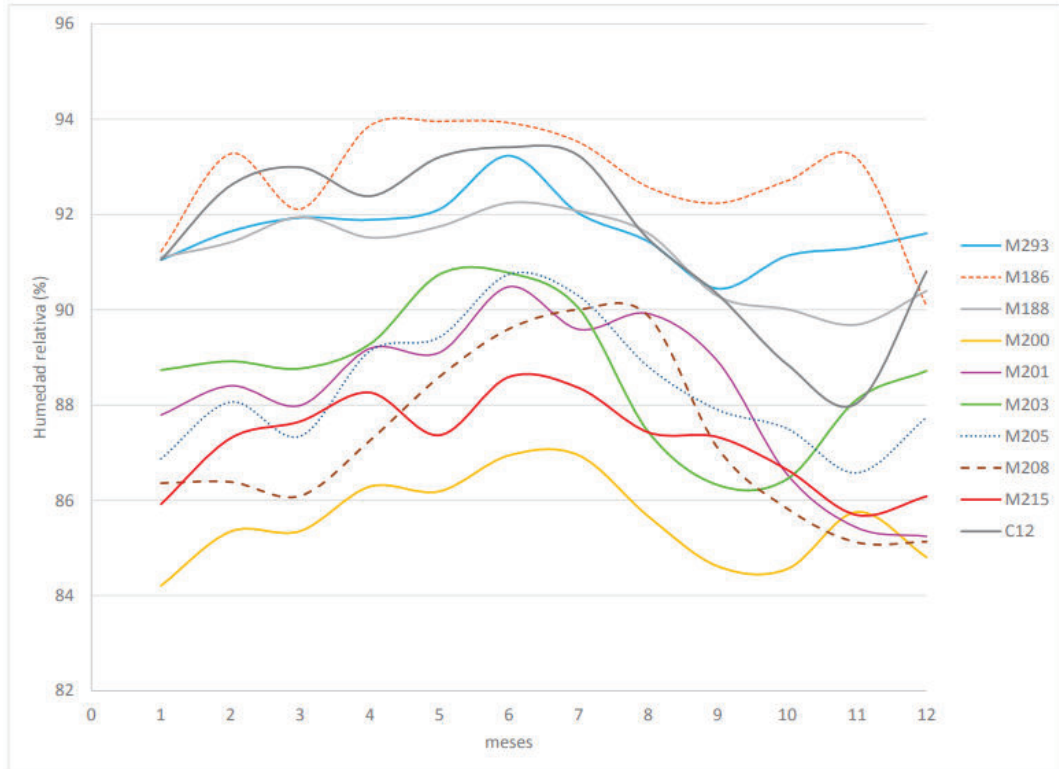


Figura 28. Variabilidad a nivel mensual de la humedad relativa en la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuente: Horna (2016).

Los valores de las variables meteorológicas analizadas en los párrafos anteriores fueron tomados de las estaciones meteorológicas señaladas en la Tabla 6, la ubicación espacial de cada una de ellas se muestra en la Figura 29.

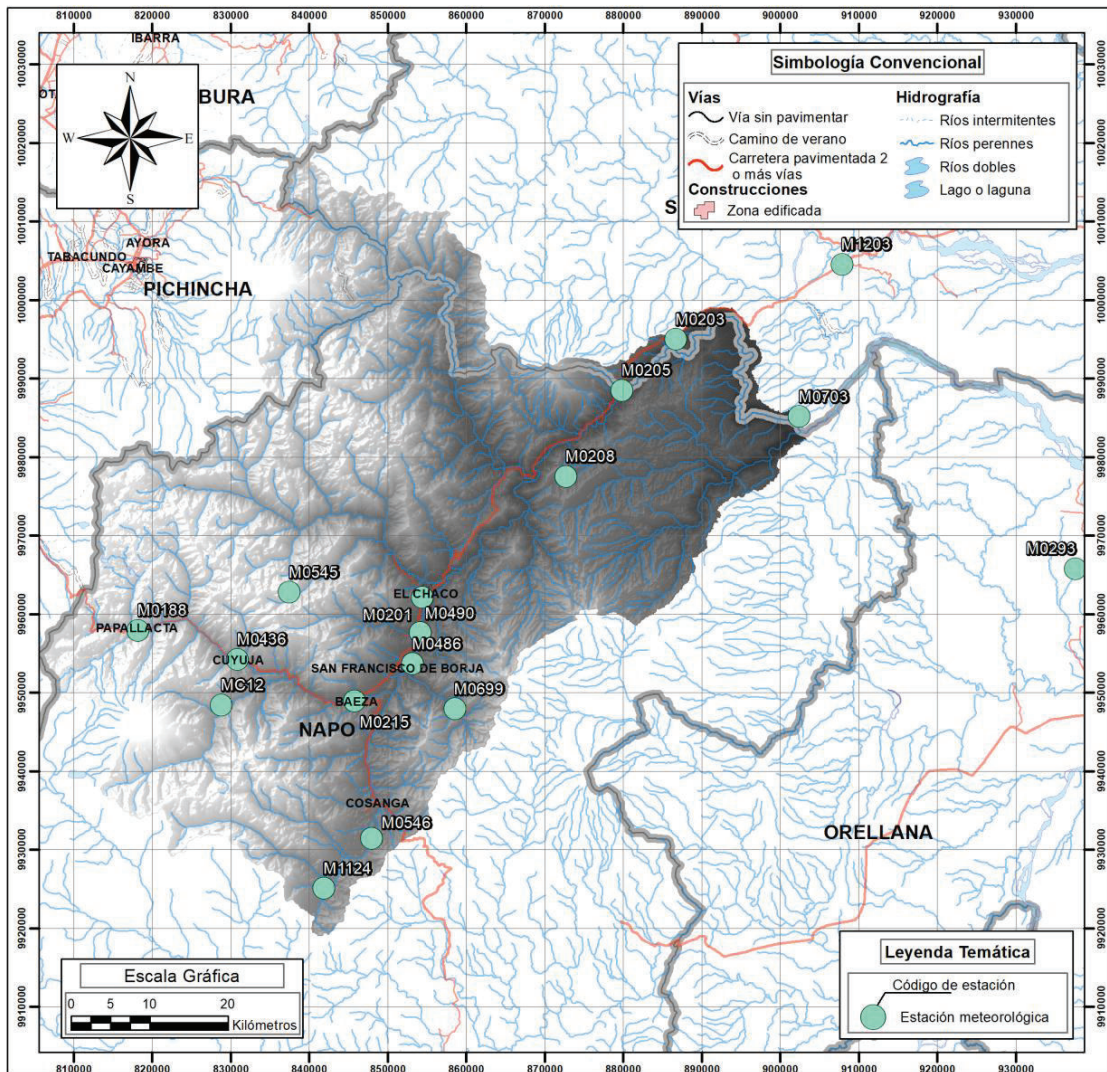


Figura 29. Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuente: IGM, INAMHI.

Elaboración: Autor.

3.3. DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA

En lo que respecta a la hidrología de la cuenca de estudio, se han identificado las siguientes estaciones hidrológicas:

Tabla 7: Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

| CÓDIGO | NOMBRE | WGS 84 ZONA 17 S | | ALTITUD | INSTITUCIÓN | RANGO DE DATOS | CAUDAL MEDIO ANUAL (m ³ /s) |
|--------|------------------|------------------|------------|---------|--------------------|----------------|--|
| | | ESTE | NORTE | | | | |
| H0715 | QUIJOS AJ BOMBON | 860992.27 | 9967224.37 | 1408 | COCA CODO SINCLAIR | 1978-2014 | 171.6 |
| H0728 | SALADO AJ COCA | 863458.80 | 9979426.98 | 1366 | COCA CODO SINCLAIR | 1975-1986 | 97.0 |
| H0733 | QUIJOS AJ BORJA | 851810.86 | 9952353.82 | 1635 | COCA CODO SINCLAIR | 1978-1992 | 106.2 |

| CÓDIGO | NOMBRE | WGS 84 ZONA 17 S | | ALTITUD | INSTITUCIÓN | RANGO DE DATOS | CAUDAL MEDIO ANUAL (m ³ /s) |
|--------|---------------------|------------------|------------|---------|--------------------|-------------------------------------|--|
| | | ESTE | NORTE | | | | |
| H0714 | COCA EN SAN RAFAEL | 878443.91 | 9986361.98 | 1208 | COCA CODO SINCLAIR | 1972-1987 2007-2009 2010-2014 | 322.3 |
| H0718 | QUIJOS EN BAEZA | 845433.86 | 9949181.37 | 1810 | COCA CODO SINCLAIR | 1964-2006 | 48.0 |
| H0719 | QUIJOS DJ OYACACHI | 857402.39 | 9964766.36 | 1446 | INAMHI | 1965-2013 | 185.9 |
| H0731 | COSANGA AJ QUIJOS | 849633.93 | 9948147.58 | 1717 | COCA CODO SINCLAIR | 1970-2006 | 44.9 |
| GRA | COCA DJ GRANADILLAS | 894719.43 | 9984797.43 | 643 | COCA CODO SINCLAIR | 2014-2015 | 220.5 |

Fuente: INAMHI.
Elaboración: Autor.

La ubicación espacial de las estaciones indicadas en la tabla anterior se encuentra en la Figura 30:

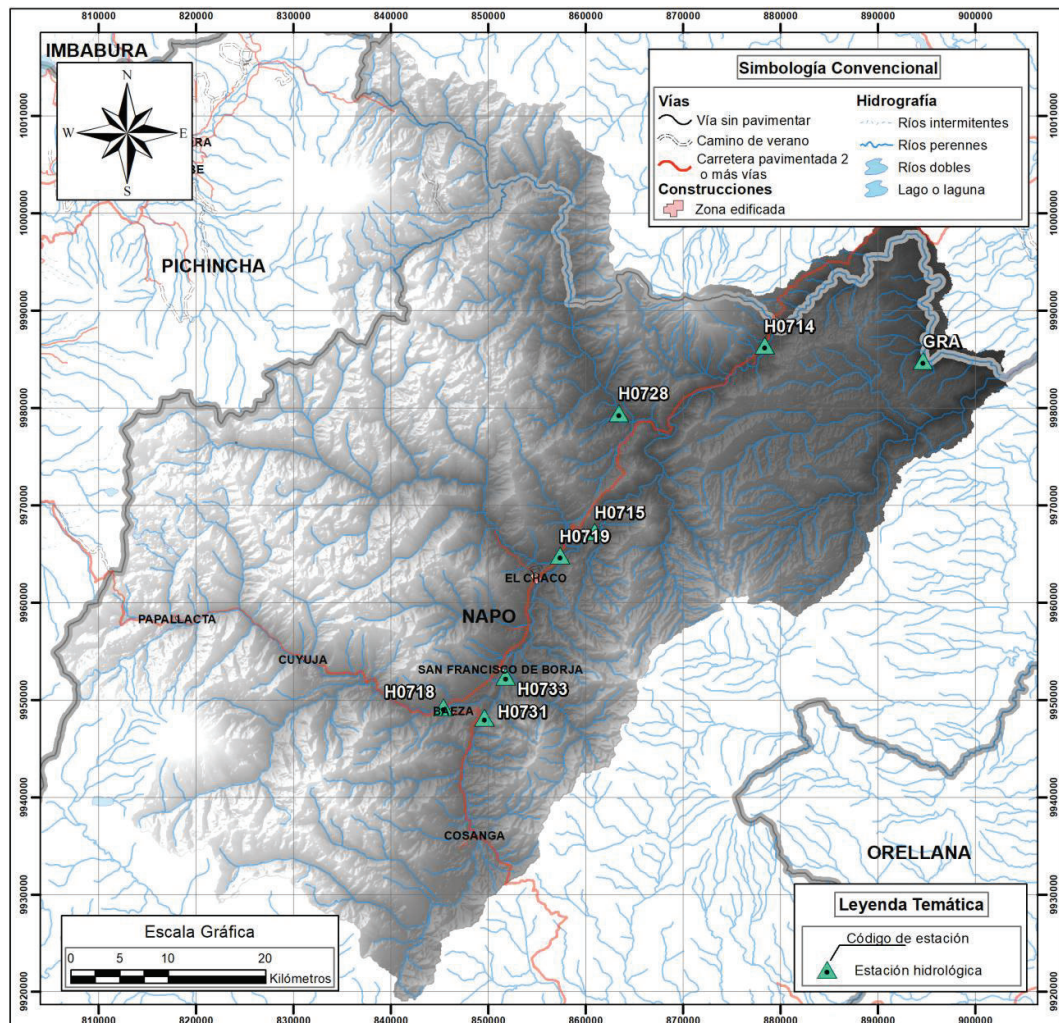


Figura 30. Ubicación de las estaciones hidrológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuente: IGM, INMAHI.
Elaboración: Autor.

En la cuenca objeto del presente estudio Horna (2016) realizó el análisis de los caudales de las estaciones hidrológicas señaladas en la Tabla 7. Dentro de este análisis, se menciona que los datos de la estación GRA Coca Granadillas son insuficientes ya que la estación tiene datos desde el año 2014 por lo que la variabilidad a nivel mensual no tendría representatividad. En la Figura 31, se muestra la variabilidad a nivel mensual de los caudales medidos en las estaciones hidrológicas dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

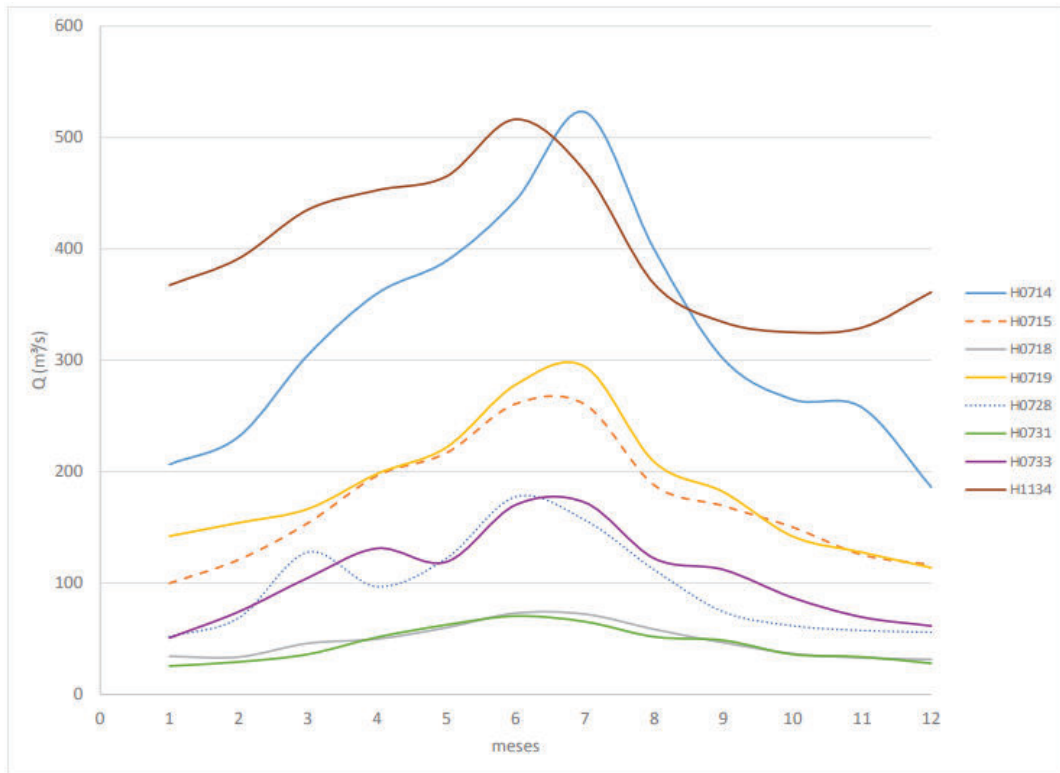


Figura 31. Variabilidad a nivel mensual de los caudales medidos en las estaciones hidrológicas de la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuente: Horna (2016)

Del gráfico anterior se puede mencionar que la estación H0714 presenta la mayor variabilidad a nivel mensual ya que presenta valores que oscilan entre los 200 m³/s hasta los 526 m³/s Horna (2016) además se puede observar que los máximos caudales se presentan en el mes de julio en todas las estaciones hidrológicas. En la estación H0714 Tamayo (2017) menciona que se drena una superficie de 3853 km² indica además que en este punto se tiene un caudal medio de 307.91 m³/s. En la Figura 32, se muestra la caracterización de los caudales líquidos por año y los caudales medios mensuales en la cuenca hidrográfica del Río Coca.

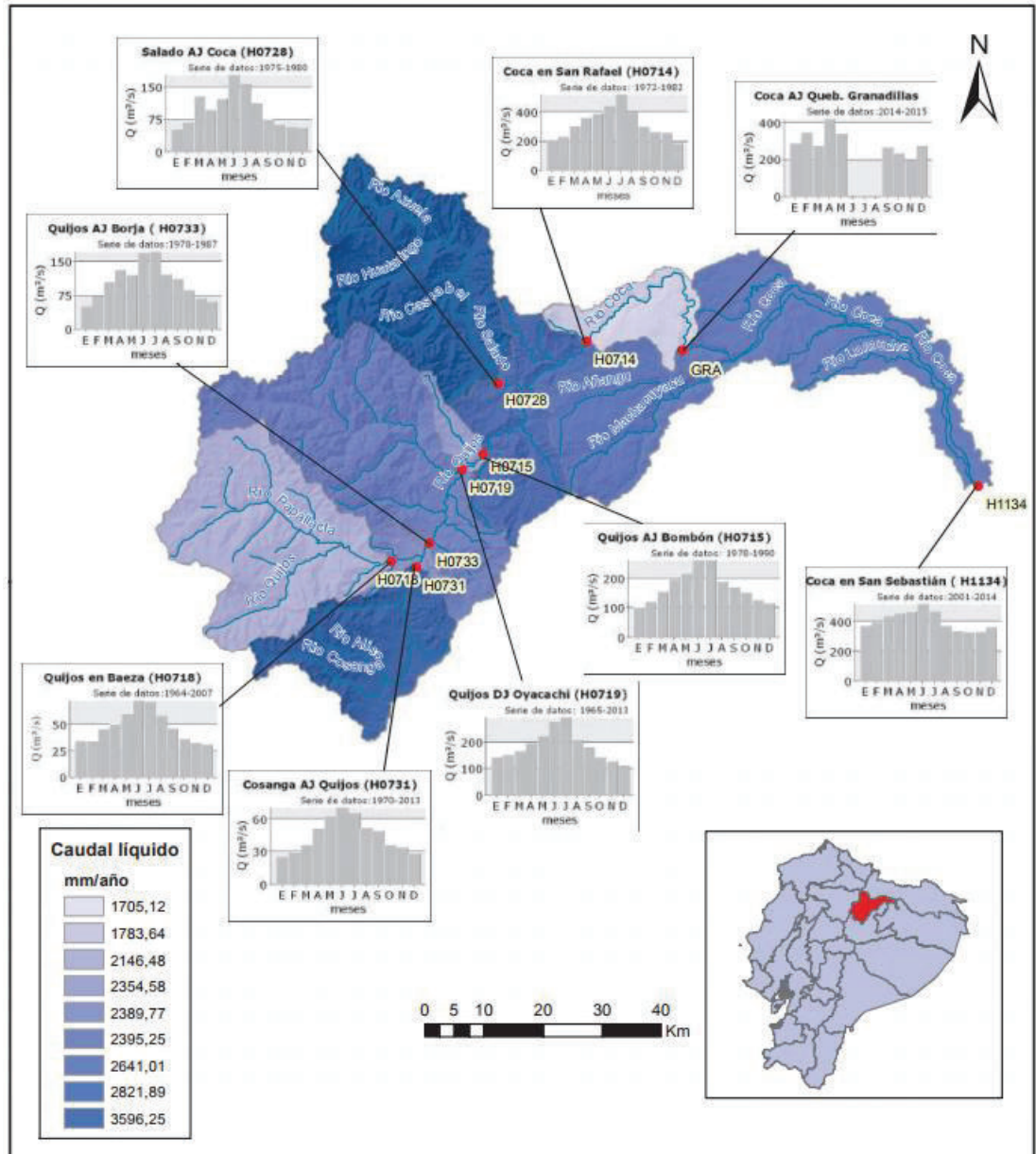


Figura 32. Caracterización de caudales líquidos por año y los caudales medios mensuales en la cuenca hidrográfica del Río Coca.

Fuente: Horna (2016).

3.4. COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO

De acuerdo al mapa de cobertura vegetal y uso del suelo realizado por el Ministerio de Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP) en el año 1990, dentro de la cuenca hidrográfica de estudio se ha realizado la clasificación de esta información en ocho categorías, siendo la principal el bosque nativo ocupando el 65.89% del total del área de estudio. En la

Tabla 8, se indican los porcentajes de ocupación de cada una de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo.

Tabla 8: Categorías de cobertura vegetal y uso del suelo dentro del área de estudio.

| CATEGORÍA | PORCENTAJE |
|----------------------------|------------|
| Bosque nativo | 65.89% |
| Páramo | 26.51% |
| Cultivos | 4.23% |
| Pastizal | 1.08% |
| Glaciar | 0.94% |
| Cuerpos de agua | 0.73% |
| Área sin cobertura vegetal | 0.60% |
| Área poblada | 0.02% |

Fuente: MAGAP 1990.
Elaboración: Autor.

La distribución espacial de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo dentro de la cuenca hidrográfica de estudio se muestra en la Figura 33.

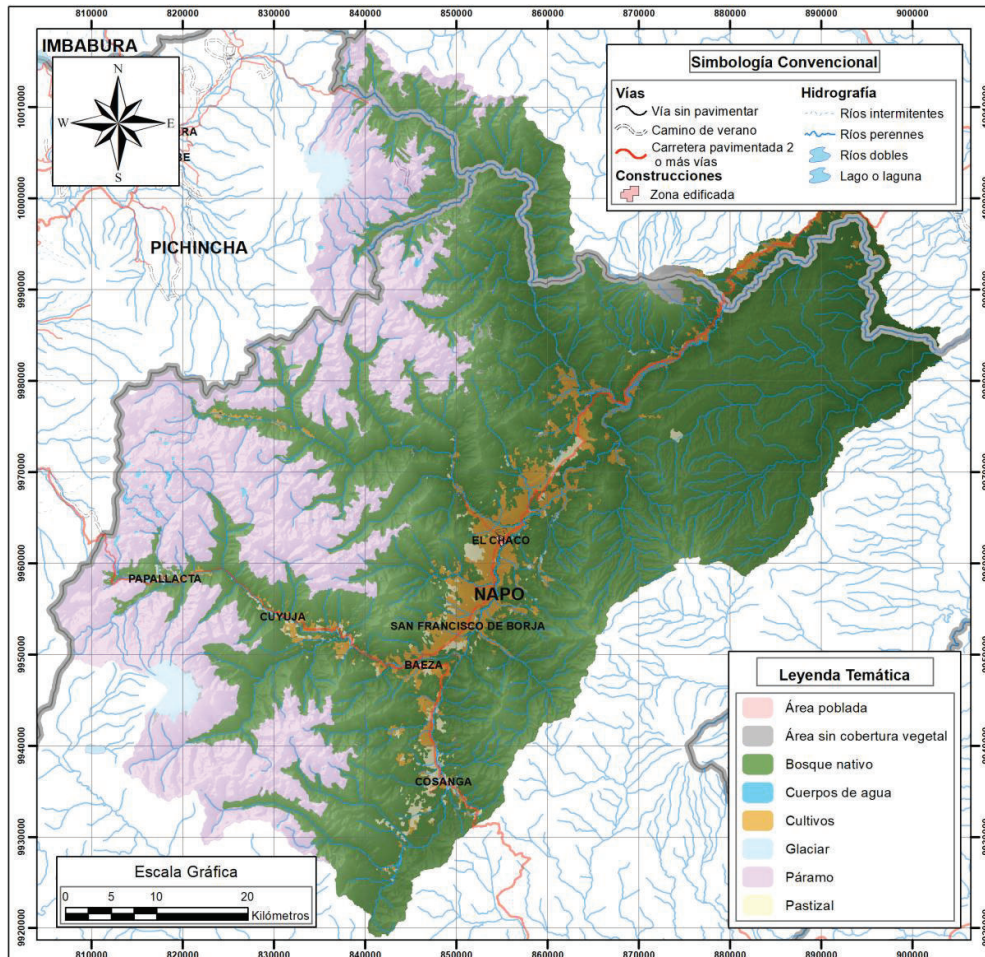


Figura 33. Distribución espacial de categorías de cobertura vegetal y uso del suelo.

Fuente: MAGAP 1990.

Elaboración: Autor.

3.5. SUELOS

La información de suelos utilizada en la investigación corresponde a la Descripción Taxonómica de Suelos realizada por el MAGAP en el año 2002 realizado de acuerdo a la clasificación propuesta por la USDA. En la cuenca de estudio existe variedad de suelos, principalmente se encuentran suelos de tipo Andisol ocupando el 81.74% del área total. En la Tabla 9 se observan los porcentajes de cada tipo de suelo dentro del área de estudio.

Tabla 9: Suelos dentro de la cuenca hidrográfica de estudio.

| SUELO | PORCENTAJE |
|-----------------|------------|
| Andisol | 81.74% |
| Inceptisol | 8.24% |
| Barren | 7.72% |
| Acrisol | 1.08% |
| Gellisol | 0.66% |
| Cuerpos de agua | 0.47% |
| Molincsol | 0.08% |

Fuente: MAGAP 2002.

Elaboración: Autor.

En la Figura 34, se muestra la ubicación de las unidades de suelos dentro de la cuenca hidrográfica de estudio:

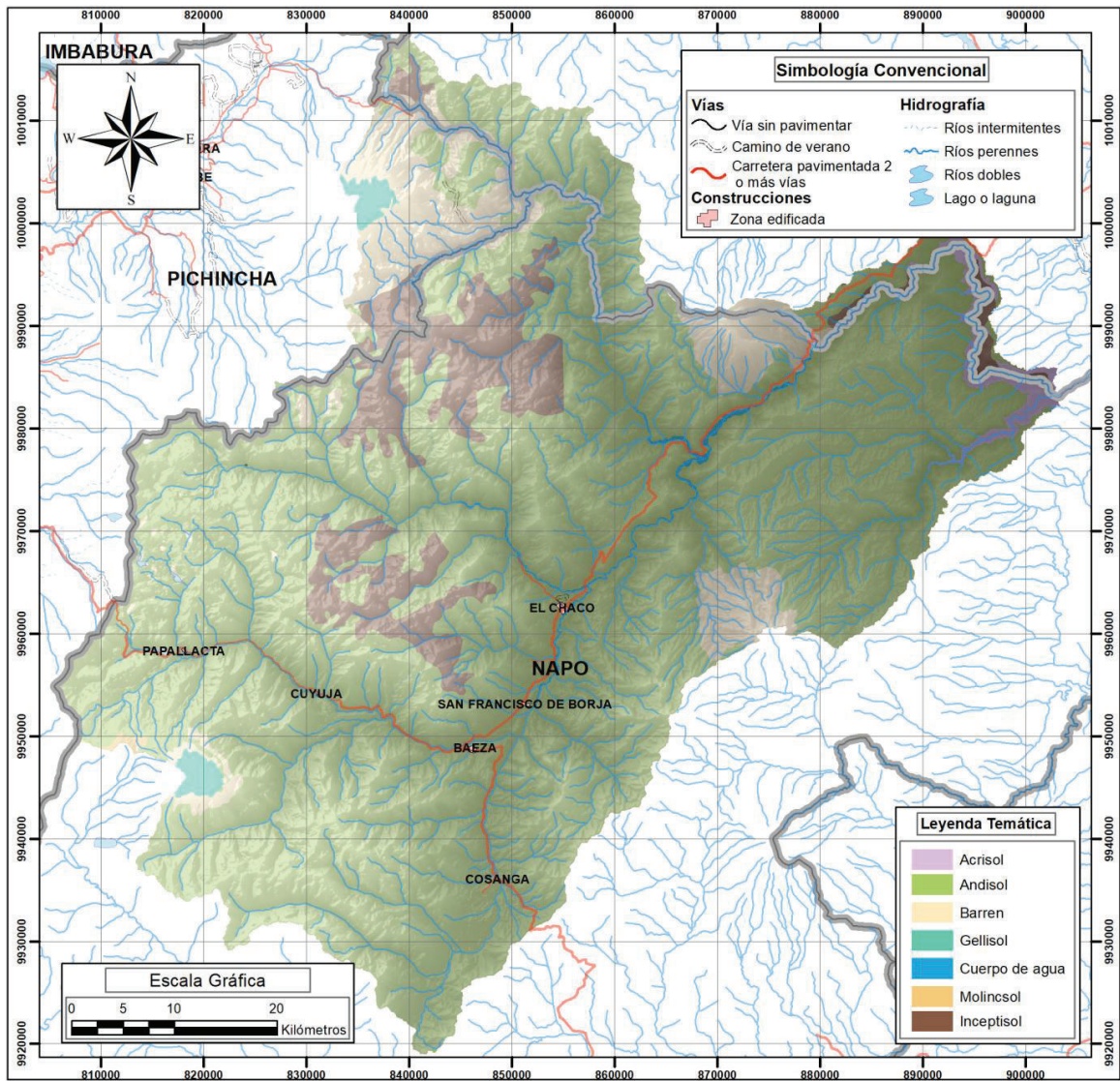


Figura 34. Distribución espacial de suelos.

Fuente: MAGAP 2002.

Elaboración: Autor.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA

4.1. CREACIÓN DE BASE DE DATOS DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

4.1.1. Procesamiento de información observada

La Escuela Politécnica Nacional (EPN) a través de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental ha generado varios proyectos de titulación y tesis relacionados con variables meteorológicas e hidrológicas, entre los que se encuentran los desarrollados por Horna (2016) y por Tamayo (2017).

Como insumo de los proyectos de investigación desarrollados por la EPN, se ha podido acceder a información histórica meteorológica e hidrológica, facilitada principalmente por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y por el Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). De este modo, se seleccionaron las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica de estudio. Las estaciones meteorológicas que se encuentran consideradas inicialmente en la presente investigación se muestran en la Figura 29, donde se observa que de las 17 estaciones, 15 se encuentran dentro de la cuenca de estudio, mientras que 2 (M1203 y M0293) se encuentran por fuera. Una descripción detallada de las 17 estaciones se encuentra en la Tabla 6.

De cada una de las 17 estaciones meteorológicas, se ha accedido a los datos diarios de precipitación. La información de precipitación de las estaciones detalladas, se encuentra registrada desde el año 1963 hasta el año 2015, sin embargo considerando que la información del producto de precipitación TMPA se encuentra desde el año 1998, se considerará este como año inicial.

Para la información hidrológica como se indicó en la Tabla 7 y se mostró en la Figura 29, en la cuenca de estudio se han identificado 8 estaciones hidrológicas con datos registrados desde 1963 hasta el año 2015. Se debe mencionar que de acuerdo a la disponibilidad de datos, a la temporalidad del estudio y al objetivo de la investigación no se han considerado todas las estaciones meteorológicas e hidrológicas. En el siguiente capítulo se encuentra la debida justificación.

La información de precipitación como de caudales, fue procesada en el programa R generando un script que permite realizar las siguientes acciones:

4.1.1.1. Lectura de archivos en formato csv y generación de matriz de datos observados.

Utilizando la función `read.csv`, se cargaron los archivos de las observaciones a nivel diario de precipitación y de caudal, al tratarse de datos que no comparten

exactamente la misma temporalidad, se utilizó la función `complete.cases` perteneciente a la librería `stats`, con el propósito de que las tablas tengan el mismo número de datos. Posteriormente se crearon las matrices de cada estación en formato zoo por las ventajas que se señalaron con anterioridad. Por último, para generar la matriz con datos observados se utilizó la función `merge`, perteneciente a la librería `base`, para poder unificar en una sola matriz los valores observados.

4.1.1.2. Generación de una tabla resumen de las series temporales.

El objeto de esta matriz es identificar el porcentaje de datos vacíos de la información a nivel diario, para esto se desarrolló una rutina utilizando una estructura condicional en la que para cada estación se realiza una búsqueda de los días que no se registran datos y los registra en una nueva matriz para después calcular la relación del número total de observaciones con el número total de observaciones válidas.

4.1.1.3. Generación de gráficos con los valores de precipitación y de caudales

Utilizando las matrices de datos observados, se usó la función `plot` de la librería `graphics`, para la generación de histogramas a nivel diario de precipitación y de caudales. Para precipitación, el intervalo de tiempo va desde el año 1998 hasta el año 2014 y para la información de caudales va desde el año 2008 hasta el año 2014 esto tomando en consideración los rangos de tiempo de las estaciones empleados en el presente estudio.

El script desarrollado se encuentra en el Anexo 1, mientras que los respectivos gráficos para precipitación y caudal se encuentran en el Anexo 2.

4.1.2. Procesamiento de información de precipitación satelital

La base de datos del producto TMPA 3B42 V7 considerará el periodo de tiempo en el que se dispone de datos es decir desde el 1 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2014. En el presente proyecto de investigación se ha tomado en cuenta el producto TMPA 3B42 V7 de la misión TRMM ya que de acuerdo a lo señalado por Liu et al., (2015) el producto presenta el mejor desempeño comparándolo con otros productos de precipitación a nivel diario, mensual y anual, del mismo modo Ochoa et al., (2014) y Zulkafli et al., (2014) señalan que la versión 7 del producto TMPA muestra una reducción del sesgo así como una mayor concordancia con los datos calibrados al compararlos con la versión 6 del algoritmo de estimación del mismo producto.

La información del producto TMPA 3B42 V7, se encuentra disponible a través de varios portales web, los más comunes se detallan en la Tabla 10. En el Anexo 3, se encuentra el manual de acceso a la información a través de los portales web Mirador y Giovanni,

Tabla 10: Portales web para acceder a información de precipitación captada por sensores remotos.

| PORTAL WEB | LINK DE ACCESO AL PORTAL |
|------------|---|
| MIRADOR | http://mirador.gsfc.nasa.gov/ |
| GIOVANNI | http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/ |

Fuente: (Mehta, 2015).
Elaboración: Autor.

La principal diferencia entre los portales mencionados en la Tabla 10, radica en que el portal MIRADOR permite descargar información en bloques utilizando diferentes herramientas como java o comandos wget. Al contrario, el portal web GIOVANNI permite generar archivos en formato NetCDF con diferentes operaciones como promedio de datos, animaciones entre intervalos de tiempo, acumulaciones de valores entre diferentes fechas, entre otros. Para descargar grandes volúmenes de información como por ejemplo la estimación de precipitación cada 3 horas del producto TMPA 3B42V7 se recomienda utilizar el portal web MIRADOR principalmente por las herramientas que ofrece para descargar los archivos por bloques.

En puntos anteriores se indicó que la información de precipitación satelital del producto TMPA 3B42 V7, está disponible para su descarga en intervalos de 3 horas desde las 22H30 del 31 de diciembre de 1997 hasta el 30 de abril de 2017³, en tiempo universal coordinado (UTC). Con esta característica los datos del producto TMPA fueron pasados a hora local (UTC-5),

La obtención de los datos indicados en el párrafo anterior, se realizó considerando que el valor de intensidad de precipitación del producto TMPA 3B42 V7 tiene una distribución uniforme durante las 3 horas, es decir que si en este lapso de tiempo se tiene una intensidad de precipitación de 1 mm/h significa que esto representa una altura de precipitación de 3 mm.

Se generó un script en el software R⁴, a continuación se realiza una breve descripción de las principales acciones que se realizan con el script. En el Anexo 4, se muestra el código completo desarrollado.

4.1.2.1. Creación del entorno espacial del producto TMPA 3B42 V7

La creación del entorno espacial del producto TMPA 3B42 V7 se refiere a registrar dentro de una variable las coordenadas del centroide de cada píxel del producto. Para realizar esta acción se utilizó la función readOGR perteneciente a la librería

³ La fecha está de acuerdo a la búsqueda realizada en el portal web MIRADOR realizada el 23 de julio de 2017.

⁴ R es un software libre desarrollado para el análisis estadísticos así como la generación de gráficos sin embargo de acuerdo a lo mencionado por los desarrolladores del sistema, se trata de un entorno en el que se implementan técnicas estadísticas; este sistema puede ser extendido a partir de diferentes paquetes distribuidos por R así como otras disponibles a través de la familia Comprehensive R Archive Network (CRAN).

rgdal, que permite cargar un archivo en formato .shp, aquí se encuentra registrada un identificador de cada píxel y su respectiva coordenada (longitud y latitud). Las coordenadas cargadas a partir del formato .shp son asignadas como el entorno espacial en la variable donde se encuentran los datos del producto TMPA 3B42 V7.

4.1.2.2. Equiparación de los rangos horarios del producto TMPA 3B42 V7 con los valores de precipitación observados

El producto de precipitación considerado en la presente investigación es registrado en tiempo UTC mientras que la información de precipitación observada se registra en tiempo local. En este sentido, utilizando la función `as.difftime` (librería `base`) se crea en una variable la diferencia de 7 horas necesarias para igualar los datos del producto con los datos observados. Con esta variable se realiza la respectiva operación aritmética con el archivo de clase `zoo` de los valores del producto creado a partir de la función `as.zoo` de la librería `zoo`. Cabe señalar que una de las características de los archivos tipo `zoo` es que se crean índices totalmente ordenados.

4.1.2.3. Acumulación de información del producto de precipitación de datos horarios a datos diarios

Del paso anterior, se obtiene un set de datos con información del producto TMPA 3B42 V7 cada 3 horas, sin embargo el objeto de la investigación es analizar la información a nivel diario para lo cual utilizando la función `aggregate` perteneciente a la librería `stats`, se realiza la acumulación a nivel diario. Esta información posteriormente es asignada al tiempo local es decir UTC-5 utilizando la función `as.POSIXct` perteneciente a la librería `base`.

4.1.2.4. Cortar los datos al intervalo de tiempo definido

Considerando el tiempo de disponibilidad de los datos del producto así como el periodo de tiempo en el que se realizará la validación, se utilizó la función `which` perteneciente a la librería `base` para por medio de una condición realizar una segregación de los datos, para este caso la condición corresponde a un rango de fechas.

En la

Figura 35, se muestra la ubicación espacial de los centroides de los píxeles del producto TMPA utilizados en el proyecto de investigación.

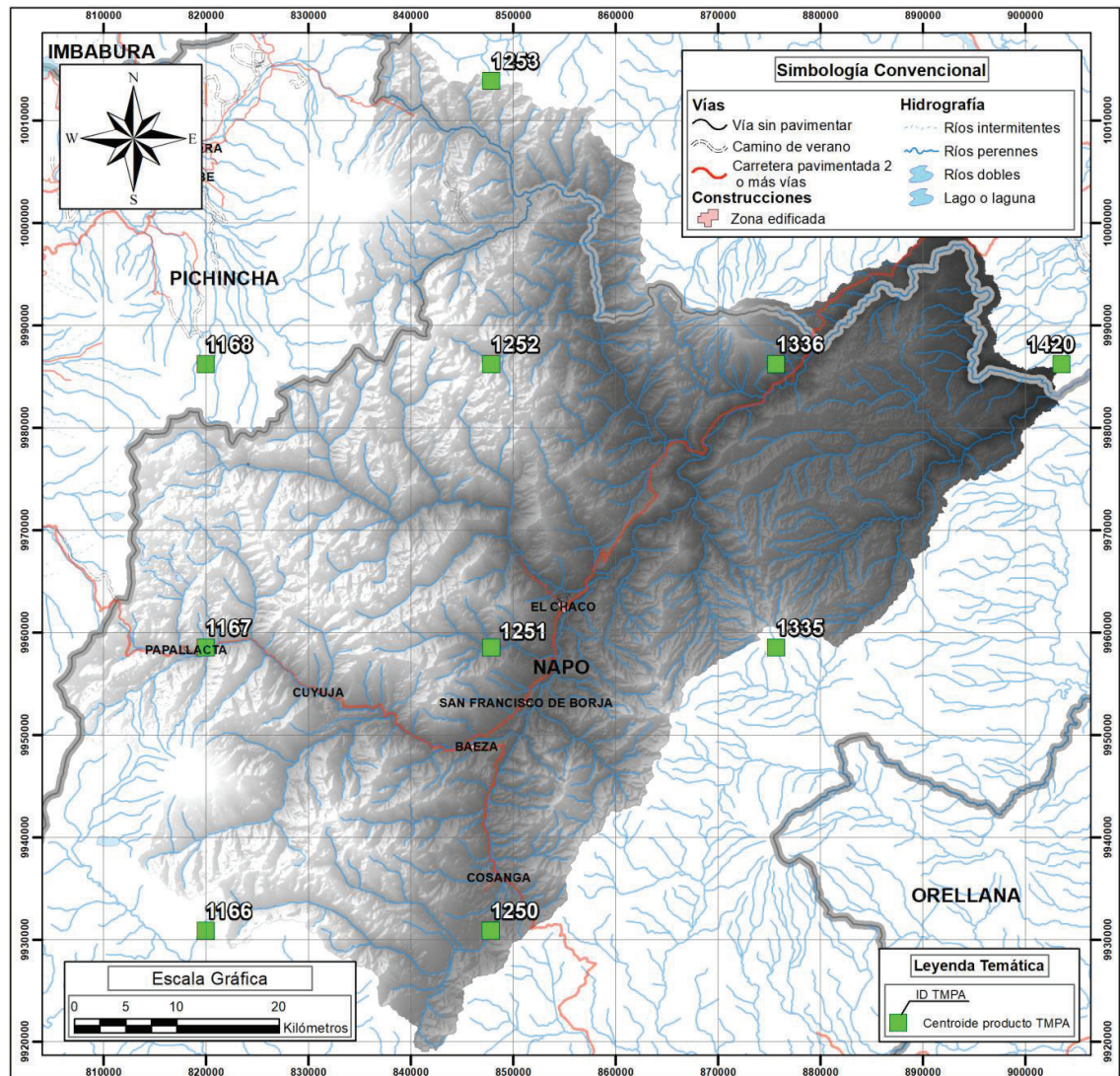


Figura 35. Centroides de píxeles del producto TMPA.

Fuente: IGM, INAMHI.

Elaboración: Autor

En el gráfico anterior se observa sobre cada punto un número que representa el código único de cada píxel a partir del cual se realizaron varias relaciones, como por ejemplo sus respectivas coordenadas, la información de precipitación del producto, entre otras.

Como resultado, se generó una matriz que incorpora la información de precipitación de 6209 días para los 42 puntos de los centroides del producto TMPA 3B42 el que fue almacenado con el nombre sat en formato RData. En el Anexo 5, se encuentra un gráfico con las series temporales del producto TMPA y en el Anexo 6 se muestra un resumen de los valores de precipitación del producto agregados a nivel anual.

4.2. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO TMPA EN BASE A OBSERVACIONES

4.2.1. Indicadores cuantitativos

Los indicadores cuantitativos son comúnmente utilizados para evaluar los datos de los productos de precipitación satelital, por ejemplo la investigación desarrollada por Tang G. et al., (2016) el estudio realizado por Ochoa A. et al., (2014) y Lujano et al., (2015) quienes utilizan el coeficiente de correlación, el error medio, el sesgo y el error medio cuadrático para este efecto.

Para las fórmulas descritas en esta sección se utilizará la siguiente terminología:

S: representa los valores simulados,
O: representa los valores observados,
i: periodo de tiempo,
N: número total de datos

4.2.1.1. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación más utilizado es el de Pearson, este índice mide cuanto se relaciona una variable con los valores de otras (Tang et al., 2016) y (Ochoa A. et al., 2014). El coeficiente varía entre -1 y 1, mientras el coeficiente es lo más cercano a 1 o -1 se puede concluir que es mayor la relación entre las variables y mientras más cercano a 0 es menor será la relación. La fórmula para cálculo del coeficiente de correlación es:

$$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_S \sigma_O} \quad (2)$$

4.2.1.2. Sesgo porcentual

El sesgo es la diferencia entre un valor observado y el verdadero valor debido a todas las causas, menos la variabilidad del muestreo (Lujano et al., 2015). Este indicador, es comúnmente utilizado para identificar en qué sentido se desplaza el error de una determinada estimación. Lujano et al., (2015) y Moriasi et al., (2007) señalan que el valor óptimo del sesgo es 0. Mientras más cercano a este valor sean los resultados, el modelo tendrá una simulación más precisa. Del mismo modo, revela que valores negativos indican una subestimación del sesgo del modelo. Mientras que los valores positivos indican una sobre estimación del sesgo del modelo.

El PBIAS se representa en términos de porcentaje y la fórmula para su cálculo es:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (3)$$

4.2.1.3. Error medio cuadrático

De acuerdo a lo mencionado por Chai y Draxler (2014) el error medio cuadrático se ha utilizado como una métrica estadística estándar para medir el desempeño del modelo en meteorología, la calidad del aire y los estudios de investigación climática. Mide el promedio de los errores al cuadrado, lo que es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se pretende estimar. Puede tomar valores que van entre 0 a $+\infty$ y su valor óptimo es 0. A continuación se muestra la fórmula para el cálculo del error medio cuadrático.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Las unidades del error medio cuadrático son las mismas unidades que tiene la variable que se está evaluando, por ejemplo cuando se analiza la precipitación a nivel diario el valor será en mm.

4.2.1.4. Error medio

Es un término que permite detectar si un modelo conduce a la sobre o sub predicción sistemática (Power, 1993). Puede tomar valores que van entre $-\infty$ a $+\infty$ y su valor óptimo es 0. Para el cálculo de este parámetro se utiliza la expresión matemática que se muestra a continuación:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i) \quad (5)$$

Las unidades del error medio se representan en las mismas unidades que la variable analizada, como por ejemplo en mm para datos de precipitación diaria.

4.2.1.5. Error medio absoluto

Es una medida ampliamente usada para realizar evaluaciones de modelos. Toma el valor absoluto de los errores y los promedia durante todas las series de tiempo consideradas. Se considera el valor absoluto de cada número para de esta manera evitar que los números negativos y positivos se anulen (Chai & Draxler, 2014). La fórmula del error medio absoluto se detalla a continuación:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - S_i| \quad (6)$$

El parámetro puede tomar valores que van entre 0 a $+\infty$, el valor óptimo es 0. Las unidades del error medio cuadrático vienen expresadas en las mismas unidades que tiene la variable que se está evaluando en este caso mm.

4.2.1.6. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es un valor que permite evaluar el rendimiento de un modelo, identificando cuanto de la variabilidad de las observaciones es representada por la simulación (Nash & Sutcliffe, 1970). La fórmula para el cálculo del coeficiente se muestra a continuación

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

El coeficiente de Nash-Sutcliffe es un valor adimensional cuyos valores oscilan entre $-\infty$ y 1; su valor óptimo es 1.

4.2.1.7. Desarrollo de script en R para el cálculo de indicadores cuantitativos

El script para el cálculo de las funciones objetivo, inició con la búsqueda de que píxel del producto TMPA se encuentra más cercano a una estación meteorológica, además de crear un archivo tipo zoo con los valores del producto TMPA de acuerdo a la relación de los píxeles más cercanos a estaciones meteorológicas.

Con el propósito de almacenar los resultados de las funciones objetivo, se creó un data frame en blanco utilizando la función `as.data.frame`. Aquí, se fueron asignando en cada fila los resultados del análisis de los indicadores cuantitativos. Para el cálculo del coeficiente de correlación, se utilizó la función `cor` perteneciente a la librería `stats`. Para el cálculo del sesgo porcentual, error medio cuadrático, error medio, error medio absoluto y coeficiente de Sash-Sutcliffe se utilizaron las funciones `rmse`, `mae`, `me`, `pbias` y `NSE` pertenecientes a la librería `hydroGOF`.

Cabe señalar que con el propósito de incluir información adicional en el análisis de las funciones objetivo, se incluyó como parte del script una sección que categoriza a las estaciones en diferentes pisos altitudinales tomando en consideración la clasificación descrita por Horna (2016) que se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Clasificación de zonas altitudinales.

| ZONA | RANGO ALTITUDINAL (m.s.n.m) |
|-------|--------------------------------|
| Baja | < 1300 |
| Media | 1300 – 2800 |
| Alta | > 2800 |

Fuente: Horna (2016).

En el Anexo 7, se encuentra el script desarrollado para el cálculo de los indicadores cuantitativos

4.2.2. Indicadores cualitativos

Los indicadores cualitativos son empleados comúnmente para evaluar la información registrada por un determinado equipo, un sensor o en el caso de la presente investigación, los valores del producto TMPA 3B42 V7. Esta técnica de evaluación, fue utilizada por Ward et al., (2011) quien analizó los productos de precipitación TRMM 3B42 y PERSIANN en los Andes de Ecuador y la Patagonia. Para el análisis de los datos se consideraron indicadores cualitativos como la frecuencia del sesgo, probabilidad de detección, proporción de falsa alarmas y la probabilidad de detección. Estos indicadores también fueron considerados por Ochoa et al., (2014) para la evaluación del producto TMPA 3B42 en la región del Pacífico y Andes en Ecuador y Perú.

Del mismo modo Tang et al., (2016), realizó la evaluación del producto GPM y TMPA considerando para tal efecto la probabilidad de detección, la tasa de falsas, entre otros indicadores. (Prakash et al., 2016), utilizó los índices POD, FAR y FBI para evaluar la detección de precipitación de tres productos satelitales comparándolos con datos de precipitación observada, por otro lado (Satgé et al., 2017) utilizó indicadores cuantitativos como POD y FAR para evaluar el producto satelital IMERG sobre la cuenca principal Boliviana.

Los autores indicados en los párrafos anteriores indican que para la obtención de los indicadores cuantitativos se emplea una tabla de contingencia de doble entrada, donde se registra el número de ocurrencias en la que las observaciones y los valores del producto de precipitación TMPA detectaron un valor superior a un umbral dado.

En la Tabla 12 se muestra como se estructura la tabla de contingencia:

Tabla 12: Modelo de tabla de contingencia.

| Producto TMPA | Observaciones | | |
|------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| | SI | NO | Total |
| SI | <i>Hit=a</i> | <i>False alarm=b</i> | <i>a+b</i> |
| NO | <i>Miss=c</i> | <i>Correct zero=d</i> | <i>c+d</i> |
| Total | <i>a+c</i> | <i>b+d</i> | <i>a+b+c+d=n</i> |

Fuente: (Jolliffe & Stephenson, 2003)

Elaboración: Autor.

De la Tabla 12 se deduce que un valor Hit (a) se origina cuando el producto TMPA y los valores observados registraron datos. False Alarm (b) se obtiene cuando el producto de precipitación registra un valor pero no en los valores observados. Se evidencian valores Miss (c) cuando el producto TMPA no registra datos pero si existen en los valores observados. Correct zero (d) se da cuando no existe valor del producto TMPA ni de los valores observados.

En la presente investigación se utilizó como umbral mínimo el valor de 0.1 mm y se generaron 100 umbrales de 0.3 mm con lo que el valor máximo del umbral alcanza los 29.8 mm.

Los indicadores cualitativos utilizados por Ward et al., (2011), Ochoa et al., (2014), (Prakash et al., 2016), (Tang et al., 2016) y (Satgé et al., 2017) son:

- Exactitud (ACC).
- Probabilidad de detección (POD).
- Proporción de Falsa Alarma (FAR).
- Probabilidad de detección corregida (ETS).
- Puntaje de habilidad Heidke (HSS).
- Frecuencia de sesgo (FBI).

En los siguientes puntos se describe brevemente los indicadores cualitativos. Se debe mencionar que para las fórmulas para el respectivo cálculo se debe tomar en consideración lo detallado en la Tabla 12.

4.2.2.1. Exactitud (ACC)

Conocido también como Proporción Correcta, se utiliza para identificar la proporción de resultados verdaderos (Jolliffe & Stephenson, 2003) (tanto registrados y no registrados por el producto TMPA) entre el número total de casos examinados. La fórmula para calcular el valor ACC se detalla a continuación:

$$ACC = \frac{a+d}{n} \quad (8)$$

Los valores de ACC varían entre 0 y 1; donde 0 representa que no existe ningún evento pronosticado y 1 cuando todos los eventos han sido pronosticados.

4.2.2.2. Probabilidad de detección (POD)

También conocido como tasa de acierto, se define como la proporción de ocurrencias que el producto TMPA registró correctamente (Tang et al., 2016). Es una estimación muestral de la probabilidad condicional de que el evento fue pronosticado, dado que fue observado.

Mientras más cercano a 1 es el valor de POD, mejor es la detección realizada por el satélite (Satgé et al., 2017). Para el cálculo de POD se emplea la siguiente fórmula:

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (9)$$

4.2.2.3. Proporción de falsa alarma (FAR)

Representa la proporción de ocurrencias que fueron registradas por el producto TMPA pero en la realidad no sucedieron (Tang et al., 2016). El término FAR es la probabilidad condicional al evento que se está pronosticando.

El valor de este término oscila entre 0 y 1. Mientras más cercano a 0 sea el valor quiere decir que mejor es el pronóstico realizado ya que no se han emitido falsas alarmas. La fórmula para calcular el término FAR es:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (10)$$

4.2.2.4. Probabilidad de detección corregida (ETS)

Determina la fracción de los datos que fueron debidamente registrados por el producto TMPA, ajustados por medio del número de detecciones (He) que se espera que ocurran aleatoriamente (Ward et al., 2011). El término ETS se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$ETS = \frac{a-He}{a+b+c-He} \quad (11)$$

$$He = \frac{(a+c)(a+b)}{n} \quad (12)$$

El valor perfecto de este indicador es 1.

4.2.2.5. Puntaje de habilidad de Heidke (HSS)

Este término se refiere a la exactitud del registro del producto TMPA respecto al valor observado tomado bajo cambios aleatorios. Es decir, mide la fracción de registros correctos después de eliminar aquellos pronósticos que serían correctos debido a cambios aleatorios. El valor de HSS oscila entre 0 y 1, donde 0 indica nada de acierto y 1 indica acierto perfecto (Jolliffe & Stephenson, 2003).

$$HSS = \frac{PC-E}{1-E} \quad (13)$$

Para el cálculo de PC:

$$PC = \frac{a+d}{n} \quad (14)$$

Para el cálculo de E:

$$E = \left(\frac{a+c}{n}\right)\left(\frac{a+b}{n}\right) + \left(\frac{b+d}{n}\right)\left(\frac{c+d}{n}\right) \quad (15)$$

4.2.2.6. Frecuencia de sesgo (FBI)

Consiste en la relación existente entre los eventos pronosticados con respecto al número de eventos observados. Los valores de FBI menores a 1 muestran subestimación del pronóstico, mientras que los valores mayores a 1 muestran sobrestimación del pronóstico (Ward et al., 2011).

El valor FBI se obtiene empleando la siguiente fórmula:

$$FBI = \frac{a+b}{a+c} \quad (16)$$

4.2.2.7. Desarrollo de script en R para el cálculo de indicadores cualitativos

El script para el cálculo de indicadores cualitativos, inicia con varias líneas de código destinadas a la creación de la tabla de contingencia en el que se registran los valores de acierto, falsa alarma, perdidos y cero correcto de acuerdo a lo indicado en la Tabla 12. Con estos valores registrados, se realizaron las operaciones matemáticas de las fórmulas señaladas en el punto 4.2.2, los resultados fueron almacenados en una lista.

Para mostrar los resultados de manera gráfica, se creó un data frame con los valores calculados de cada indicador cualitativo para el umbral de 0.1 a 29.8 con un intervalo de 0.3 (en total 100 valores). A partir de este data frame, se utilizó la función ggplot perteneciente a la librería ggplot2, con esta función se generó un gráfico para cada indicador cualitativo.

Los script desarrollados para el cálculo de indicadores cuantitativos así como los índices de detección, se encuentran en el Anexo 7. En el Anexo 8 se encuentra un ejemplo para la creación de la tabla de contingencia y el cálculo de los indicadores cualitativos.

4.3. PROCESOS DE CORRECCIÓN DE LOS DATOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Los sensores encargados de captar la precipitación internamente, incorporan algoritmos para realizar una corrección de la estimación, tal como lo describe Huffman et al., (2007) y Grimes et al., (1999) quienes utilizan procedimientos como Mean Bias Correction y/o el promedio ponderado por error inverso.

Del mismo modo, se han utilizado métodos de fusión de datos post análisis, por ejemplo los ajustes espaciales de TMPA utilizando el inverso al peso de la distancia, realizado por Lavado (2009). Double-kernel smoothing descrito por Li y Shao (2010) y por el vecino más cercano realizado por Vila et al., (2009)

Además, Almazroui (2011) realizó correcciones mediante el análisis de regresión entre los datos captados por los satélites meteorológicos y la precipitación captada por los pluviómetros a diversas escalas temporales. Esto, también fue realizado por Yin (2008) pero con datos a nivel mensual y correcciones, usando distribuciones de probabilidad (Anagnostou, Negri, & Adler, 1999).

Para la corrección de datos, igualmente se realizan técnicas geoestadísticas, como por ejemplo Kriging External Drift (KED) donde se combina la estimación y los datos de precipitación basados en el sensor infrarrojo de Meteosat (Grimes et al., 1999).

Para la presente investigación, la corrección de los valores de precipitación diaria del producto TMPA 3B42 se realizó utilizando varias técnicas descritas por Nerini et al., (2015), además se consideró el método de corrección propuesto por (Arias-Hidalgo, et al., 2013). Estos métodos propuestos por los autores, utilizan los datos de la precipitación observada a nivel diario. Para realizar la corrección de los valores del producto de acuerdo a las técnicas señaladas por Nerini et al., (2015) se consideró la librería Rainmerging desarrollada por Zulkafli (2014); esta librería se puede descargar en la siguiente dirección:

<https://github.com/zedzulkafli/Rainmerging>

Los métodos de corrección que se encuentran en la librería Rainmerging son:

- Mean Bias Correction.
- Double Kernel Smoothing.
- Kriging con External Drift.

El método de corrección Coeficiente de corrección K propuesto por Arias-Hidalgo et al., (2013), fue replicado en un script desarrollado en R tomando en consideración las fórmulas e indicaciones realizadas en su proyecto de investigación. Se debe mencionar que de acuerdo a un análisis realizado al método propuesto, se consideró que los valores menores a 0.1 deben ser 0 debido a que es el mínimo valor que puede estimar el producto TMPA 3B42 de acuerdo a sus especificaciones.

El periodo de tiempo considerado para realizar el proceso de corrección de los datos producto TMPA 3B42 fue desde el 1 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2014. En este intervalo de tiempo, se encuentran 6209 días, mismos que se tomaron en cuenta debido a que corresponde al tiempo en el que se dispone datos del producto TMPA. Por ello, es necesario analizar la disponibilidad de datos de las 17 estaciones señaladas en el capítulo 3 del presente documento, ya que para realizar la corrección de los datos es necesario que tanto los valores del producto como los valores observados tengan la misma temporalidad. Este análisis se realizó al momento de construir la base de datos de precipitación y se brindará una descripción más detallada de esto en el capítulo 5. Sin embargo, cabe mencionar que de las 17 estaciones consideradas inicialmente se tomaron en cuenta solamente 9.

4.3.1. Mean Bias Correction

Este método, corrige la estimación de los datos basados en la estimación realizada por los sensores remotos, multiplicando por el sesgo total entre los datos observados de precipitación y los valores estimados por los satélites, asumiendo un sesgo uniforme sobre el dominio espacial (Nerini et al., 2015).

Para cada evento diario, se calcula un factor de corrección B representado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^N Z_G(x_j)}{\sum_{j=1}^N Z_S(x_j)} \quad (17)$$

Dónde: N es el número estimaciones disponibles dentro del dominio del satélite, $Z_G(x_j)$ y $Z_S(x_j)$ son los datos observados de precipitación y las estimaciones del satélite en una ubicación j.

El valor corregido se obtiene multiplicando el valor del producto de precipitación de cada pixel por su respectivo factor de corrección.

4.3.2. Doble – kernel smoothing

De acuerdo a lo descrito por Nerini et al., (2015) esta técnica no paramétrica fue desarrollada por Li y Shao (2010), específicamente para aplicaciones con datos escasos. La idea principal del método, es la interpolación de los residuales puntuales ε_S utilizando la función de densidad de kernel y el ajuste del campo del satélite por el campo residual estimado.

El residual puntual dado en la en la posición $j = 1, \dots, N$ está definido por:

$$\varepsilon_{S_j} = \varepsilon_S(x_j) = Z_S(x_j) - Z_G(x_j) \quad (18)$$

Para generar un set completo de residuales (pseudo-residuals) se realiza una interpolación de primer nivel ε_{SS} en la misma grilla que los datos de satélite, en la posición de un punto de grilla dado $i = 1, \dots, M$, los residuales se definen de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{SS_i} = \frac{\sum_{j=1}^N \Lambda(\|H_i - H_j\|/b) \varepsilon_{S_j}}{\sum_{j=1}^N \Lambda(\|H_i - H_j\|/b)} \quad (19)$$

Donde $\|-\|$ es la normalización Euclidina y Λ es la función kernel definida como un kernel Gaussiano tal como lo señala Li y Shao (2010):

$$\Lambda(\|H_i - H_j\|/b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\|H_i - H_j\|/b)^2 \right] \quad (20)$$

En la ecuación anterior, H representa la posición de los puntos y el ancho de banda b se determina utilizando la regla de Silverman (1986).

$$b = \left(\frac{4\sigma^5}{3n} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (21)$$

De la regla de Silverman, n representa el número de muestra y σ la desviación estándar de las muestras. La interpolación de segundo nivel, es aplicada tanto para los residuales como para los pseudo-residuales, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{DS_k} = \frac{\sum_{j=1}^N \wedge(\|H_k - H_j\|/b_1) \varepsilon_{S_j} + \sum_{i=1}^M \wedge(\|H_k - H_i\|/b_2) \varepsilon_{SS_i}}{\sum_{j=1}^N \wedge(\|H_k - H_j\|/b_1) + \sum_{i=1}^M \wedge(\|H_k - H_i\|/b_2)} \quad (22)$$

El resultado de la corrección de datos se calcula de la siguiente manera:

$$Z_{DS_k} = Z_{S_k} - \varepsilon_{DS_k} \quad (23)$$

Dónde: Z_{DS_k} representa el valor del producto TMPA corregido, Z_{S_k} representa los valores del producto TMPA originales y ε_{DS_k} corresponde al factor de corrección.

Nerini et al., (2015) señala que el kernel smoothing no se basa en la suposición de estacionaridad, como es el caso de las técnicas geoestadísticas. De esta manera, la formulación de la corrección convergerá hacia el punto observado con una menor distancia.

4.3.3. Coeficiente de Corrección K

De acuerdo a lo descrito por Arias-Hidalgo, et al., (2013) el Coeficiente de Corrección K corresponde a un método mediante el cual se calculan los factores de corrección del sesgo por medio de la comparación de los valores estimados con los valores observados. Los valores de corrección del sesgo, son distribuidos espacialmente para mejorar los datos del satélite. Cabe señalar que el autor utilizó los datos corregidos por este método en la modelación hidrológica.

En este proyecto se realizó una modificación a la fórmula propuesta por Arias-Hidalgo, et al., (2013), que se detalla a continuación:

$$TRMM_{coor,j,d} = K \cdot TRMM_{j,m} \quad (24)$$

$$K = \frac{P_{i,d,m}}{TP_{i,m}} \quad (25)$$

Donde: K es el coeficiente de corrección distribuido en todas las ubicaciones j utilizando el método inverso al peso de la distancia (IDW).

$P_{i,d,m}$ es la precipitación a nivel diario en las ubicaciones i..

$TP_{i,m}$ es la precipitación total mensual del producto TMPA relacionado con cada estación meteorológica en las ubicaciones i.

$TRMM_{j,m}$ es el valor del producto TMPA a nivel mensual en la posición j durante el mes m.

$TRMM_{cor,j,d}$ es el valor corregido del producto TMPA a nivel diario en la posición j durante el día d.

4.3.4. Kriging

Kriging es el nombre genérico adoptado por los geoestadísticos para un conjunto de algoritmos generalizados de regresión de mínimos (Goovaerts, 1999). El método kriging es utilizado generalmente para realizar predicciones. Sin embargo, esta técnica es utilizada en varias aplicaciones entre las que cabe mencionar la simulación y el diseño de redes de muestreo óptimo.

Existen diferentes clases de estimaciones por medio de técnicas kriging, sin embargo, estas son modificaciones de las estimaciones de regresión lineal básicas. En este sentido, para predecir el valor de un atributo Z en una localización u_o denotada por $Z^*(u_o)$, se define de la siguiente manera:

$$Z^*(u_o) - m(u_o) = \sum_{\alpha=1}^{n(u_o)} \lambda_{\alpha}(u_o) [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})] \quad (26)$$

Dónde: λ_{α} define el peso asignado a los datos que intervienen dentro del sumatorio, $m(u_o)$ y $m(u_{\alpha})$ son los correspondientes valores esperados de $Z(u_o)$ y $Z(u_{\alpha})$ respectivamente y $n(u_o)$ número de elementos.

Cada una de las variaciones de kriging, tratan de minimizar la varianza del error $\sigma_E^2(u)$, que se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$\sigma_E^2(u) = Var[Z^*(u) - Z(u)] \quad (27)$$

El superíndice * indica el valor estimado en una localización determinada.

La expresión anterior, es posible minimizarla bajo la restricción de insesgadez, por lo que $E[Z^*(u) - Z(u)]=0$. La variable aleatoria que define el atributo en estudio se descompone en una componente residual $R(u)$ y otra determinística que define la tendencia $m(u)$ (Ginzo, 2009).

Lo anterior se puede expresar por medio de la siguiente expresión:

$$Z(u) = R(u) + m(u) \quad (28)$$

Como se mencionó, existen diferentes variantes de kriging, en este documento se considerará el kriging con external drift (KED).

Una función que es necesario conocer al utilizar las técnicas kriging, es el variograma. Esta, es utilizada usualmente para describir patrones espaciales y mide la disimilitud media entre datos separados por un vector h . A la mitad de esta función se denomina semivariograma (Goovaerts, 1999). A continuación se muestra la definición del semivariograma (isotrópico).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x+h) - Z(x)] \quad (29)$$

Donde γ es la semivarianza de la variable aleatoria Z entre dos puntos, $Z(x)$ es el valor de la variable en la ubicación x . Por otro lado, $Z(x+h)$ es otro valor muestral separado del anterior por una distancia h (Giraldo, 2011). La semivarianza no depende de una ubicación, solamente es función de la distancia h , de esta manera se asume la estacionaridad de la varianza de las diferencias separadas por la misma distancia. Además, se asume la isotropía del modelo, ya que γ no es función de la dirección.

El variograma puede ser estimado empíricamente a partir de las observaciones disponibles mediante el cálculo de la semivarianza γ para varias clases de distancias entre estimaciones. A esto se denomina variograma experimental empírico, una vez estimado el variograma experimental, es posible ajustar un modelo teórico de variograma. Todos los modelos teóricos tienen tres parámetros comunes que se describen a continuación:

Pepita o nugget (C_0)

Bohling (2005), describe este parámetro como la variabilidad a distancias más pequeñas que la separación de las muestras incluyendo el error de la media. De acuerdo a la bibliografía analizada, esto se puede producir por errores en la medición así como a fuentes espaciales de variación a distancias inferiores que el intervalo de muestreo.

Meseta (C_0+C_1)

La literatura investigada define a la meseta como el límite superior del semivariograma.

Rango (a)

Corresponde a la distancia a la cual el semivariograma comienza a aplanarse. Además, Bohling (2005), lo describe como el lugar a partir del cual la autocorrelación es cero.

En la Figura 36 se muestran los elementos del semivariograma.

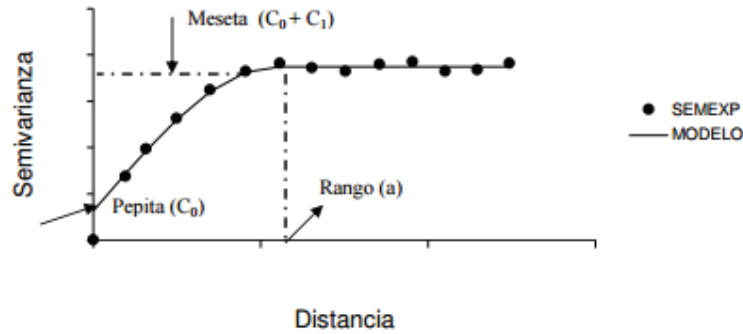


Figura 36. Parámetros que describen a un semivariograma.

Fuente: (Giraldo, 2011)

Modelo Esférico

Tiene una tendencia lineal en el origen, a medida que aumenta la distancia el valor tiende a ser constante hasta alcanzar el valor de la meseta.

La expresión matemática del modelo esférico se muestra a continuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (30)$$

Modelo Exponencial

Tiene una tendencia exponencial cerca del origen, el rango se define como la distancia a la que el semivariograma alcanza el 95% de la meseta.

La expresión del modelo exponencial se detalla a continuación:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right) \quad (31)$$

Modelo Gaussiano

Tiene una tendencia parabólica cerca del origen y al igual que el modelo exponencial, el rango es la distancia a la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta.

La fórmula del modelo Gaussiano se indica a continuación:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right) \quad (32)$$

En la Figura 37 se muestra la representación gráfica de los modelos teóricos descritos anteriormente.

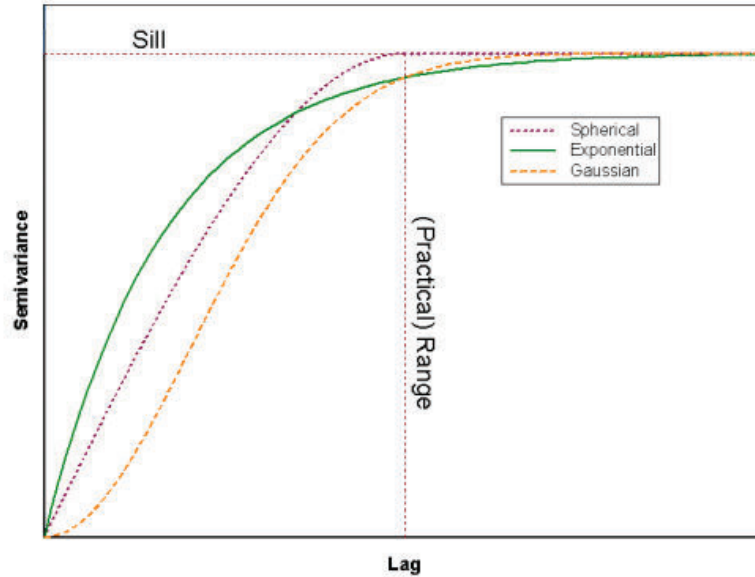


Figura 37. Modelos teóricos de semivariograma.

Fuente: (Bohling, 2005)

Una vez conocido el modelo del semivariograma, el valor desconocido se calcula como una distribución lineal del valor de precipitación conocido en una ubicación y los pesos son calculados en función del semivariograma.

Kriging con external drift (KED)

Nerini et al., (2015), define a este método como una extensión del Kriging ordinario, en la que se asume la no estacionaridad y se representa por el término de acumulación.

Del mismo modo, señala que KED requiere que el valor del satélite en la posición de predicción x_o sea igual al promedio ponderado de los valores de los satélites Z_s en posiciones calibradas x_j

La expresión de lo antes descrito viene dada por:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j Z_s(x_j) = Z_s(x_o) \quad (33)$$

Dónde: λ_j corresponde a los pesos en función del semivariograma, Z_s es el valor del producto TMPA en la ubicación (x_j) .

En la ecuación anterior incluyendo la minimización de errores se obtiene lo siguiente:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu_a + \mu_b Z_s(x_i) = \gamma(x_i, x_o) \quad (34)$$

En el Anexo 9, se encuentran los scripts en R aplicando la librería Rainmerging para realizar la corrección de los valores del producto TMPA 3B42 V7. El uso de esta librería requiere que se preparen y se organicen los datos de una forma específica, este formato es una lista que almacena en archivo tipo zoo y un archivo tipo spatial points data frame. En el primero se almacenan los valores de precipitación (observada y del producto TMPA), en el segundo archivo se almacena las coordenadas de las estaciones y los centroides de los píxeles del producto TMPA. En la presente investigación, se crearon dos listas; una denominada gauge donde se almacena la información correspondiente a los datos observados y otra lista denominada sat donde se almacena toda la información relacionada al producto TMPA. En el Anexo 10, se encuentran los ejemplos para la corrección de los productos de precipitación con los métodos considerados en esta investigación.

4.4. EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL PRODUCTO TMPA CORREGIDO

El uso de productos de precipitación satelital aplicados a la modelación hidrológica, ha sido analizado por diferentes autores en diferentes regiones del mundo, sin embargo, destaca la investigación realizada por (Arias-Hidalgo, et al., 2013) quien realizó la corrección de los productos TMPA 3B42 utilizando el coeficiente de corrección K señalado en el punto anterior. Los valores corregidos fueron ingresados en el modelo HEC-HMS generando valores de caudales que fueron comparados con los valores observados. Esta modelación, fue realizada en la cuenca del río Vinces.

Otro estudio relacionado fue realizado por Zulkafli Z. et al., (2014) quien realizó la comparación del producto TMPA 3B42 en sus versiones 6 y 7 a partir de la simulación de caudales con los valores de las diferentes versiones del producto TMPA y comparando los valores de caudales simulados con los caudales observados. La investigación se llevó a cabo en las cuencas de los ríos de los Andes y Amazónicas.

Zubieta (2013) realizó su investigación en las cuencas amazónicas de Ecuador y Perú con el propósito de evaluar el impacto de tres productos de precipitación satelital (TMPA, CMORPH y PERSIAN) en el balance hidrológico, para lo cual empleó el modelo MGB-IPH y consideró el periodo de tiempo comprendido entre el año 2003 y 2009.

En la presente investigación, se evalúa la aplicación en la modelación hidrológica del producto TMPA 3B42 V7 corregidas por diferentes métodos. El modelo hidrológico seleccionado para la evaluación, corresponde al modelo calibrado y validado por Tamayo (2017); en este modelo se ingresaron los valores de precipitación a manera de estaciones ficticias, por lo que se realizaron 5 modelaciones, 4 con los valores corregidos del producto TMPA y una extra con los valores originales (sin corrección). Los valores resultantes de las modelaciones, fueron comparados con los valores de caudales observados.

Es importante señalar que el periodo de calibración del modelo hidrológico desarrollado por Tamayo (2017) está comprendido entre el 1 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre de 1983 y el periodo de validación fue desde el 1 de enero de 1984 hasta el 31 de diciembre de 1986; la calibración fue realizada a nivel mensual por medio de un análisis de sensibilidad ejecutado con el programa SWAT CUP con el algoritmo SUFI-2 para determinar que parámetros tienen efectos en el modelo hidrológico así como sus respectivos valores para ser ingresados. El modelo hidrológico SWAT requiere como datos de entrada la siguiente información:

- Modelo digital de elevación.
- Drenajes.
- Cobertura vegetal y uso del suelo.
- Suelos.
- Datos de precipitación diario.
- Datos de temperatura diario, máximo y mínimo.

Se debe mencionar que el modelo hidrológico SWAT posee dentro de sus bases de datos un generador de clima que reproduce datos a nivel diario a partir de los valores promedio a nivel mensual (S. Neitsch et al., 2005). Cuando no existen datos para realizar la modelación, toma los datos del generador de clima para realizar la simulación. Las variables y valores utilizados para crear el generador de clima del modelo hidrológico utilizado en este proyecto, se encuentran ampliamente descritos en la investigación realizada por Tamayo (2017).

Con la información del modelo digital de elevación y los drenajes, se procedió a seleccionar los puntos de cierre de las subcuencas que se encuentran dentro de la cuenca de estudio. En total se delimitaron 26 subcuencas hidrográficas dentro de la cuenca de estudio y se identificaron 1018 HRU. En la

Figura 38, se muestran las subcuencas delimitadas para la modelación hidrológica.

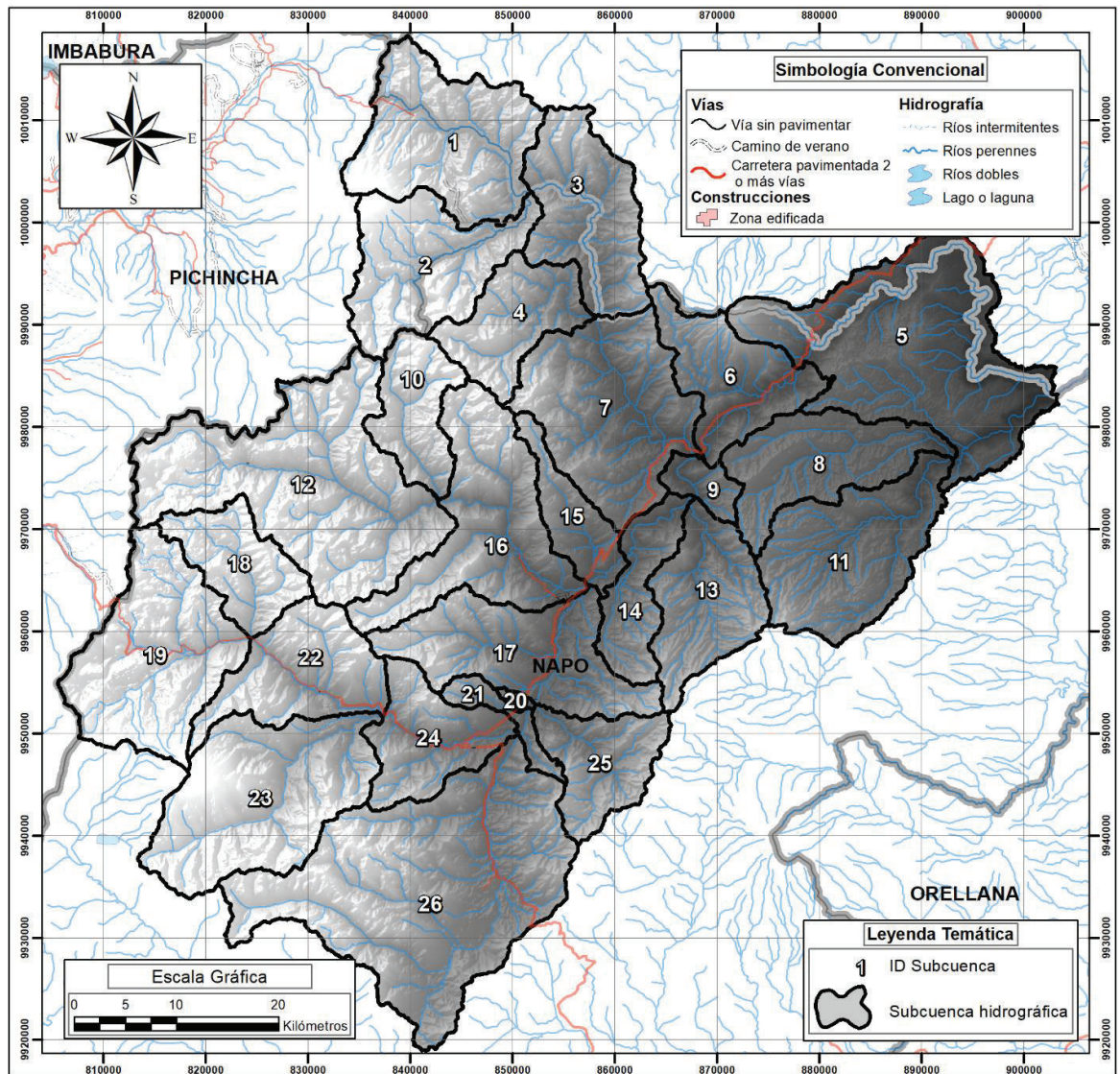


Figura 38. Subcuencas hidrográficas delimitadas utilizando el paquete computacional SWAT.

Fuente: IGM.

Elaboración: Autor.

Como valores de entrada de datos de precipitación se ingresaron a manera de estaciones ficticias los puntos que incorporan los datos de precipitación del producto TMPA 3B42 corregido por los métodos: Mean Bias Correction, Doble Kernel Smoothing y Coeficiente de Corrección K, del mismo modo se ingresaron los valores del producto sin corrección y precipitación observada.

De los cuarenta y dos puntos seleccionados para realizar las respectivas correcciones del producto TMPA, el modelo hidrológico solo considera diez, debido a su ubicación con relación a las veintiséis subcuencas hidrológicas en las que se dividió la cuenca principal. En la Figura 39, se muestran los puntos considerados como valores de entrada de precipitación.

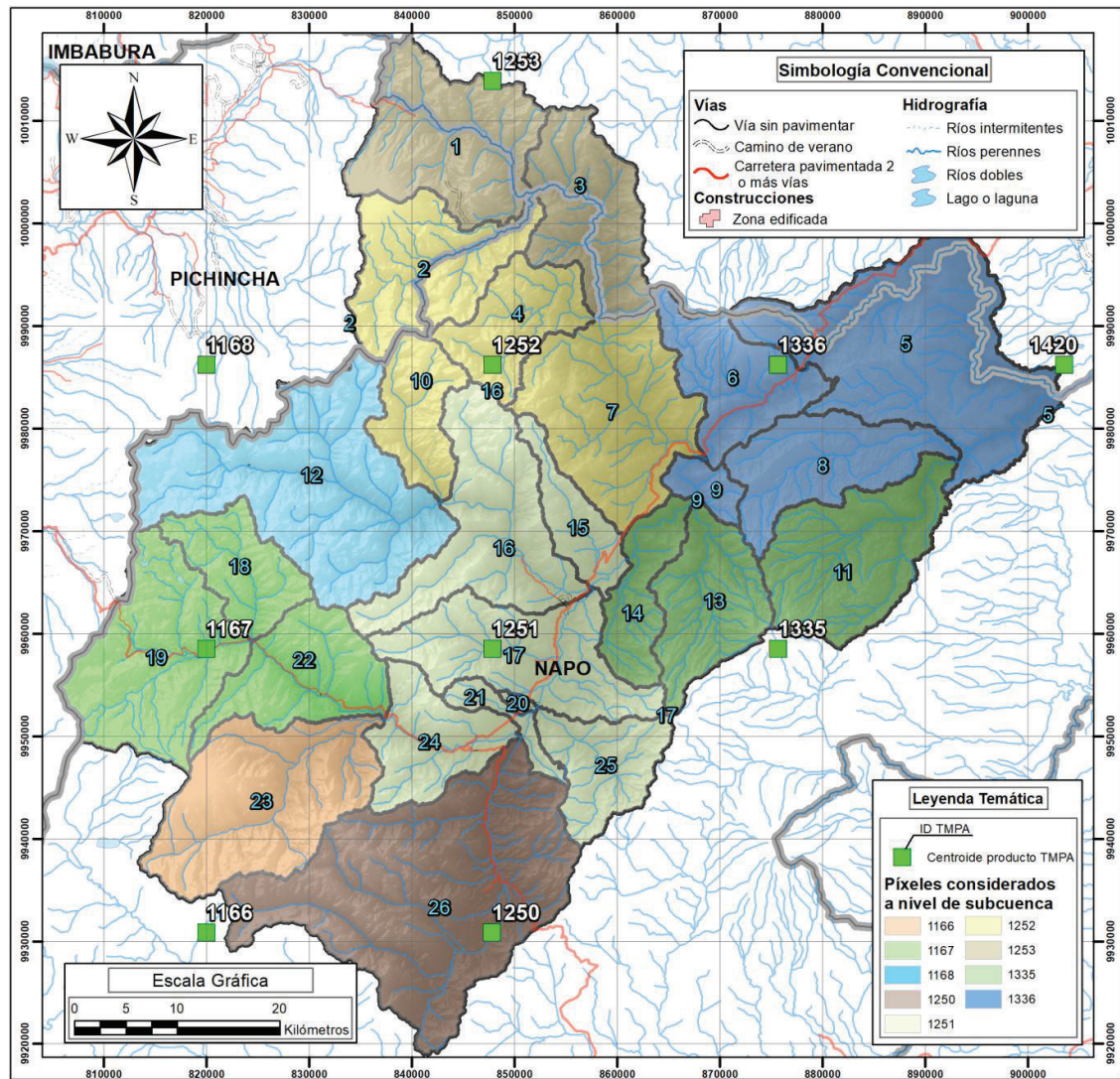


Figura 39. Ubicación de puntos de entrada con valores precipitación del producto TMPA corregida.

Fuente: IGM.

Elaboración: Autor.

De la figura anterior, se puede apreciar que cada subcuenca toma como dato de entrada de precipitación el punto que se encuentra a la menor distancia de su centroide. Por esta razón, se consideran solamente diez puntos como estaciones virtuales para la modelación hidrológica. La figura también muestra cómo se agrupan las subcuencas con relación a la ubicación de las estaciones virtuales.

Con los datos de las estaciones virtuales, se realizaron las respectivas simulaciones para cada uno de los métodos de corrección señalados en los puntos anteriores. El periodo de simulación fue desde el 1 de enero de 2008 hasta el 31 de diciembre de 2013, considerando 3 años como periodo de calentamiento para la simulación del modelo hidrológico. Se seleccionó este periodo de tiempo considerando que el objetivo del proyecto es comparar los caudales simulados con los caudales observados ya que las estaciones hidrológicas H0714 y H0715

son las que tienen datos en este intervalo de tiempo. No se consideró la estación H0731 debido a que la ubicación de la estación no se encuentra en un punto de cierre de una subcuenca y además está relativamente cerca de la estación H0715.

La simulación del modelo hidrológico, tomó en consideración los parámetros óptimos de calibración definidos por Tamayo (2017), los que se detallan en la Tabla 13 :

Tabla 13: Parámetros de calibración del modelo hidrológico

| PARÁMETRO | UNIDAD | MÉTODO DE REEMPLAZO | VALOR ÓPTIMO |
|-----------|---------------|------------------------------|--------------|
| CH_k2 | mm.hr-1 | Multiplicar el valor inicial | 8.8272 |
| MSK_CO2 | | Reemplazar con nuevo valor | 7.046735 |
| MSK_CO1 | | Reemplazar con nuevo valor | 0.159205 |
| MSK_X | | Reemplazar con nuevo valor | 0.08099 |
| ESCO | | Reemplazar con nuevo valor | 0.9931 |
| GW_REVAP | | Reemplazar con nuevo valor | 0.105044 |
| GW_QMN | mm | Reemplazar con nuevo valor | 613.125 |
| ALPHA_BF | días | Reemplazar con nuevo valor | 0.53954 |
| SOL_AWC | mm.mm-1 suelo | Multiplicar el valor inicial | 0.5005 |
| CN2 | | Multiplicar el valor inicial | 1.663085 |

Fuente: (Tamayo 2017).
Elaboración: Autor.

En la Tabla 14, se realiza una breve descripción de los parámetros mencionados en la tabla anterior de acuerdo a las definiciones realizadas por Arnold et al., (2012).

Tabla 14: Descripción de parámetros de calibración del modelo hidrológico.

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN |
|-----------|---|
| CH_k2 | Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal. |
| MSK_CO2 | Coefficiente de calibración usado para controlar el impacto del almacenamiento para caudal bajo. |
| MSK_CO1 | Coefficiente de calibración usado para controlar el impacto del almacenamiento para caudal normal. |
| MSK_X | Factor que controla la importancia relativa de los afluentes y las descargas en la determinación del almacenamiento en la cuenca. |
| ESCO | Factor de compensación de la evaporación del suelo. |

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN |
|-----------|---|
| | Este parámetro permite modificar la distribución de la profundidad para satisfacer la demanda de evaporación del suelo. |
| GW_REVAP | Coefficiente “revap” de agua subterránea. Expresa el movimiento del agua hacia arriba desde un acuífero poco confinado en la zona no saturada sobrepuesta. |
| GW_QMN | Umbral de la profundidad para que el agua del acuífero superficial pase al cauce principal superficial. |
| ALPHA_BF | Factor alpha de caudal base Es un índice directo de la respuesta del caudal subterráneo al cambio en la recarga. |
| SOL_AWC | Capacidad de agua disponible de la capa del suelo. |
| CN2 | Curva SCS inicial de escorrentía para una condición de humedad II. La curva SCS es una función de la permeabilidad del suelo, el uso del suelo y las condiciones del agua en el suelo. |

Fuente: Arnold et al., (2012).
Elaboración: Autor

Con el modelo hidrológico calibrado, se realizaron las simulaciones con los valores de precipitación corregida con los métodos ya señalados. Como resultado de las simulaciones se obtuvieron valores de caudales que fueron comparados con los valores observados en las estaciones hidrológicas H0714 y H0715 y de esta manera evaluar los resultados utilizando los indicadores cuantitativos coeficiente de Nash-Sutcliffe, coeficiente de correlación y el sesgo porcentual de acuerdo a lo señalado por Moriasi et al., (2007). Para el cálculo de los valores de los indicadores cuantitativos, se desarrolló un script en R en el que se utilizaron las funciones NSE, cor y pbias pertenecientes a la librería hydroGOF.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. BASE DE DATOS DE INFORMACIÓN SATELITAL Y OBSERVADA

Uno de los resultados de la investigación, es la base de datos de información de precipitación con datos a nivel diario. Esta base de datos, se encuentra almacenada en archivos tipo RData, que puede ser utilizado en cualquier otra investigación a partir del software R. Los datos generados correspondientes al producto TMPA 3B42 V7 y a la precipitación observada a través de la red de estaciones meteorológicas incorporan además su respectiva ubicación espacial, lo que permite realizar análisis espaciales de la información. En los siguientes puntos se detallan los resultados que se obtuvieron al estructurar y almacenar la información señalada.

5.1.1. Información de precipitación del producto TMPA 3B42 V7

La base de datos de precipitación a nivel diario generado con el producto TMPA inicia el 1 de enero de 1998 y finaliza el 31 de diciembre de 2014 dando un total de 6209 datos de precipitación para cada píxel. Esta información es generada de manera continua, sin embargo una vez realizado el análisis de los datos se pudo identificar que existe un mínimo de días en los que el producto TMPA 3B42 no produjo datos. El porcentaje de datos no válidos representados a nivel anual, se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: Porcentaje de datos válidos del producto de estimación de precipitación.

| AÑO | PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS | AÑO | PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS |
|------|-----------------------------|------|-----------------------------|
| 1998 | 91.78% | 2006 | 100% |
| 1999 | 98.36% | 2007 | 100% |
| 2000 | 100% | 2008 | 99.73% |
| 2001 | 99.73% | 2009 | 100% |
| 2002 | 100% | 2010 | 100% |
| 2003 | 99.73% | 2011 | 100% |
| 2004 | 98.09% | 2012 | 100% |
| 2005 | 100% | 2013 | 99.73% |
| | | 2014 | 100% |

Elaboración: Autor.

De la Tabla 15, se evidencia que el año en el que existe menor porcentaje de datos válidos corresponde a 1998, esto se debe a que fue el año en el que se inició con la captura de datos por lo que debieron surgir ciertos desperfectos en

las mediciones, lo que ocasionó que no sea posible realizar el cálculo de la precipitación.

Como resumen, se muestra la estimación de precipitación a nivel anual para los 10 píxeles utilizados como datos de ingreso para la generación del modelo hidrológico.

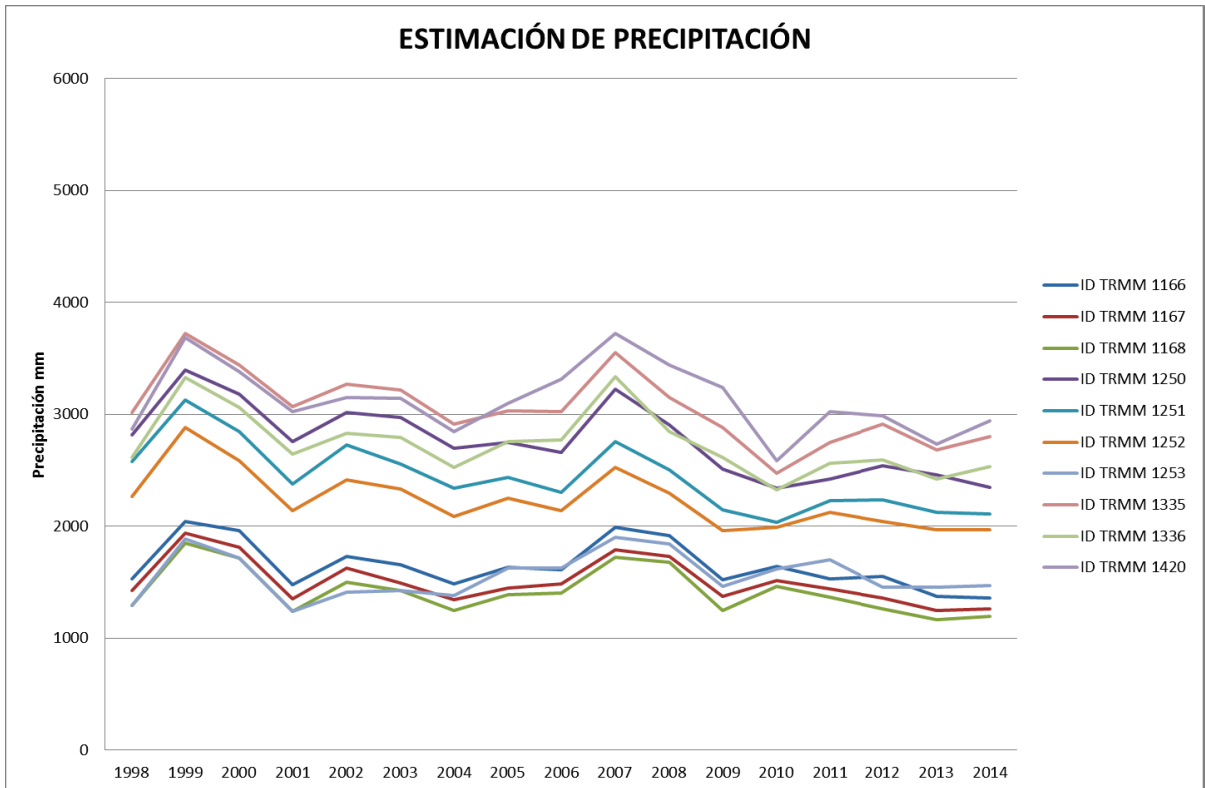


Figura 40. Resumen de resultados de precipitación a nivel anual para los píxeles considerados en la modelación hidrológica.

Elaboración: Autor

Del gráfico anterior, se puede evidenciar que el píxel que presenta mayores valores de precipitación corresponde al código IDTRMM 1420, ubicado hacia el oriente de la cuenca de estudio, lugar donde se registran mayores valores de precipitación, tal como lo señalado por Horna (2016). Realizando un análisis similar con relación al menor valor registrado, se evidencia que corresponde al píxel con código ID TRMM 1168, ubicado en la sección Noroccidental de la cuenca, lo que es corroborado por lo mencionado en la caracterización meteorológica del presente documento.

5.1.2. Información de precipitación observada

En el Capítulo 3 del presente documento, se mencionó que en la zona de estudio se encuentran 17 estaciones meteorológicas, la información de precipitación de estas estaciones se encuentra registrada desde el año 1963 hasta el año 2015. Sin embargo, al tratarse en su mayoría de mediciones que dependen de la lectura in situ realizadas por un observador, suelen existir días en los que no consta el respectivo registro de datos. En la Tabla 16, se indica un resumen del número total de datos y el porcentaje de datos vacíos.

Tabla 16: Resumen de datos de precipitación observada a nivel diario periodo 1963 a 2015.

| ESTACIÓN | # TOTAL DE DATOS | # TOTAL DE DATOS VACÍOS | % DE VACÍOS |
|----------|------------------|-------------------------|-------------|
| M0188 | 18535 | 2373 | 12.80% |
| M0201 | 6362 | 800 | 12.57% |
| M0203 | 14548 | 6357 | 43.70% |
| M0205 | 9102 | 4609 | 50.64% |
| M0208 | 5951 | 1428 | 24.00% |
| M0215 | 7200 | 1499 | 20.82% |
| M0293 | 10244 | 4274 | 41.72% |
| M0436 | 12022 | 5182 | 43.10% |
| M0486 | 12815 | 1492 | 11.64% |
| M0490 | 15551 | 2116 | 13.61% |
| M0545 | 6454 | 2110 | 32.69% |
| M0546 | 7305 | 2343 | 32.07% |
| M0699 | 1369 | 712 | 52.01% |
| M0703 | 1827 | 1347 | 73.73% |
| M1124 | 6484 | 2791 | 43.04% |
| M1203 | 6482 | 1339 | 20.66% |
| MC12 | 1888 | 63 | 3.34% |

Elaboración: Autor.

Como se evidencia en la Tabla 16, el número de porcentaje de datos vacíos es mayor que el porcentaje de valores obtenidos a partir de sensores remotos, debido principalmente a la forma en la que se toman los datos. Se esperaría que al implementar estaciones de monitoreo automáticas, los porcentajes de valores vacíos disminuyan.

Considerando el periodo de tiempo en el que se cuenta con información de precipitación del producto TMPA (1998-2014), existe un cambio significativo en los valores de datos válidos de precipitación observada, ya que no todas las estaciones cuentan con observaciones diarias en este periodo de tiempo. Esto, se evidencia con mayor claridad en la Tabla 17.

Tabla 17: Resumen de datos de precipitación observada a nivel diario periodo 1998 a 2014.

| ESTACIÓN | # TOTAL DE DATOS | # TOTAL DE DATOS VACÍOS | % DE VACÍOS | PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm) |
|--------------|------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|
| M0188 | 4092 | 2117 | 34.10% | 1286.2 |
| M0201 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0203 | 2433 | 3776 | 60.81% | 5460.6 |
| M0205 | 31 | 6178 | 99.50% | ----- |
| M0208 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0215 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0293 | 1821 | 4388 | 70.67% | 2013.8 |
| M0436 | 3767 | 2442 | 39.33% | 1336.2 |
| M0486 | 1078 | 5131 | 82.64% | 2146.9 |
| M0490 | 5225 | 984 | 15.85% | 2437.7 |
| M0545 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0546 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0699 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M0703 | 0 | 6209 | 100.00% | ----- |
| M1124 | 3053 | 3156 | 50.83% | 3084.7 |
| M1203 | 4778 | 1431 | 23.05% | 4683.1 |
| MC12 | 1743 | 4466 | 71.93% | 1465.9 |

Elaboración: Autor.

De la tabla anterior, claramente se denota que para realizar el proceso de corrección con los valores de precipitación observada, es necesario descartar las estaciones que no poseen datos en el periodo de tiempo comprendido entre 1998 y 2014. Estas estaciones son: M0201, M0205, M0208, M0215, M0545, M0545, M0699 y M0703, por lo que se utilizaron 9 estaciones para realizar la corrección del producto TMPA.

En la Tabla 18, se puede evidenciar la distribución temporal de los datos de precipitación observada.

Tabla 18: Resumen a nivel anual de datos observados de precipitación.

| ESTACIÓN \ AÑO | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | M0188 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M0201 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0203 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M0205 | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| M0208 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0215 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0293 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M0436 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M0486 | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| M0490 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M0545 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0546 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0699 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0703 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M1124 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| M1203 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| MC12 | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

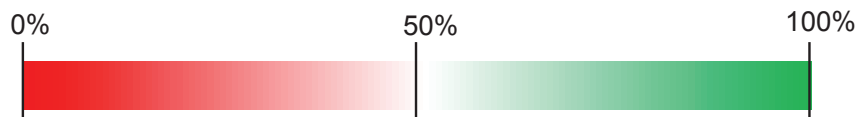
Elaboración: Autor.

De acuerdo a lo manifestado en párrafos anteriores, se presenta en la Tabla 19 una escala de color con el porcentaje de valores vacíos agregados a nivel anual para cada una de las nueve estaciones consideradas para el proceso de corrección del producto TMPA.

Tabla 19: Porcentaje de datos válidos observados desde 1998 a 2014 de las estimaciones de meteorológicas.

| AÑOS | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1998 | 67% | 0% | 100% | 0% | 89% | 83% | 84% | 100% | 0% |
| 1999 | 0% | 0% | 100% | 0% | 100% | 100% | 78% | 100% | 0% |
| 2000 | 0% | 0% | 100% | 0% | 98% | 92% | 61% | 58% | 0% |
| 2001 | 0% | 0% | 8% | 0% | 8% | 92% | 0% | 0% | 0% |
| 2002 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 99% | 0% | 0% | 0% |
| 2003 | 85% | 0% | 0% | 58% | 0% | 92% | 0% | 0% | 0% |
| 2004 | 100% | 0% | 0% | 100% | 0% | 92% | 0% | 100% | 0% |
| 2005 | 99% | 0% | 0% | 25% | 0% | 91% | 0% | 91% | 0% |
| 2006 | 100% | 8% | 66% | 60% | 0% | 84% | 0% | 100% | 0% |
| 2007 | 94% | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% | 83% | 99% | 0% |
| 2008 | 100% | 100% | 33% | 100% | 0% | 100% | 64% | 99% | 0% |

| AÑOS | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2009 | 91% | 100% | 17% | 100% | 0% | 83% | 65% | 90% | 0% |
| 2010 | 100% | 92% | 58% | 100% | 0% | 100% | 100% | 100% | 95% |
| 2011 | 87% | 100% | 0% | 99% | 0% | 25% | 100% | 100% | 100% |
| 2012 | 91% | 92% | 0% | 100% | 0% | 15% | 100% | 100% | 99% |
| 2013 | 83% | 75% | 16% | 98% | 0% | 83% | 100% | 100% | 96% |
| 2014 | 24% | 0% | 0% | 92% | 0% | 100% | 0% | 71% | 88% |



Elaboración: Autor.

La escala de calor presente en la tabla anterior, muestra el porcentaje de datos válidos de las 9 estaciones meteorológicas consideradas para la corrección del producto TMPA donde la gama de color rojo inicia en el 0% y termina en el 50% en color blanco. La gama de color verde inicia en el 50% y finaliza en el 100%. Como ejemplo se puede apreciar que la estación M0203 tiene 0% de datos válidos en el año 1999 y se celda se encuentra con color rojo intenso, mientras que la estación M1124 en el año 2010 tiene el 100% de datos válidos, por lo que la celda correspondiente tiene un color verde intenso.

Se indican en la Tabla 20, los valores de precipitación anual obtenida a través de la agregación de los datos diarios de la base de datos de precipitación observada generada como parte del presente estudio.

Tabla 20: Resumen de precipitación observada agregada a nivel anual.

| AÑO | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1998 | 965.8 | | 3536.6 | | 2504.5 | 1989 | 3274.6 | 6325.1 | |
| 1999 | | | 4615.9 | | 3086.7 | 2498.3 | 3312.7 | 2588.4 | |
| 2000 | | | 3499.3 | | 2855.5 | 2331.9 | 2274.9 | 1617.2 | |
| 2001 | | | 122.4 | | 140.8 | 2083 | | | |
| 2002 | | | | | | 2962.5 | | | |
| 2003 | 2333.8 | | | 734.3 | | 1925.5 | | | |
| 2004 | 1270.8 | | | 1449.3 | | 1909.3 | | 5214.7 | |
| 2005 | 1221.8 | | | 282.7 | | 2592.8 | | 4744.7 | |
| 2006 | 1084.7 | 649.1 | 2420.9 | 861.8 | | 2335.1 | | 5872 | |
| 2007 | 1325.9 | 6227.9 | | 1706.8 | | 3125 | 3206.1 | 5403.3 | |
| 2008 | 1366.2 | 6147.6 | 851.4 | 1712.5 | | 2666.8 | 2266.1 | 4965.7 | |
| 2009 | 1248.9 | 7108.9 | 546.6 | 1553.2 | | 1982.3 | 2753.6 | 4666.3 | |
| 2010 | 1661.8 | 4913.2 | 1861.9 | 1657.8 | | 2795.4 | 3846.8 | 4827.5 | 1484.6 |
| 2011 | 1506 | 6617.7 | | 1567.2 | | 2361.1 | 3063.8 | 5412.8 | 1414.5 |
| 2012 | 1165.2 | 8466.2 | | 1461.8 | | 2651.5 | 3143.4 | 5637.9 | 1452.6 |
| 2013 | 1210.8 | 3553.8 | 669.4 | 1393.2 | | 2186.7 | 3705 | 4637.8 | 1504.9 |

| AÑO | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2014 | 359.2 | | | 1653.2 | | 3044.2 | | 3649.5 | 1473 |
| PROMEDIO | 1286.2 | 5460.6 | 2013.8 | 1336.2 | 2146.9 | 2437.7 | 3084.7 | 4683.1 | 1465.9 |

Fuente: Autor.

5.1.3. Información de temperatura observada

La modelación hidrológica realizada por el SWAT, requiere como datos de entrada los valores de temperatura. El modelo hidrológico seleccionado para la evaluación de los valores corregidos del producto TMPA, consideró los datos de temperatura de las estaciones M0188, M0201 y M0208. Sin embargo es necesario indicar que solamente la estación M0188 posee datos de temperatura entre los años considerados para la corrección del producto TMPA. La temporalidad de los valores observados de temperatura se detalla en la Tabla 21:

Tabla 21: Resumen a nivel anual de datos observados de temperatura.

| AÑO ESTACIÓN | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| M0188 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0201 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M0208 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Elaboración: Autor.

Se evidencia que solo la estación M0188 tiene información de temperatura en el mismo período de tiempo que el producto de precipitación TMPA 3B42. Mientras que las otras dos estaciones disponen datos en tiempos anteriores al año 1998.

En la Tabla 22, se muestra el promedio anual de las temperaturas observadas en la estación M0188.

Tabla 22: Promedio anual de datos de temperatura observados en la estación M0188.

| MES \ AÑO | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-----------------|-----------|------|------|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Enero | 10.8 | | | | | | 11.8 | 11.3 | 10.8 | 10.6 | 11.3 | 10.7 | 10.8 | 11.4 | 11.4 | 9.96 | |
| Febrero | 11.6 | | | | | | 10.4 | 11.4 | 11 | 10.8 | 10.3 | 10.8 | 11.8 | 9.08 | 8.82 | 9.72 | 11.5 |
| Marzo | 10.9 | | | | | 10.7 | 10.8 | 11 | 10.8 | 9.78 | 10.4 | 11.6 | 11.5 | 11.4 | | | 11.6 |
| Abril | 11.3 | | | | | 10.8 | 11 | 11.3 | 11 | 11 | 11.1 | | 11.6 | 8.76 | | 10.7 | 10.3 |
| Mayo | 10.3 | | | | | 10.7 | 11.2 | 11.2 | 10.9 | 11.3 | 10.4 | 11.2 | 11 | 9.2 | | 9.97 | |
| Junio | 9.41 | | | | | 10.1 | 9.46 | 10.2 | 9.99 | 10 | 10.1 | 10.8 | 10.5 | 8.8 | | 10.6 | |
| Julio | 8.49 | | | | | 8.74 | 9.35 | 9.72 | 9.31 | 9.44 | 10 | 10.6 | 10.8 | 7.86 | | 10.7 | |
| Agosto | 7.9 | | | | | 9.14 | 9.18 | 9.83 | 9.5 | 9.98 | 10.3 | 11.2 | 10.3 | 10.3 | | 10.5 | |
| Septiembre | | | | | | 9.16 | 9.64 | 10.4 | 10.2 | 10.2 | 11 | 10.7 | 11.9 | 11 | 9.81 | 10.3 | |
| Octubre | | | | | | 9.81 | 11.2 | 11 | 11.5 | 11.9 | 11.9 | 12.2 | 11.5 | 13.2 | 11.1 | 10.6 | |
| Noviembre | | | | | | | 11.4 | 11.4 | 10.7 | 11.8 | 12.1 | 12.7 | 13.8 | 13.7 | 11.9 | | |
| Diciembre | | | | | | 10.6 | 11.1 | 11.2 | 11.3 | 11.1 | 11.5 | | 10.1 | | | | |
| PREMEDIO | 10 | | | | | 9.91 | 10.6 | 10.8 | 10.6 | 10.6 | 10.9 | 11.2 | 11.1 | 10.5 | 10.8 | 10.3 | 11.1 |

Elaboración: Autor.

De la Tabla 22, se puede mencionar que la temperatura anual promedio registrada en la estación M0188 es de 10.6 °C con una temperatura media máxima promedio de 14.6 °C y una mínima promedio de 5.4 °C. La temperatura anual promedio coincide con lo mencionado por Horna (2016) para los datos registrados en la cuenca hidrográfica de estudio.

5.1.4. Información de caudales observados

En la cuenca de estudio, se han identificado 9 estaciones hidrológicas, sin embargo se evidenció que las estaciones H0714, H0715 y H0733 coinciden con los puntos de cierre de la delimitación de las subcuencas hidrográficas delimitadas para la simulación del modelo hidrológico, por lo que fueron seleccionadas para los posteriores análisis de datos; tal como se realizó con la información de la precipitación observada, se analizó la temporalidad de los datos obtenidos. En la Tabla 23, se puede observar los años en los que se cuenta con datos observados de caudal a nivel diario.

Tabla 23: Resumen a nivel anual de datos observados de caudal.

| ESTACIÓN \ AÑO | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H0733 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H0714 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H0715 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Elaboración: Autor.

El rango de tiempo de la Tabla 23, considera la temporalidad del producto de precipitación TMPA 3B42 V7, en este lapso la estación H0733 no posee observaciones de caudal a nivel diario por lo que esta estación fue descartada

para la evaluación de los resultados de la simulación utilizando los datos del producto corregido. Las estaciones H0714 y H0715 tiene datos desde el año 2007 hasta el año 2014, en este sentido la simulación del modelo hidrológico considerará este periodo de tiempo ya que no tendría sentido realizar simulaciones años antes, en razón de que no existirán datos para realizar la evaluación. En la Tabla 24 y Tabla 25 se muestran los promedios de caudales observados a nivel diario en las estaciones H0714 y H0715.

Tabla 24: Promedio de caudal observado en la estación H0714.

| MES \ AÑO | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | PROMEDIO |
|------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Enero | | 254.1 | 408.4 | 164.0 | 179.8 | 308.1 | 204.9 | 264.5 | 254.8 |
| Febrero | | 352.2 | 339.2 | 226.6 | 160.1 | 300.2 | 359.1 | 171.1 | 273.2 |
| Marzo | | 178.7 | 254.7 | 206.7 | 189.5 | 430.8 | 320.1 | 367.4 | 278.3 |
| Abril | | 283.2 | 360.1 | 331.9 | 288.5 | 333.9 | 301.4 | 450.9 | 335.7 |
| Mayo | | 366.2 | 308.6 | 278.4 | 348.0 | 370.7 | 333.9 | 431.1 | 348.1 |
| Junio | | 479.7 | 1258.6 | 380.8 | 407.1 | 377.3 | 395.5 | 544.8 | 549.1 |
| Julio | | 409.6 | 388.9 | 308.6 | 483.9 | 414.7 | 396.2 | 467.7 | 409.9 |
| Agosto | | 256.7 | 502.3 | 247.5 | 267.5 | 317.1 | 376.0 | 408.5 | 339.4 |
| Septiembre | | 398.9 | 333.4 | 188.7 | 277.8 | 202.9 | 307.0 | 341.8 | 292.9 |
| Octubre | | 326.8 | 386.9 | 149.5 | 226.4 | 186.2 | 273.1 | 283.6 | 261.8 |
| Noviembre | 298.35 | 264.5 | 272.9 | 189.8 | 141.1 | 113.7 | 181.3 | 207.5 | 208.6 |
| Diciembre | 295.18 | 257.6 | 526.4 | 167.5 | 386.5 | 157.5 | 203.2 | 250.1 | 280.5 |
| PROMEDIO | 296.74 | 318.4 | 444.7 | 236.4 | 280.7 | 293.1 | 303.9 | 350.2 | 317.7 |

Elaboración: Autor.

Tabla 25: Promedio de caudal observado en la estación H0715.

| MES \ AÑO | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | PROMEDIO |
|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Enero | | | 218.3 | 79.8 | 84.2 | 156.4 | 115.3 | 148.2 | 133.7 |
| Febrero | | | 177.3 | 123.9 | 84.8 | 172.5 | 203.0 | 96.4 | 143.2 |
| Marzo | | | 109.9 | 111.3 | 98.4 | 239.7 | 182.1 | 220.9 | 160.4 |
| Abril | | | 209.6 | 181.5 | 162.1 | 177.2 | 174.4 | 266.7 | 195.3 |
| Mayo | | | 224.3 | 175.4 | 209.4 | 207.6 | 187.0 | 247.4 | 208.5 |
| Junio | | | 293.7 | 242.0 | 240.3 | 211.8 | 226.2 | 333.4 | 257.9 |
| Julio | | | 306.5 | 182.3 | 302.5 | 241.7 | 228.5 | 273.1 | 255.8 |
| Agosto | | | 238.5 | 164.2 | 154.7 | 195.5 | 212.1 | 235.0 | 200.0 |
| Septiembre | | | 143.1 | 118.8 | 166.2 | 113.0 | 171.1 | 193.1 | 150.9 |
| Octubre | | 147.6 | 118.9 | 95.6 | 108.2 | 107.0 | 151.7 | 156.1 | 123.0 |
| Noviembre | | 134.3 | 75.6 | 105.3 | 86.7 | 68.3 | 101.0 | 124.7 | 99.4 |
| Diciembre | | 119.5 | 78.1 | 73.3 | 191.6 | 83.0 | 112.2 | 135.2 | 113.3 |
| PROMEDIO | | 127.1 | 182.9 | 137.6 | 158.0 | 164.7 | 171.9 | 203.1 | 168.5 |

De las tablas anteriores, se evidencia que el mes en el que se registra mayor caudal corresponde a junio, con un promedio de 549.1 m³/s en la estación H0714

y 257.9 m³/s en la estación H0715. Esto, coincide con los resultados obtenidos por Horna (2016), del mismo modo el promedio general de los caudales observados se encuentra muy cercano a los valores descritos por Tamayo (2017) quien consideró para su análisis periodos de tiempo más extensos.

En el Anexo 11, se encuentra la disponibilidad de datos observados a nivel diario de precipitación, temperatura y caudales desde el año 1963 hasta el año 2015.

5.2. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO TMPA EN BASE A OBSERVACIONES

El insumo para el cálculo de las funciones objetivo o indicadores estadísticos, es la información de del producto TMPA y la información de precipitación observada a nivel diario, para esto se utilizaron las bases de datos previamente generadas.

Los indicadores cuantitativos se obtuvieron a través de la comparación de los datos observados con el respectivo valor de precipitación satelital asignado al centroide del píxel correspondiente. En la sección de metodología se mencionó como se realizó la identificación del píxel más cercano a la ubicación de la estación meteorológica.

A continuación se indican los códigos de las estaciones meteorológicas así como el píxel del centroide del producto TMPA correspondiente y su distancia en línea recta medida entre cada punto.

Tabla 26: Estaciones meteorológicas y centroides de píxeles correspondientes.

| ESTACIÓN | CENTROIDE PÍXEL TMPA | DISTANCIA (m) |
|----------|----------------------------|------------------|
| M0188 | 1167 | 1934.8 |
| M0203 | 1336 | 14043.6 |
| M0293 | 1503 | 9477.4 |
| M0436 | 1167 | 11650.6 |
| M0486 | 1251 | 7191.1 |
| M0490 | 1251 | 6314.7 |
| M1124 | 1250 | 8326.6 |
| M1203 | 1421 | 10284.1 |
| MC12 | 1167 | 13434.3 |

Elaboración: Autor.

5.2.1. Indicadores Cuantitativos

Los indicadores cuantitativos calculados son:

- Coeficiente de correlación.

- Error medio cuadrático.
- Error medio absoluto.
- Error medio.
- Sesgo Porcentual.
- Coeficiente de Nash.

Los valores calculados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Resultados del cálculo de indicadores cuantitativos a nivel diario.

| ESTACIÓN | COR - | RMSE mm/d | MAE mm/d | ME mm/d | PBias % | NSE - |
|----------|-------------|--------------|-------------|------------|------------|-------------|
| M0188 | 0.18 | 10.20 | 5.22 | -0.02 | -0.40 | -0.48 |
| M0203 | 0.35 | 26.26 | 15.13 | -10.47 | -58.40 | -0.06 |
| M0293 | 0.51 | 16.43 | 9.05 | -0.40 | -4.00 | 0.09 |
| M0436 | 0.23 | 8.42 | 4.99 | -0.25 | -5.80 | -1.04 |
| M0486 | 0.14 | 15.16 | 9.78 | -0.07 | -0.80 | -1.70 |
| M0490 | 0.13 | 19.36 | 9.48 | -1.10 | -13.80 | -0.38 |
| M1124 | 0.25 | 16.28 | 9.87 | -2.41 | -23.80 | -0.44 |
| M1203 | 0.44 | 20.39 | 11.26 | -7.31 | -53.70 | 0.07 |
| MC12 | 0.24 | 7.98 | 4.69 | -0.44 | -10.40 | -1.15 |

Elaboración: Autor.

En la Tabla 27, se muestra resultado con color azul los mejores resultados del análisis realizado a los indicadores cuantitativos, una descripción más amplia de los resultados obtenidos de las funciones objetivo se detalla en los siguientes párrafos.

Con respecto al coeficiente de correlación, se puede evidenciar que las simulaciones de precipitación tienen un mayor coeficiente de correlación en las estaciones M0293 (0.51) y en la M1203 (0.44). Es importante señalar que estas estaciones se encuentran en la zona baja de la cuenca hidrográfica de estudio. Por otra parte, los valores de estimación de precipitación que muestran menor correlación corresponden a los relacionados con la estación M0490 alcanzando un valor de 0.13, misma que se encuentra ubicada en la zona de altitud media. Los valores de correlación obtenidos, no discrepan sustancialmente con los resultados obtenidos por Arias-Hidalgo, et al., (2013) quien menciona en su investigación realizada que se obtuvieron correlaciones generalmente menores a 0.3.

Se debe destacar que en general los valores de correlación obtenidos tienen signo positivo, es decir que la relación entre los dos valores es directa lo que significa que, a valores altos de precipitación observada le corresponden valores altos de precipitación generada por el producto TMPA.

El menor valor de error medio cuadrático es de 7.98 y corresponden a los relacionados con la estación MC12 ubicada en la zona media; el valor más alto

alcanza los 26.26 mm correspondientes a los valores relacionados a la estación M0203 ubicado en la zona media. Los valores del error medio cuadrático obtenidos, se encuentran en el mismo orden que los señalados por Nerini et al., (2015) quien reporta un valor medio de 14.32 mm.

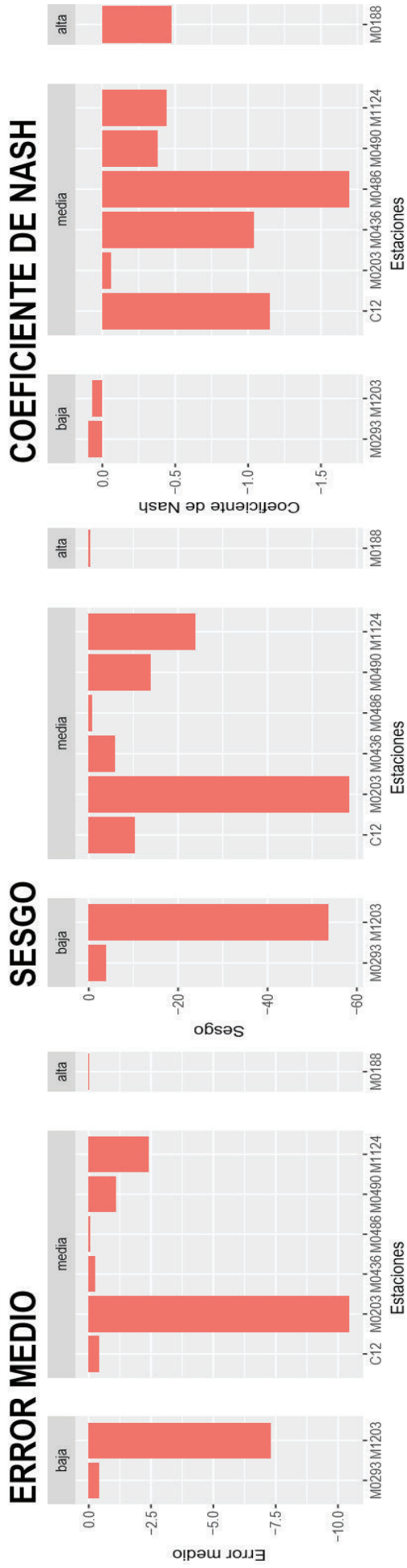
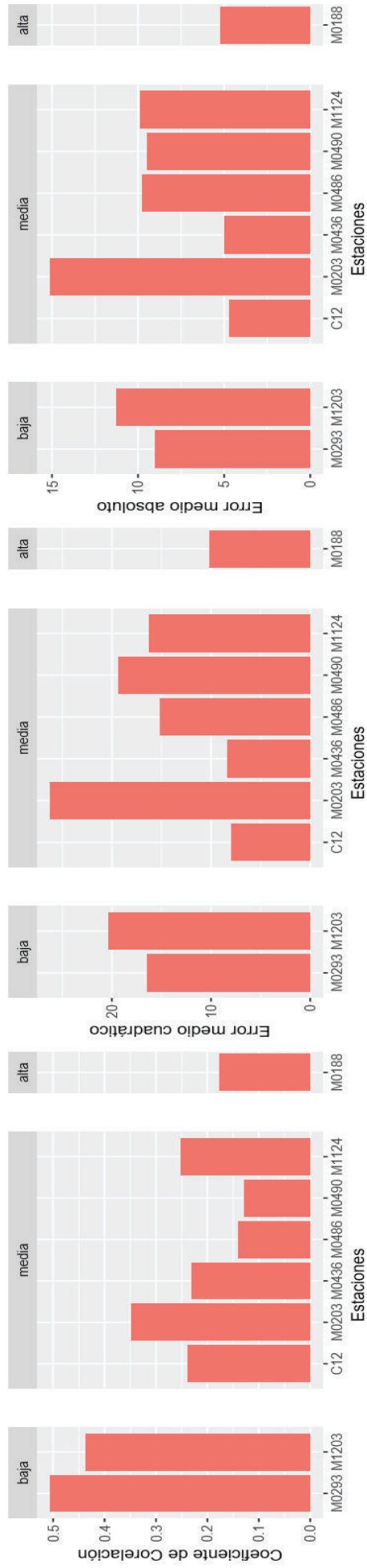
El menor valor del error medio absoluto corresponde a los datos de estimación de precipitación relacionados con la estación MC12. Para este caso el valor es de 4.69, el valor más alto se registran a los valores asociados con la estación M0203 ubicada también en la zona media que, en este caso se tiene un *error medio absoluto de 15.13. Se debe destacar que el promedio del error medio absoluto de las estaciones consideradas en el presente estudio es 8.83 mm/día, este valor es muy semejante al determinado por Nerini et al., (2015) quien reporta 8.71 mm/día

El error medio alcanza el menor valor con los datos de la estimación de la precipitación de los valores relacionados con la estación M0188 ubicada en la zona alta. En general, todos los valores del error medio tienen un valor negativo lo que determina que el producto de precipitación subestima los valores, esto se contrasta con lo indicado por Arias-Hidalgo, et al., (2013).

La probabilidad del sesgo con un menor valor corresponde a los valores asociados con la estación M0188, donde se alcanza un resultado de -0.40%, mientras que el valor menos favorable corresponde a los datos asociados con la estación M0203, ubicado en la región media de la cuenca donde se obtuvo un porcentaje de -58.4. Con relación a estos valores Arias-Hidalgo, et al., (2013) señala que a nivel diario y semanal, los valores del sesgo porcentual están alrededor del 50%. Es importante indicar además que todos los valores analizados reportaron un sesgo porcentual negativo, lo que significa que existe una subestimación del producto de precipitación que es reportado por Manz et al., (2016).

Con relación al coeficiente de Nash-Sutcliffe, se puede evidenciar que los valores resultantes son bajos, sin embargo el mejor valor alcanzado corresponde a las estimaciones relacionadas con la estación M0293 con 0.09, misma que se encuentra ubicada en la zona baja. El valor menos favorable del coeficiente NSE, corresponde a los datos asociados a la estación M0486, ubicado en la zona media donde resultaron valores de -1.70. Estos valores se encuentran en órdenes similares a los reportados por Zulkafli et al., (2014) y por Nerini et al., (2015).

De manera gráfica, se muestran los indicadores estadísticos de las estimaciones de precipitación relacionadas para cada estación meteorológica.



COEFICIENTE DE NASH

SESGO

ERROR MEDIO

Figura 41. Indicadores cuantitativos calculados entre las estimaciones de precipitación y los valores observados. Elaboración: Autor.

De la Figura 41, se puede evidenciar que los datos relacionados a las estaciones ubicadas en la zona baja, tienen el valor más alto de correlación mientras que los valores más bajos de coeficiente de correlación están asociados a la estación que se encuentra en la zona alta, esto es corroborado por Buytaert, Celleri, Willems, Bièvre y Wyseure, (2006) quienes indican que en regiones montañosas los patrones de precipitación son influenciados por la topografía irregular, la gran variabilidad en altura, la pendiente y fuertes vientos.

En lo referente a los errores, no existe una diferenciación clara entre las zonas altitudinales, sin embargo se puede destacar que en la sección alta se registran los menores errores en términos generales. En lo que respecta al coeficiente de Nash-Sutcliffe, los mejores valores registrados se encuentran asociados a las estaciones que se encuentran en la zona baja, mientras que en la zona alta, se registran los valores más bajos. Esto, refuerza el argumento de que es más complejo representar la variabilidad espacial de la precipitación en las zonas montañosas, tal como lo señala Buytaert et al., (2006)

5.2.2. Indicadores Cualitativos

A partir del script desarrollado en R, se ha podido calcular los siguientes indicadores de detección:

- Probabilidad de detección (POD).
- Falsa Alarma (FAR).
- Exactitud (ACC).
- Frecuencia de sesgo (FBI).
- Probabilidad de detección corregida (ETS).
- Puntaje de habilidad Heidke (HSS).

Con el propósito de exponer de mejor manera los resultados, se han preparado gráficos para cada uno de los indicadores tomando como base la correspondencia de las estimaciones de precipitación con los valores observados por medio de las estaciones meteorológicas.

Los gráficos de los indicadores cuantitativos se encuentran en el Anexo 12.

5.2.2.1. Probabilidad de detección (POD)

La probabilidad de detección para las estimaciones de los valores de precipitación relacionados con los datos observados, tiende a disminuir conforme aumenta la precipitación, esto es contrastado con lo mencionado por Vila et al., (2009) quien reporta la misma tendencia para los valores diarios del producto. Del mismo modo, Castro (2014) menciona que a nivel mensual, a medida que aumenta la precipitación disminuye la detección del satélite.

Los datos de estimación que mayor probabilidad de detección tienen, se encuentran relacionados con la estación M0293 correspondiente a la zona baja

del área de estudio. Mientras que los que presentan menor probabilidad de detección corresponden a los relacionados con la estación M0188 correspondiente a la zona alta del área de estudio.

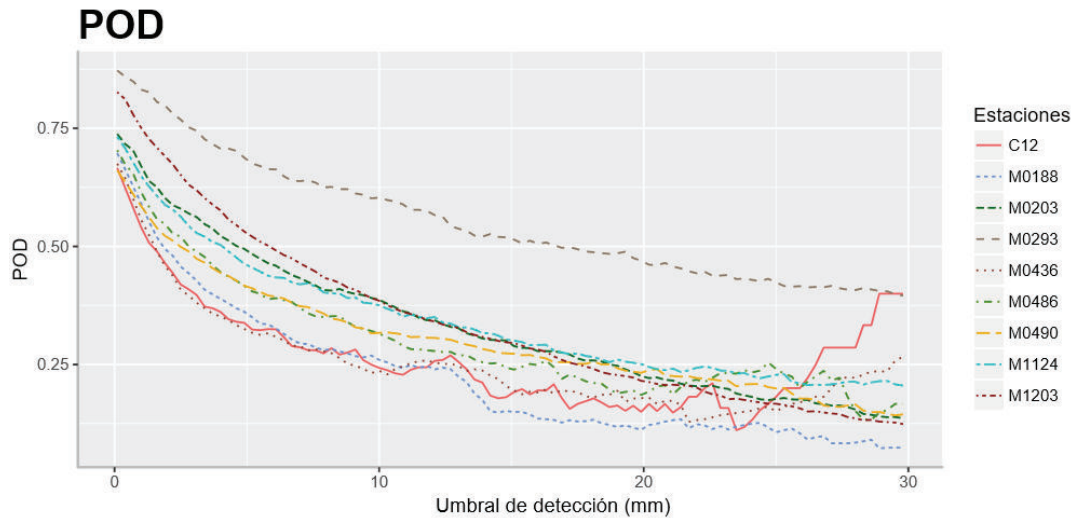


Figura 42. Probabilidad de detección calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.
Elaboración: Autor.

5.2.2.2. Falsa Alarma (FAR)

A medida que aumentan los valores de la estimación de la precipitación, aumentan las falsas alarmas, esto fue determinado por Vila et al., (2009) en su análisis realizado. La estación que presenta más falsas alarmas corresponde a los datos relacionados con la estación M0188, al contrario las estimaciones que presentan menores falsas alarmas corresponden a las relacionadas con las estaciones M0203 y M1203. En general, de acuerdo a los resultados obtenidos se puede mencionar que en la región baja del área de estudio se produce menor incidencia de falsas alarmas, mientras que en la región alta es donde se registran con mayor frecuencia, esto es corroborado por Castro (2014) quien menciona que en la región de la sierra se registran más falsas alarmas que en la costa y en el oriente.

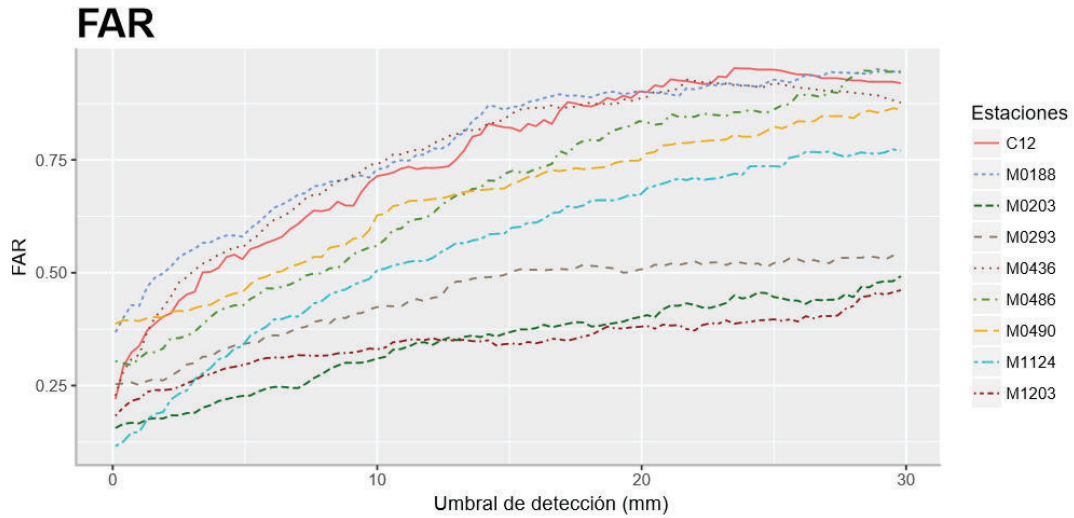


Figura 43. Falsa alarma calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.

Elaboración: Autor.

5.2.2.3. Exactitud (ACC)

El valor de exactitud, permite identificar la proporción de resultados verdaderos (tanto positivos como negativos). Para este indicador de acuerdo a la Figura 44, se puede evidenciar que a bajas precipitaciones no se obtiene una buena exactitud. Sin embargo, a medida que el valor de precipitación aumenta, también lo hace la exactitud. Las estimaciones que presentan una mayor exactitud corresponden a los valores asociados con las estaciones MC012, M0436 y M0188 que se encuentran ubicadas en la zona media, las dos primeras y la última en la zona alta.

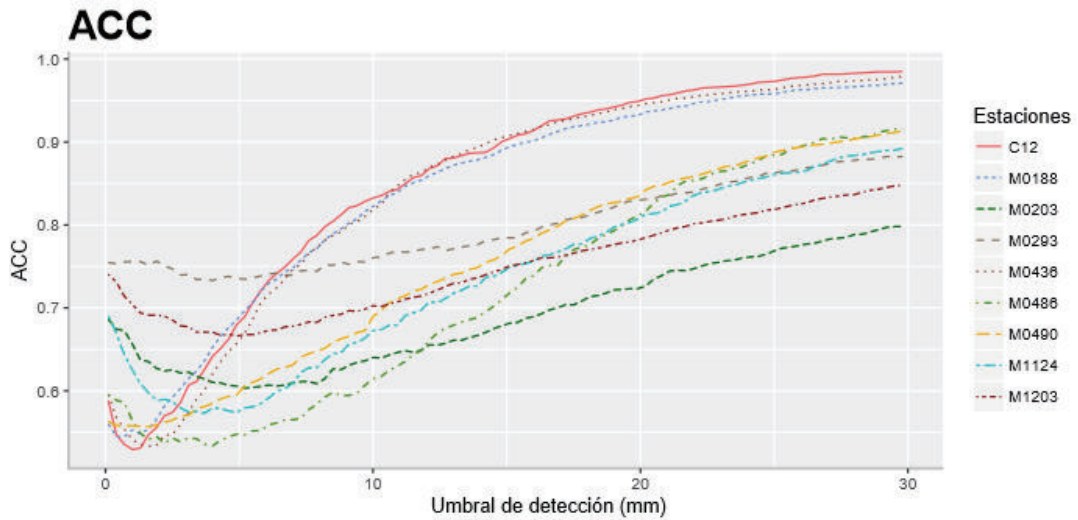


Figura 44. Exactitud calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.

Elaboración: Autor.

5.2.2.4. Frecuencia de sesgo (FBI)

La frecuencia del sesgo permite analizar la relación existente entre los eventos estimados con respecto al número de eventos observados.

De acuerdo a la bibliografía citada en la base teórica, los valores asociados a las estaciones M0203 y M1203 presentan una subestimación, esto también se traduce en el elevado valor de errores registrados así como el porcentaje del sesgo obtenido. Las estimaciones que presentan tendencia a sobre estimación corresponden a las valores asociados con las estaciones: MC012, M0486, M0436 y M0188. Los valores asociados a las estaciones M0490, M1124 y M0293 no presentan subestimación ni sobre estimación con relación a los valores observados.

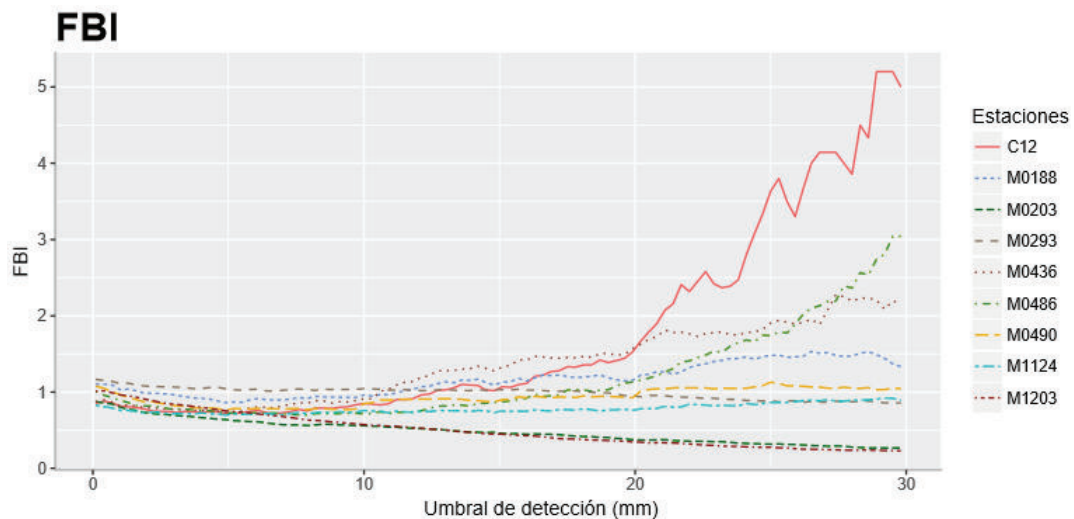


Figura 45. Frecuencia de sesgo calculada entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.

Elaboración: Autor.

5.2.2.5. Probabilidad de detección corregida (ETS)

La probabilidad de detección corregida, de acuerdo a la bibliografía citada, es mejor cuanto más cercano a 1 es el valor. Del análisis realizado, se puede evidenciar que en general los valores de ETS, son relativamente bajos y que los valores tienden a disminuir ligeramente cuando aumenta la precipitación, esta tendencia también fue determinado por Vila et al., (2009).

Los valores de estimación relacionados con la estación M0293, alcanzan un valor máximo de 0.35, mientras que el valor más bajo con un registro mínimo de precipitación, corresponde a los valores relacionados con la estación MC12. Cuando existe mayor cantidad de precipitación, los valores estimados relacionados con la estación M0188 tienden a cero. La mejor probabilidad se obtuvo para los valores ubicados en la zona baja de la cuenca, mientras que las peores probabilidades se registraron en las zonas alta y media de la cuenca.

En la Figura 46, se muestra el comportamiento de (ETS) de los valores relacionados con las 9 estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

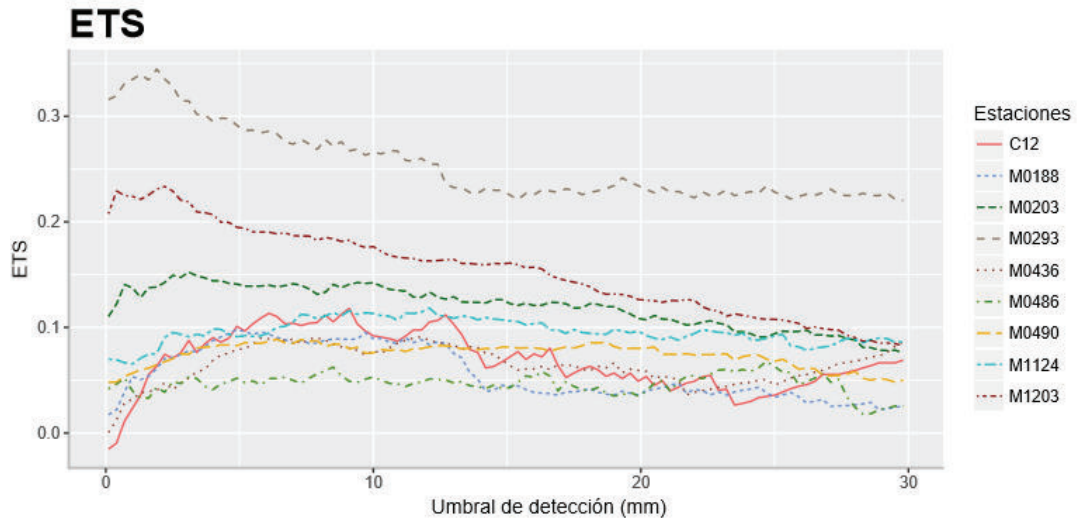


Figura 46. Probabilidad de detección corregida entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.

Fuente: Autor.

5.2.2.6. Puntaje de habilidad de Heidke (HSS)

En general el índice HSS, tiende a disminuir a manera que aumenta la precipitación. Los mejores resultados de este índice, corresponde a los datos relacionados con la estación M0293, mientras que los valores de estimación con menor índice HSS corresponden a los datos relacionados con las estaciones MC12, M0188 y M0486, esto es claramente identificable en la Figura 47.

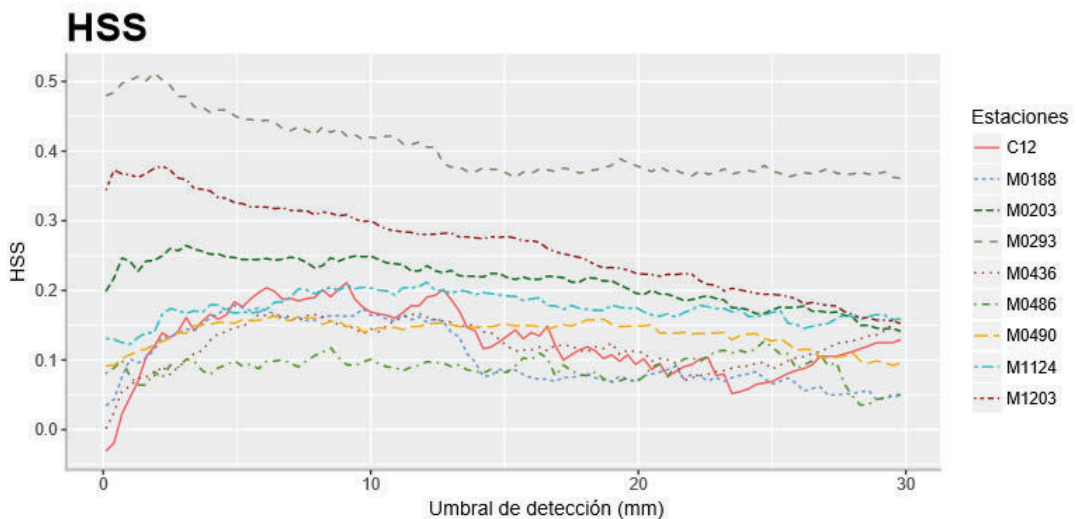


Figura 47. Puntaje de habilidad de Heidke calculado entre las estimaciones de precipitación y los valores observados.

Elaboración: Autor.

En resumen, se puede evidenciar que los mejores valores del índice HSS se obtienen en zona baja del área de estudio, mientras que los valores más bajos del índice se obtuvieron en la zona alta y media de la cuenca de estudio.

5.3. PROCESOS DE CORRECCIÓN DE LAS ESTIMACIONES TMPA

La corrección realizada a las estimaciones de precipitación del producto TMPA 3B42 contempló 42 píxeles que se encuentran en la cuenca de estudio así como en la zona externa. Es necesario indicar que en la modelación hidrográfica el modelo SWAT utilizó solamente 10 píxeles de acuerdo a la distribución de las microcuencas. La corrección realizada al producto TMPA se realizó a nivel diario.

Como resultado del método de corrección, se generó un set de datos con los nuevos valores de precipitación. Los valores de corrección con el método MBC y KCC se realizaron desde el 1 de enero de 1998 hasta el 31 de diciembre de 2014, con el método DS la corrección se realizó desde el 1 de enero de 2005 hasta el 31 de diciembre de 2014 y para el método de corrección KED el intervalo de tiempo considerado fue del el 1 de agosto de 2009 hasta el 26 de mayo de 2011. La variación de los intervalos de tiempo para la corrección se debe al número de datos mínimos que solicita el método para su ejecución. En la Figura 48 se muestra el número total de estaciones con datos observados válidos a nivel diario.

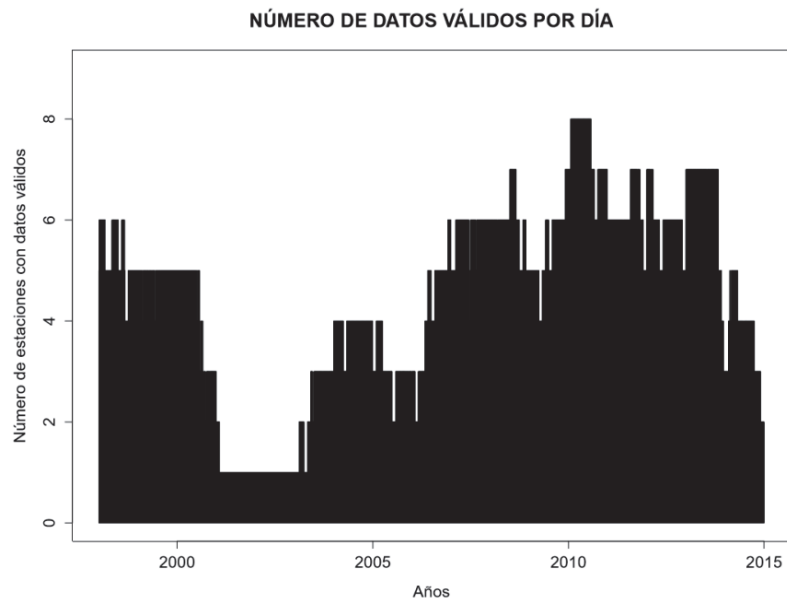


Figura 48. Resumen del número de datos observados válidos por día.
Elaboración: Autor.

De acuerdo a lo indicado en la Figura 48, se debe mencionar que en general el 43,2% de días considerados en la investigación se tiene hasta 4 estaciones con datos de precipitación observada, otro 43% de días tienen hasta 5 estaciones con datos válidos a nivel diario y tan solo el 13,8% tienen hasta 8 observaciones a

nivel diario de precipitación. El número máximo de estaciones con observaciones de precipitación diaria se encuentra en el año 2010. Las estaciones que se incorporan en este periodo de tiempo corresponden a MC12 y M0293.

Como resumen se muestran los valores de precipitación agregados a nivel anual (para los métodos de corrección MBC, DS y KCC) y a nivel mensual (para el método de corrección KED) de los 10 píxeles que fueron considerados en la modelación hidrológica. Para los gráficos agregados a nivel anual, el periodo de tiempo considerado es desde el año 2008 hasta el año 2013, debido a que en este rango de tiempo se cuenta con información hidrológica y será el tiempo en el que se ejecute la simulación.

5.3.1. Mean Bias Correction

El primer método de corrección seleccionado fue Mean Bias Correction. Los valores corregidos de la estimación de precipitación agregado a nivel anual se muestran en la Figura 49.

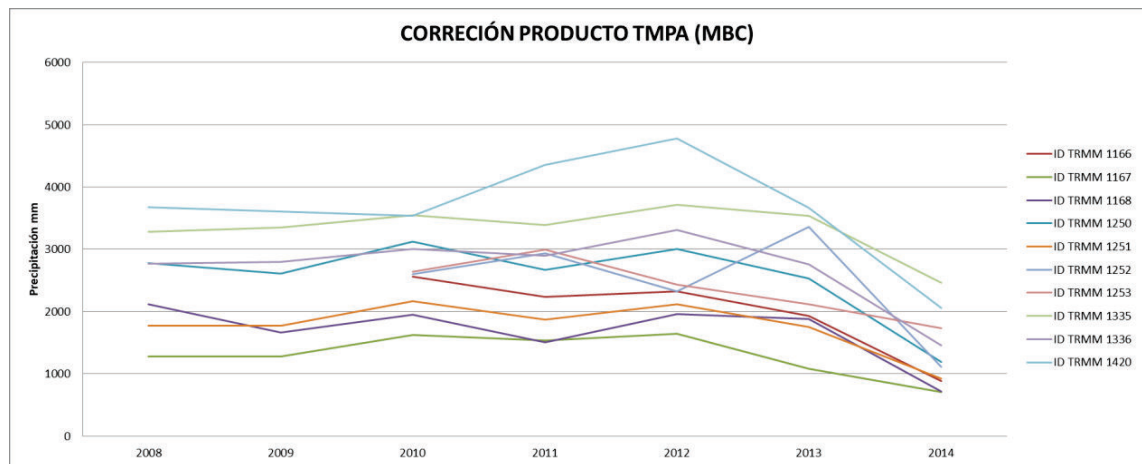


Figura 49. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Mean Bias Correction.

Elaboración: Autor.

Como resultado de la corrección de la estimación de precipitación por medio del método Mean Bias Correction, se obtuvieron valores superiores a los 10000 mm los que fueron descartados en el presente análisis, debido a que sobrepasan los valores anuales registrados en la cuenca de estudio.

5.3.2. Doble Kernel Smoothing

Se generó un nuevo set de datos corregidos por medio del método Doble Kernel Smoothing. A continuación se muestra un resumen de las estimaciones de precipitación acumuladas a nivel anual.

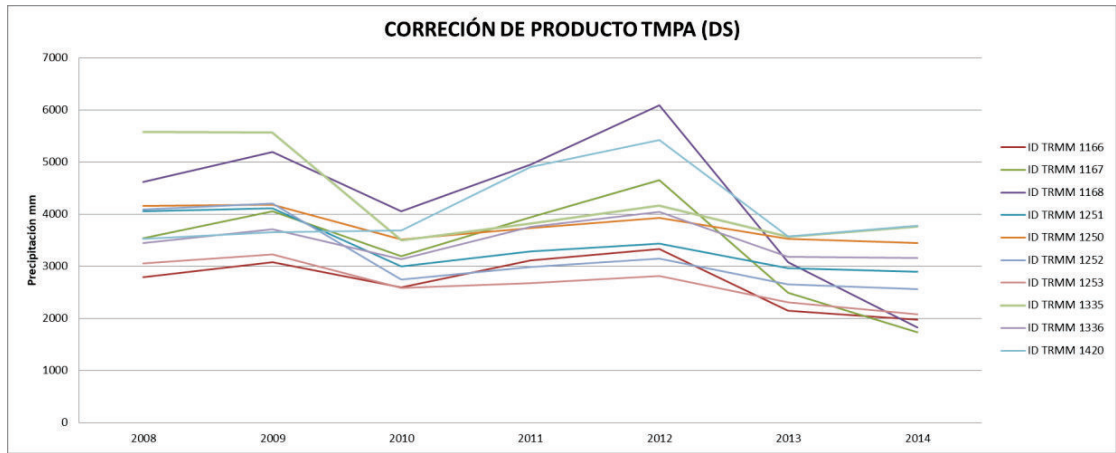


Figura 50. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Doble Kernel Smoothing.

Elaboración: Autor.

5.3.3. Coeficiente de Corrección K

El set de datos de la estimación de precipitación corregidos por medio del Coeficiente de Corrección K, se muestra en la Figura 51.

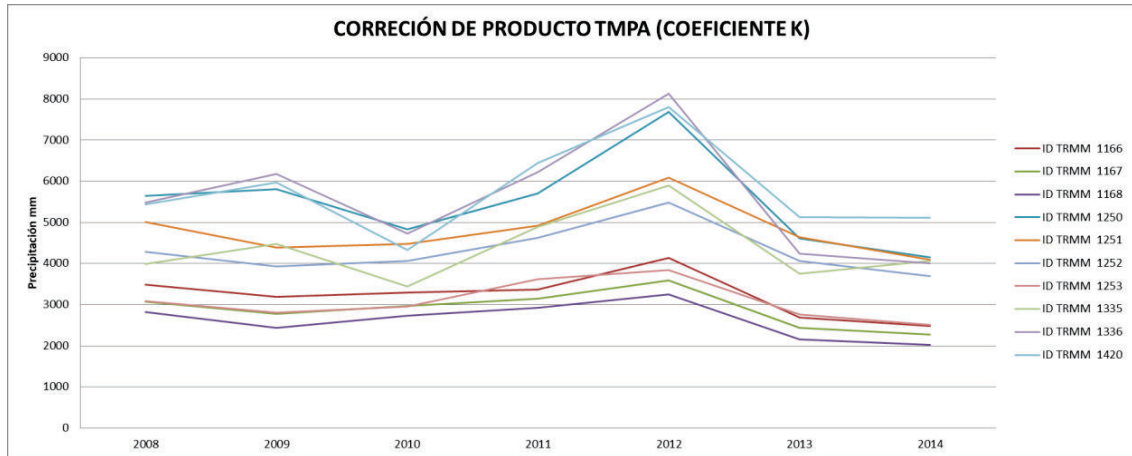


Figura 51. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Coeficiente de Corrección K.

Elaboración: Autor.

5.3.4. Kriging con external drift

Otro método de corrección considerado en la presente investigación fue el kriging con external drift. Esta técnica, tiene un grado de complejidad mayor a los otros métodos de corrección por lo que para su ejecución es necesario contar con un mayor número de datos, principalmente para la construcción del semivariograma experimental y para la selección del modelo teórico de semivariograma en base a

la tendencia de los datos. En la Figura 52, se muestran los semivariogramas generados con diferente cantidad de datos observados.

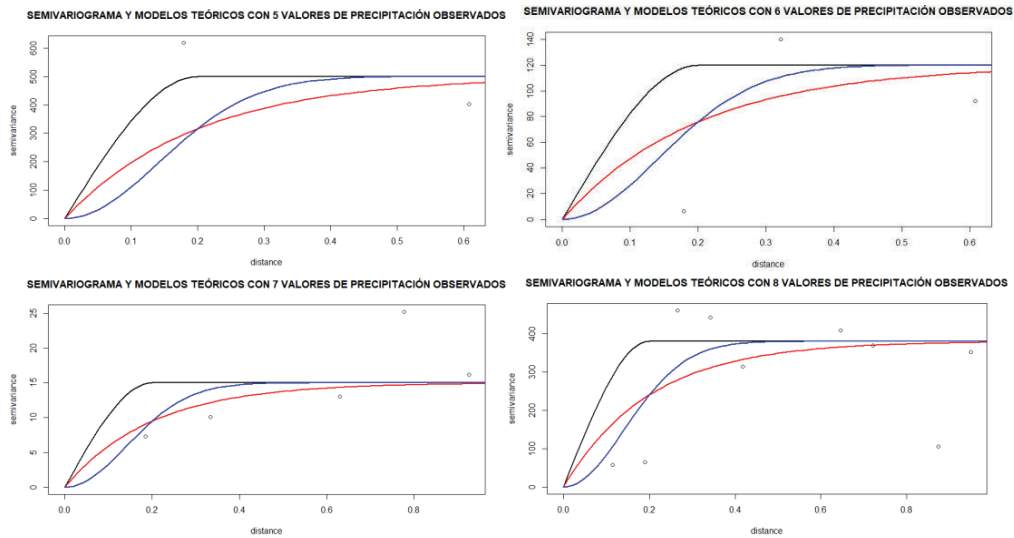


Figura 52. Ejemplos de semivariogramas calculados con 5, 6, 7 y 8 valores.
Elaboración: Autor.

En las figuras anteriores no se incluyeron semivariogramas cuando se cuenta con menos de 5 datos observados, ya que con menos de 5 valores no es posible realizar el cálculo del semivariograma. Se evidencia además, que con el número de datos disponibles (incluso cuando existe datos observados en 8 estaciones), no es posible distinguir el modelo teórico del semivariograma por lo que para su ajuste se empleó la opción auto ajuste del semivariograma provisto por la librería Rainmerging de R.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se realizó el ajuste con el método KED en el periodo de tiempo considerado entre el 1 de agosto de 2009 hasta el 26 de mayo de 2011, donde existe 5 o más datos de precipitación observada, al no contar con el mismo número de años que los gráficos anteriores, se generó un gráfico con datos a nivel mensual. El resumen de los datos corregidos se muestra a nivel mensual en la Figura 53.

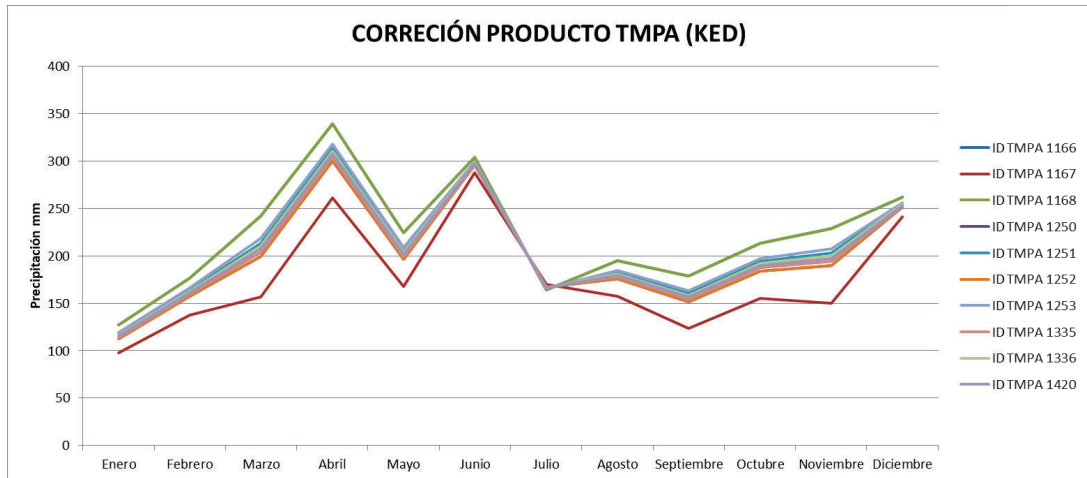


Figura 53. Resumen de resultados de la corrección de estimaciones de precipitación a través del método Kriging con external drift.
Elaboración: Autor.

A nivel anual, los resultados obtenidos presentan una ligera desviación con los valores medios anuales destacados en la caracterización del presente documento, ya que al considerar la zona de mayor precipitación, se mencionó que la precipitación media anual puede alcanzar los 6000 mm y los valores corregidos para este mismo sector alcanzan valores similares para el caso de los métodos de corrección MBC y DC. Por otra parte, el método de corrección KCC generó valores que sobrepasan la precipitación media mensual.

Con el set de datos corregidos por medio de los métodos descritos en el punto anterior, se calculó el promedio de precipitación para los píxeles que serán ingresados en el modelo hidrológico, como estaciones ficticias. La distribución espacial de los datos se muestra en la Figura 54.

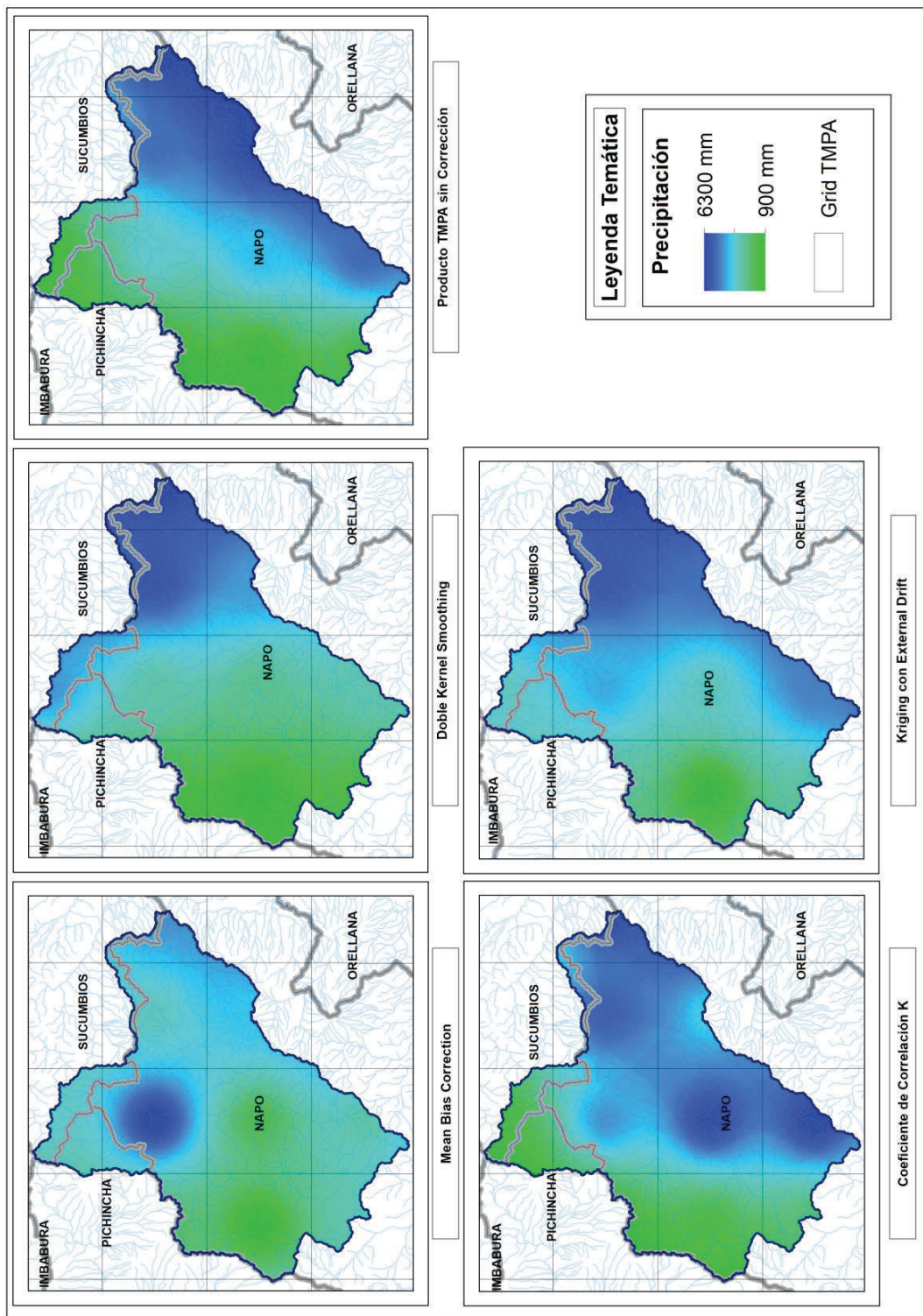


Figura 54. Espacialización del promedio de precipitación obtenida por los métodos de corrección.
Elaboración: Autor.

La espacialización de la precipitación, fue generada a partir de la interpolación con el método Inverso al Peso de la Distancia de los 42 centroides de los píxeles en los que se realizó la corrección del producto TMPA. El método de interpolación, fue seleccionado de acuerdo a la recomendación realizada por Moreano (2008) para la interpolación de valores de precipitación.

En el Anexo 13, se encuentra la comparación a nivel mensual de los valores observados de precipitación y los valores corregidos del producto TMPA con los métodos MBC, DS, KCC y KED.

5.4. EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL PRODUCTO TMPA CORREGIDO

La evaluación del producto TMPA corregido se realizó por medio de la comparación de los caudales observados con los caudales simulados a través de la modelación hidrológica realizada en SWAT, tal como se mencionó el modelo considerado fue desarrollado por Tamayo (2017).

Los valores corregidos del producto TMPA (42 píxeles), fueron ingresados como estaciones virtuales en el modelo hidrológico, en el que por la ubicación de las subcuencas divididas el sistema consideró solamente 10. Los resultados de las simulaciones generadas en el modelo hidrológico SWAT se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28: Resumen de resultados de la simulación del modelo hidrológico.

| PARÁMETRO | DATOS OBSERVADOS | TMPA SIN CORRECCIÓN | CORRECCIÓN TMPA | | | |
|------------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|---------|---------|---------|
| | | | MBC | DS | KCC | KED |
| Precipitación (P) | 2995.3 | 2096 | 2776.5 | 3670.8 | 4392.9 | 4146.5 |
| Evapotranspiración Potencial (PET) | 859.5 | 797.8 | 784.5 | 626.3 | 642.1 | 610.9 |
| Evapotranspiración (ET) | 559.8 | 558.6 | 568 | 511 | 527 | 521.3 |
| CN | 55.82 | 55.82 | 55.82 | 55.82 | 55.82 | 55.82 |
| Caudal superficial | 650.98 | 318.17 | 698.76 | 807.57 | 857.16 | 817.08 |
| Caudal lateral | 495.03 | 357.4 | 433.09 | 632.01 | 846.03 | 774.06 |
| Caudal de infiltración | 1193.45 | 820.06 | 1010.39 | 1608.79 | 2026.71 | 1746.9 |
| Caudal total (Qt) | 2339.46 | 1495.63 | 2142.24 | 3048.37 | 3729.9 | 3338.04 |
| Qt/P | 0.78 | 0.71 | 0.77 | 0.83 | 0.85 | 0.81 |
| ET/P | 0.19 | 0.27 | 0.20 | 0.14 | 0.12 | 0.13 |

Elaboración: Autor.

De la Tabla 28, se evidencia que el valor de la precipitación de la cuenca con los diferentes sets de datos es muy variable, con valores que van desde los 2000 mm hasta valores de 4300 mm. El menor valor de precipitación para la cuenca

hidrográfica se obtuvo con los valores del producto TMPA sin corrección, lo que demuestra la subestimación de precipitación del producto tal como se ha señalado anteriormente en el presente documento. Los valores de precipitación sobre los 4000 mm, se encuentran con una sobreestimación, ya que los resultados mencionados por Tamayo (2017), indican una precipitación media en la cuenca de 3302.4 mm.

Tomando en consideración lo mencionado en el párrafo anterior, los valores que se encuentran más cercanos al valor reportado por Tamayo (2017) corresponden a los simulados a partir de la corrección del producto TMPA, utilizando los métodos MBC y DS. Resultados similares fueron evidenciados por Nerini et al (2015) quienes indican que estos métodos produjeron mejores resultados. Señalando que se obtuvo mejores resultados, utilizando el método DS. Del mismo modo, destaca que el método MBC suele ser atractivo por su simplicidad, sin embargo las suposiciones que maneja este método no toman en consideración la complejidad del clima.

En el Anexo 14, se encuentra para cada set de datos, la representación del ciclo hidrológico en su fase terrestre.

Los resultados de los caudales obtenidos para las diferentes simulaciones realizadas fueron comparados con los caudales observados, aplicaciones similares fueron realizadas por Bitew et al., (2012), (Arias-Hidalgo, et al., 2013), Zulkafli et al., (2014), Zubieta et al., (2013), Zubieta et al., (2017) entre otros. Los resultados en general demostraron que en zonas donde no existe gran cantidad de datos de precipitación observada es una buena alternativa emplear información de precipitación satelital.

En la Figura 55 y Figura 56, se muestran los hidrogramas a nivel mensual de los valores observados, así como los resultantes con los métodos de corrección MBC, DS, KCC y KED y la simulación con los valores de precipitación observada.

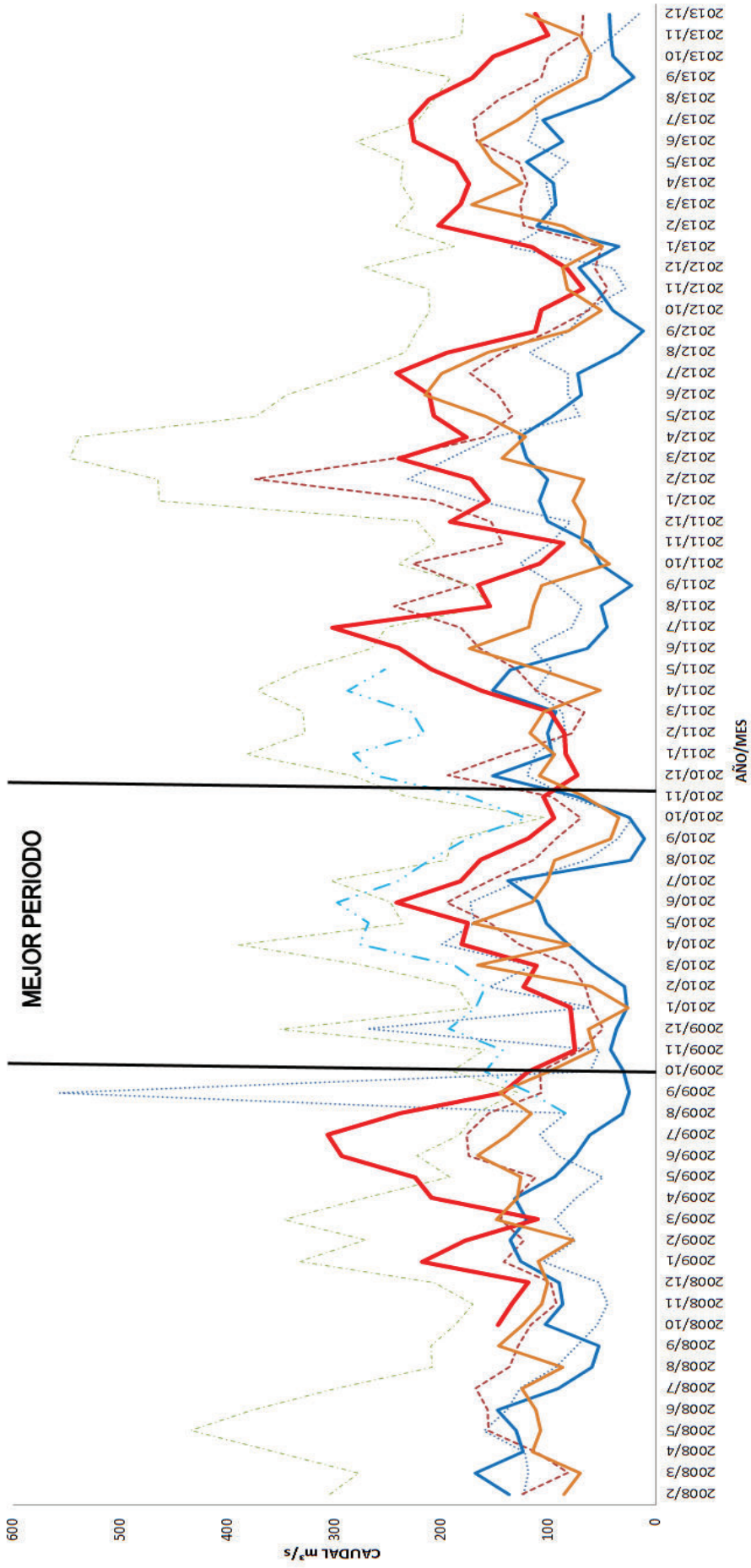


Figura 55. Hidrogramas obtenidos a partir de la simulación del modelo hidrológico comparados con los datos de la estación hidrológica H0715.
Elaboración: Autor.

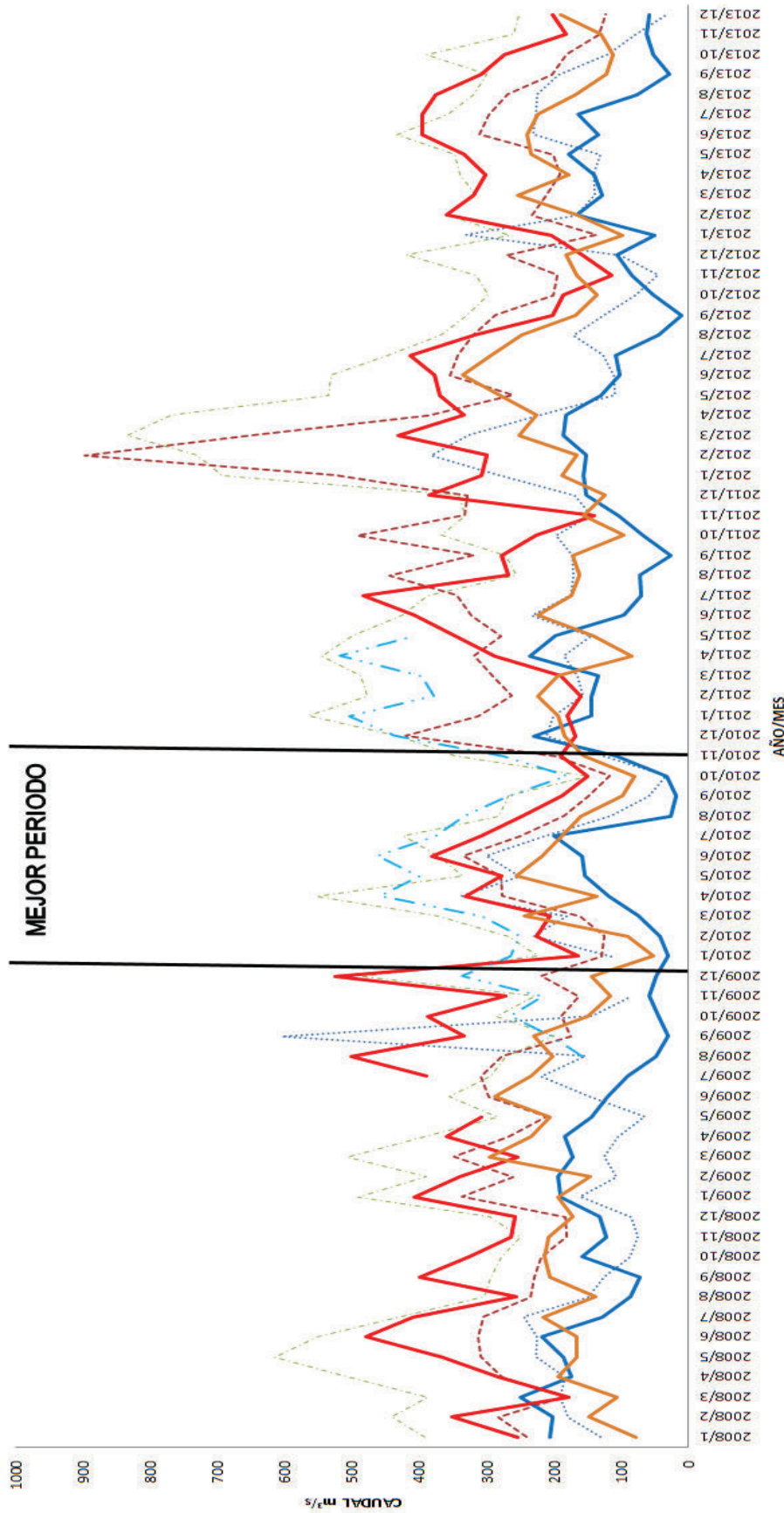


Figura 56. Hidrogramas obtenidos a partir de la simulación del modelo hidrológico comparados con los datos de la estación hidrológica H0714.
Elaboración: Autor.

De la figura anterior, se debe indicar que se eliminó el valor del caudal observado del mes de julio de 2009 de la estación H0714, al considerarse un valor atípico dentro de la distribución de caudales.

Con el propósito de evaluar el modelo, se realizó el cálculo del Coeficiente de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de correlación, el promedio del error medio cuadrático estandarizado y el porcentaje del sesgo. La Tabla 29 con los resultados obtenidos se muestra a continuación:

Tabla 29: Indicadores estadísticos de los resultados de los caudales simulados comparados con los valores de caudal observados.

| ESTACIÓN | INDICADOR | TMPA CORRECCIÓN | | | | TMPA ORIGINALES |
|----------|-----------|-----------------|--------|-------|-------|-----------------|
| | | MBC | DS | KCC | KED | |
| H0715 | NSE | -2.23 | -0.18 | -4.51 | -2.74 | -2.17 |
| | COR | 0.09 | 0.52 | 0.14 | 0.21 | 0.24 |
| | RSR | 1.78 | 1.08 | 2.33 | 1.89 | 1.76 |
| | PBIAS | -34.90 | -18.90 | 60.20 | 53.10 | -53.30 |
| H0714 | NSE | -1.08 | -0.43 | -0.81 | -1.47 | -1.86 |
| | COR | 0.16 | 0.18 | 0.16 | -0.08 | 0.12 |
| | RSR | 1.43 | 1.19 | 1.34 | 1.53 | 1.68 |
| | PBIAS | -44.50 | -11.80 | 24.90 | 22.90 | -62.40 |

Elaboración: Autor.

Los resultados presentados, corresponden al periodo comprendido entre el 1 de enero de 2008 hasta el 31 de diciembre de 2013 dando en total 72 meses. Se puede evidenciar que el método de corrección con el que se obtuvieron los mejores resultados corresponde al Double Kernel Smoothing, ya que posee el coeficiente de Nash y el coeficiente de correlación lo más cercano a 1 y los menores valores del promedio del error medio cuadrático estandarizado y del porcentaje del sesgo. En la Figura 57, se muestran los resultados de los indicadores estadísticos obtenidos en la evaluación.

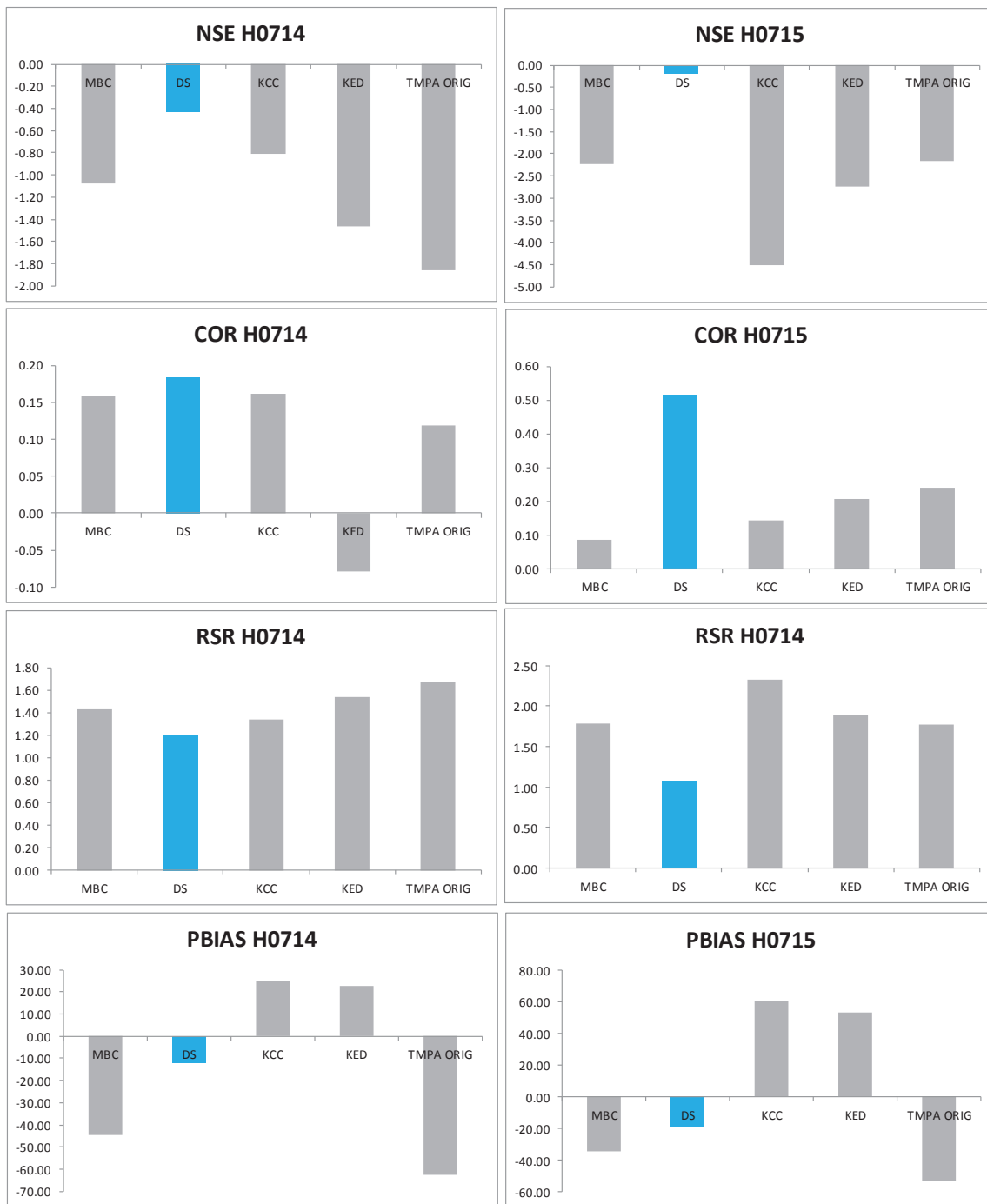


Figura 57. Resultados de evaluación de caudales observados y simulados entre enero 2008 hasta diciembre 2013.

Elaboración: Autor.

Cabe recalcar que como parte de los resultados obtenidos por Arias-Hidalgo, et al., (2013) se menciona que los valores de precipitación del producto TMPA muestran un considerable PBIAS negativo, tal como se evidencia en los resultados obtenidos en esta investigación. Del mismo modo, indica que se obtuvo mejores resultados después de realizar métodos de corrección al producto TMPA. Esto, se evidencia claramente en el presente documento al realizar la corrección

con el método DS. Al analizar los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe, se puede evidenciar que los resultados presentan un índice relativamente bajo, sin embargo los valores obtenidos en esta investigación presentan mejores resultados que los obtenidos en otras investigaciones como por ejemplo la realizada por Zulkafli et al., (2014) en donde se utilizaron los valores del producto TMPA 3B42 V7 sin corrección.

Para el periodo de evaluación de los métodos de corrección se consideró desde enero de 2008 hasta diciembre de 2013, tomando en cuenta la disponibilidad de datos de caudal observado. Se debe recalcar que el periodo de calibración del modelo hidrológico fue realizado en fechas anteriores a las mencionadas, en este sentido se considera apropiado realizar un análisis particularizado de los resultados, específicamente considerando el periodo de tiempo comprendido entre octubre de 2009 hasta el mes de noviembre de 2010, tiempo en el que se observa que existe una fuerte correlación de los caudales observados con los caudales generados a partir de los valores corregidos del producto TMPA.

Debido a este análisis, se calcularon nuevamente los indicadores estadísticos para la franja de tiempo indicada en el párrafo anterior donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 30: Indicadores estadísticos de los resultados de los caudales simulados comparados con los valores de caudal observados.

| ESTACIÓN | INDICADOR | TMPA CORRECCIÓN | | | | TMPA ORIGINALES |
|----------|-----------|-----------------|--------|-------|-------|-----------------|
| | | MBC | DS | KCC | KED | |
| H0715 | NSE | -1.19 | 0.49 | -5.48 | -1.16 | -1.85 |
| | COR | 0.33 | 0.95 | 0.36 | 0.89 | 0.69 |
| | RSR | 1.42 | 0.68 | 2.45 | 1.41 | 1.62 |
| | PBIAS | -11.80 | -23.30 | 75.40 | 51.10 | -56.30 |
| H0714 | NSE | -0.90 | -0.05 | -0.05 | 0.03 | -3.38 |
| | COR | 0.79 | 0.64 | 0.71 | 0.60 | 0.35 |
| | RSR | 1.32 | 0.98 | 0.99 | 0.95 | 2.01 |
| | PBIAS | -30.30 | -25.40 | 24.20 | 19.20 | -69.10 |

Elaboración: Autor.

De la Tabla 30, se puede evidenciar que en la franja de tiempo seleccionada existe una notable mejora de los indicadores cuantitativos de los resultados obtenidos con los métodos de corrección Mean Bias Correction, Coeficiente de correlación K y Kriging con External Drift. Sin embargo, se debe destacar que el método de corrección que generó los mejores resultados fue Doble Kernel Smoothing. Los resultados de la Tabla 30, se muestran de manera gráfica en la Figura 58.

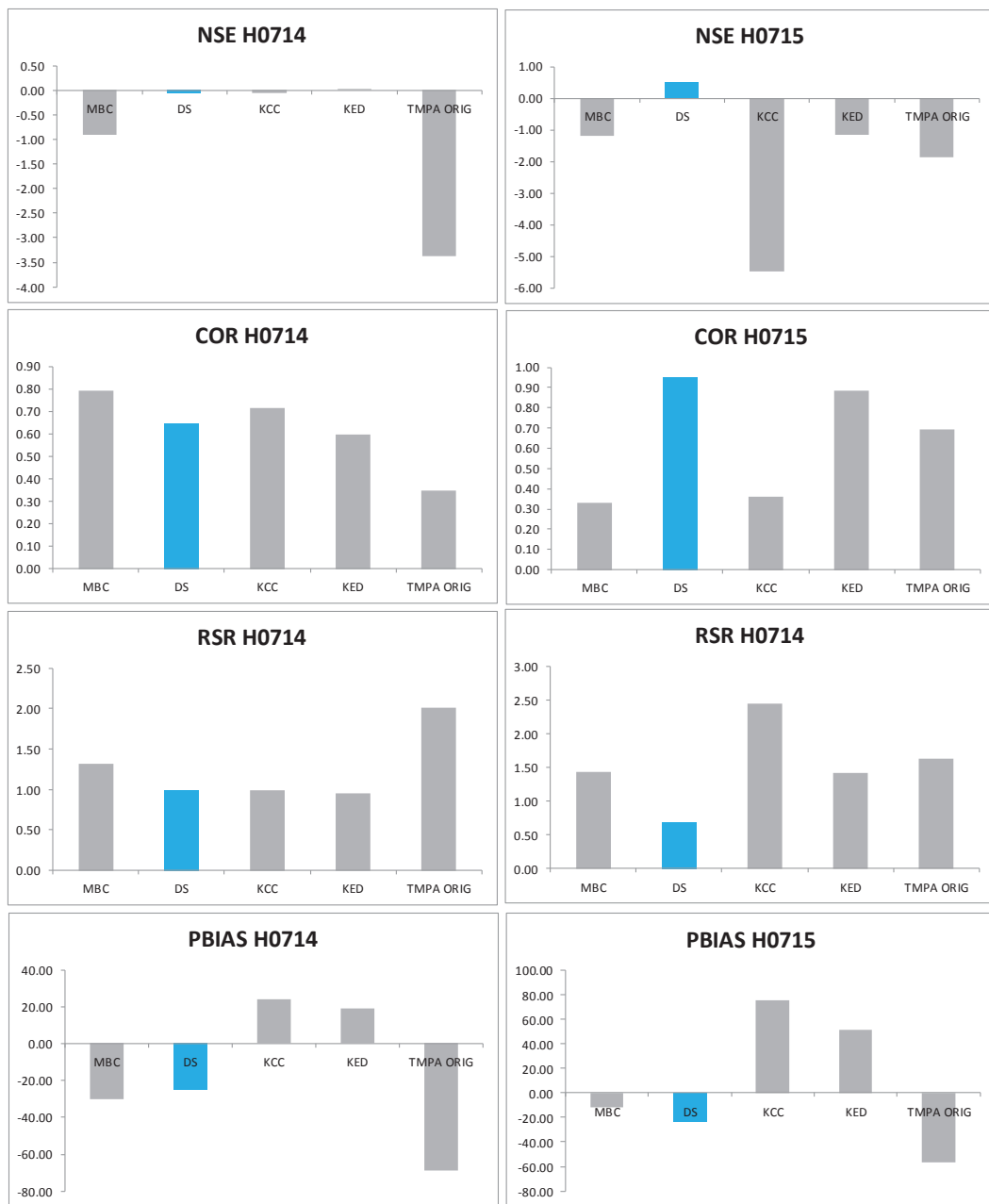


Figura 58. Resultados de evaluación de caudales observados y simulados entre octubre 2009 hasta noviembre 2010.

Elaboración: Autor.

En general, como resultado del análisis realizado entre octubre de 2009 y noviembre de 2010, se puede mencionar que para el método Double Kernel Smoothing, los valores del coeficiente NSE y de correlación se encuentran dentro del rango muy bueno de acuerdo a los criterios de evaluación del modelo propuestos por Moriasi et al., (2007). Los hidrogramas obtenidos para el periodo de tiempo desde octubre 2009 a noviembre 2011 se muestran en la Figura 59.



Figura 59. Hidrogramas de los caudales simulados con los valores corregidos del producto TMPA, valores sin corrección y caudales observados en las estaciones H0715 y H0714 desde octubre 2009 hasta noviembre 2010.

Elaboración: Autor.

Analizando la disponibilidad de datos en el periodo de tiempo en el que se obtuvieron los mejores resultados, se puede apreciar que la única diferencia sustancial radica en el número de datos de precipitación observada, ya que en este periodo de tiempo, se cuenta con 7 y 8 valores de precipitación observada, mientras que en los demás años se tienen menos datos de estaciones observadas. La importancia del número de datos para realizar los métodos de corrección, fue evidente en el método KED donde fue necesario contar con más de 5 valores para realizar la corrección. Del mismo modo, se pudo identificar que para realizar la corrección con el método DS es necesario contar con al menos 3 valores de precipitación observada.

Se conoce que el modelo hidrológico presenta incertidumbres por diversos motivos, sin embargo el objetivo de este estudio no es el analizar las variables que generan la incertidumbre del modelo sino analizar los métodos de corrección utilizando una variable externa que es el caudal, del mismo modo cabe señalar

que cualquier incertidumbre generada por el modelo hidrológico aplica para todas las simulaciones realizadas.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los valores sugeridos por la Organización Meteorológica Mundial, en el Ecuador existen provincias que no cuentan con el número mínimo de estaciones por kilómetro cuadrado, sobre todo en la región amazónica.
- La información de precipitación observada provista por medio de las estaciones meteorológicas, presenta un porcentaje de vacío de datos que van desde los 3.34% hasta el 73.73%, desde el año 1963 hasta el año 2015, valores que fueron considerados al momento de seleccionar las estaciones consideradas en el proyecto de investigación.
- La información de estimación de precipitación obtenida a través del producto TMPA 3B42, de igual manera presenta vacíos de datos, cuyos porcentajes oscilan entre el 8.22% y el 0.27%.
- El año en el que existe un mayor porcentaje de valores perdidos del producto TMPA 3B42 V7 es 1998, debido a que este fue el año en el que se empezó a transmitir la información.
- La mejor correlación entre los valores de precipitación observados y la estimación de precipitación, se da en la zona baja del área de estudio, específicamente en la zona de las estaciones M0293 y M1203 obteniendo valores de 0.51 y 0.44 respectivamente, mientras que la correlación más baja se registró en la zona alta de la cuenca.
- El producto TMPA 3B42 V7, presenta una probabilidad del sesgo negativa, lo que indica que tiende a subestimar los valores de precipitación en toda la cuenca.
- Al comparar la información de precipitación observada con el producto TMPA 3B42 V7, se pudo evidenciar que en la zona baja se produjeron los mejores valores de los indicadores cuantitativos y cualitativos exceptuando los errores.
- La probabilidad de detección de la estimación de precipitación tiende a disminuir conforme aumenta la precipitación, esto concuerda con lo señalado por Castro (2014); los valores de estimación que tienen una mayor probabilidad de detección son los relacionados con la estación M0293.

- Los valores de estimación de precipitación del producto TMPA tienden a presentar mayores falsas alarmas conforme aumenta la precipitación. En el área de estudio los valores con menores falsas alarmas corresponden a los valores relacionados con la estación M1203.
- De acuerdo al análisis de los indicadores cuantitativos, se puede concluir que a medida que aumenta el valor de precipitación, aumenta la exactitud. Los valores de estimación que presentan mayor exactitud corresponden a los asociados con la estación MC012.
- Se seleccionó como periodo de evaluación de precipitación desde el 1 de enero de 2008 hasta el 31 de diciembre de 2013 considerando que en este lapso de tiempo se cuenta con información de caudales observados en la estación Coca San Rafael.
- Los caudales obtenidos por medio de la simulación del modelo hidrológico, muestran que al ingresar los valores de estimación de precipitación sin corrección, dan como resultado valores inferiores a los observados, por lo que se puede concluir que el producto TMPA subestima los valores de precipitación, esto se contrasta con lo mencionado por Castro (2014).
- Al realizar los procesos de corrección con los métodos descritos en el proyecto de investigación, se pudo identificar que la correlación de los caudales obtenidos a partir de los valores corregidos del producto TMPA con los caudales observados en las estaciones H0714 y H0715 aumenta.
- El mejor método de corrección resultante para el área de estudio fue Double Kernel Smoothing, en razón de que obtuvo el coeficiente de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de correlación más cercano a 1.
- El periodo de tiempo en el que se obtuvieron los mejores resultados de caudales con el método de corrección Double Kernel Smoothing corresponde al mes de octubre de 2009 hasta el mes de noviembre de 2010, alcanzando un coeficiente de correlación de 0.9 y un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.5. Lo que de acuerdo a lo propuesto por Moriasi et al., (2007), corresponde a un modelo satisfactorio.
- En el periodo considerado entre el mes de octubre de 2009 hasta noviembre de 2010 donde se obtuvieron los mejores resultados, se pudo identificar que existe el mayor número de observaciones de precipitación (entre 7 y 8 estaciones con observaciones de precipitación a nivel diario).
- La idea de utilizar productos satelitales es complementar información en zonas donde existe escasez de datos, sin embargo para emplear los métodos de corrección se necesita información de precipitación observada, ya que al incorporarse 2 estaciones (MC12 y M0293) al

proceso de corrección de datos el modelo hidrológico produjo los caudales más próximos a los observados.

6.2. RECOMENDACIONES

- El análisis de la aplicabilidad de la estimación de precipitación se realizó comparando los caudales observados con los caudales simulados por la modelación hidrológica, por lo que se recomienda que se realice la calibración del modelo hidrológico en el mismo periodo de tiempo que la información de precipitación, con lo que se esperaría que mejoren aún más los resultados obtenidos.
- Para la generación del modelo hidrológico, considerar la información de cobertura vegetal y uso del suelo en el mismo periodo de análisis para que de esta manera la simulación pueda reflejar de mejor manera la realidad del ciclo hidrológico.
- Como un proyecto nuevo de investigación, se recomienda analizar la aplicabilidad en la modelación hidrológica de los valores de la estimación de precipitación del producto IMERG (producto sucesor de TMPA) ya que presenta mejores características relacionadas con la resolución espacial y temporal.
- Excluir dentro de la evaluación de la estimación de precipitación los valores atípicos, en vista a que no se genere sobreestimaciones o subestimaciones en la modelación hidrológica.
- Considerar los métodos de corrección para productos de precipitación satelital en investigaciones que se lleven a cabo con estos datos, ya que presentan una fuente importante de datos en zonas en las que existe una escasa distribución de estaciones meteorológicas, como es el caso de la región amazónica.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., ... Nelkin, E. (2003). The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 1147–1167. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2)
- Almazroui, M. (2011). Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009. *Atmospheric Research*, 99(3–4), 400–414. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.006>
- Anagnostou, E., Negri, J., & Adler, R. (1999). Statistical Adjustment of Satellite Microwave Monthly Rainfall Estimates over Amazonia. *Journal of Applied Meteorology*, 38(11), 1590–1598. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1590:SAOSMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1590:SAOSMM>2.0.CO;2)
- Arias-Hidalgo, M. Bhattacharya, B., Mynett, A., & Van Griensven, A. (2013). Guía de prácticas hidrológicas Volumen I. Sexta Edición, 51. *Manual*. <https://doi.org/OMM-Nº 168>
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012. Texas Water Resources Institute, TR-439*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1231
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Barros, J., & Troncoso, A. (2010). *Atlas Climatológico del Ecuador (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil)*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1720/1/CD-2755.pdf>
- Bitew, M., Gebremichael, M., Ghebremichael, L., & Bayissa, Y. (2012). Evaluation of High-Resolution Satellite Rainfall Products through Streamflow Simulation in a Hydrological Modeling of a Small Mountainous Watershed in Ethiopia. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 338–350. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1292.1>
- Bohling, G. (2005). INTRODUCTION TO GEOSTATISTICS And VARIOGRAM ANALYSIS. *Earth*, (October), 1–20. <https://doi.org/10.1162/0162287054769931>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cabrera, A. (2016). “ *Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay* ” (tesis de pregrado de Ingeniería Civil). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/24213/1/TESIS.pdf>
- Cáceres, L. (2012). Informe de Consultoría Línea Base sobre la Gestión de la Información Agro Meteorológica en. Quito.
- Caicedo, F. (2008). *Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia)*. (Tesis de maestría en Hidrosistemas). Pontificia Universidad Javeriana. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10554/3807>
- Castillo, C., & Ortega, N. (2009). *Modelización hidrológica de microcuencas de montaña usando el modelo hidrológico SWAT*. (tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Retrieved from <http://cdjbv.ucuenca.edu.ec/ebooks/ti818.pdf>
- Castro, E. (2014). *Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador*. (Tesis de pregrado de Ingeniería Civil). Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20874/1/TESIS.pdf>
- Chai, T., & Draxler, R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error

- (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledeteccion Espacial* (3a ed.). <https://doi.org/23.304-1995>
- Crespo, P., Coello, C., Iñíguez, V., Cisneros, F., Cisneros, P., Ramírez, M., & Feyen, J. (2008). Evaluacion De Swat2000 Como Herramienta Para El Analisis De Escenarios De Cambio De Uso Del Suelo En Microcuencas De Montaña Del Sur Del Ecuador. In *XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo* (pp. 29–31).
- Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Buytaert, W., ... Yilmaz, K. K. (2016). Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 17(6), 1817–1836. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0197.1>
- DISC, G. (2016). Mirador - Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Center (DISC). Retrieved August 1, 2017, from <https://mirador.gsfc.nasa.gov/>
- Duque, L., & Vázquez, R. (2015). Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de la cobertura del suelo. *Aqua-LAC*, 7, 63–76. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Emmert, J. (2010). Misterioso colapso de la atmósfera superior de la Tierra | Ciencia de la NASA. Retrieved August 1, 2017, from https://ciencia.nasa.gov/ciencias-tierra/15jul_thermosphere
- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., & Yates, D. (2013). Modelación Hidrológica Y Escenarios De Cambio Climático En Cuencas De Suministro De Agua De Las Ciudades La Paz Y El Alto. *Aqua-LAC*, 5(August 2016), 1–13.
- Espinosa, J., & Rivera, D. (2016). Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes. *Environmental Earth Sciences*, 75(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5962-1>
- Feler, M., Vazquez, G., Van Meer, H., Gaspari, F., Mercuri, P., Prieto, D., & Flamenco, E. (2014). Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca. *Researchgate*, (September), 1–10. <https://doi.org/10.13140/2.1.1763.2008>
- Ginzo, M. (2009). Análisis Geostadístico de datos funcionales. *Researchgate*, (February), 108. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267709936_Analisis_Geostadistico_de_Datos_Funcionales
- Giraldo, R. (2011). *Introducción a la geoestadística*. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0627-7>
- GODARD SPACE FLIGHT CENTER-NASA. (2015). TRMM. Retrieved August 1, 2017, from <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1–2), 1–45. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0)
- Grimes, D., Pardo-Igúzquiza, E., & Bonifacio, R. (1999). Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, 222(1–4), 93–108. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00092-X)
- Hong, Y., Chen, S., Xue, X., & Hodges, G. (1989). Global Precipitation Estimation and Applications. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(1), 160. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Horna, L. (2016). *Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la Zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil)*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15064>
- Huffman, G., Bolvin, D., Nelkin, E., Wolff, D., Adler, R., Gu, G., ... Stocker, E. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Hurtado, J., & Yáñez, D. (2015). APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

- (SOIL & WATER ASSESSMENT TOOL) PARA ANALISIS DEL CAUDAL DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LAS JUNTAS. *Revista GEOESPACIAL*, 12, 106–122. Retrieved from http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44662000/Revista-Geoespacial-12_2015_swat.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1493750527&Signature=PdzzjyYbsUqx%2FDCKnm5zPzXKaUE%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DAPLICACION_DEL
- Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing*. New Jersey: Upper Saddle River.
- Jhan Carlo Espinoza, Steven Chavez, Josyane Ronchail, Clémentine Junquas, Ken Takahashi, & Waldo Lavado. (2015). Water Resources Research. *Water Resource Research*, 1182–1202. <https://doi.org/10.1002/2014WR016606>. Received
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2003). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Wiley. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2005.11.002>
- Jorquera, E., & Weber, J. (2014). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *ResearchGate*, (October 2014), 1–18. Retrieved from http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03_014_Jorquera.pdf
- Lavado, W. (2009). TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon- Andes basin and its assimilation into a monthly water balance. In *(Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009)* (p. 9). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/271853419_TRMM_rainfall_data_estimation_over_the_Peruvian_Amazon-Andes_basin_and_its_assimilation_into_a_monthly_water_balance_model
- Le, T. B., Al-Juaidi, F. H., & Sharif, H. (2014). Hydrologic simulations driven by satellite rainfall to study the hydroelectric development impacts on river flow. *Water (Switzerland)*, 6(12), 3631–3651. <https://doi.org/10.3390/w6123631>
- Li, M., & Shao, Q. (2010). An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.023>
- Liu, J., Duan, Z., Jiang, J., & Zhu, A. (2015). Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42 , CMORPH , and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China. *Hindawi*, 2015, 1–14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2015/151239>
- Lujano, E., Obando, F., Lujano, L., & Quispe, J. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del rio Ramis Puno Perú. *Rev. Investig. Altoandin*, 17(2), 221–228. Retrieved from <file:///C:/Users/Carolina/Downloads/116-214-1-PB.pdf>
- Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L. A., & Rodríguez-Sánchez, J.-P. (2016). High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1190–1207. <https://doi.org/10.1002/2015JD023788>
- Mehta, A. (2015). Percepcion Remota de la NASA. Introduccion a los Datos y Aplicaciones de las Meidiciones de la Precipitacion Global. Retrieved from <http://www.uss.cl/biblioteca/wp-content/uploads/2015/03/Normas-APA.pdf>
- Monsalve Saenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. (E. C. de Ingeniería, Ed.) (2a. edició). Alfaomega.
- Moreano, R. (2008). *Sistema de información para la interpolación espacial y temporal de datos sobre el tiempo atmosférico y el clima del Ecuador (Tesis de pregrado)*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/719/1/CD-1664%282008-09-15-10-33-24%29.pdf>

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASA. (n.d.). TRMM Instruments | Precipitation Measurement Missions. Retrieved August 1, 2017, from <https://pmm.nasa.gov/TRMM/trmm-instruments>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I—a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Natural Resources Canada. (1999). *Fundamentals of Remote Sensing. Forestry*. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90072-1)
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute. Texas - Estados Unidos: Texas Water Resource Institute. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams., J. (2005). Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005. *Diffuse Pollution Conference Dublin*, 494.
- Nerini, D., Zulkafli, Z., Wang, L., Onof, C., Buytaert, W., Lavado, W., & Guyot, J. (2015). A comparative analysis of TRMM-rain gauge data merging techniques at the daily time scale for distributed rainfall-runoff modelling applications. *Journal of Hydrometeorology*, 150904104740009. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0197.1>
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., & Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific-Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3179–3193. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3179-2014>
- Oñate-Valdivieso, F., & Sendra, J. B. (2014). Semidistributed hydrological model with scarce information: Application to a large south american binational basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(5), 1006–1014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000853](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000853)
- Pham, L. (2016). Giovanni. Retrieved August 1, 2017, from <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Pourrut, P., Gómez, G., Bermeo, A., Segovia, Á., & Segovia, A. (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. El Agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentía*. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010014823.pdf
- Power, M. (1993). The predictive validation of ecological and environmental models. *Ecological Modelling*, 68(1–2), 33–50. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90106-3](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90106-3)
- Prakash, S., Mitra, A. K., AghaKouchak, A., Liu, Z., Norouzi, H., & Pai, D. S. (2016). A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. *Journal of Hydrology*, (February 2014), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.029>
- Puig i Polo, C. (2015). *Evolución temporal de la vegetación en el Sahel mediante el NDVI y su relación con la precipitación en el periodo 1983-2012 (Tesis Doctoral)*. Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTECH.
- Rodríguez, J., Capa, Á., Portela, L., & 2004., S. de la C. y T. (2004). Meteorología y Climatología. In F. (Fundación E. para la C. y la Tecnología) (Ed.) (pp. 1–170). <https://doi.org/M-XXXXX-2004>
- Salmerón, R. (2008). *Análisis estadístico de datos espacio-temporales mediante modelos de funcionales de series temporales (Tesis de doctorado)*. Universidad de Granada. Retrieved from <https://hera.ugr.es/tesisugr/17573427.pdf>
- Satgé, F., Xavier, A., Zolá, R. P., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., & Bonnet, M. P. (2017). Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main bolivian watersheds. *Remote Sensing*,

- 9(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9040369>
- Scheel, M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J. (2010). Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(5), 8545–8586. <https://doi.org/10.5194/hessd-7-8545-2010>
- Silverman, B. (1986). Density estimation for statistics and data analysis. *Chapman and Hall*, 37(1), 1–22. <https://doi.org/10.2307/2347507>
- Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., Arnold, J. G., & Bednarz, S. T. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 91–101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05962.x>
- Tamayo, G. (2017). *Evaluación De Los Caudales Líquidos Y Producción De Sedimentos Con El Modelo Soil Water Assessment Tool (Swat) Y Su Relación Con Los Caudales Líquidos Y Sólidos Observados. (Tesis de Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos)*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17067/1/CD-7651.pdf>
- Tan, S. Y. (2014). Meteorological satellite systems. In International Space University (Ed.), *Meteorological satellite systems* (pp. 1–16). Ontario-Canada: Springer.
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533(December), 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.008>
- Van Griensven, A., Xuan, Y., Haguma, D., & Niyonzima, W. (2008). Understanding riverine wetland-catchment processes using remote sensing data and modelling, 1, 462–469. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650575931&partnerID=40&md5=a29dba7f677d5bee90cb654f82465068>
- Vazquez, R. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *Maskana*, 1(1), 79–90. Retrieved from <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/370/315>
- Vila, D., De Goncalves, L., Toll, D., & Rozante, J. (2009). Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. *Journal of Hydrometeorology*, 10(2), 533–543. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1048.1>
- Villacrés, C., & Gallegos, S. (2010). *Estudio de la evaluación de la red hidrometeorológica en la región Nor-Oriental del Ecuador y propuesta de su optimización como parte de la red hidrometeorológica básica del Ecuador. (Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil)*. Quito. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2456/6/CD-3156.pdf>
- Vintimilla, P. (2014). *Análisis de factores climáticos en las diferentes regiones del Ecuador para el diseño de pavimentos. (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil)*. Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1356/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-80.pdf>
- Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L., & Wheeler, H. (2011). Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective. *Advances in Water Resources*, 34(10), 1222–1231. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.05.007>
- Yin, Z., Zhang, X., Liu, X., Colella, M., & Chen, X. (2008). An Assessment of the Biases of Satellite Rainfall Estimates over the Tibetan Plateau and Correction Methods Based on Topographic Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 9(Zheng 1996), 301–326. <https://doi.org/10.1175/2007JHM903.1>
- Zubieta, R. (2013). *Modelado hidrológico distribuido de la cuenca amazonica peruana utilizando precipitación obtenida por satélite (Tesis de Maestría en Scientiae en Recursos Hídricos)*. Universidad Nacional Agraria la Molina. Retrieved from http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2013/Tesis_RZubieta.pdf

- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., & Aragon, L. (2017). Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (December), 1–21. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-656>
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., & Guyot, J. (2014). A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean – Amazon River Basins. *AMS*, 42, 581–592. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>

ANEXOS

ANEXO 1: Script en R para la creación de gráficos de los valores observados de precipitación y caudal a nivel diario.

```

rm(list=ls())
gc()

library('zoo')
library(gridExtra)
library(ggplot2)

load("diarios.RData")

observados_pre<- zoo(diarios$estaciones[which(index(diarios$estaciones)== "1998-01-01
12:00:00"): which(index(diarios$estaciones)== "2014-12-31 12:00:00"),])

file='obs_precip.pdf'
pdf(file=file, width=18, height=8)

par(mfrow=c(3,3))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,1], type='h', main='M0188', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,2], type='h', main='M0203', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,3], type='h', main='M0293', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,4], type='h', main='M0436', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,5], type='h', main='M0486', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,6], type='h', main='M0490', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,7], type='h', main='M1124', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,8], type='h', main='M1203', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
plot((index(observados_pre)),observados_pre[,9], type='h', main='MC12', xlab='Años',
ylab=expression(mm), ylim=c(0,250))
dev.off()

ind_C<-seq(as.Date("2007-01-01"), as.Date("2014-12-31"),by="day")

vacio_C<-zoo(rep(NA, length(ind_C)),ind_C)

Caudales <- zoo(read.csv("Caudales.csv", sep = ";", header = T))

index(Caudales)<- index(vacio_C)

Caudales_M <- as.data.frame(Caudales)

file='Caudales.pdf'

pdf(file=file, width=25, height=12)

```

```
par(mfrow=c(2,1))
```

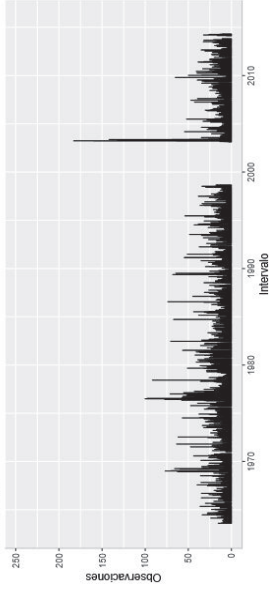
```
plot((index(Caudales)),Caudales[,1], type='h', main='H714', xlab='Años',  
ylab=expression(m^3/s), ylim=c(0,4000))
```

```
plot((index(Caudales)),Caudales[,2], type='h', main='H715', xlab='Años',  
ylab=expression(m^3/s), ylim=c(0,4000))
```

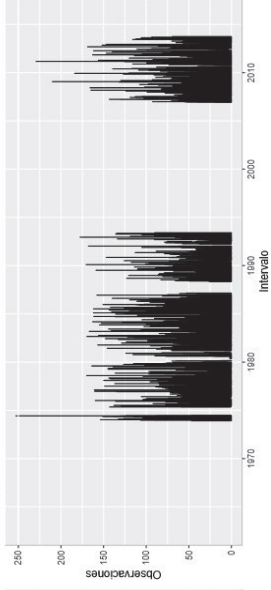
```
dev.off()
```

ANEXO 2: Series temporales de precipitación y caudales observados.

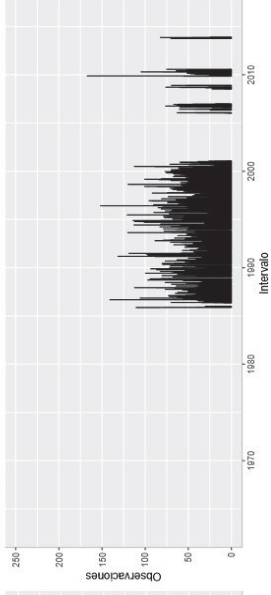
M0188



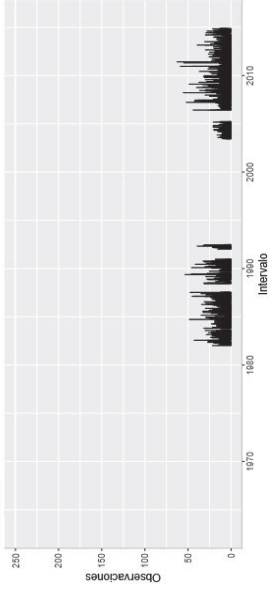
M0203



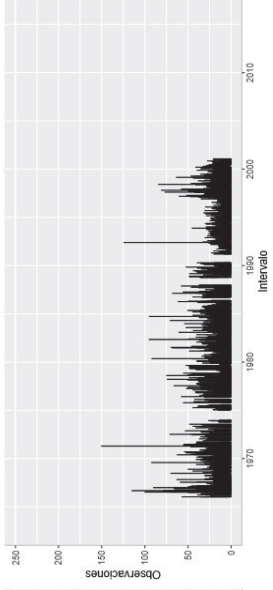
M0293



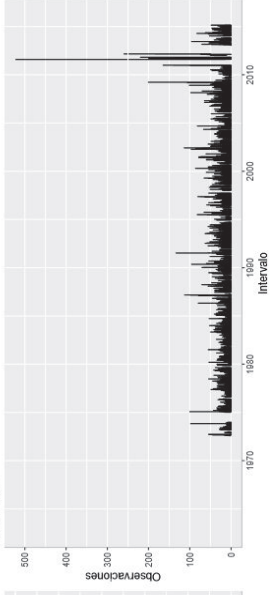
M0436



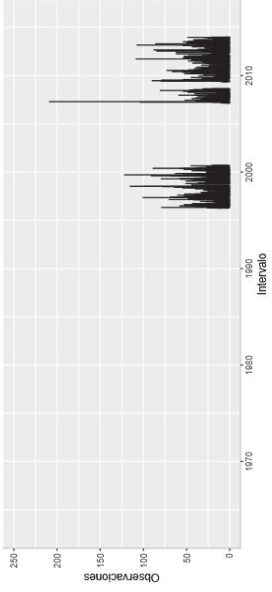
M0486



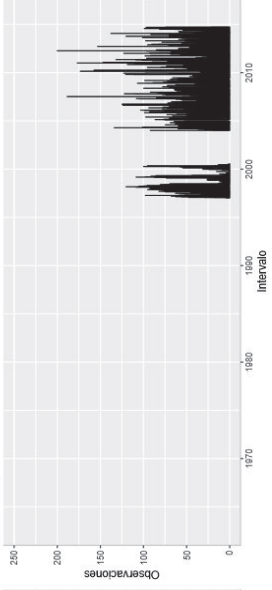
M0490



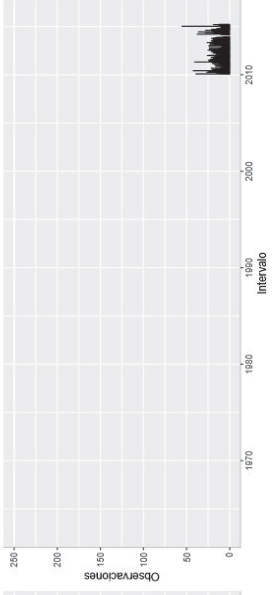
M1124



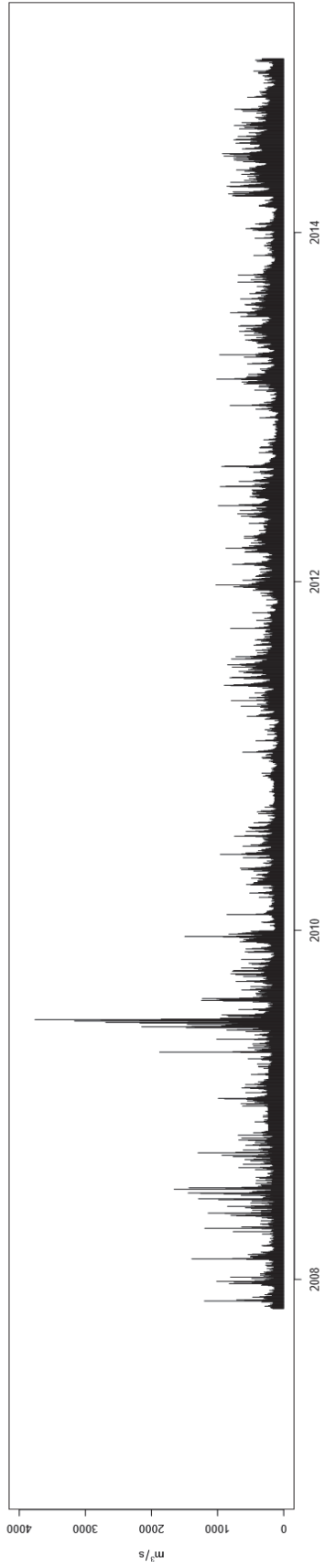
M1203



C12

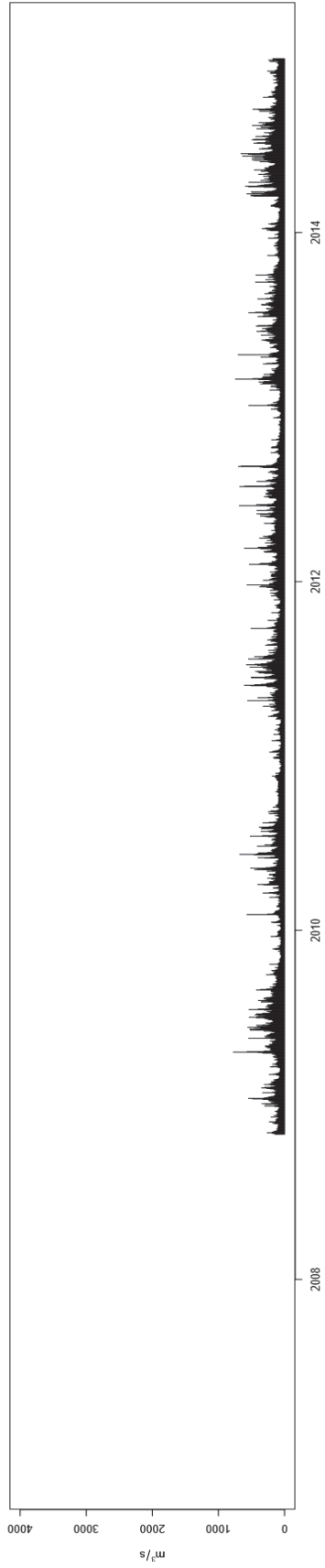


H714



Años

H715



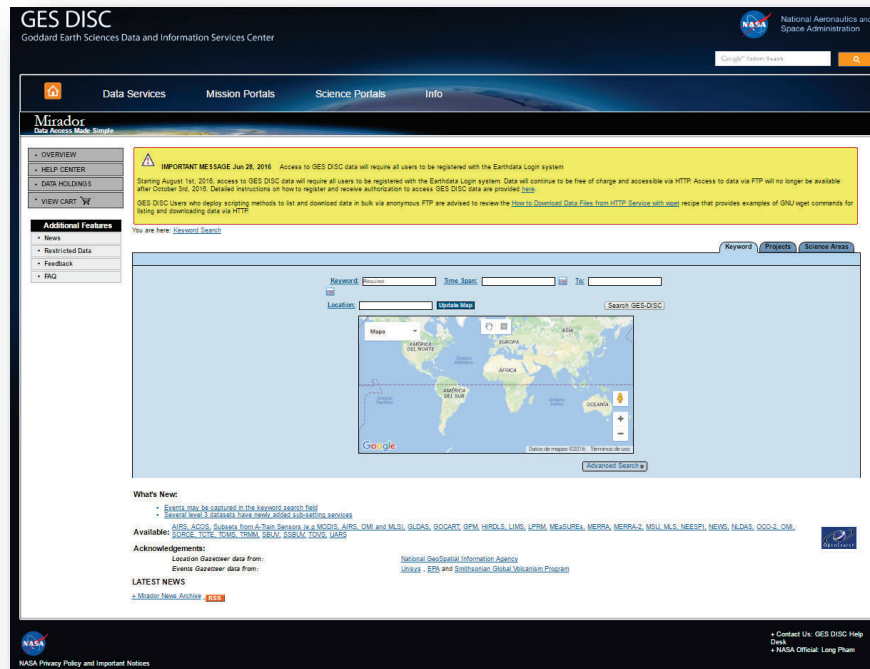
Años

ANEXO 3: Procedimiento de acceso a información de estimación satelital a través de entornos web.

Acceso de datos a través de MIRADOR

Para ingresar al portal MIRADOR, es necesario copiar y pegar la dirección web en un navegador, de esta manera se podrá acceder a la página principal del portal web tal como se muestra en la siguiente figura:


Página principal del portal web Mirador



Fuente:(DISC, 2016).

En la sección **Keyword** se debe ingresar el producto que se desea descargar. Para acceder a los valores de precipitación capturados cada 3 horas se debe ingresar **3B42 V7**.

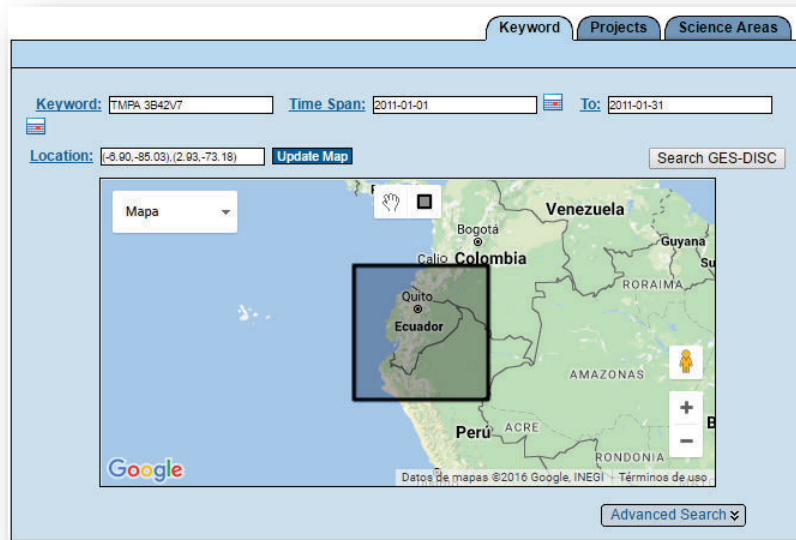
En la sección **Time Span** se debe ingresar la fecha inicial desde cuando se requiere descargar los datos de precipitación, en la sección **To** se debe ingresar hasta que fecha se requieren los datos.

En la sección de **Location** se registran las coordenadas geográficas de la extensión del box que se está visualizando en la sección correspondiente al mapa; con el rectángulo de color gris  se determina el área específica de la cual se va a descargar la información de precipitación.

Dando click en el botón **Search GES-DISC**, se accede a la siguiente ventana para continuar con el proceso de descarga de información.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la información que debe ser ingresada en la página web de Mirador.

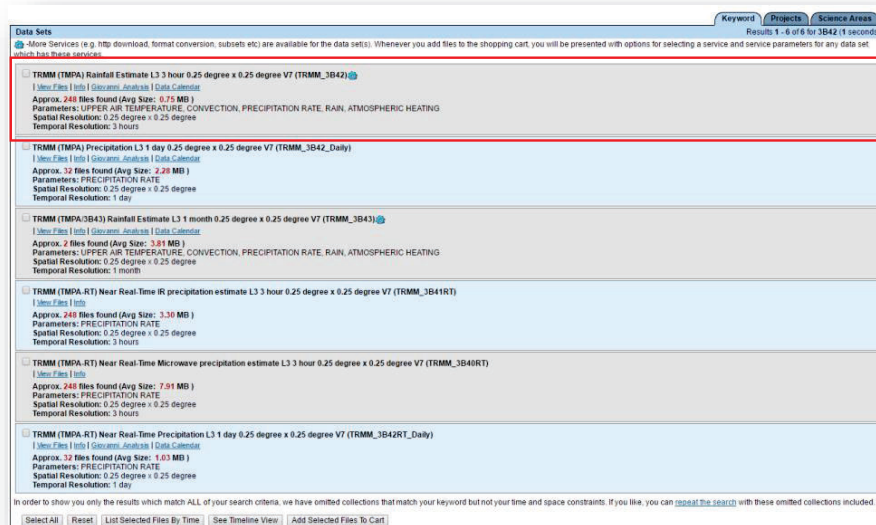
Página principal del portal web Mirador.



Fuente: (DISC, 2016).

En la siguiente ventana se debe seleccionar el producto específico del que se desea acceder, para este caso los datos de precipitación captados por cada 3 horas calculados con el algoritmo 3B42 V7.

Página de selección del producto en la página web de Mirador.



Fuente: (DISC, 2016).

En la siguiente ventana se despliegan los archivos disponibles para descargar, para seleccionarlos individualmente se debe habilitar el check que se encuentran a lado izquierdo del nombre del archivo. Si se requiere descargar solamente 1 archivo se puede dar click directamente sobre el nombre y se descargará el archivo en formato HDF (esta opción descarga la información global sin tener en consideración el subset de la información ingresado en los pasos anteriores).

Para descargar varios archivos se deben seleccionar las fechas específicas requeridas y a continuación se debe dar click en **Add All Files in All Pages To Cart**.

Selección de archivos para ser descargados.

Results 1 - 15 for 3B42 (1 second)

TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7 [info](#)

The following services are available for the data set(s). Whenever you add files to the shopping cart, you will be presented with options for selecting any of these services if they are cart-enabled.
 ⚙️ Subset Spatially and/or by Parameter as NetCDF

[Add Selected Files To Cart](#) [Add All Files in All Pages To Cart](#)

| Select All in Page | File Names/Descriptive File Names | Start Time |
|-------------------------------------|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> | 3B42_20110201_00.7.HDF (0.73 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 22:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_21.7.HDF (0.78 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 19:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_18.7.HDF (0.78 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 16:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_15.7.HDF (0.75 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 13:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_12.7.HDF (0.74 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 10:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_09.7.HDF (0.74 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 07:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_06.7.HDF (0.74 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 04:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_03.7.HDF (0.74 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-31 01:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110131_00.7.HDF (0.76 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 22:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_21.7.HDF (0.77 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 19:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_18.7.HDF (0.79 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 16:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_15.7.HDF (0.78 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 13:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_12.7.HDF (0.78 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 10:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_09.7.HDF (0.76 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 07:30:00 Metadata |
| <input type="checkbox"/> | 3B42_20110130_06.7.HDF (0.76 MB) 📄 One Click Download: OPeNDAP | 2011-01-30 04:30:00 Metadata |

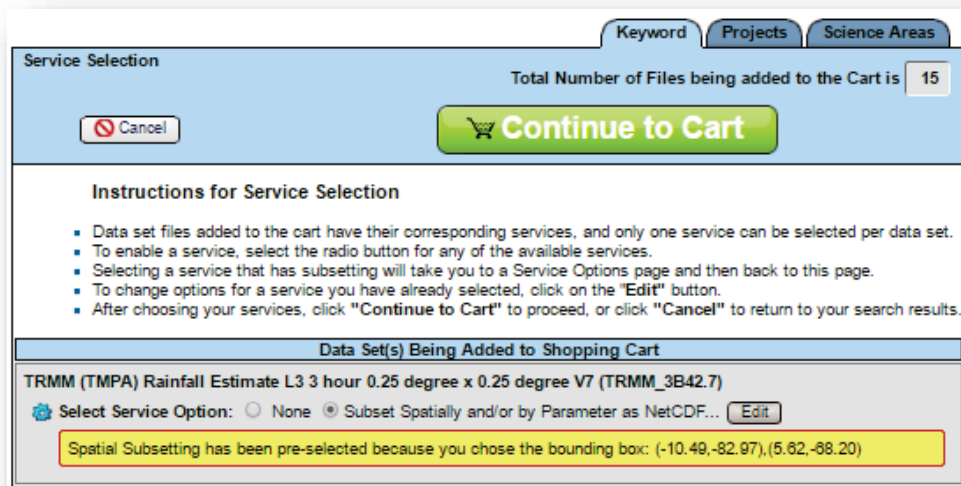
[Add Selected Files To Cart](#) [Add All Files in All Pages To Cart](#)

NASA Search Results

Fuente: (DISC, 2016).

A continuación aparece una nueva ventana que indica el número de archivos que se van a descargar así como las instrucciones de la selección del servicio, en el botón **Edit** se pueden modificar las coordenadas del área donde se descargará la información, para continuar se debe dar click en el botón **Continue to Cart**.

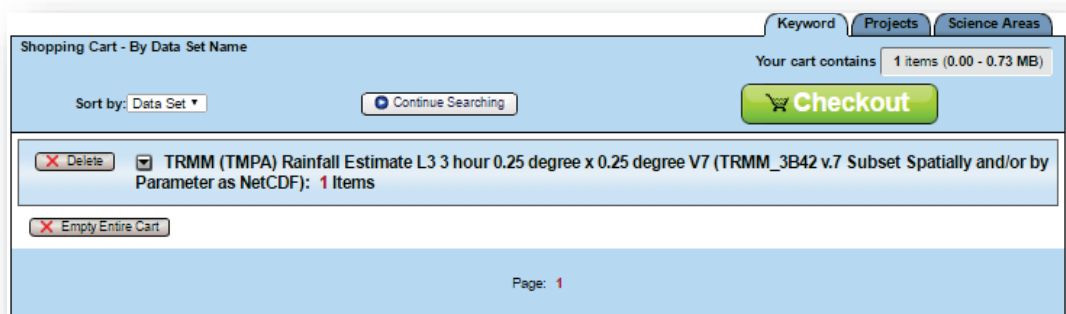
Ventana de selección del servicio.



Fuente: (DISC, 2016).

Una vez que se da click en **Continue to Cart**, se muestra una nueva ventana donde se indican los elementos agregados al carrito de compras, se puede además eliminar algún elemento determinado en caso de requerirse; para continuar se debe dar click en el botón **Checkout**.

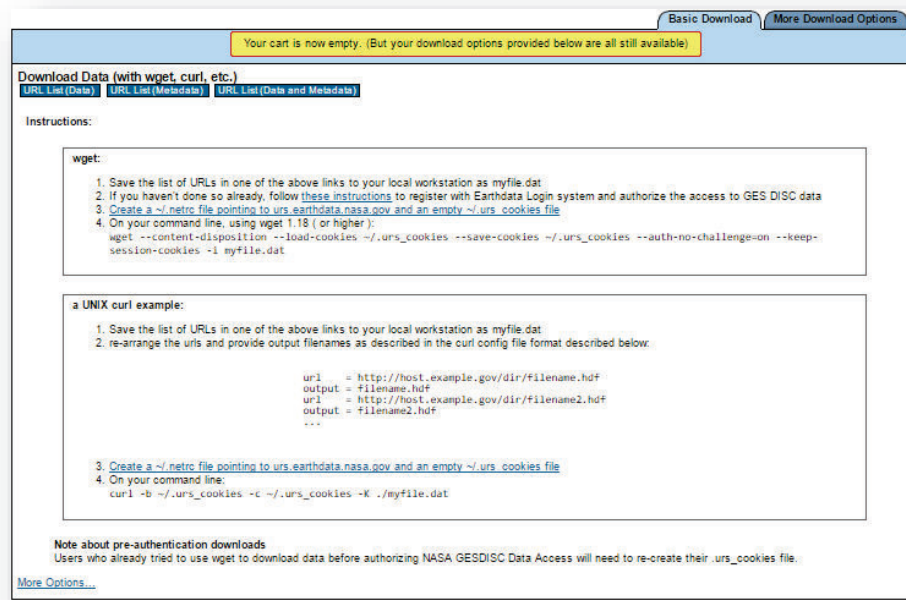
Ventana de visualización de los elementos agregados al carrito de compras.



Fuente: (DISC, 2016).

En la siguiente ventana se muestran las metodologías con las que se puede realizar la descarga de los datos, para que se desplieguen más opciones de descarga se debe dar click en la pestaña **More Download Options**.

Ventana de opciones para descargar información.



Fuente: (DISC, 2016).

La ventana que se despliega al dar click en **More Download Options**, muestra las siguientes opciones para la descarga de información:

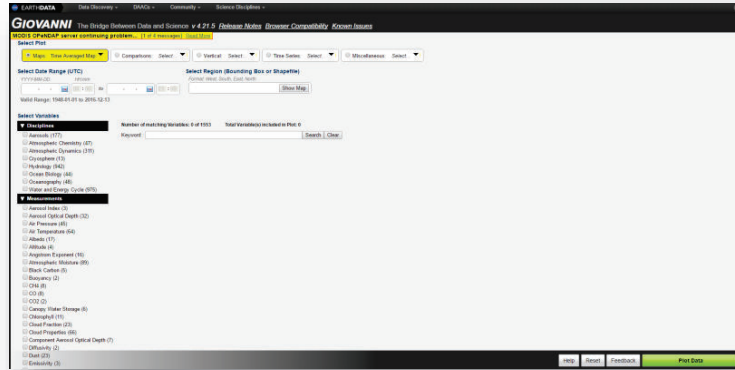
- Descarga a través de un archivo con extensión .jar (requiere que el equipo donde se realice la descarga tenga instalado y actualizado Java).
- Descarga a través de un navegador utilizando manejadores de descarga.
- Descarga compleja a través de un script wget (disponible para sistemas operativos con Windows y UNIX).

Por medio de cualquiera de las opciones detalladas en los puntos anteriores, se puede realizar la descarga de varios archivos a la vez.

Acceso de datos a través de GIOVANNI

Para acceder a los datos provistos por el portal GIOVANNI, es necesario copiar en un navegador web el link que se encuentra en la tabla correspondiente a los portales web para acceder a información de precipitación captada por sensores remotos.

Pantalla principal del portal web GIOVANNI.



Fuente: (Pham, 2016)

En la página principal del portal Giovanni se puede seleccionar diferentes opciones para plotear los datos de la información captada por los sensores remotos, la sección **Maps** permite seleccionar la opción en la que se van a mostrar los datos.

En la sección **Select Date Range (UTC)**, se debe ingresar el rango de tiempo en el que se desean descargar los datos.

El portal Giovanni también posee un entorno espacial para determinar el área de la cual se desean descargar los archivos sin embargo este portal permite realizar la selección a través del polígono de un país. El área se debe ingresar en la sección **Select Region (Bounding Box or Shapefile)**.

En la sección **Keyword** se debe ingresar la variable o el producto del que se desea acceder a los datos, para este caso específico se ingresa 3B42 con lo que se desplegarán todos los productos que tienen relación con el parámetro ingresado, en la siguiente figura se muestran las alternativas que se muestran al ingresar el producto indicado:

Alternativas de selección de productos en el portal web Giovanni.

| Keyword : 3B42 | | Search | Clear | | | |
|--------------------------|--|--------|------------|------------|------------|------------|
| | Variable | Source | Temp. Res. | Spat. Res. | Begin Date | End Date |
| <input type="checkbox"/> | Precipitation (TRMM_3B42 v7) | TRMM | 3-hourly | 0.25 ° | 1997-12-31 | 2016-09-30 |
| <input type="checkbox"/> | Precipitation Rate (TRMM_3B42_Daily v7) | TRMM | Daily | 0.25 ° | 1998-01-01 | 2016-09-30 |
| <input type="checkbox"/> | Near-Real-Time Precipitation Rate (TRMM_3B42RT_Daily v7) | TRMM | Daily | 0.25 ° | 2000-03-01 | 2016-12-12 |
| <input type="checkbox"/> | Near-Real-Time Precipitation Rate (TRMM_3B42RT v7) | TRMM | 3-hourly | 0.25 ° | 2003-03-01 | 2016-12-12 |

Fuente: (Pham, 2016)

Para acceder a la información de precipitación de cada 3 horas se debe marcar en la primera opción de la figura anterior.

En la siguiente figura se muestran los parámetros que deben ser ingresados para acceder a la información de precipitación calculados por el algoritmo 3B42 V7.

Parámetros ingresados en el portal web Giovanni para acceder a la información de precipitación del producto 3B42 V7.

The screenshot shows the Giovanni web portal interface. At the top, there is a notification: "MODIS OPeNDAP server continuing problem... [1 of 4 messages] Read More". Below this, the "Select Plot" section includes a dropdown menu for "Maps" set to "Time Averaged Map", and other options for "Comparisons", "Vertical", "Time Series", and "Miscellaneous". The "Select Date Range (UTC)" section shows a date range from "2000 -01 -01 00 :00" to "2000 -01 -30 23 :59". The "Select Region (Bounding Box or Shapefile)" section shows "Countries Ecuador" and a "Show Map" button. The "Select Variables" section is expanded to show "Disciplines" (Hydrology (4), Water and Energy Cycle (1)) and "Measurements" (Precipitation (4)). A table lists the search results for the keyword "3B42".

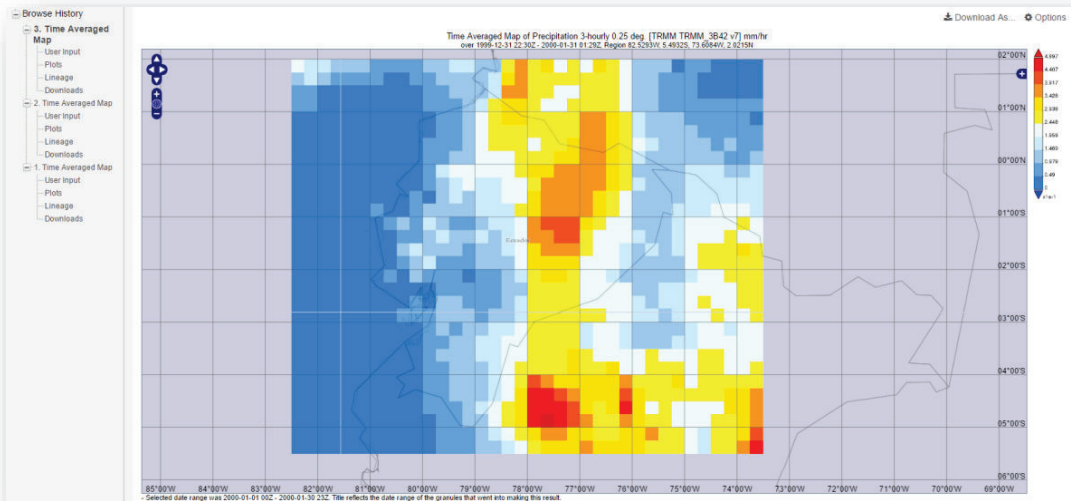
| Variable | Source | Temp. Res. | Spat. Res. | Begin Date | End Date |
|---|--------|------------|------------|------------|------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Precipitation (TRMM_3B42 v7) | TRMM | 3-hourly | 0.25 ° | 1997-12-31 | 2016-09-30 |
| <input type="checkbox"/> Precipitation Rate (TRMM_3B42_Daily v7) | TRMM | Daily | 0.25 ° | 1998-01-01 | 2016-09-30 |
| <input type="checkbox"/> Near-Real-Time Precipitation Rate (TRMM_3B42RT_Daily v7) | TRMM | Daily | 0.25 ° | 2000-03-01 | 2016-12-12 |
| <input type="checkbox"/> Near-Real-Time Precipitation Rate (TRMM_3B42RT v7) | TRMM | 3-hourly | 0.25 ° | 2003-03-01 | 2016-12-12 |

At the bottom of the interface, there is a footer with logos for NASA, NC, OPeNDAP, and ECHO, along with text: "Responsible NASA Official: Long Pham, Web Curator: M. Hegde, Privacy Policy and Important Notices". A "Contact Us" link is also present. At the very bottom, there are buttons for "Help", "Reset", "Feedback", and a prominent green "Plot Data" button.

Fuente: (Pham, 2016)

Al dar click en el botón **Plot Data**, se muestra la información del producto en un entorno espacial tal como se aprecia en la siguiente figura.

Información de precipitación planteada en el portal web Giovanni.



Fuente: (Pham, 2016)

Para descargar en archivo se debe dar click en la parte izquierda de la ventana en la palabra Download, donde aparecerá una nueva ventana en la que se debe seleccionar el formato en el que se va a descargar el archivo.

Información de precipitación planteada en el portal web Giovanni

MODIS OPeNDAP server continuing problem... [1 of 4 messages] [Read More](#)

Browse History

- 1. Time Averaged Map
 - User Input
 - Plots
 - Downloads**
 - Lineage

Click on file links to download. Files contain data portrayed in the plot images.

NetCDF:
[q4.timeAvqMap.TRMM_3B42_7_precipitation.20000101-20000130.82W_5S_73W_2N.nc](#)

PNG:
[q4.timeAvqMap.TRMM_3B42_7_precipitation.20000101-20000130.82W_5S_73W_2N.png](#)

GEOTIFF:
[q4.timeAvqMap.TRMM_3B42_7_precipitation.20000101-20000130.82W_5S_73W_2N.geotiff](#)

KMZ:
[q4.timeAvqMap.TRMM_3B42_7_precipitation.20000101-20000130.82W_5S_73W_2N.kmz](#)

Fuente: (Pham, 2016)

Al dar click en el nombre del archivo que se encuentra debajo de cada formato, se descargará el archivo y se almacenará en el equipo desde el que se está accediendo a la información.

ANEXO 4: Script de agregación a nivel diario de precipitación del producto TMPA 3B42 V7

```

rm(list=ls())
gc()

Sys.setenv(TZ='UTC')

library(zoo)
library(xts)
library(sp)
library(rgdal)
library(hydroGOF)
library(gstat)
library(ggplot2)

load("TMPAV7_EcuPeru_1998_2015_UNI_HR.RData")

coord_trmm<-readOGR(dsn = "grid_trmm_cuenca_principal.shp", layer =
"grid_trmm_cuenca_principal")

trmm.hrly_cuenca<-trmm.hrly[,coord_trmm@data$ID_TRMM]

rm(trmm.hrly)
rm(trmm.sp)
gc()

trmm_clip_hl <- trmm.hrly_cuenca
index(trmm_clip_hl) <- as.POSIXct(format(index(trmm_clip_hl), tz='America/Bogota',usetz=T),
tz='America/Bogota')

dt<-as.difftime(7, unit = 'hours')
trmm_clip_hl_agg7h<-as.zoo(trmm_clip_hl)
index(trmm_clip_hl_agg7h)<-index(trmm_clip_hl) - dt

prueba_d<- apply.daily(trmm_clip_hl,colSums)
index(prueba_d)<-index(prueba_d)-(11*60*60)

ind_days <- as.POSIXct(format(index(trmm_clip_hl_agg7h), '%Y-%m-%d'),
tz='America/Bogota')
trmm_clip_d <- aggregate(trmm_clip_hl_agg7h,ind_days,function(x) round(sum(x),2))
index(trmm_clip_d) <- index(trmm_clip_d)+(12*60*60)

Sys.setenv(TZ='America/Bogota')
zoo_trmm_clip_d_pd <- prueba_d[which(index(prueba_d)=="2008-01-01 12:00:00"):
which(index(prueba_d)=="2014-12-31 12:00:00"),]

zoo_trmm_clip_d <- trmm_clip_d[which(index(trmm_clip_d)=="1998-01-01 12:00:00"):
which(index(trmm_clip_d)=="2014-12-31 12:00:00"),]

sat<-list()
sat[[2]]<-cbind(coord_trmm@coords,coord_trmm@data$ID_TRMM)
sat[[2]]<- as.data.frame(sat[[2]])
colnames(sat[[2]])<-c('x','y', 'ID')

coordinates(sat[[2]])<-~x+y

```

```
proj4string(sat[[2]])<-CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84")

sat[[1]]<-zoo_trmm_clip_d

save(sat,file = 'sat.Rdata')

library(xts)
library(sp)

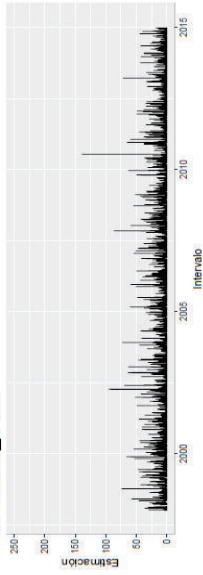
load("sat.RData")
load("estaciones_sp.RData")

ID_TRMM <- numeric()
loc_dists <- numeric()
for (i in 1:nrow(estaciones.sp)) {
  ID_TRMM[i] <- which.min(spDistsN1(sat[[2]],estaciones.sp[i,],longlat=TRUE))
  loc_dists[i] <- min(spDistsN1(sat[[2]],estaciones.sp[i,] ,longlat=TRUE))
}

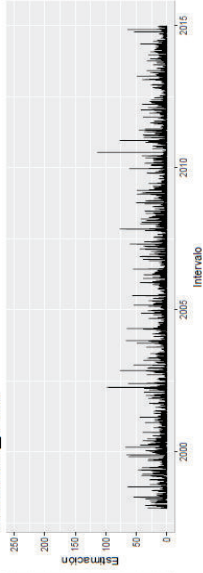
trmm_clip <- sat[[1]][,ID_TRMM]
save(trmm_clip,file = 'trmm_clip.Rdata')
```

ANEXO 5: Series temporales del producto TMPA 3B42 V7 TMPA

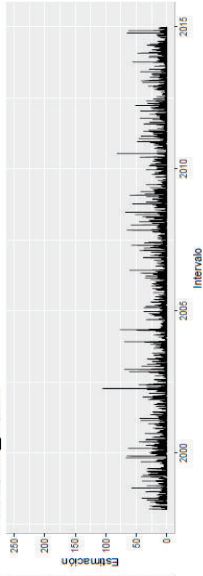
IDTRMM_1166



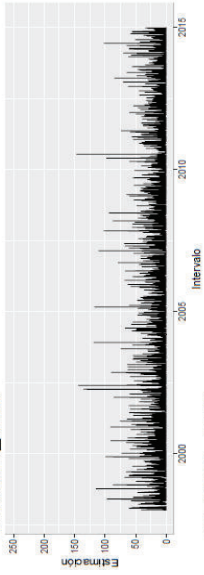
IDTRMM_1167



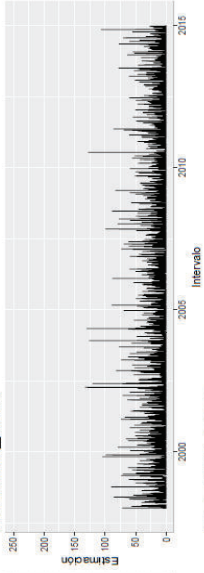
IDTRMM_1168



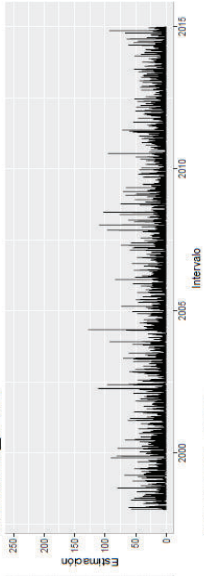
IDTRMM_1250



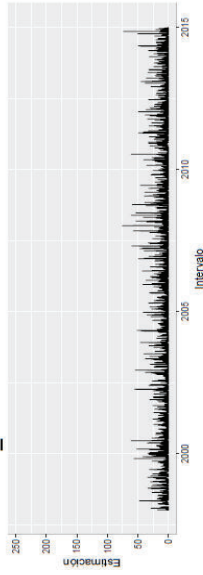
IDTRMM_1251



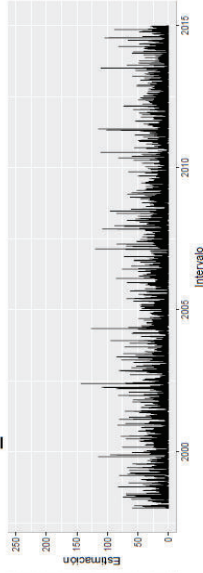
IDTRMM_1252



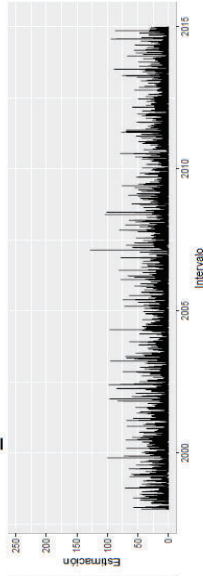
IDTRMM_1253



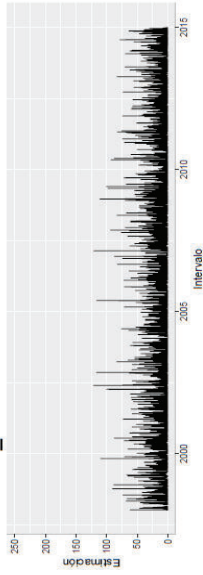
IDTRMM_1335



IDTRMM_1336



IDTRMM_1420



ANEXO 6: Resumen de datos del producto TMPA 3B42 V7 a nivel anual

ANEXO 7: Script en R para el cálculo de indicadores cualitativos e indicadores cuantitativos.

```

load("diarios.RData")
load("trmm_clip.RData")

g_products <- diarios$estaciones

sat_products <- trmm_clip

QPE <- as.data.frame(matrix(ncol=6,nrow=ncol(g_products)))
colnames(QPE) <- c("COR","RMSE","MAE","ME","Bias","NSE")

for(i in 1:ncol(g_products)){

  if (sum(g_products[,i]>0,na.rm=T)<10){
    QPE$COR[i] <- NA
    QPE$RMSE[i] <- NA
    QPE$MAE[i] <- NA
    QPE$ME[i] <- NA
    QPE$Bias[i] <- NA
    QPE$NSE[i] <- NA
  }else{
    gs <- merge(g_products[,i],sat_products[,i])
    gs <- gs[complete.cases(gs),]
    if (nrow(gs)==0){
      next
    } else{
      gauge <- gs[,1]
      sat <- gs[,2]

      gauge[gauge < min_threshold]=0
      sat[sat < min_threshold]=0

      QPE$COR[i] <- cor(gauge,sat,use="na.or.complete")
      QPE$RMSE[i] <- rmse(sat,gauge, na.rm=TRUE)
      QPE$MAE[i] <- mae(sat,gauge, na.rm=TRUE)
      QPE$ME[i] <- me(sat,gauge, na.rm=TRUE)
      QPE$Bias[i] <- pbias(sat,gauge, na.rm=TRUE)
      QPE$NSE[i] <- NSE(sat,gauge, na.rm=TRUE)
    }
  }
}

results$QPE <- QPE

save(results, file="results.RData")

CORs_gg <- data.frame(results$QPE[,1],
  colnames(diarios$estaciones),
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),
  rep("0.25°-day",9),
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))
)

```

```
colnames(CORs_gg) <- c("val", "estacion", "producto", "escala", "zona")
```

```
COR_plot <- qplot(estacion, data=CORs_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+  
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1,  
"cm"))+  
  ggtitle("COEFICIENTE DE CORELACIÓN")+  
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+  
  theme(legend.position = "none")+  
  ylab("Coeficiente de Corelación")+  
  xlab("Estaciones")
```

```
RMSE_gg <- data.frame(results$QPE[,2],  
  colnames(diarios$estaciones),  
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),  
  rep("0.25°-day",9),  
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",  
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))  
)
```

```
colnames(RMSE_gg) <- c("val", "estacion", "producto", "escala", "zona")
```

```
RMSE_plot <- qplot(estacion, data=RMSE_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+  
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1, "cm"))+  
  ggtitle("ERROR MEDIO CUADRÁTICO")+  
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+  
  theme(legend.position = "none")+  
  ylab("Error medio cuadrático")+  
  xlab("Estaciones")
```

```
MAE_gg <- data.frame(results$QPE[,3],  
  colnames(diarios$estaciones),  
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),  
  rep("0.25°-day",9),  
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",  
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))  
)
```

```
colnames(MAE_gg) <- c("val", "estacion", "producto", "escala", "zona")
```

```
MAE_plot <- qplot(estacion, data=MAE_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+  
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1, "cm"))+  
  ggtitle("ERROR MEDIO ABSOLUTO")+  
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+  
  theme(legend.position = "none")+  
  ylab("Error medio absoluto")+  
  xlab("Estaciones")
```

```
ME_gg <- data.frame(results$QPE[,4],  
  colnames(diarios$estaciones),  
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),  
  rep("0.25°-day",9),  
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",  
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))  
)
```

```
colnames(ME_gg) <- c("val", "estacion", "producto", "escala", "zona")
```

```

ME_plot <- qplot(estacion, data=ME_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1, "cm"))+
  ggtitle("ERROR MEDIO")+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(legend.position = "none")+
  ylab("Error medio")+
  xlab("Estaciones")
BIAS_gg <- data.frame(results$QPE[5],
  colnames(diarios$estaciones),
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),
  rep("0.25°-day",9),
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))
)
colnames(BIAS_gg) <- c("val","estacion", "producto", "escala", "zona")

BIAS_plot <- qplot(estacion, data=BIAS_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1, "cm"))+
  ggtitle("SESGO")+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(legend.position = "none")+
  ylab("Sesgo")+
  xlab("Estaciones")

NSE_gg <- data.frame(results$QPE[6],
  colnames(diarios$estaciones),
  rep("ESTACIONES/TMPA",9),
  rep("0.25°-day",9),
  factor( c("alta", "media", "baja", "media", "media", "media", "media", "baja",
"media"), levels = c ("baja", "media", "alta"))
)
colnames(NSE_gg) <- c("val","estacion", "producto", "escala", "zona")

NSE_plot <- qplot(estacion, data=NSE_gg, geom="bar", weight=val, fill='black')+
  facet_grid(.~zona, scale="free_x", space = "free_x")+theme(panel.margin.x=unit(1, "cm"))+
  ggtitle("COEFICIENTE DE NASH")+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(legend.position = "none")+
  ylab("Coeficiente de Nash")+
  xlab("Estaciones")

file='Ind_estadísticos.pdf'
pdf(file=file, width=20, height=10)

grid.arrange(COR_plot, RMSE_plot, MAE_plot, ME_plot, BIAS_plot, NSE_plot, ncol=3, nrow =
2)

dev.off()

g_products <- diarios$estaciones

```

```

sat_products <- trmm_clip

min_threshold <- 0.1

thresholds_detect<-seq(0.1,30,0.3)

# list to store results
results <- list()

k=1

print(Sys.time())

detection <- list()

detection$Hits <- matrix(ncol=ncol(g_products),nrow=length(thresholds_detect))
encabezado <-c(rep("M0188"),rep("M0203"), rep("M0293"), rep("M0436"), rep("M0486"),
rep("M0490"), rep("M1124"), rep("M1203"), rep("C12"))

detection$Miss <- detection$Hits
detection$FAs <- detection$Hits
detection$CZs <- detection$Hits
detection$CSI <- detection$Hits
detection$POD <- detection$Hits
detection$FAR <- detection$Hits
detection$ACC <- detection$Hits
detection$FBI <- detection$Hits
detection$ETS <- detection$Hits
detection$HSS <- detection$Hits

colnames(detection$Hits)<-encabezado
colnames(detection$Miss)<-encabezado
colnames(detection$FAs)<- encabezado
colnames(detection$CZs)<-encabezado
colnames(detection$CSI)<-encabezado
colnames(detection$POD)<-encabezado
colnames(detection$FAR)<-encabezado
colnames(detection$ACC)<-encabezado
colnames(detection$FBI)<-encabezado
colnames(detection$ETS)<-encabezado
colnames(detection$HSS)<-encabezado

for(i in 1:ncol(g_products)){
  gs <- merge(g_products[,i],sat_products[,i])
  gs <- gs[complete.cases(gs),]
  if (nrow(gs)==0){
    next
  } else{
    gauge <- gs[,1]
    sat <- gs[,2]

    for(j in 1:length(thresholds_detect)){

```

```

print(i + j/length(thresholds_detect))

hits <- sum(gauge>thresholds_detect[j] & sat>thresholds_detect[j], na.rm=T)
miss <- sum(gauge>thresholds_detect[j] & !(sat>thresholds_detect[j]), na.rm=T)
fas <- sum(!(gauge>thresholds_detect[j]) & sat>thresholds_detect[j], na.rm=T)
czeroes <- sum(gauge<=thresholds_detect[j] & sat<=thresholds_detect[j],na.rm=T)

detection$Hits[j,i] <- hits/ sum(!is.na(sat)) # perc_hits
detection$Miss[j,i] <- miss/ sum(!is.na(sat)) # perc_miss
detection$FAs[j,i] <- fas/ sum(!is.na(sat)) # perc_fas
detection$CZs[j,i] <- czeroes/ sum(!is.na(sat)) # perc_czs

detection$CSI[j,i] <- hits/ (hits + miss + fas) # CSI
detection$POD[j,i] <- hits/(hits + miss) # POD
detection$FAR[j,i] <- fas/(hits + fas) # FAR
detection$ACC[j,i] <- (hits + czeroes)/ sum(!is.na(sat)) # ACC
detection$FBI[j,i] <- (hits + fas)/(hits + miss) # FBI
He = ((hits + miss)*(hits + fas))/sum(!is.na(sat))
detection$ETS[j,i] <- (hits-He)/(hits + fas + miss - He) # ETS
detection$HSS[j,i] <- 2*((hits*czeroes)-(fas*miss))/(((hits+miss)*(miss+czeroes)) +
((hits+fas)*(fas+czeroes))) # HSS
}
}
}

intervalos<- seq(0.1,30,0.3)
mdetec<-as.data.frame(matrix(data = NA, nrow = 900,ncol =11 ))
colnames(mdetec) <- c("Umbral","Estaciones","FAs","CZs","CSI","POD", "FAR", "ACC", "FBI",
"ETS", "HSS")
mdetec$Intervalo <- intervalos
mdetec$Estaciones <- c(rep("M0188",100),rep("M0203",100), rep("M0293",100),
rep("M0436",100), rep("M0486",100), rep("M0490",100), rep("M1124",100), rep("M1203",100),
rep("C12",100))

mdetec$FAs <- c(results$detection$FAs[,1], results$detection$FAs[,2],
results$detection$FAs[,3], results$detection$FAs[,4], results$detection$FAs[,5],
results$detection$FAs[,6], results$detection$FAs[,7], results$detection$FAs[,8],
results$detection$FAs[,9])
mdetec$CZs <- c(results$detection$CZs[,1], results$detection$CZs[,2],
results$detection$CZs[,3], results$detection$CZs[,4], results$detection$CZs[,5],
results$detection$CZs[,6], results$detection$CZs[,7], results$detection$CZs[,8],
results$detection$CZs[,9])
mdetec$CSI <- c(results$detection$CSI[,1], results$detection$CSI[,2],
results$detection$CSI[,3], results$detection$CSI[,4], results$detection$CSI[,5],
results$detection$CSI[,6], results$detection$CSI[,7], results$detection$CSI[,8],
results$detection$CSI[,9])
mdetec$POD <- c(results$detection$POD[,1], results$detection$POD[,2],
results$detection$POD[,3], results$detection$POD[,4], results$detection$POD[,5],
results$detection$POD[,6], results$detection$POD[,7], results$detection$POD[,8],
results$detection$POD[,9])
mdetec$FAR <- c(results$detection$FAR[,1], results$detection$FAR[,2],
results$detection$FAR[,3], results$detection$FAR[,4], results$detection$FAR[,5],

```

```

results$detection$FAR[,6], results$detection$FAR[,7], results$detection$FAR[,8],
results$detection$FAR[,9])
mdetec$ACC <- c(results$detection$ACC[,1], results$detection$ACC[,2],
results$detection$ACC[,3], results$detection$ACC[,4], results$detection$ACC[,5],
results$detection$ACC[,6], results$detection$ACC[,7], results$detection$ACC[,8],
results$detection$ACC[,9])
mdetec$FBI <- c(results$detection$FBI[,1], results$detection$FBI[,2], results$detection$FBI[,3],
results$detection$FBI[,4], results$detection$FBI[,5], results$detection$FBI[,6],
results$detection$FBI[,7], results$detection$FBI[,8], results$detection$FBI[,9])
mdetec$ETS <- c(results$detection$ETS[,1], results$detection$ETS[,2],
results$detection$ETS[,3], results$detection$ETS[,4], results$detection$ETS[,5],
results$detection$ETS[,6], results$detection$ETS[,7], results$detection$ETS[,8],
results$detection$ETS[,9])
mdetec$HSS <- c(results$detection$HSS[,1], results$detection$HSS[,2],
results$detection$HSS[,3], results$detection$HSS[,4], results$detection$HSS[,5],
results$detection$HSS[,6], results$detection$HSS[,7], results$detection$HSS[,8],
results$detection$HSS[,9])

```

```

FAs_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=FAs, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid", "longdash", "solid"))+
  scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue", "dark
green", "peachpuff4", "coral4", "chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[3]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[3]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2, face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(), legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")

```

```

file='FAs.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
FAs_plot

```

```
dev.off()
```

```

CZs_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=CZs, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid", "longdash", "solid"))+
  scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue", "dark
green", "peachpuff4", "coral4", "chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[4]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+

```

```

ggtitle(colnames(mdetec[4]))+
theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
      axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
#(legend.position = "none")+
#theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
file='CZs.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
CZs_plot

dev.off()

CSI_plot <-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=CSI, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
geom_line()+
#scale_linetype_manual(values=c("solid","longdash","solid"))+
scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue","dark
green","peachpuff4","coral4","chartreuse4","darkgoldenrod2","darkturquoise","firebrick4"))+
scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
#guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
ylab(colnames(mdetec[5]))+
xlab(colnames(mdetec[1]))+
ggtitle(colnames(mdetec[5]))+
theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
      axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
#(legend.position = "none")+
#theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")

file='CSI.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
CSI_plot

dev.off()

POD_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=POD, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
geom_line()+
#scale_linetype_manual(values=c("solid","longdash","solid"))+
scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue","dark
green","peachpuff4","coral4","chartreuse4","darkgoldenrod2","darkturquoise","firebrick4"))+
scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
#guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
ylab(colnames(mdetec[6]))+
xlab(colnames(mdetec[1]))+
ggtitle(colnames(mdetec[6]))+
theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
      axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
#(legend.position = "none")+

```



```
#theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
file='POD.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
POD_plot
```

```
dev.off()
```

```
FAR_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=FAR, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid", "longdash", "solid"))+
  scale_color_manual(values=c( "indianred2", "cornflowerblue", "dark
green", "peachpuff4", "coral4", "chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[7]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[7]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
```

```
file='FAR.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
FAR_plot
```

```
dev.off()
```

```
ACC_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=ACC, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid", "longdash", "solid"))+
  scale_color_manual(values=c( "indianred2", "cornflowerblue", "dark
green", "peachpuff4", "coral4", "chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[8]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[8]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
```

```
file='ACC.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
```

ACC_plot

dev.off()

```
FBI_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=FBI, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid","longdash","solid"))+
  scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue","dark
green", "peachpuff4","coral4","chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[9]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[9]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
```

file='FBI.pdf'

pdf(file=file, width=10, height=6)

FBI_plot

dev.off()

```
ETS_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=ETS, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid","longdash","solid"))+
  scale_color_manual(values=c("indianred2", "cornflowerblue","dark
green", "peachpuff4","coral4","chartreuse4", "darkgoldenrod2", "darkturquoise", "firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[10]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[10]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")
```

file='ETS.pdf'

pdf(file=file, width=10, height=6)

ETS_plot

dev.off()

```

HSS_plot<-ggplot(mdetec,aes(x=intervalos, y=HSS, color=Estaciones, linetype=Estaciones,
size=Estaciones))+
  geom_line()+
  #scale_linetype_manual(values=c("solid","longdash","solid"))+
  scale_color_manual(values=c("indianred2","cornflowerblue","dark
green","peachpuff4","coral4","chartreuse4","darkgoldenrod2","darkturquoise","firebrick4"))+
  scale_size_manual(values=c(0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5))+
  #guides(color=guide_legend(override.aes=list(shape=NA)))+
  ylab(colnames(mdetec[1]))+
  xlab(colnames(mdetec[1]))+
  ggtitle(colnames(mdetec[1]))+
  theme(plot.title=element_text(size = rel(2), vjust=2,face="bold", color = "black"))+
  theme(axis.line.x = element_line(color="grey", size = 0.7),
        axis.line.y = element_line(color="grey", size = 0.7))#+
  #(legend.position = "none")+
  #theme(legend.position = "top", legend.title=element_blank(),legend.key =
  element_blank())#+geom_hline(yintercept = 0.4, color="grey")

file='HSS.pdf'
pdf(file=file, width=10, height=6)
HSS_plot

dev.off()

library(gridExtra)
file='detection.pdf'
pdf(file=file, width=25, height=12)
grid.arrange(FAs_plot, CZs_plot, CSI_plot, POD_plot, FAR_plot, ACC_plot, FBI_plot, ETS_plot,
HSS_plot, ncol=3, nrow = 3)
dev.off()

```

ANEXO 8: Ejemplo de creación de tabla de contingencia e indicadores cualitativos

EJEMPLO DE CÁLCULO DE INDICADORES CUALITATIVOS

Para el cálculo de los indicadores cuantitativos es necesario calcular los valores Hit, Miss, False Alarm y Correct Zeros presentes en la tabla de contingencia. Para este análisis es necesario comparar los valores de precipitación observada y los valores de precipitación del producto TMPA, para efectos de ejemplo se tomarán en cuenta los valores del 3 de febrero de 2010.

| ID PÍXEL TMPA | PRECIPITACIÓN TMPA (mm) | ESTACIÓN DE REFERENCIA | PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm) |
|------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 1167 | 1.33 | M0188 | 11.3 |
| 1336 | 0.04 | M0203 | 9.8 |
| 1503 | 0 | M0293 | 0 |
| 1167 | 1.33 | M0436 | 8.1 |
| 1251 | 0 | M0486 | ----- |
| 1251 | 0 | M0490 | 3.5 |
| 1250 | 0 | M1124 | 5 |
| 1421 | 0.11 | M1203 | 4.2 |
| 1167 | 1.33 | MC12 | 39.3 |

En la investigación llevada a cabo, el umbral de detección considerado fue de 0.1 a 30 con intervalos de 0.3 dando un total de 100.

Para el valor HIT se analiza las detecciones realizadas por los datos observados y por el producto TMPA dentro de cada umbral, cada valor de uno corresponde a un HIT. Los resultados de los Hits hasta el umbral de 3mm se muestra a continuación:

| HITS | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| UMBRAL | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
| 0.1 | 1 | 0 | 0 | 1 | ----- | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0.4 | 1 | 0 | 0 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0.7 | 1 | 0 | 0 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1.3 | 1 | 0 | 0 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |

Los valores correspondientes a MISS corresponde a los umbrales en los que el producto de precipitación TMPA ya no capto información, cada valor registrado con uno corresponde a un MISS.

| MISS | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| UMBRAL | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
| 0.1 | 0 | 1 | 0 | 0 | ----- | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0.4 | 0 | 1 | 0 | 0 | ----- | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0.7 | 0 | 1 | 0 | 0 | ----- | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | ----- | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1.3 | 0 | 1 | 0 | 0 | ----- | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1.6 | 1 | 1 | 0 | 1 | ----- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1.9 | 1 | 1 | 0 | 1 | ----- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2.2 | 1 | 1 | 0 | 1 | ----- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2.5 | 1 | 1 | 0 | 1 | ----- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2.8 | 1 | 1 | 0 | 1 | ----- | 1 | 1 | 1 | 1 |

Las falsas alarmas son registradas cuando el producto de precipitación TMPA reporta un registro mientras que en los datos observados no se registra valor de precipitación, para el 3 de febrero de 2010, no se han registrado falsas alarmas hasta el umbral de 2.5mm

| FALSE ALARM | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| UMBRAL | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
| 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |

El objetivo del análisis llevado a cabo con el indicador Correct Zero es identificar los valores de cero detectados correctamente por el producto de precipitación TMPA, en este sentido se registrará el valor de 1 cuando el producto de precipitación haya registrado correctamente el valor de 0 con relación a los datos observados. En la siguiente figura se puede evidenciar que el píxel relacionado a la estación M0293 captó correctamente el valor de 0.

CERRECT ZEROS

| UMBRAL | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.1 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.4 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.7 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.3 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.6 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.9 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |

Estas tablas fueron generadas para los 6209 días de datos. Para el cálculo de los indicadores POD, FAR, ACC, FBI, ETS y HSS, se deben realizar las operaciones aritméticas descritas en las fórmulas respectivas que se encuentran en la sección de metodología. A continuación se muestra los valores del indicador ACC para el 3 de febrero de 2010.

ACC

| UMBRAL | M0188 | M0203 | M0293 | M0436 | M0486 | M0490 | M1124 | M1203 | MC12 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.1 | 1 | 0 | 1 | 1 | ----- | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0.4 | 1 | 0 | 1 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0.7 | 1 | 0 | 1 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1.3 | 1 | 0 | 1 | 1 | ----- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1.6 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.9 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8 | 0 | 0 | 1 | 0 | ----- | 0 | 0 | 0 | 0 |

ANEXO 9: Script para la corrección del producto TMPA 3B42 V7 a nivel diario aplicando los métodos MBC, DS, KCC y KED.

MBC

```
rm(list=ls())
gc()

library(xts)
library(rgdal)

library(zoo)
library(gstat)
library(automap)
library(rgdal)
library(sp)
library(hydroGOF)
library(raster)
library(devtools)
library(Rainmerging)

load("diarios.Rdata")

load("sat.Rdata")

load("gaugeM.Rdata")

gauge[[1]]<-gauge[[1]][which(index(gauge[[1]])=="2010-02-01 12:00:00"):
which(index(gauge[[1]])=="2010-02-05 12:00:00"),]
sat[[1]]<-sat[[1]][which(index(sat[[1]])=="2010-02-01 12:00:00"):
which(index(sat[[1]])=="2010-02-05 12:00:00"),]

Zs <- sat[[1]]
Zg <- gauge[[1]]
Tdata <- sat[[2]]
Gdata <- gauge[[2]]

if (!cross.val) {

  # get location of Zg in Zs
  loc <- numeric()
  for (i in 1:length(Gdata)) loc[i] <- which.min(spDists(Tdata,Gdata[i,] ,
              longlat=TRUE))

  # subset Zs
  Zs_sub <- Zs[,loc]

  # remove pixel-point pairs with NA values
  Zs_sub[is.na(Zg)] <- NA

  # calculate bias factor
  CF <- apply(Zg, 1, sum, na.rm=TRUE)/ apply(Zs_sub, 1, sum, na.rm=TRUE)

  # apply bias correction
  Zs <- CF*Zs

  return( Zs )
}
```

```
} else {
```

DS

```
rm(list=ls())  
gc()
```

```
library(xts)  
library(rgdal)
```

```
library(zoo)  
library(gstat)  
library(automap)  
library(rgdal)  
library(sp)  
library(hydroGOF)  
library(raster)  
library(devtools)  
library(Rainmerging)
```

```
load('sat.RData')  
load('gaugeM.RData')
```

```
gauge[[1]]<-gauge[[1]][which(index(gauge[[1]])=="2010-02-03 12:00:00"):  
which(index(gauge[[1]])=="2010-02-03 12:00:00"),]  
sat[[1]]<-sat[[1]][which(index(sat[[1]])=="2010-02-03 12:00:00"):  
which(index(sat[[1]])=="2010-02-03 12:00:00"),]
```

```
Zs <- sat[[1]]  
Zg_o <- gauge[[1]]  
Tdata <- sat[[2]]  
Gdata_o <- gauge[[2]]
```

```
Zs_final<-zoo(matrix(NA,ncol=ncol(Zs),nrow=nrow(Zs)),index(Zs))  
colnames(Zs_final)<-1:ncol(Zs_final)
```

```
longlat=TRUE  
cross.val=FALSE
```

```
for ( l in 1:length(index(gauge[[1]]))){
```

```
  Gdata<-Gdata_o[-which(is.na(Zg_o[l,])),]  
  Zg<-Zg_o[l,-which(is.na(Zg_o[l,]))]
```

```
  print(index(Zg))
```

```
  # standardise index classes  
  index(Zs) <- as.Date(index(Zs))  
  index(Zg) <- as.Date(index(Zg))
```

```
  #if(!cross.val) {
```

```

# get location of Zg in Zs
loc <- numeric()
for (i in 1:length(Gdata)) loc[i] <- which.min(spDists(Tdata,Gdata[i,]
, longlat))

# subset Zs
Zs_sub <- Zs[l,loc]

# get point residuals
res <- Zs_sub - Zg

# calculate kernel weights

# first level - get distances between interpolation grids and point residuals
distres <- spDists(Gdata, Tdata ,longlat)

# second level - get distances between interpolation grids and pseudo-residuals
distpseud <- spDists(Tdata, Tdata ,longlat)

# Define Gaussian kernel function
kerf <- function(x,b){ return(1/sqrt(2*pi)*exp(- x^2 /(2*b^2))) }

# Parameterise b using Silverman's rule of thumb

b1 <- 1.06*sd(distres )*length(distres )^(-1/5)
b2 <- 1.06*sd(distpseud)*length(distpseud)^(-1/5);

# compute Kernel weights
K1 <- kerf((distres ) ,b1);
K2 <- kerf((distpseud),b2);

K1 <- t(K1)
K1 <- rep(K1,nrow(res)); dim(K1) <- c(dim(t(distres)),nrow(res))

# interpolate residuals
eDS <- eSS <- matrix(ncol=nrow(Tdata), nrow=nrow(res))

for (t in 1:nrow(res)){

  eSS[t,] <- (K1[,t] %*% t(res[t,])) /apply(K1[,t],1,sum)
  eDS[t,] <- (K1[,t] %*% t(res[t,]) + K2 %*% eSS[t,]) / (apply(K1[,t],1,sum)
+ apply(K2,1,sum))
}

# add residual back to background
Zs_temp <- Zs[l,] - eDS

Zs_temp[which(Zs_temp<0)] <- 0

Zs_final[l,]<-Zs_temp
}

```

KCC

```
rm(list=ls())  
gc()
```

```
library(raster)  
library(xts)  
library(rowr)  
library(gstat)  
library(rgdal)  
library(zoo)
```

```
load("diarios.Rdata")  
load("trmm_clip.RData")  
load("estaciones_sp.RData")
```

```
trmm_clip<-trmm_clip[which(index(trmm_clip)== "2010-02-01 12:00:00"):  
which(index(trmm_clip)== "2010-02-28 12:00:00"),]
```

```
#####PARA PONER 0 DONDE APARECE NA SOLAMENTE SE UTILIZA PARA  
REALIZAR EL CALCULO DEL FACTOR A NIVEL MENSUAL###
```

```
trmm_clip_mod<-(trmm_clip)  
trmm_clip_mod[is.na(trmm_clip_mod)]<-0  
trmm_agg_men<- apply.monthly(trmm_clip_mod,function(x) colSums(x,na.rm =  
TRUE))
```

```
diarios_estaciones_cortado <-  
diarios$estaciones[which(index(diarios$estaciones)== "2010-02-01 12:00:00"):  
which(index(diarios$estaciones)== "2010-02-28 12:00:00"),]
```

```
temp_vacio<-data.frame(matrix(NA,ncol=9))  
colnames(temp_vacio)<-colnames(diarios_estaciones_cortado)  
for(i in 1:nrow(trmm_agg_men)){  
  temp_subset<-  
  subset(diarios_estaciones_cortado,format(index(diarios_estaciones_cortado),'%Y-  
%m')== format(index(trmm_agg_men),'%Y-%m')[i])
```

```
  temp_trmm_agg_subset <-as.vector(trmm_agg_men[i,])  
  temp_subset_1<-as.matrix(temp_subset)  
  temp_op <-t(t(temp_subset_1)/temp_trmm_agg_subset)
```

```
  temp_vacio<-rbind(temp_vacio,temp_op)  
}
```

```
coef_f<-temp_vacio[-1,]  
coef_f<-zoo(coef_f)  
index(coef_f)<-index(trmm_clip)  
coef_f<-round(coef_f,3)
```

```

# crear un dummy raster para definir zona de estudio (coordenadas de cuenca Napo
en Ecuador, WGS84, coordenadas geograficas) #
norte<-0.5
sur<- -1
oeste<- -78.5
este<- -76.75

num_filas<-length(seq(sur,norte,0.25))-1
num_cols<-length(seq(oeste,este,0.25))-1

zona<-raster(nrows=num_filas, ncols=num_cols, xmn=oeste, xmx=este, ymn=sur,
ymx=norte)
zona[]<-1
# Visualizar el raster
plot(zona)

# Calcular el coeficiente de sesgo k
#trmm_min_umbral = 0.1
#coredata(trmm_clip) [which(coredata(trmm_clip)<trmm_min_umbral)] <- 0
#k_coef<-diarios$estaciones/trmm_clip
#k_coef<-apply(k_coef,2,function(x) ifelse(is.finite(x),x,NA))

# Para la interpolacion
# establecer el area sobre la que se hara la interpolacion
# y transformar en SpatialPixelsDataFrame
zona2<-as.data.frame(rasterToPoints(zona))
coordinates(zona2)<-~x+y
projection(zona2)<-projection(estaciones.sp)
gridded(zona2) = TRUE

# crear data frame vacio que se llenara en el bucle, con la misma extension del raster
zona
df_k<-as.data.frame(matrix(NA, ncol=num_filas*num_cols, nrow = nrow(coef_f)))

for (i in 1:nrow(coef_f)){
  # colocar en data frame la informacion espacial y valores de k
  temp<-
cbind(estaciones.sp@coords[,1],estaciones.sp@coords[,2],as.numeric(coredata(coef_f
)[i,]))
  # transformar a SpatialPointsDataFrame
  colnames(temp)<-c('x','y','data')
  temp<-as.data.frame(temp)

temp<-temp[complete.cases(temp),]

if(nrow(temp)<=2){
  df_k[i,]<-rep (NA,42)
}else{
  coordinates(temp)<-~x+y
  projection(temp)<-projection(estaciones.sp)
  # interpolar coeficiente k con metodo idw
  resultados<-idw(data~1, temp, zona2, nmax=5, idp=2 )
}
}

```

```

# transformar de SpatialPixelsDataFrame a raster
ress<-raster(resultados)
# almacenar valores interpolados en el data frame df_k
df_k[i,]<-round(ress@data@values,2)
}
}

#df_k[is.na(df_k)]<-1
zoo_df_f<- zoo(df_k,index(trmm_clip))

load("sat.Rdata")
sat[[1]]<-sat[[1]][which(index(sat[[1]])=="2010-02-01 12:00:00"):
which(index(sat[[1]])=="2010-02-28 12:00:00"),]
sat_agg_men<- apply.monthly(sat[[1]],function(x) colSums(x,na.rm = TRUE))

Fechas <- zoo(read.csv("Fechas.csv", sep = ",", header = T))
num_rep<-as.data.frame(Fechas[,3])
rep_sat_agg_men<-matrix(NA,ncol = 42, nrow = 1 )

for(k in 1:204){
  temp_rep<-num_rep[k,]
  valores<- as.vector(sat_agg_men[k,])
  rango_matriz<-matrix(NA,ncol=42, nrow = (temp_rep))
  l=1
  for(l in 1:temp_rep){
    rango_matriz[l,]<-valores
  }

  rep_sat_agg_men<-rbind(rep_sat_agg_men,rango_matriz)

}

rep_sat_agg_men<-rep_sat_agg_men[-1,]

tmpa_corr_f<-rep_sat_agg_men*zoo_df_f

tmpa_corr_f<-zoo(tmpa_corr_f,index(zoo_df_f))

```

KED

```

rm(list=ls())
gc()

library(xts)
library(rgdal)

library(zoo)
library(gstat)

```

```

library (automap)
library (rgdal)
library (sp)
library (hydroGOF)
library (raster)

library ("Rainmerging")

load("gaugeM.RData")
load("sat.RData")

KED <- function(sat,gauge, longlat =TRUE, cross.val=FALSE){

  gauge[[1]]<-gauge[[1]][which(index(gauge[[1]])=="2010-02-01 12:00:00"):
which(index(gauge[[1]])== "2010-02-28 12:00:00"),]
  sat[[1]]<-sat[[1]][which(index(sat[[1]])=="2010-02-01 12:00:00"):
which(index(sat[[1]])== "2010-02-28 12:00:00"),]

  Zs   <- sat[[1]]
  Zg   <- gauge[[1]]
  Tdata <- sat[[2]]
  Gdata <- gauge[[2]]

  # get location of Zg in Zs

  loc <- numeric()
  for (i in 1:length(Gdata)) loc[i] <- which.min(spDists(Tdata,Gdata[i,],
longlat))

  Zg   <- data.frame(t(Zg))
  Zs_field <- data.frame(t(Zs))
  Zs_trend <- data.frame(t(Zs[loc,]))

  names(Zg)   <- paste("Gauge",names(Zg),sep="")
  names(Zs_trend) <- paste("Trend",names(Zs_trend),sep="")
  names(Zs_field) <- names(Zs_trend)

  gaugename<- names(Zg)
  trendname<- names(Zs_trend)

  ## log transform rain gauge data (comment out if not needed)
  #Zg <- log(Zg +0.01)

  ## merge maps
  data <- data.frame(Gdata, Zg, Zs_trend)
  #coordinates(data) <- coordinates(Tdata[loc,])
  coordinates(data) <- ~x+y##MODIFICADO##
  proj4string(data) <- proj4string(Tdata)

  coordinates(Zs_field) <- coordinates(Tdata)
  proj4string(Zs_field) <- proj4string(Tdata)

  vm.fit <- list()
  crossval <- matrix(ncol=nrow(Gdata),nrow=length(gaugename))

```

```

for (i in 1:length(gaugename)){

  # Get data for time step and exclude gauges with missing data
  data_sub <- data[is.finite(unlist(as.data.frame(data)[gaugename[i]])),]

  # Model semivariogram
  formula <- as.formula(paste(as.character(gaugename[i])," ~ ",
                              as.character(trendname[i]),sep=""))

  vm.fit[[i]] <- autofitVariogram(formula, data_sub,
                                  model = c("Sph", "Exp", "Gau"))

  #####GRAFICAR EL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL##
  vgm <- variogram(formula, data= data_sub)
  print(plot(vgm))

  library ("geoR")
  geodata<- as.geodata(data_sub[,i])
  vgm1<-variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data, max.dist =
1)
  print(plot(vgm1))
  ###INCLUIR MODELO DE SEMIVARIOGRAMA TEÓRICO##
  lines.variomodel(cov.m="sph", cov.p =c(100,0.2), nug=0, max.dist=1, lty=1,
scaled=F, col="black", lwd=2)
  lines.variomodel(cov.m="exp", cov.p =c(100,0.2), nug=0, max.dist=1, lty=1,
scaled=F, col="red", lwd=2)
  lines.variomodel(cov.m="gau", cov.p =c(100,0.2), nug=0, max.dist=1, lty=1,
scaled=F, col="blue", lwd=2)
  legend("top", expression(list("Esférico"),list("Exponencial"), list("Gaussiano")),
        lty=c(1,1,1), lwd=c(2,2,2), col=c("black","red","blue"))

  # Perform Kriging
  Zs[i,] <- krige(formula, locations=data_sub, newdata=Zs_field,
                  model = vm.fit[[i]]$var_model)$var1.pred

  Zs_KED<-Zs
  Zs_KED[which(Zs_KED<0)] <- 0
  Zs_KED<-round(Zs_KED,3)
  save(Zs_KED, file = "Zs_KED.RData")

  # Perform cross-validation
  if(cross.val==TRUE) {
    cv <- krige.cv(formula, locations=data_sub, model = vm.fit[[i]]$var_model)
    crossval[i,as.numeric(row.names(cv))] <- cv$var1.pred
  }
}

# back-log transform output
# Zs <- exp(Zs) - 0.01

# tag dates
Zs <- as.zoo(Zs); time(Zs) <- time(gauge[[1]])

```



```
crossval <- as.zoo(crossval); time(crossval) <- time(gauge[[1]])  
  
# return results  
if(cross.val==TRUE) return(crossval) else return(Zs)  
}
```

ANEXO 10: Ejemplo del aplicaciones de métodos de corrección al producto de precipitación TMPA 3B42 V7

EJEMPLO DE CORRECCIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO MBC

Para el presente ejemplo de cálculo se tomarán los datos correspondientes al 3 de febrero de 2010.

Para este método es necesario conocer que centroide del píxel del producto TMPA está más cercano a una estación meteorológica, en la siguiente tabla se indica el código de la estación meteorológica, el identificador del centroide del píxel del producto TMPA y su respectivo valor de precipitación.

| ESTACIÓN DE REFERENCIA | ID PÍXEL TMPA | PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm) | PRECIPITACIÓN TMPA (mm) |
|------------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|
| M0188 | 1167 | 11.3 | 1.33 |
| M0203 | 1336 | 9.8 | 0.04 |
| M0293 | 1503 | 0 | 0 |
| M0436 | 1167 | 8.1 | 1.33 |
| M0486 | 1251 | ----- | 0 |
| M0490 | 1251 | 3.5 | 0 |
| M1124 | 1250 | 5.0 | 0 |
| M1203 | 1421 | 4.2 | 0.11 |
| MC12 | 1167 | 39.3 | 1.33 |
| SUMA | | 81.2 | 4.14 |

Para el cálculo de la sumatoria de los valores del producto TMPA, se excluyen los valores en los que no existe registro de precipitación observada para este caso los valores que están en color naranja. Aplicando la fórmula descrita en la sección de metodología se divide el valor de la sumatoria de datos observados para la sumatoria de los valores del producto TMPA, en este caso se obtuvo un valor de 19.61 para el 3 de febrero de 2010, este valor se debe multiplicar por cada valor de precipitación del producto TMPA, en este sentido el valor corregido del píxel 1167 será 26.09 mm.

EJEMPLO DE CORRECCIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO DS

Para el presente ejemplo de cálculo se tomarán los datos correspondientes al 3 de febrero de 2010.

Tal como en el método anterior, es necesario conocer que centroide del píxel está más cercano a una estación meteorológica y en base a esta distancia calcular el residual puntual el que se obtiene al restar los valores de precipitación del producto menos los valores de precipitación observada.

| ID PÍXEL TMPA | PRECIPITACIÓN TMPA (mm) | ESTACIÓN DE REFERENCIA | PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm) | RESIDUAL PUNTUAL |
|---------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| 1167 | 1.33 | M0188 | 11.3 | -9.97 |
| 1336 | 0.04 | M0203 | 9.8 | -9.76 |
| 1503 | 0 | M0293 | 0 | 0 |
| 1167 | 1.33 | M0436 | 8.1 | -6.77 |
| 1251 | 0 | M0486 | ----- | ----- |
| 1251 | 0 | M0490 | 3.5 | -3.5 |
| 1250 | 0 | M1124 | 5 | -5 |
| 1421 | 0.11 | M1203 | 4.2 | -4.09 |
| 1167 | 1.33 | MC12 | 39.3 | -37.97 |

No se calcula el residual relacionado con la estación M0486 debido a que no se registran datos de precipitación observada para el día de análisis; este criterio aplica para el cálculo de los residuales puntuales para cada día.

Se debe considerar que el método de corrección DS, emplea para su cálculo dos funciones kernel una que relaciona las distancias de los centroides con las estaciones meteorológicas y otra que relaciona las distancias entre los centroides los píxeles, para esto se deben generar las respectivas matrices de distancia descritas con anterioridad.

Distancias entre centroides de píxeles y estaciones meteorológicas

| ID TMPA Estación | 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 | 1250 | 1251 | ... | 1590 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|--------|
| M0188 | 37.47 | 26.01 | 38.37 | 54.61 | 27.04 | 1.93 | 28.27 | 55.84 | 83.43 | 62.11 | 40.09 | 29.67 | ... | 163.80 |
| M0203 | 114.05 | 101.19 | 94.84 | 113.21 | 92.33 | 75.88 | 67.17 | 69.21 | 81.19 | 99.42 | 74.79 | 53.15 | ... | 86.14 |
| M0293 | 149.34 | 145.40 | 146.64 | 132.96 | 122.45 | 117.62 | 119.15 | 126.81 | 139.60 | 109.17 | 96.10 | 89.86 | ... | 78.62 |
| M0436 | 45.11 | 38.88 | 50.11 | 52.01 | 25.66 | 11.64 | 33.69 | 60.48 | 87.78 | 53.65 | 28.84 | 17.56 | ... | 155.11 |
| M0490 | 67.42 | 61.91 | 68.14 | 64.12 | 43.30 | 34.09 | 44.40 | 65.61 | 90.34 | 54.68 | 27.44 | 6.31 | ... | 134.31 |
| M1124 | 50.00 | 59.83 | 78.63 | 30.88 | 22.59 | 39.87 | 64.75 | 91.21 | 118.19 | 22.64 | 8.31 | 33.89 | ... | 165.08 |
| M1203 | 136.92 | 124.32 | 116.99 | 133.81 | 114.42 | 98.99 | 89.61 | 88.22 | 95.18 | 117.47 | 94.78 | 75.43 | ... | 63.31 |
| MC12 | 40.58 | 38.00 | 52.57 | 45.92 | 19.56 | 13.41 | 38.73 | 65.90 | 93.33 | 48.93 | 25.84 | 21.56 | ... | 160.07 |

Distancias entre centroides de píxeles

| ID TMPA Estación | 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | ... | 1590 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1082 | 0 | 27.60 | 55.19 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | 113.84 | ... | 82.79 |
| 1083 | 27.60 | 0.00 | 27.60 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | ... | 55.19 |
| 1084 | 55.19 | 27.60 | 0.00 | 87.34 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | ... | 27.60 |
| 1165 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | 0.00 | 27.60 | 55.19 | 82.79 | 110.39 | 137.98 | ... | 161.27 |
| 1166 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 27.60 | 0.00 | 27.60 | 55.19 | 82.79 | 110.39 | ... | 83.49 |
| 1167 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 55.19 | 27.60 | 0.00 | 27.60 | 55.19 | 82.79 | ... | 123.62 |
| 1168 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 82.79 | 55.19 | 27.60 | 0.00 | 27.60 | 55.19 | ... | 216.61 |
| 1169 | 87.34 | 61.81 | 39.19 | 110.39 | 82.79 | 55.19 | 27.60 | 0.00 | 27.60 | ... | 169.24 |
| 1170 | 113.84 | 87.34 | 61.81 | 137.98 | 110.39 | 82.79 | 55.19 | 27.60 | 0.00 | ... | 166.98 |
| 1249 | 62.12 | 78.38 | 99.76 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | 113.84 | 140.76 | ... | 148.78 |
| 1250 | 55.66 | 62.12 | 78.38 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | 113.84 | ... | 55.66 |
| 1251 | 62.12 | 55.66 | 62.12 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | 87.34 | ... | 140.76 |
| 1252 | 78.38 | 62.12 | 55.66 | 87.34 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | 61.81 | ... | 113.84 |
| 1253 | 99.76 | 78.38 | 62.13 | 113.84 | 87.34 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | 39.19 | ... | 27.83 |
| 1254 | 123.62 | 99.76 | 78.38 | 140.76 | 113.84 | 87.34 | 61.81 | 39.19 | 27.83 | ... | 137.98 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 110.39 |
| 1590 | 200.16 | 186.37 | 175.86 | 195.96 | 177.61 | 161.91 | 149.69 | 141.86 | 139.15 | 177.29 | 0.00 |

Con las matrices de distancias se calcula la respectiva desviación estándar.

$$\sigma_1 = 36.88$$

$$\sigma_2 = 44.83$$

Con los valores de la desviación estándar se calcula el valor b utilizando la regla de Silverman utilizando la fórmula descrita en la sección de metodología.

$$b_1 = 12.21$$

$$b_2 = 10.65$$

Utilizando la fórmula respectiva se realiza el cálculo del kernel Gausiano de cada una de las matrices de distancias. Al multiplicar el kernel Gausiano de los centroides de píxeles y estaciones meteorológicas por los valores de los residuales puntuales se obtiene el primer set de residuales para cada uno de los centroides de los píxeles.

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 |
| -17.45 | -11.68 | -10.23 | -5.68 | -19.88 | -15.95 | -11.02 | -9.82 | -9.74 | -5.06 |
| 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1419 |
| -8.37 | -9.30 | -5.74 | -9.67 | -9.69 | -4.46 | -3.82 | -9.49 | -9.17 | -2.09 |
| 1420 | 1421 | 1503 | 1504 | 1505 | 1587 | 1588 | 1589 | 1333 | 1338 |
| -6.82 | -4.90 | 0.00 | -0.80 | -4.09 | 0.00 | 0.00 | -2.19 | -5.00 | -7.47 |
| 1418 | 1081 | 1085 | 1086 | 1417 | 1422 | 1501 | 1502 | 1506 | 1585 |
| -0.27 | -11.16 | -9.98 | -9.96 | -4.62 | -4.25 | -1.40E-06 | -1.50E-06 | -4.09 | -2.17E-12 |
| 1586 | 1590 | | | | | | | | |
| -2E-09 | -4E+00 | | | | | | | | |

Relacionando el kernel Gausiano de los centroides de píxeles y estaciones y el kernel Gausiano de los centroides de los píxeles, se obtiene el segundo set de residuales.

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 |
| -17.13 | -11.92 | -10.30 | -6.27 | -19.24 | -15.83 | -10.96 | -9.85 | -9.75 | -5.18 |
| 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1419 |
| -8.45 | -9.26 | -6.21 | -9.54 | -9.62 | -4.46 | -4.08 | -9.23 | -9.03 | -2.17 |
| 1420 | 1421 | 1503 | 1504 | 1505 | 1587 | 1588 | 1589 | 1333 | 1338 |
| -6.61 | -4.98 | -0.06 | -0.98 | -3.97 | -8.53E-04 | -0.10 | -2.24 | -4.97 | -7.49 |
| 1418 | 1081 | 1085 | 1086 | 1417 | 1422 | 1501 | 1502 | 1506 | 1585 |
| -0.58 | -11.20 | -9.99 | -9.95 | -4.35 | -4.36 | -0.14 | -0.01 | -4.10 | -5.22E-06 |
| 1586 | 1590 | | | | | | | | |
| -1.70E-06 | -4.03 | | | | | | | | |

El valor final producto de la corrección se obtiene al restar los valores de precipitación del producto TMPA menos los valores del segundo set de residuales.

EJEMPLO DE CORRECCIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO KCC

El método de corrección inicia con la división de los valores diarios de precipitación observado dividido para la agregación a nivel mensual del producto TMPA.

| ESTACIÓN DE REFERENCIA | PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm) 03/02/2017 | ID PÍXEL TMPA | PRECIPITACIÓN TMPA (mm/mes) | COEFICIENTE K |
|------------------------|---|---------------|-----------------------------|---------------|
| M0188 | 11.3 | 1167 | 107.3 | 0.11 |
| M0203 | 9.8 | 1336 | 163.81 | 0.06 |
| M0293 | 0 | 1503 | 187.88 | 0.00 |
| M0436 | 8.1 | 1167 | 107.3 | 0.08 |
| M0486 | ----- | 1251 | 137.04 | ----- |
| M0490 | 3.5 | 1251 | 137.04 | 0.03 |
| M1124 | 5 | 1250 | 166.69 | 0.03 |
| M1203 | 4.2 | 1421 | 145.95 | 0.03 |
| MC12 | 39.2 | 1167 | 107.3 | 0.37 |

Los valores del coeficiente K son interpolados para cada uno de los centroides de los píxeles del producto TMPA utilizando para esto el método IDW de acuerdo a la recomendación realizada por (Moreano 2008).

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 |
| 0.13 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.12 | 0.06 |
| 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1419 |
| 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.07 | 0.04 | 0.02 |
| 1420 | 1421 | 1503 | 1504 | 1505 | 1587 | 1588 | 1589 | 1333 | 1338 |
| 0.01 | 0.14 | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0.14 | 0.16 |
| 1418 | 1081 | 1085 | 1086 | 1417 | 1422 | 1501 | 1502 | 1506 | 1585 |
| 0.06 | 0.09 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.13 | 0.11 | 0.08 | 0.1 | 0.08 |
| 1586 | 1590 | | | | | | | | |
| 0.02 | 0.02 | | | | | | | | |

Los valores interpolados para cada día, se multiplican por el valor de precipitación del producto TMPA agregado a nivel mensual.

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 |
| 121.56 | 111.22 | 111.70 | 143.31 | 117.14 | 107.30 | 106.73 | 117.46 | 105.65 | 224.92 |
| 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1419 |
| 166.69 | 137.04 | 146.59 | 119.45 | 96.92 | 195.85 | 171.33 | 163.81 | 161.49 | 183.70 |
| 1420 | 1421 | 1503 | 1504 | 1505 | 1587 | 1588 | 1589 | 1333 | 1338 |
| 174.86 | 145.95 | 187.88 | 175.88 | 154.50 | 211.92 | 198.05 | 184.73 | 225.20 | 141.92 |
| 1418 | 1081 | 1085 | 1086 | 1417 | 1422 | 1501 | 1502 | 1506 | 1585 |
| 203.25 | 122.56 | 120.95 | 113.13 | 230.13 | 124.20 | 244.22 | 194.84 | 134.08 | 205.74 |
| 1586 | 1590 | | | | | | | | |
| 195.94 | 174.35 | | | | | | | | |

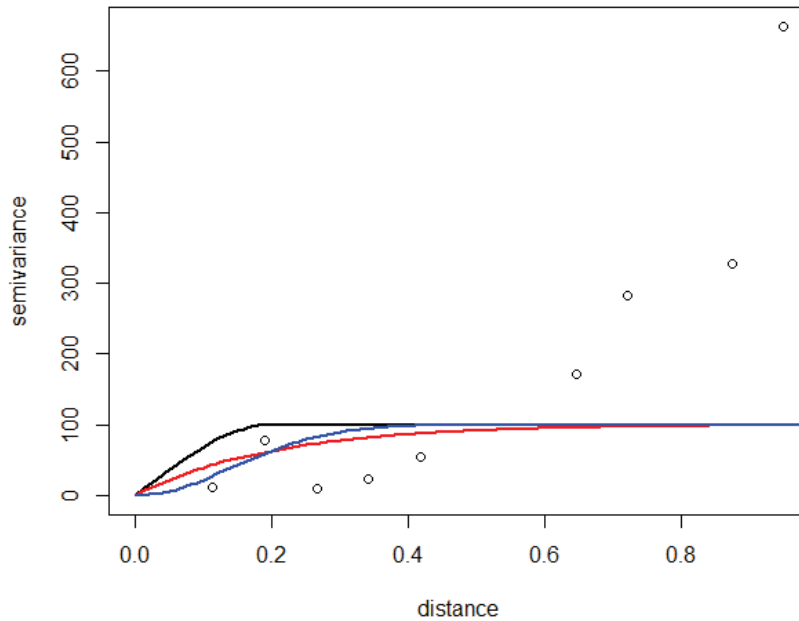
El valor corregido del píxel 1251 el 3 de febrero de 2010 resultaría 4.11 mm.

EJEMPLO DE CORRECCIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO KED

Similar a los métodos anteriores, este método necesita la información a nivel diario de precipitación del producto TMPA y la precipitación observada, en este ejemplo se utilizarán los datos del 3 de febrero de 2017.

| ID PÍXEL TMPA | PRECIPITACIÓN TMPA (mm) | ESTACIÓN DE REFERENCIA | PRECIPITACIÓN OBSERVADA (mm) |
|---------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1167 | 1.33 | M0188 | 11.3 |
| 1336 | 0.04 | M0203 | 9.8 |
| 1503 | 0 | M0293 | 0 |
| 1167 | 1.33 | M0436 | 8.1 |
| 1251 | 0 | M0486 | ----- |
| 1251 | 0 | M0490 | 3.5 |
| 1250 | 0 | M1124 | 5 |
| 1421 | 0.11 | M1203 | 4.2 |
| 1167 | 1.33 | MC12 | 39.3 |

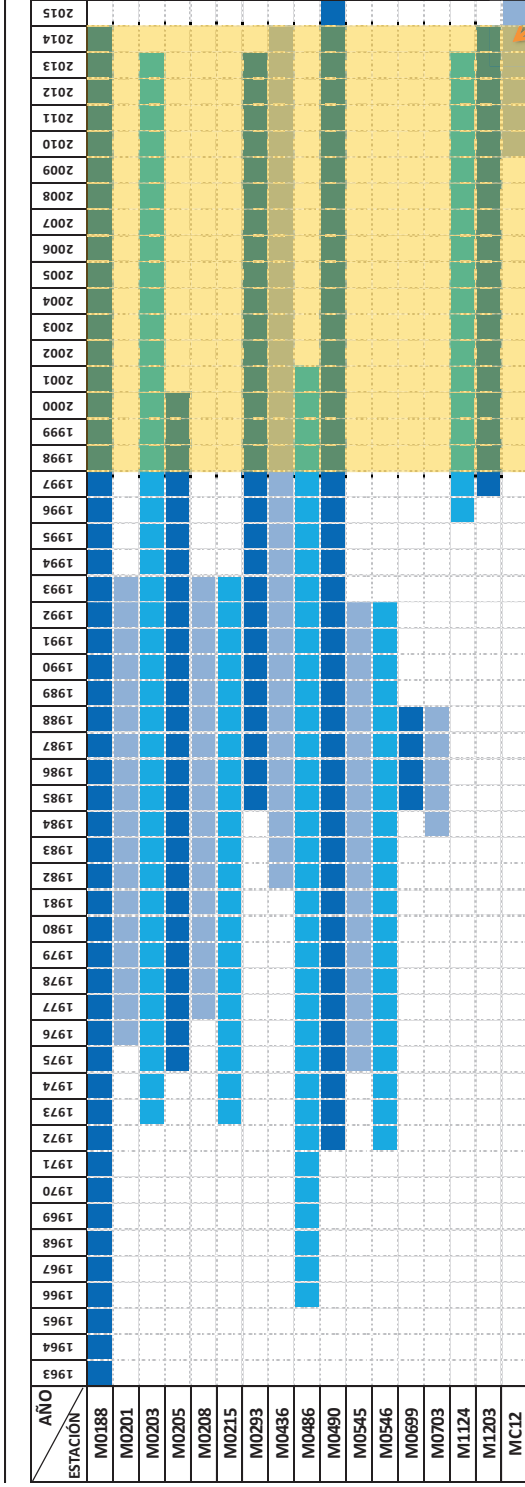
Con estos valores se realiza la construcción del semivariograma



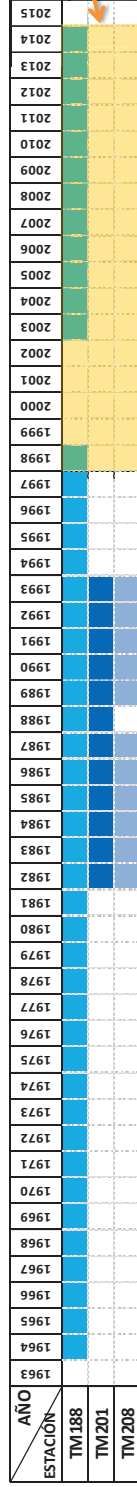
Como se puede apreciar en la figura del semivariograma no es posible determinar el modelo del semivariograma experimental por lo que se utilizó la función de autofitvariogram de la librería Rainmerging. Con el modelo teórico del semivariograma se calculan los pesos y se realiza la corrección con el método KED para cada uno de los centroides de los píxeles del producto TMPA para cada día. Los valores corregidos para el día 3 de febrero de 2010 fueron:

| | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1082 | 1083 | 1084 | 1165 | 1166 | 1167 | 1168 | 1169 | 1170 | 1249 |
| 23.058 | 4.141 | 4.141 | 31.763 | 4.141 | 19.517 | 4.141 | 10.64 | 4.489 | 4.141 |
| 1250 | 1251 | 1252 | 1253 | 1254 | 1334 | 1335 | 1336 | 1337 | 1419 |
| 4.142 | 4.139 | 4.373 | 4.721 | 5.185 | 4.141 | 7.506 | 4.605 | 12.497 | 4.141 |
| 1420 | 1421 | 1503 | 1504 | 1505 | 1587 | 1588 | 1589 | 1333 | 1338 |
| 4.141 | 5.416 | 4.135 | 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.605 |
| 1418 | 1081 | 1085 | 1086 | 1417 | 1422 | 1501 | 1502 | 1506 | 1585 |
| 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.605 | 4.141 | 4.257 | 4.141 | 4.141 | 4.141 | 4.141 |
| 1586 | 1590 | | | | | | | | |
| 4.141 | 4.14 | | | | | | | | |

ANEXO 11: Disponibilidad de observaciones diarias de
Precipitación, Temperatura y Caudal desde 1963 hasta 2015.

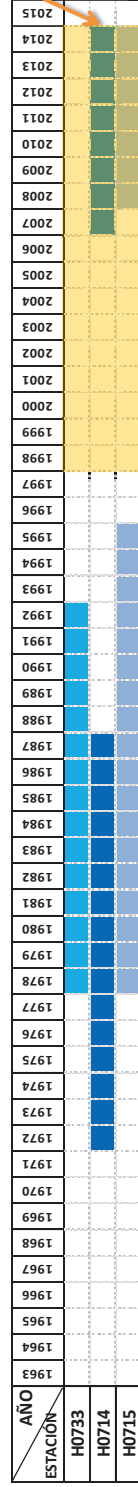


TEMPERATURA

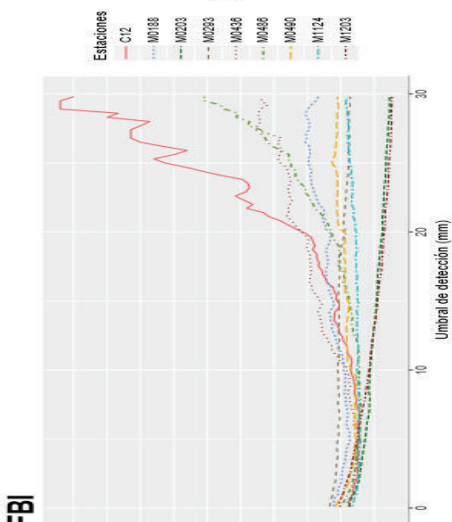
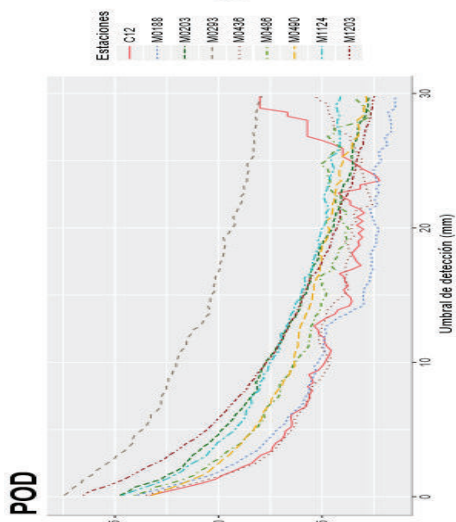
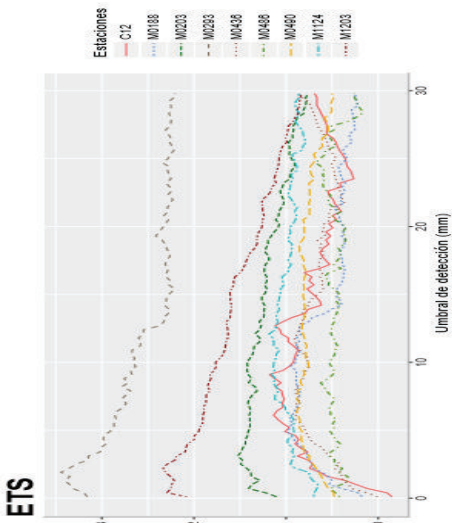
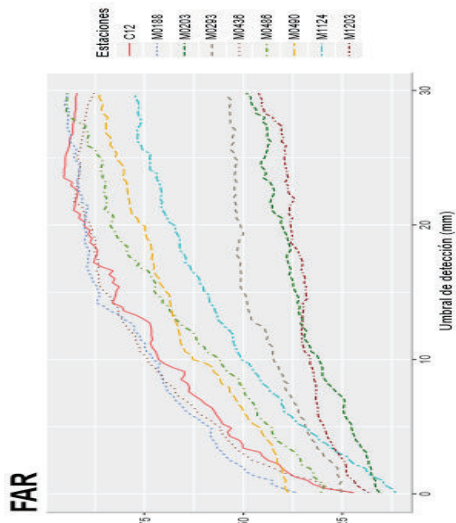
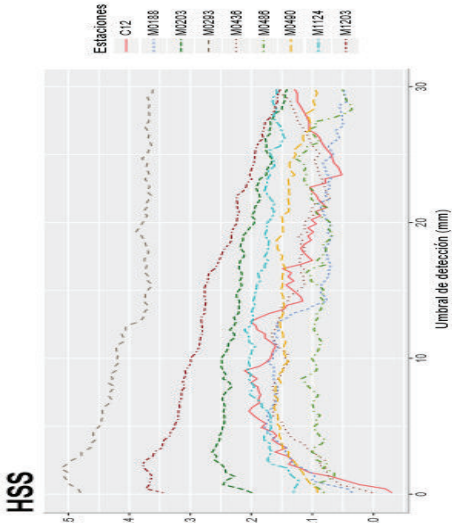
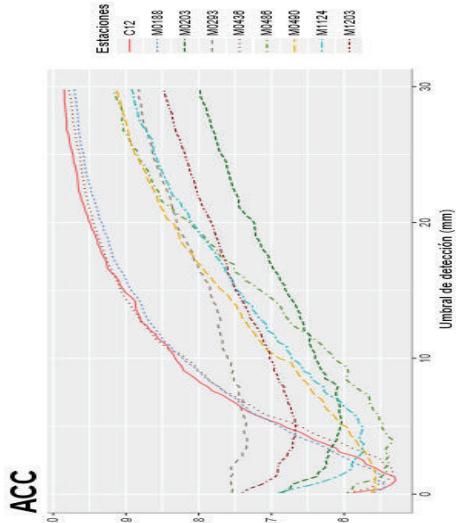


Disponibilidad de datos
del producto de
precipitación TMPA
3B42 V7

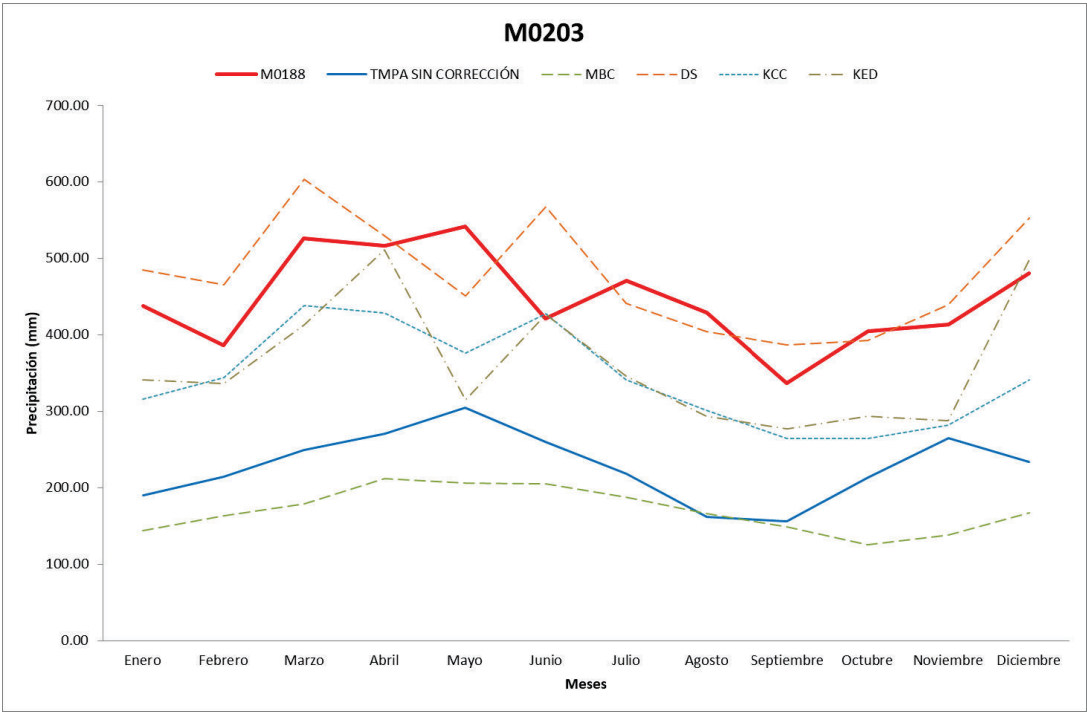
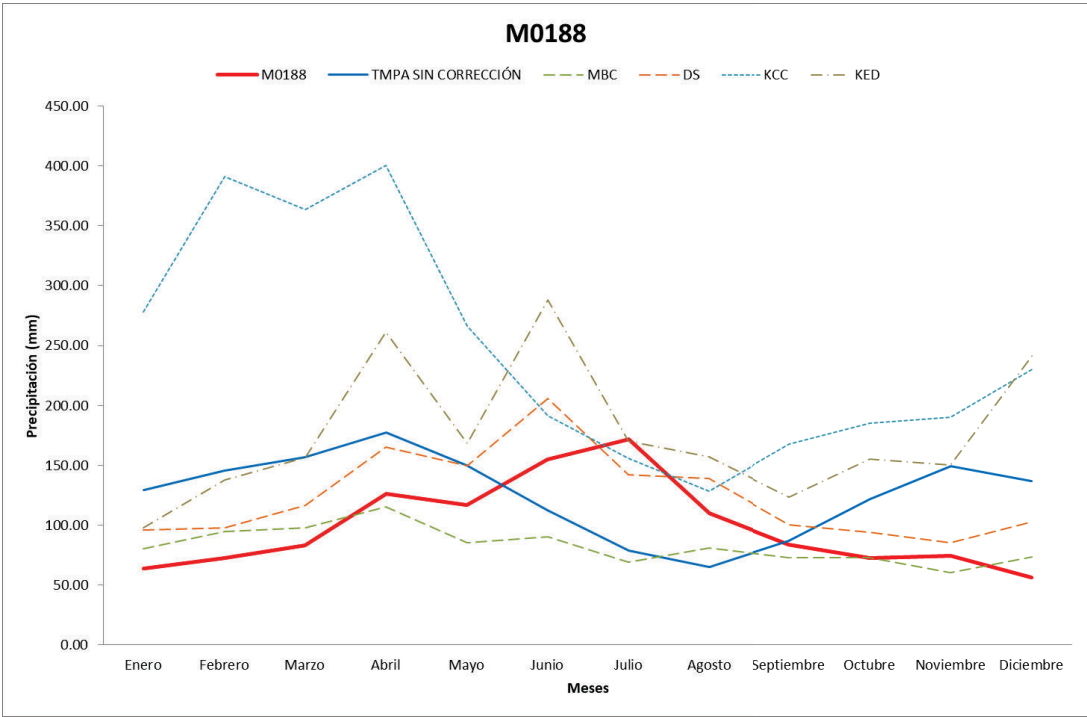
CAUDAL

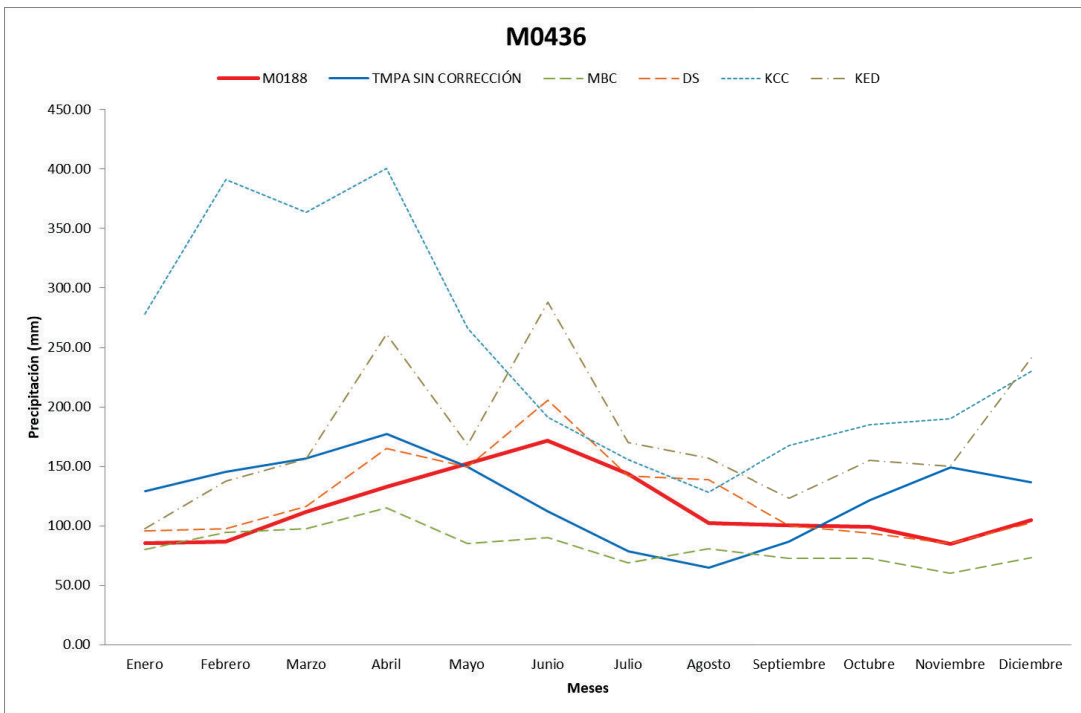
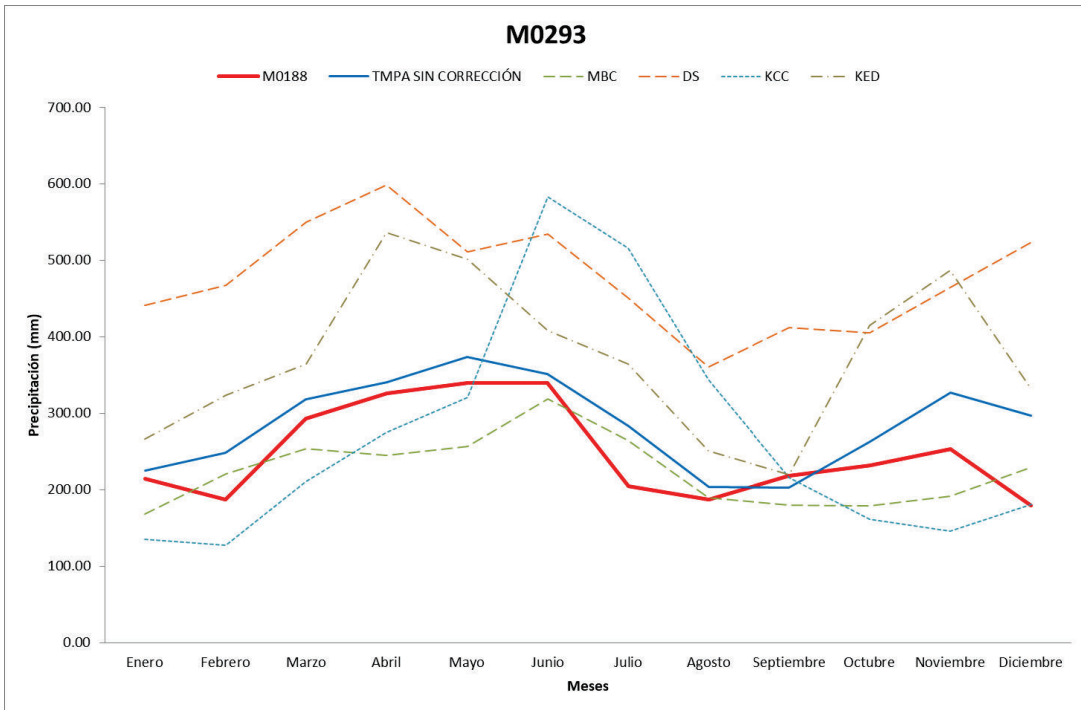


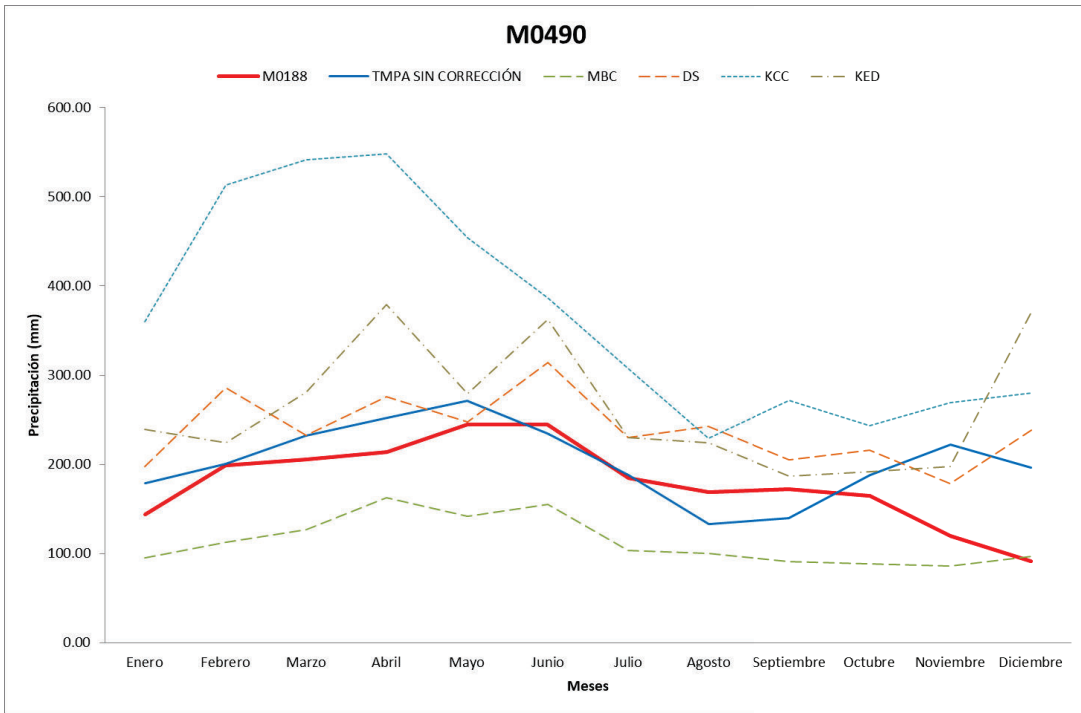
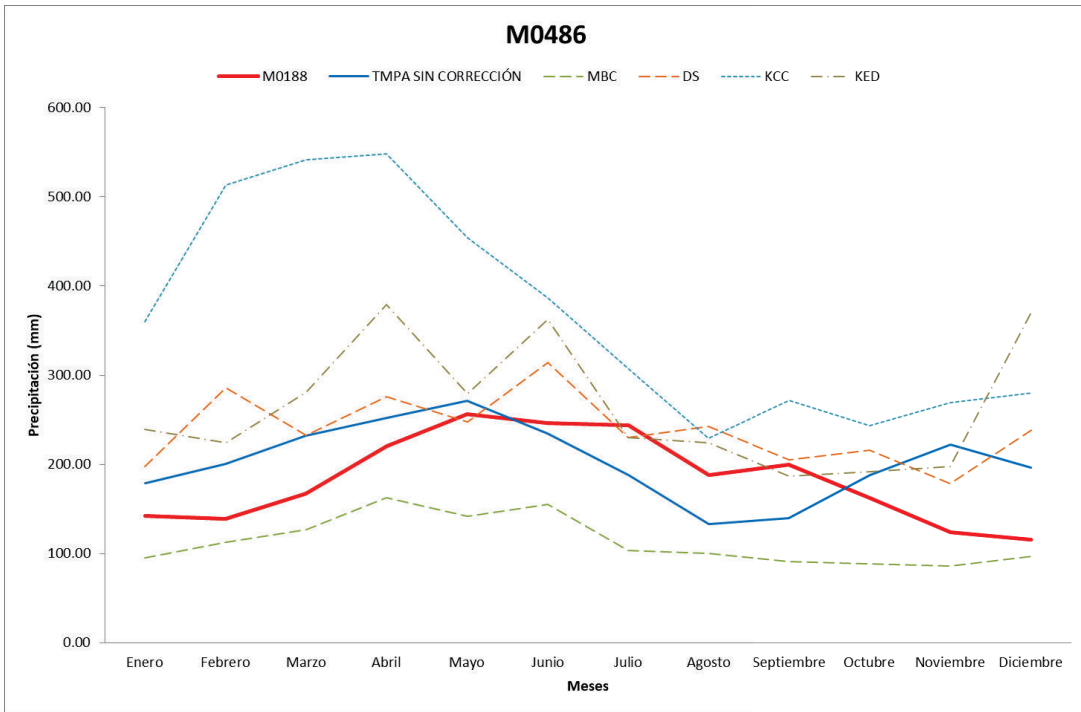
ANEXO 12: Gráficos de indicadores cualitativos

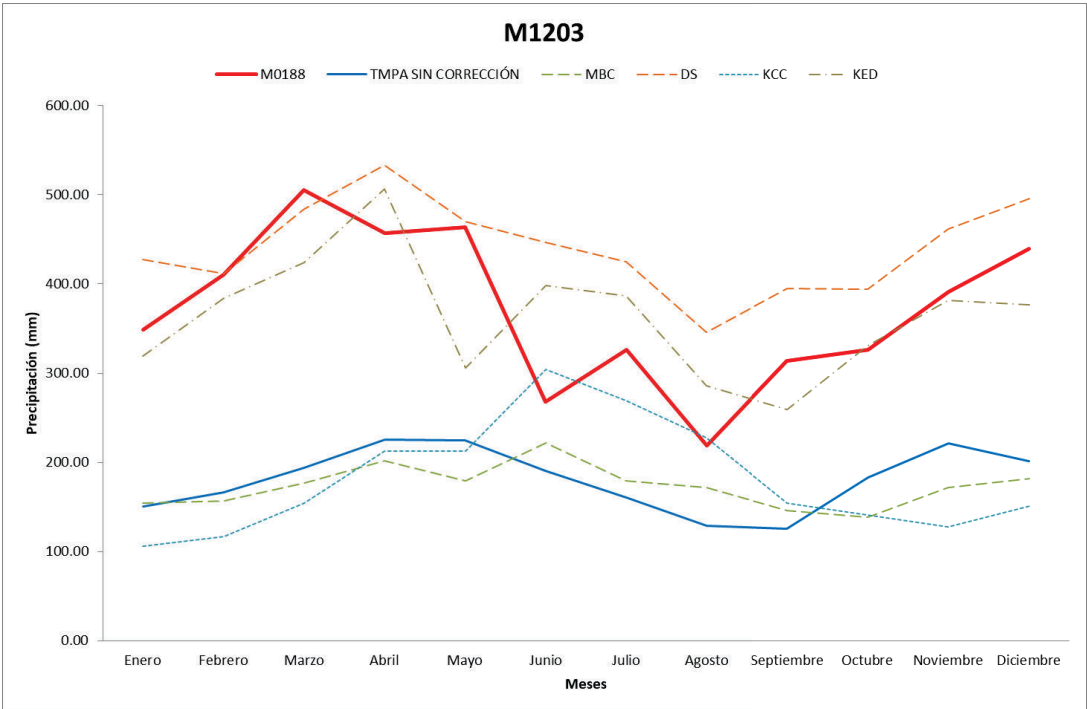
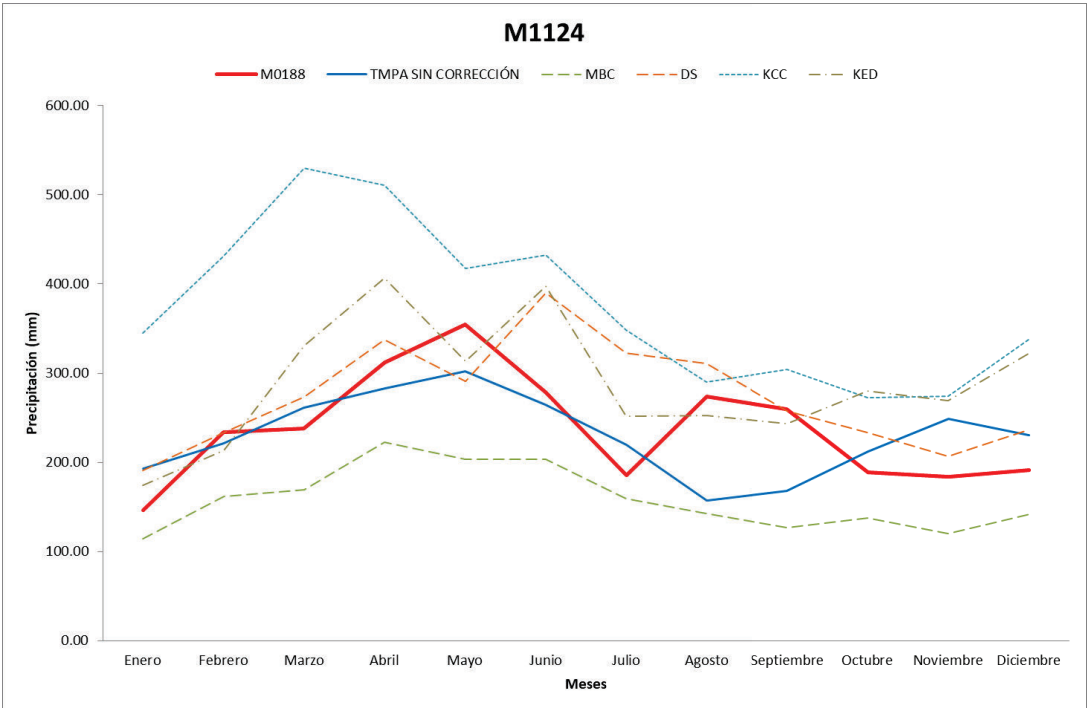


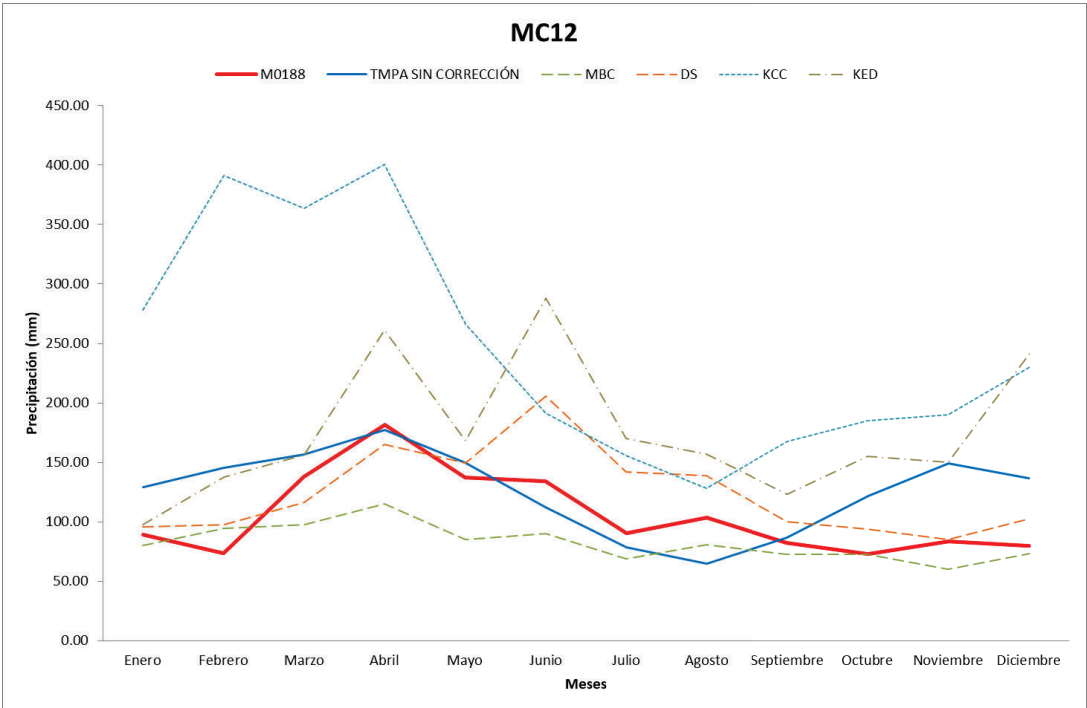
ANEXO 13: Comparación a nivel mensual de precipitación observada y precipitación del producto TMPA 3B42 V7 corregida.







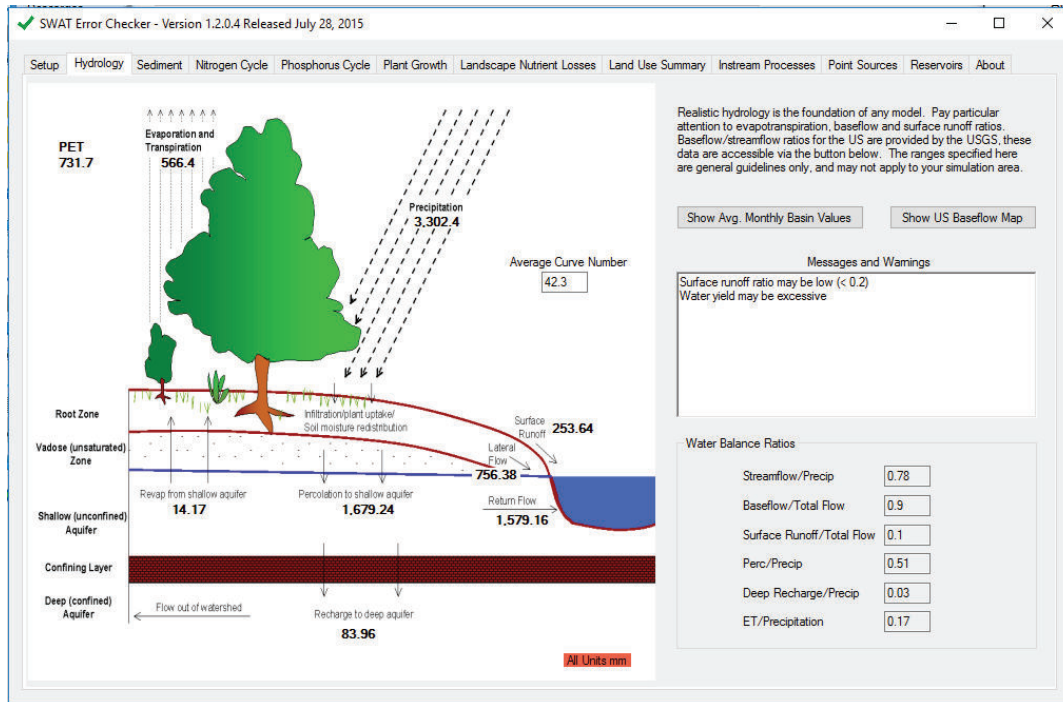




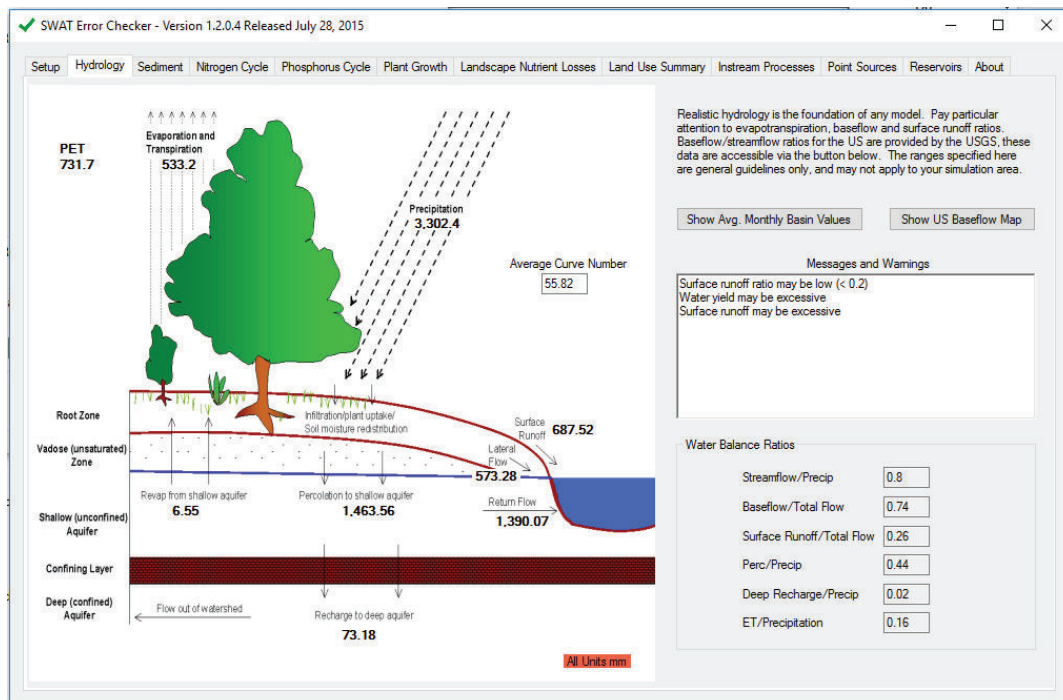
ANEXO 14: Resultados del modelo hidrológico en su fase terrestre para cada simulación

MODELO ORIGINAL TAMAYO (2017) 1979-1983

Sin calibración

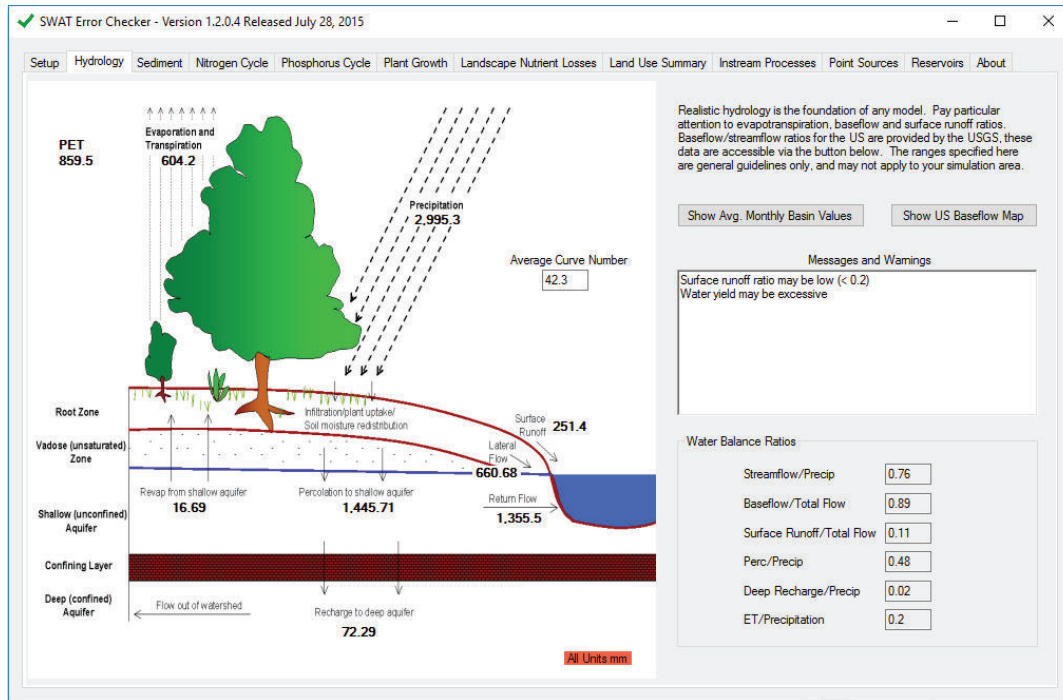


Con calibración

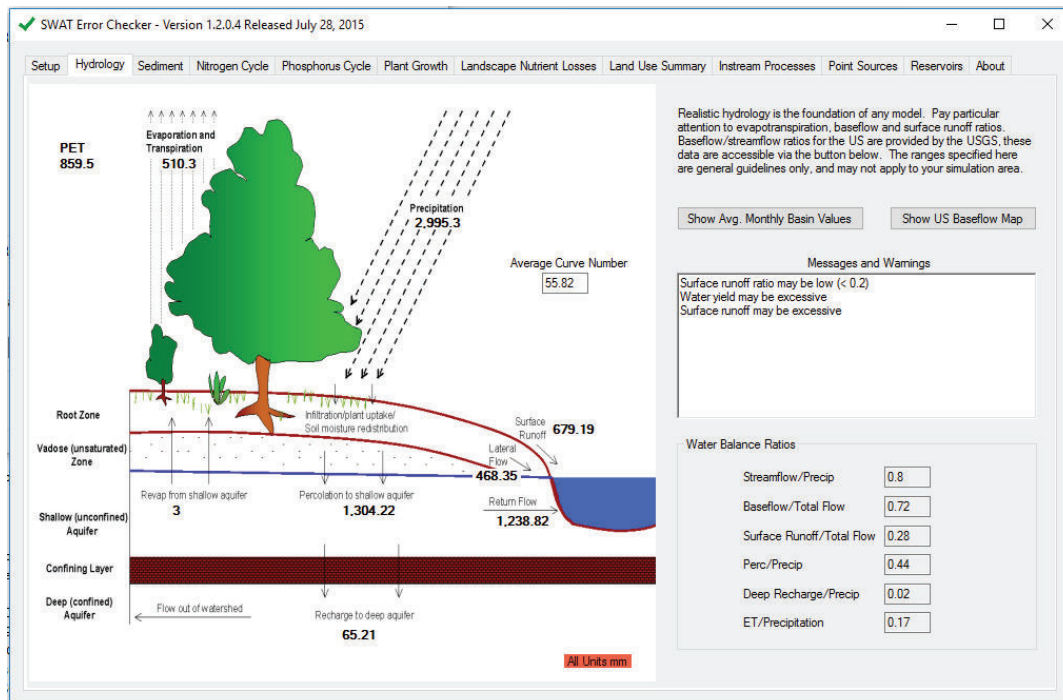


MODELO ORIGINAL TAMAYO (2017) 2008-2013

Sin calibración

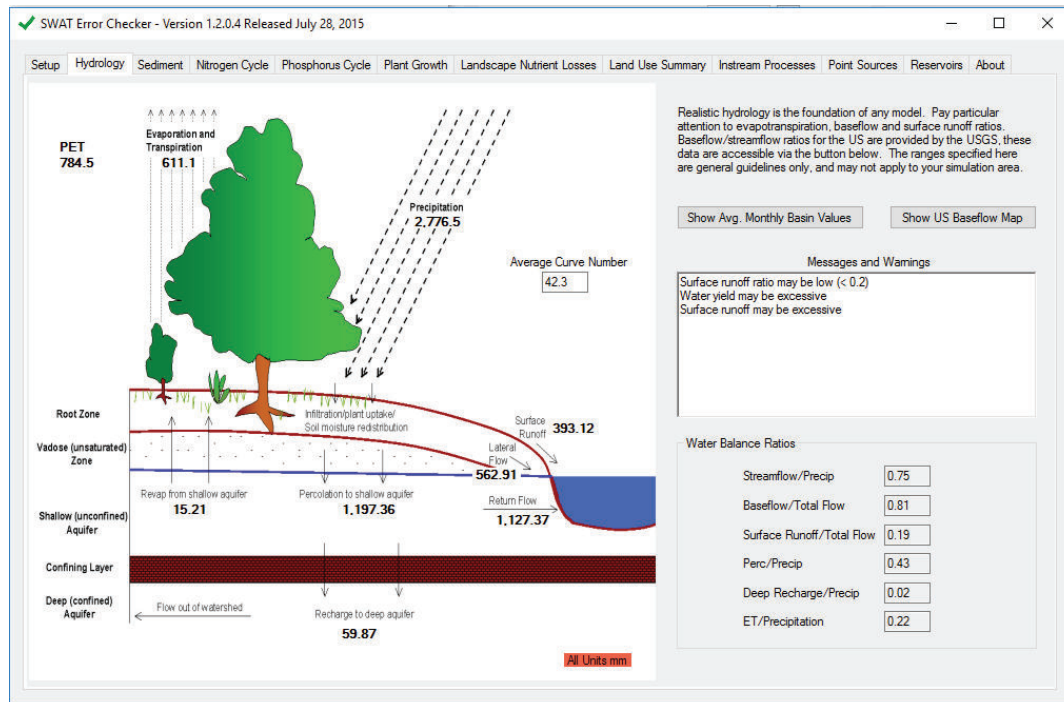


Con calibración

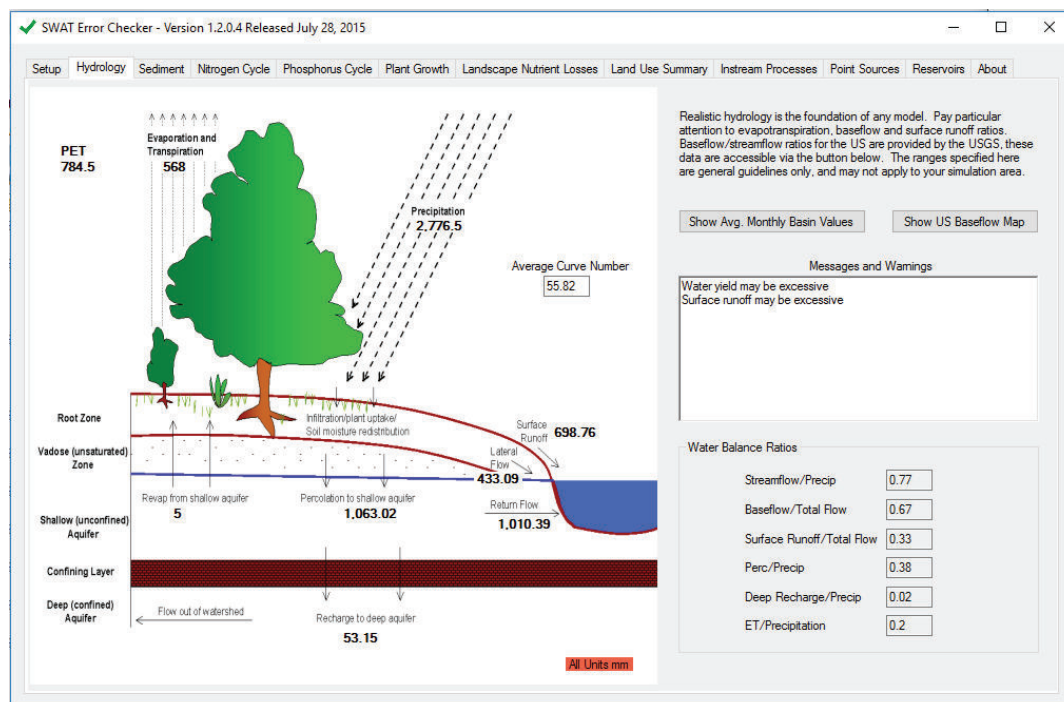


MEAN BIAS CORRECTION

Sin calibración

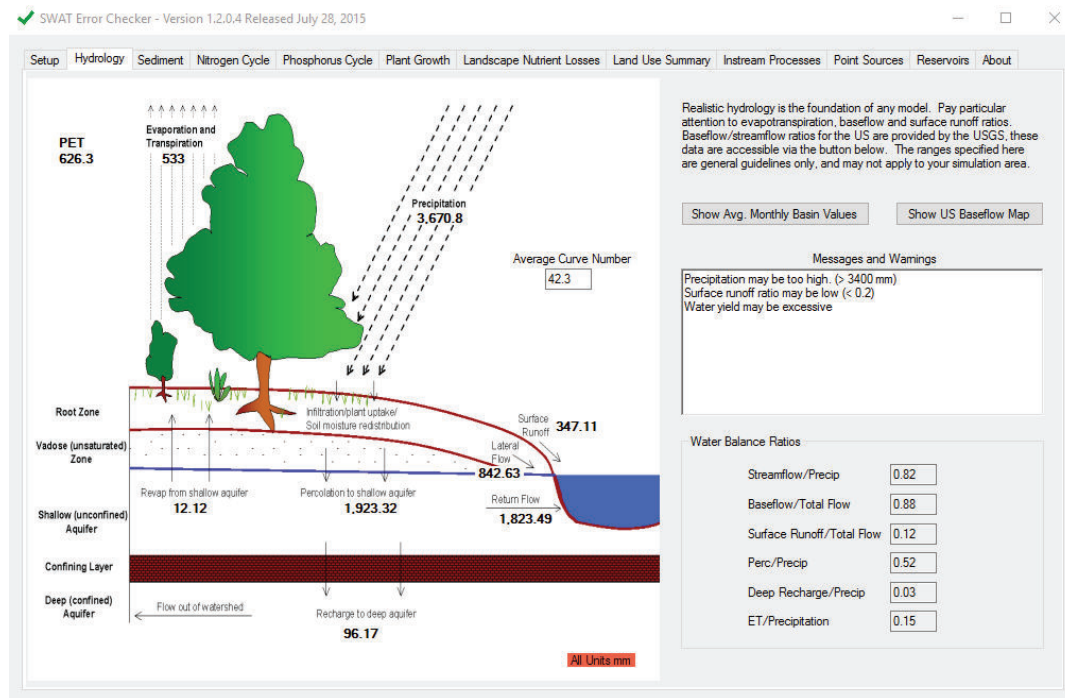


Con calibración

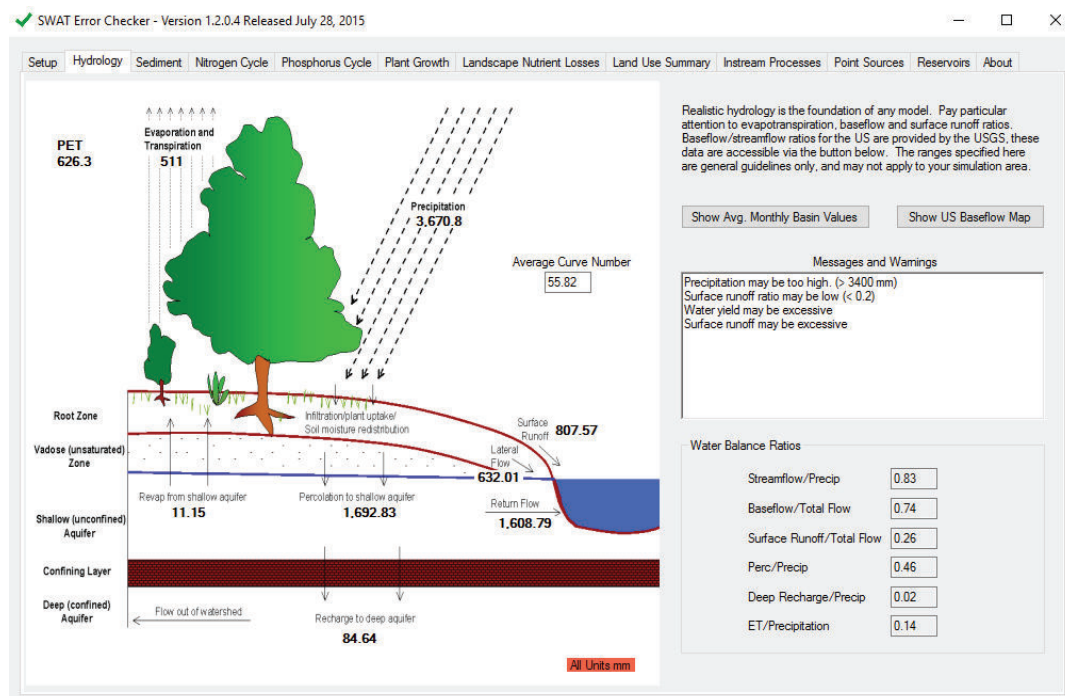


DOBLE KERNEL SMOOTHING MATCH

Sin calibración

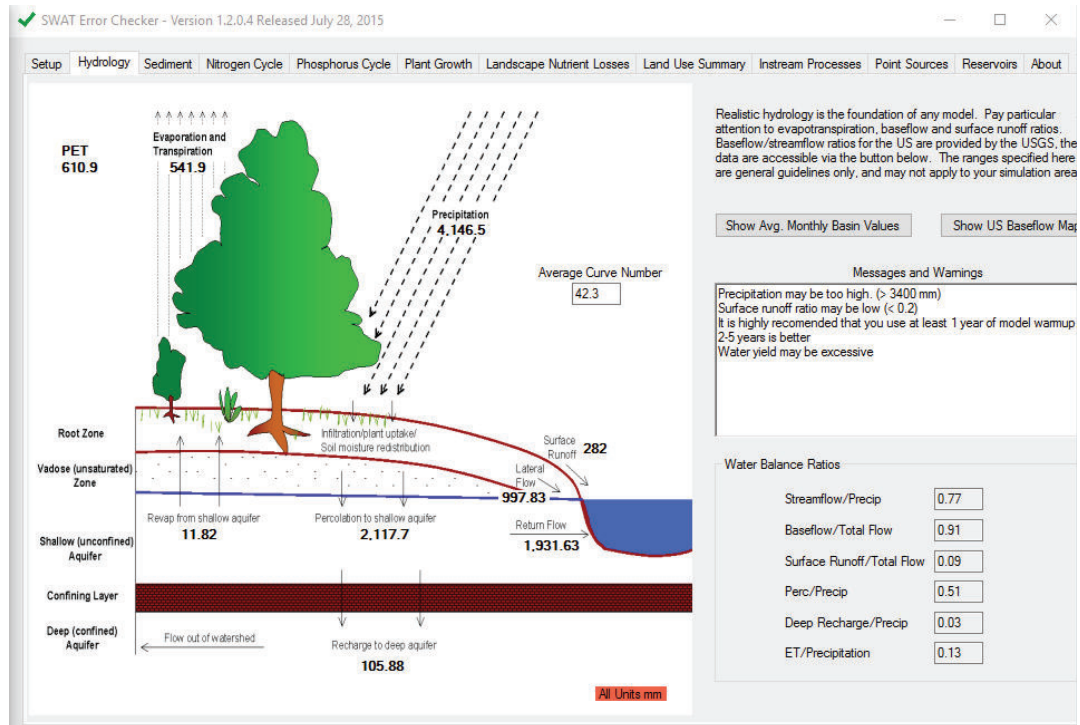


Con calibración

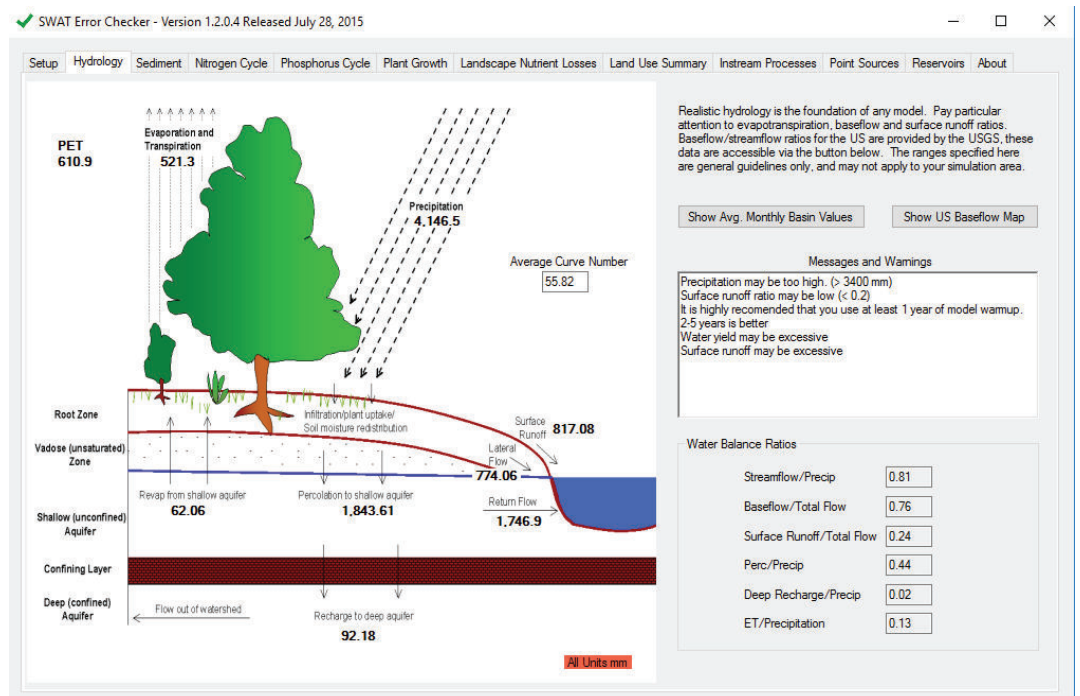


KED

Sin calibración

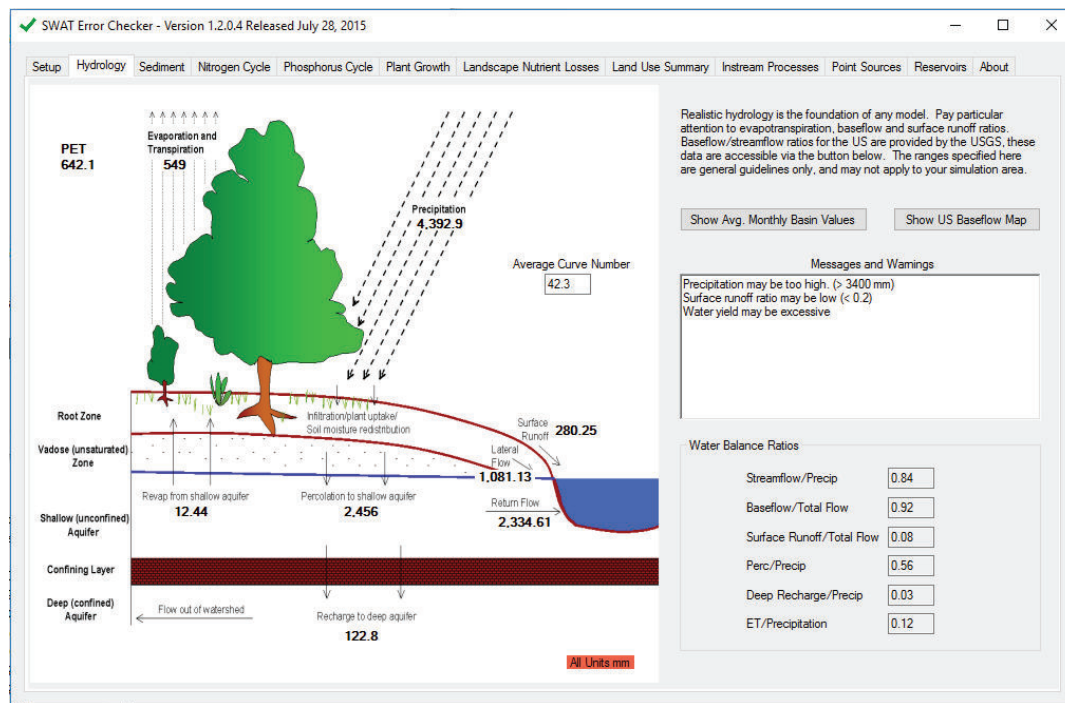


Con calibración

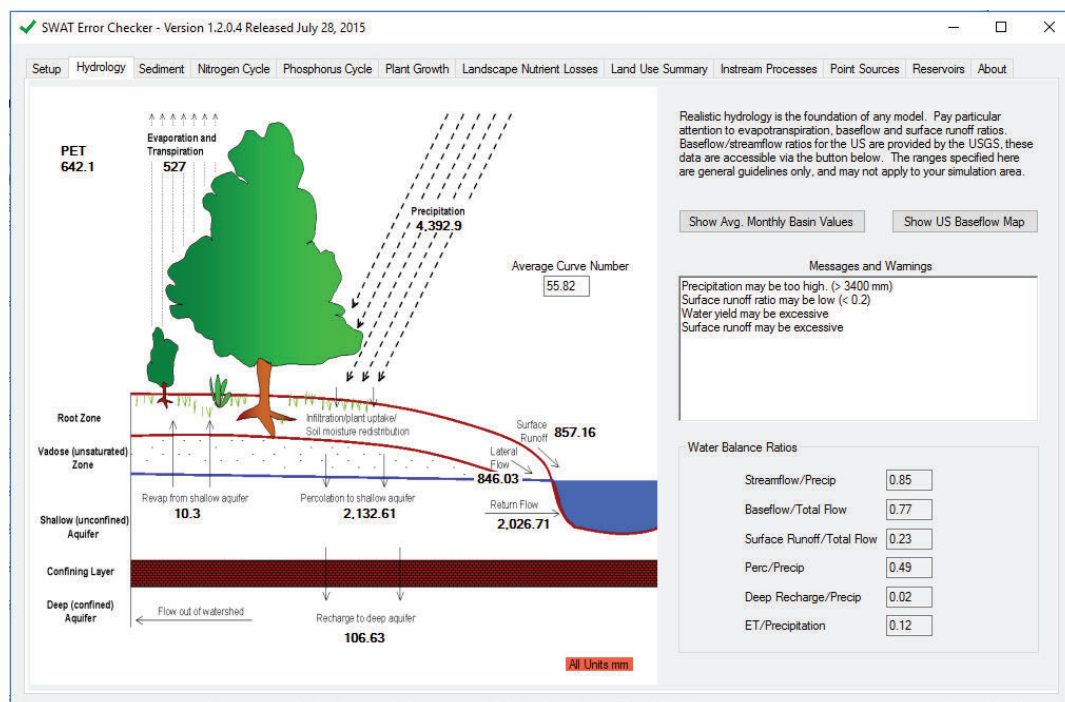


COEFICIENTE K

Sin calibración

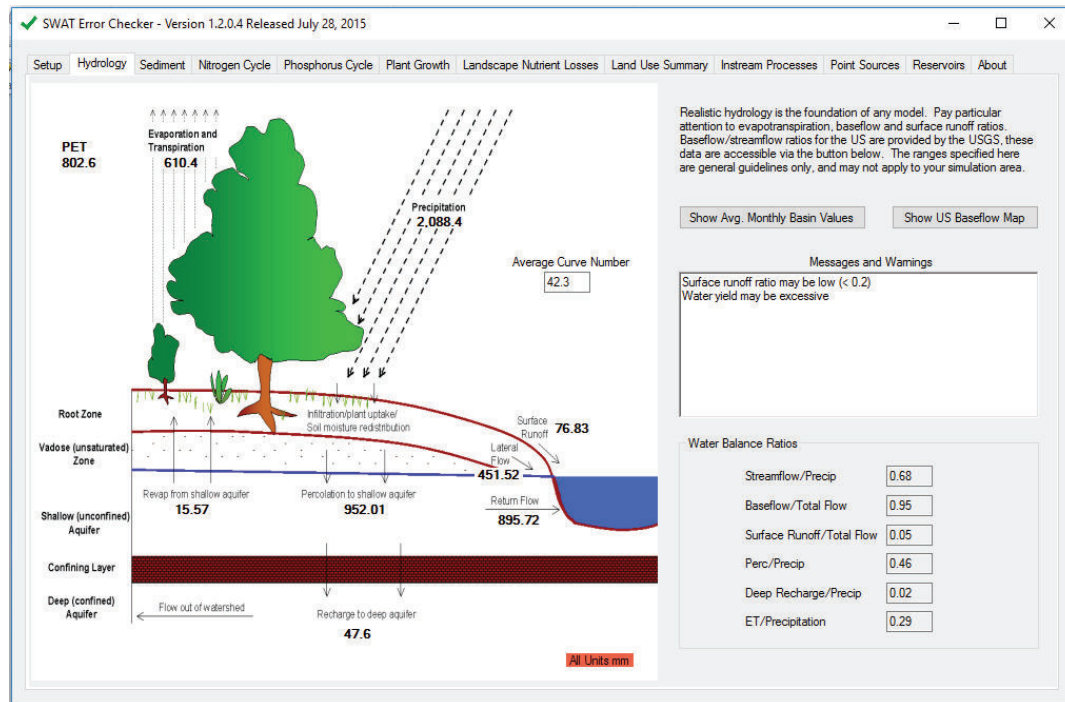


Con calibración



ORIGINALES SIN CORRECCION

Sin calibración



Con calibración

