

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA
EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

Presentado por:

ERNESTO ADOLFO VALLADARES MARTEL

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÍCOLA

Lima - Perú

2017

DEDICATORIA

A mis padres, quienes son las personas que más amo.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor Ing, Mg.Sc. Cayo Ramos por brindarme la oportunidad de alcanzar este objetivo académico y su constante orientación en la realización de la tesis.

Al ing. Marcelo Portugal por impartirme sus valiosos conocimientos, brindarme su tiempo y apoyo constante.

Al presidente y miembros del jurado por sus importantes sugerencias y observaciones hasta concluir la tesis.

Al ing. Abraham Dávila del proyecto especial CHAVIMOCHIC por proporcionarme la información de caudales y sedimentos de las estaciones que administran.

Al ing. Justiniano Cochachín de (UGRH-ANA) por la información meteorológica de estaciones bajo su administración.

A mi familia por su importante apoyo hasta el término de esta investigación.

A mis amigos de promoción, quienes son fuente de admiración y perseverancia.

INDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS	3
2.1.1 TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS EN CUENCAS	3
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS	5
2.2 PRINCIPIOS TEÓRICOS DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO.....	8
2.2.1 LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	8
2.2.2 LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA	8
2.3 EROSIÓN DEL SUELO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	10
2.3.1 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	11
2.4 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	13
2.5 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL	14
2.6 DOWNSCALING ESTADÍSTICO.....	14
2.7 MODELO HIDROLÓGICO SWAT	15
2.7.1 PRINCIPIOS DE LA MODELACIÓN EN SWAT	15
III. MATERIALES Y METODOS.....	17
3.1 UBICACIÓN Y CARACTERISTICAS DEL AREA DE INVESTIGACION	17
3.1.1 REGIÓN DE ESTUDIO	17
3.1.2 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA OBSERVADA	18
3.1.3 INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
3.1.4 INFORMACIÓN CLIMÁTICA GLOBAL	20
3.2 MATERIALES	20
3.2.1 HARDWARE Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	20
3.3 PROCEDIMIENTO	21
3.3.1 FORMULACION DEL MODELO SWAT	22
3.3.2 ANALISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT	31
3.3.3 REDUCCIÓN DE ESCALA Y PROYECCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS	36
3.3.4 COMPARACION DE LA PRODUCCION HIDRICA Y SEDIMENTARIA ACTUAL CON LAS PROYECCIONES FUTURAS.....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
4.1 FORMULACION DEL MODELO EN SWAT	39
4.2 ANALISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO.....	41
4.2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	41
4.2.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	45
4.3 REDUCCION DE ESCALA Y PROYECCION DE DATOS CLIMATICOS	52

4.4 COMPARACION DE LA PRODUCCION HIDRICA Y SEDIMENTARIA ACTUAL CON LAS PROYECCIONES FUTURAS.....	56
4.4.1 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL DIARIO	56
4.4.2 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL MENSUAL.....	58
4.4.3 ANÁLISIS DE SEDIMENTOS A NIVEL MENSUAL.....	62
4.4.4 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL ANUAL	63
4.4.5 ANÁLISIS DE SEDIMENTOS A NIVEL ANUAL	64
V. CONCLUSIONES.....	65
VI. RECOMENDACIONES	67
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
VIII. ANEXOS.....	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas e hidrométricas disponibles	19
Tabla 2. Fuentes de información geográfica utilizadas en la formulación del modelo	19
Tabla 3. Modelos de circulación general utilizados en el estudio	20
Tabla 4. Análisis de consistencia de la media en la estación Quiruvilca	25
Tabla 5. Análisis de consistencia de la desviación estándar en la estación Quiruvilca.....	25
Tabla 6. Cuadro resumen de la identificación, análisis y procedimiento considerado.....	26
Tabla 7. Reclassificación de coberturas reconocidas por el modelo SWAT	29
Tabla 8. Características del Suelo pertenecientes a la zona de estudio	29
Tabla 9. Clasificación del Tipo de suelo con nomenclatura FAO.....	30
Tabla 10. Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad.....	32
Tabla 11. Interpretación de parámetros estadísticos para Calibrar y Validar el Modelo	35
Tabla 12. Ranking de parámetro según análisis de sensibilidad para caudales.....	44
Tabla 13. Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad para caudales.	44
Tabla 14. Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad, para sedimentos.	45
Tabla 15. Parámetros dentro de la Subcuenca A, utilizados en la calibración del caudal.....	46
Tabla 16. Parámetros dentro de la Subcuenca B, utilizados en la calibración del caudal	47
Tabla 17. Parámetros de eficiencia del Modelo a paso mensual de caudales	48
Tabla 18. Parámetros de eficiencia del modelo a paso diario de caudales.....	48
Tabla 19. Parámetros dentro de la Subcuenca A, utilizados en la calibración de sedimentos	50
Tabla 20. Parámetros dentro de la Subcuenca B, utilizados en la calibración de sedimentos	50
Tabla 21. Parámetros de eficiencia del modelo a paso mensual de sedimentos.....	51
Tabla 22. Modelos de circulación general de mayor a menor ajuste	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los tipos de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación	6
Figura 2. Representación del Ciclo Hidrológico en SWAT	9
Figura 3. Principales factores que controlan el proceso de erosión hídrica	10
Figura 4. Escenarios del Calentamiento global de la superficie hasta el año 2100.....	13
Figura 5. Representación de un modelo de Circulación Global (MCG).	14
Figura 6. Componentes para la formulación del modelo en el análisis de Cuencas por SWAT	16
Figura 7. Mapa de ubicación de la zona en estudio.....	17
Figura 8. Mapa de Ubicación de estaciones hidrometeorológicas	18
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	21
Figura 10. Variabilidad histórica de las precipitaciones diarias.....	22
Figura 11. Grafica de series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones	23
Figura 12. Grafica de series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones	24
Figura 13. Mapa de elevaciones de la zona en estudio.....	27
Figura 14. Mapa de cobertura vegetal de la zona en estudio.....	28
Figura 15. Mapa de tipo de suelos de la zona en estudio	30
Figura 16. Paso a paso para la creación de archivos de entrada en SwatCUP.	33
Figura 17. Procedimiento gráfico para el análisis de frecuencia de datos de caudales	37
Figura 18. Resumen del modelo SWAT Implementado	39
Figura 19. Cuenca discretizada en la zona de estudio	40
Figura 20. Análisis de sensibilidad Caudales, subcuenca de Apoyo A.....	41
Figura 21. Análisis de sensibilidad Caudales, Subcuenca de apoyo B.	42
Figura 22. Análisis de sensibilidad Sedimentos, Subcuenca de apoyo A.	43
Figura 23. Análisis de sensibilidad Sedimentos, Subcuenca de apoyo B.	43
Figura 24. Correlación mensual de los caudales observados y simulados	48
Figura 25. Evolución de caudales observados y simulados a paso mensual	49
Figura 26. Correlación diaria de los caudales observados y simulados	49
Figura 27. Evolución de los caudales observados y simulados a paso diario	49
Figura 28. Evolución de sedimentos observados y simulados a paso mensual.....	51
Figura 29. Producción de sedimentos observados y simulados a nivel mensual	51
Figura 30. Serie de precipitaciones de referencia generada por los modelos.....	53
Figura 31. Precipitación anual observada y variación porcentual al periodo (2050 - 2059).....	54
Figura 32. Precipitación mensual observada y proyectada (2050 - 2059) de las estaciones.....	55
Figura 33. Curva de duración de caudales diarios proyectados y observado	56
Figura 34. Rango de variación de caudales diarios	57
Figura 35. Diagrama de caja de los caudales diarios proyectados	57
Figura 36. Caudales promedio mensual proyectados periodo (2050 - 2059).....	58
Figura 37. Variación relativa de caudales medios mensuales proyectados respecto del observado	59
Figura 38. Evolución de caudales proyectados a paso mensual.....	60
Figura 39. Diagrama de cajas de caudales mensuales proyectados.....	60
Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de las disponibilidades hídricas al 50%, 75% y 90%.....	61
Figura 41. Sedimentos mensuales proyectados considerando evento ENOS en data observada	62
Figura 42. Sedimentos mensuales proyectados excluyendo evento ENOS en data observada.....	62
Figura 43. Evolución de caudales proyectados a paso anual.....	63

Figura 44. Diagrama de caja de caudales anuales proyectados	63
Figura 45. Sedimentos proyectados durante el decenio 2050 - 2059	64
Figura 46. Sedimentos promedios a lo largo del decenio 2050 - 2059	64

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Registro de precipitaciones mensuales dentro de la cuenca del Río Santa	71
ANEXO 2. Registro de Temperaturas mínimas (°C) dentro de la cuenca del Río Santa.....	74
ANEXO 3. Registro de Temperaturas máximas (°C) dentro de la cuenca del Río Santa	77
ANEXO 4. Registro histórico de Caudales mensuales en la Estación Condorcerro.....	80
ANEXO 5. Registro histórico de sedimentos en la Estación Condorcerro	80
ANEXO 6. Grafica de cajas de los datos de precipitación a nivel diario y mensual	81
ANEXO 7. Análisis de consistencia de las precipitaciones mensuales.....	87
ANEXO 8. Diagrama de cajas de los datos de precipitación Observada y Proyectadas.....	89
ANEXO 9. Graficas de variación porcentual de las precipitaciones Modelos Proyectados	93
ANEXO 10. Variación relativa de caudales para probabilidades de excedencia.....	94

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo conocer el impacto del cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca del Rio Santa para el periodo (2050 – 2059) usando el escenario de trayectoria de concentración representativa 4.5. Para conocer las proyecciones futuras de esorrentía superficial y sedimentos en suspensión en la estación de control Condorcerro se utilizó el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua), este modelo fue calibrado para simular caudales en la zona de estudio, obteniéndose valores de NS, PBIAS, RSR y R2 de 0.89, 8.26, 0.34 y 0.92 respectivamente, posteriormente se realizó la calibración de los sedimentos, alcanzado valores de NS, PBIAS, RSR y R2 equivalentes a 0.64, -7.42, 0.6 y 0.66 respectivamente. Los caudales y sedimentos simulados fueron comparados con los datos observados en la estación de control Condorcerro, durante el periodo 2006 – 2011 para calibración y 2012 – 2015 para validación. El estudio utilizó ocho modelos de circulación general los cuales fueron sometidos a una reducción de escala de tipo estadística y proyectada al periodo de interés (2050 - 2059). Los resultados obtenidos para la disponibilidad hídrica al 50% de persistencia indican un incremento de +18% durante el periodo húmedo y +7% durante el periodo seco; la disponibilidad hídrica al 75% de persistencia incrementa un +10% durante el en periodo húmedo y +2% durante el periodo seco; la oferta hídrica al 90% de ocurrencia muestra +6% en periodo húmedo y -5% en periodo seco. A nivel mensual Enero se proyecta como el mes que experimenta una mayor variación del caudal medio, con un incremento del 38% mientras que Mayo y Setiembre indican reducciones de -6% y -5% respectivamente. Finalmente el decenio futuro (2050 - 2059) proyecta un +19% de agua así como un +9.25% de sedimentos respecto al decenio observado en la estación Condorcerro.

Palabras claves: Hidrología, Cambio climático, SWAT, Disponibilidad hídrica, sedimentos, Rio Santa.

ABSTRACT

The aim of this research is to know the impact of climate change on the hydrological response of the Santa River basin for the period (2050 - 2059) using the representative concentration pathway (rcp) 4.5 scenario. In order to know the future projections of surface runoff and suspended sediment in the control station Condorcero we used the semi-distributed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool), this model was calibrated to simulate flow rates in the study area, obtaining values of NS, PBIAS, RSR and R2 of 0.89, 8.26, 0.34 and 0.92 respectively, subsequently the sediments were calibrated, reaching values of NS, PBIAS, RSR and R2 equivalent to 0.64, -7.42, 0.6 and 0.66 respectively. The flows and simulated sediments were compared with the data observed in the Condorcero control station, during the period 2006 - 2011 for calibration and 2012 - 2015 for validation. The study used eight models of general circulation which were subjected to a scale reduction of statistical type and projected to the period of interest (2050 - 2059). The results obtained for water availability at 50% persistence indicate an increase of + 18% during the wet period and + 7% during the dry period; the water availability at 75% of persistence increase + 10% during the wet period and + 2% during the dry period; the water supply at 90% of occurrence shows an increase of + 6% in the wet period and -5% in the dry period. On a monthly basis, January is projected as the month experiencing the greatest variation in the average flow, with an increase of 38% while May and September indicate reductions of -6% and -5% respectively. Finally, the future decade (2050 - 2059) projects + 19% of water as well as + 9.25% of sediments compared to the decade observed in the Condorcero station.

Keywords: Hydrology, Climate change, SWAT, Water availability, sediments, Santa River.

I. INTRODUCCIÓN

La comunidad científica a nivel mundial continúa desarrollando investigaciones concernientes al cambio climático producto del calentamiento global que experimenta la tierra. Con el inicio de la revolución industrial, en el siglo XVIII, aumentó intensamente la concentración de gases causantes del efecto invernadero, lo que genera el calentamiento global.

En el quinto informe elaborado por el IPCC se presentan cuatro escenarios de emisión, las llamadas trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) que a diferencia de los llamados (SRES, por sus siglas en inglés) los rcp adicionalmente toman en consideración las políticas y acuerdos de la comunidad mundial orientados a mitigar las emisiones, estos escenarios rcp se identifican por el forzamiento radiativo que alcanzarían para finales del siglo XXI, forzamientos radiativos que varían de 2.6 a 8.5 W/m².

La cuenca del Río Santa es una de las más importantes en la vertiente del Pacífico, alberga a uno de los ríos más caudalosos del país; sus aguas que recorren aproximadamente 347 km desde su nacimiento en la laguna Conococha hasta su desembocadura en la bahía de Santa sirven para generar energía eléctrica en la Central hidroeléctrica Cañón, abastecer del recurso hídrico a proyectos de irrigación como Chavimochic y cubrir las necesidades en materia hídrica de poblaciones que se asientan a lo largo de su recorrido.

Ante la presente amenaza del cambio climático y el crecimiento poblacional. La sostenibilidad de la cuenca así como todo aquello que dependa de esta, podría verse afectada en los próximos treinta o cuarenta años. En este sentido las herramientas de modelado hidrológico cobran importancia; puesto que permiten investigar los efectos del cambio en el clima sobre la hidrología superficial.

La consideración de los nuevos escenarios climáticos mencionados contribuye con las investigaciones para hacer frente a los retos que conlleva la adaptación al cambio climático. La presente investigación contempla el estudio de la cuenca media y alta del río Santa bajo las condiciones del escenario rcp 4.5 en un futuro intermedio, periodo 2050.

Los resultados de este estudio contribuirán con la gestión integral del recurso hídrico en la unidad hidrográfica del río Santa. La estimación de la oferta hídrica para diferentes usos, producción hídrica mensual y producción de sedimentos que permitirá tener un panorama amplio del comportamiento actual y futuro de la cuenca hidrográfica; por consiguiente, servirá como apoyo en la toma de decisiones de carácter técnico y político.

De este modo se busca conocer los efectos de las condiciones futuras proyectadas en la respuesta hidrológica de la zona en estudio. Para lo cual se empleó modelo hidrológico semi-distribuido SWAT (Soil and Water Assessment tool).

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Estimar la producción de caudales y sedimentos a través de un modelo semidistribuido en el escenario climático rcp 4.5 a fin de analizar la variación de la respuesta hidrológica en la cuenca del Río Santa en el punto de control Estación Condorcerro.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Formular el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool) con información cartográfica y meteorológica en la unidad hidrográfica del Río Santa.
- Calibrar y Validar el modelo hidrológico semidistribuido SWAT en la unidad hidrográfica del Río Santa.
- Reducir de escala los Modelos de Circulación General (MCG) y proyectar los datos climáticos.
- Comparar la producción hídrica y sedimentaria actual con las proyecciones futuras, periodo 2050 – 2059.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. (Chavarri 2008)

Los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías generales: (1) material y (2) formal.

Un modelo material es una representación física del prototipo, más simple en estructura pero con propiedades que reúnen las del prototipo. Los ejemplos de modelos de cuenca material son simuladores de lluvia y cuencas experimentales (Ponce 1989).

Un modelo formal es una abstracción matemática de una situación idealizada que preserva las propiedades estructurales importantes del prototipo. Ya que los modelos formales son invariablemente matemáticos en naturaleza, es costumbre referirse a ellos como modelos matemáticos. Los modelos matemáticos que se usan con la ayuda de una computadora se denominan modelos computacionales (Ponce 1989).

Ponce (1989) indicó que los modelos materiales de cuenca son caros y de aplicabilidad limitada. Por el contrario, los modelos formales están rápidamente disponibles, son altamente flexibles, y comparativamente económicos para utilizar. De allí que no resulte una sorpresa que los modelos formales (matemáticos) sean la herramienta preferida en la solución de los problemas del modelado de cuencas.

2.1.1 TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS EN CUENCAS

Modelos de Caja Blanca (También llamados Modelos Determinísticos):

Son aquellos formulados siguiendo formulas de la física, es decir, “de base física” o “teóricos”, en los cuales se conocen todos los procesos involucrados en la transformación. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular y haciendo innecesario el proceso de calibración;

sin embargo, la falta de suficiente información relativa a los procesos que se desarrollan en el suelo, en el subsuelo y en la vegetación (entre otros), genera incertidumbre y la calibración se hace necesaria (Cabrera 2014).

Modelos de Caja Gris (También llamados Modelos Conceptuales):

Son aquellos modelos en los cuales se conocen algunos de los procesos internos del modelo. En general, los modelos conceptuales consideran leyes físicas en forma simplificada (Cabrera 2014).

Al ser estas representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos (Ponce 1989).

Modelo de Caja Negra (También llamados Probabilísticos, empíricos o de regresión)

Los modelos probabilísticos son exactamente lo opuesto en significado a los modelos determinísticos. Un modelo probabilístico se formula siguiendo las leyes del azar o probabilidad (Ponce 1989).

Estos modelos se basan en relaciones entrada-salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales.

Ponce (1989) indicó además que los modelos probabilísticos son de dos tipos: (1) estadísticos, y (2) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales - por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requieren invariablemente el uso de datos; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS

Modelos Lineales versus Modelos no lineales:

La elección entre modelos lineales y no lineales tiene implicaciones prácticas. En la naturaleza, los procesos físicos son generalmente no lineales, en el modelado, sin embargo, los modelos lineales están sustituidos frecuentemente por procesos no lineales en interés de la propiedad o aptitud matemática. La simplicidad de los modelos lineales es una ventaja definida, aunque se logra a costo de la pérdida de detalle. Los modelos no lineales son más complejos pero generalmente mejores para proveer detalles en la simulación de los procesos físicos (Ponce 1989).

Un modelo lineal es formulado en términos de ecuaciones lineales y procesos, por el contrario, un modelo no lineal está descrito por ecuaciones y procesos no lineales. Un ejemplo típico de un modelo lineal es el clásico hidrograma unitario. Ejemplos de ecuaciones no lineales utilizadas para modelar los procesos hidrológicos hay muchos, por ejemplo, las técnicas de regresión no lineal utilizadas en el análisis regional (Ponce 1989).

Modelos de Tiempo Invariable vs Modelos de Tiempo variable:

En los modelos de tiempo invariable, el parámetro o parámetros permanecen constantes en el tiempo. Por el contrario, en los modelos de tiempo variable, los parámetros varían. Un ejemplo típico es aquel del modelo conceptual de un reservorio lineal. En donde un modelo llamado de tiempo invariable es $S = K \times O$, mientras que un modelo de tiempo variable es cuando $S = K(t) \times O$, en el cual la constante K de almacenaje del reservorio es una función de tiempo. En la práctica, la mayoría de las aplicaciones han sido restringidas a modelos de tiempo invariable (Ponce 1989)

Modelos Globales versus modelos Distribuidos:

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub superficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos globales”, “modelos agregados” o “agrupados” (Cabrera 2014) tal como se observa en la Figura 1.

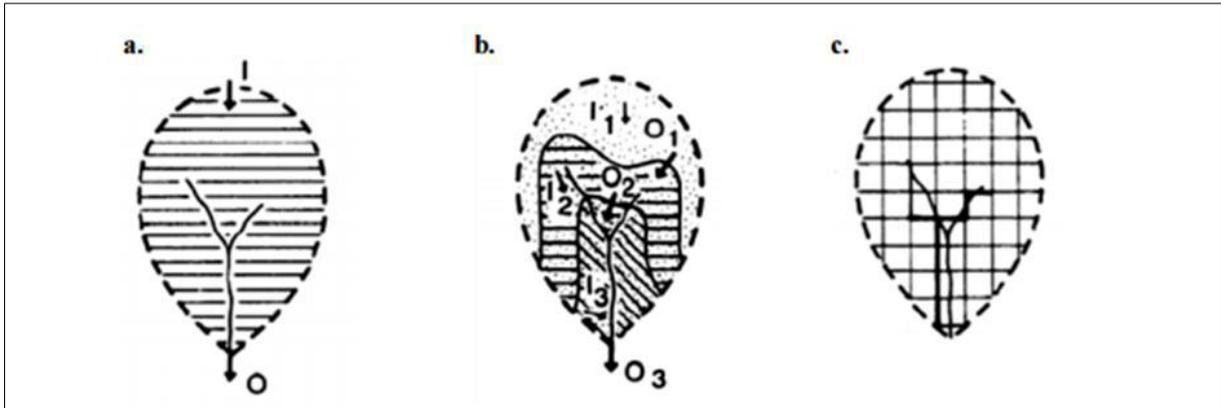


Figura 1. Clasificación de los tipos de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación Fuente: Adaptado de Chong-Yu Xu 2002.

A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de éste tipo de modelo va perdiendo representatividad. Es así que a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. Éstos son los llamados modelos “semi distribuidos” (Cabrera 2014)

A pesar que los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aún así representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas”. Estos modelos son llamados “modelos distribuidos” y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes (Cabrera 2014)

Modelos Continuos versus Modelos Discretos

Los modelos continuos y los discretos son opuestos en significado. Matemáticamente, una función continua es la que posee derivada en cualquier punto de su dominio. Por el contrario, una función discreta carece de esta propiedad. Ejemplos del uso de funciones discretas y continuas son comunes en la ingeniería hidrológica. Por ejemplo, un hidrograma de corriente es continuo, pero un hietograma de lluvia es discreto. El modelado, el término continuo es utilizado para referirse a modelos cuyas soluciones pueden ser obtenidas en cualquier punto. En los modelos discretos, sin embargo, las soluciones pueden ser obtenidas solo en ciertos puntos predeterminados (Ponce 1989).

Un ejemplo típico de la diferencia entre modelos continuos y discretos es proporcionado por la teoría del reservorio. La ecuación diferencial de almacenaje (Ec. 8-4) es una ecuación diferencial ordinaria, y de allí que una solución continua puede obtenerse por medios analíticos. La misma ecuación, sin embargo, puede ser discernible en el plano xt y resuelta por un método tal como la indicación de almacenaje (sección 8.3) usando procedimientos numéricos. En general, las funciones descritas analíticamente llevan a un modelado continuo. Por el contrario, las funciones de forma arbitraria son mejor manejadas con modelos discretos (Ponce 1989).

Modelos Analíticos versus Modelos Numéricos

La diferencia entre modelos analíticos y modelos numéricos es casi similar a la que existe entre modelos discretos y modelos continuos. Las funciones y modelos continuos pueden usualmente ser resueltos por medios analíticos, las funciones discretas y los modelos llevan a solucionarlos utilizando procedimientos numéricos. Una solución analítica utiliza las herramientas de la matemática clásica- por ejemplo, la teoría de la perturbación, transformaciones de Laplace, y así sucesivamente. Una solución numérica utiliza diferencias finitas, elementos finitos, el método de las características, o cualquier otro método basado en el discernimiento del dominio de la solución (Ponce 1989).

Ponce (1989) indico que en general, las soluciones analíticas pueden ser obtenidas solo por problemas altamente simplificados, particularmente aquellos para los cuales las condiciones iniciales y de borde pueden ser expresadas en forma analítica. Los modelos numéricos se adaptan mejor para las aplicaciones reales, para las cuales las condiciones iniciales y de borde pueden ser especificadas arbitrariamente.

Los modelos numéricos, esquemas, y algoritmos son frecuentemente utilizados como parte integral de modelos computacionales que simulan todas las fases relevantes del ciclo hidrológico. Dado el amplio uso de las computadoras, parece cierto que los modelos numéricos continuarán jugando un rol importante en la práctica del modelado de cuencas (Ponce 1989)

2.2 PRINCIPIOS TEÓRICOS DEL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

2.2.1 LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

El principio de la conservación de la energía, puede ser descrita como el intercambio neto de energía por unidad de área de superficie de la cuenca (Chavarri 2008)

$$RS (1 - \rho) = R L + G + H + L.E \dots\dots\dots(1)$$

Dónde:

RS : Radiación de onda corta en la superficie de la tierra

ρ : albedo de la superficie

RL : Radiación neta de onda larga

G : Flujo de calor de la tierra

H : Calor transferido a la atmósfera

L : Calor latente de vaporización del agua

E : Tasa de evaporación

Las unidades de todos los términos son energía calórica por unidad de área y unidad de tiempo.

Los cambios de calor en la vegetación y el calor utilizado en la fotosíntesis se ignoran en la ecuación (1), debido a que son aproximadamente el 1% de RS (Chavarri 2008).

2.2.2 LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

Cuando se considera el ciclo hidrológico, y conforme al principio de conservación de masa, axioma que en dinámica de fluidos se conoce como la ecuación de continuidad, debe existir un equilibrio entre las variables de entrada, las variables de salida y las variaciones del sistema considerado. Las relaciones cuantitativas que se establecen para representar dicho equilibrio constituyen las formulaciones de los balances hidrológicos (Guerra 2012).

Por ejemplo, si queremos expresar el principio de conservación de la masa para algún intervalo de tiempo Δt , se puede utilizar el concepto de balance de agua para el siguiente volumen de control.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \dots\dots\dots (2)$$

SW_t : es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O).

SW₀ : es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mmH₂O).

T : es el tiempo en (días).

R_{day} : es la cantidad de precipitación en un día i (mmH₂O).

Q_{surf} : es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mmH₂O).

E_a : es la cantidad de evapotranspiración en día i (mmH₂O).

W_{seep} : es la cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en un día i (mmH₂O).

Q_{gw} : es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mmH₂O).

En la Figura 2 se observa la representación esquemática de los procesos hidrológicos que contempla el modelo hidrológico para simular la realidad.

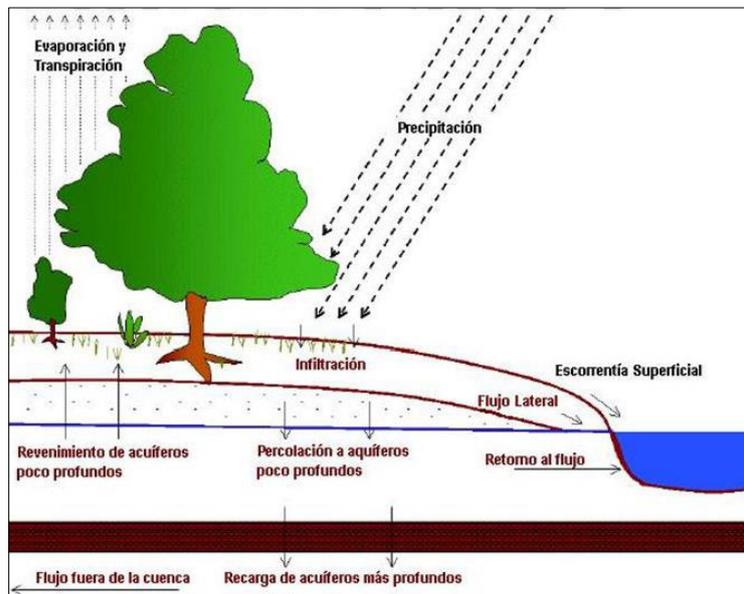


Figura 2. Representación del Ciclo Hidrológico en SWAT
Fuente: Adaptado de Theoretical documentation 2005.

2.3 EROSIÓN DEL SUELO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La erosión puede definirse como el proceso de desprendimiento y transporte del suelo o material rocoso desde cualquier parte de la superficie de la Tierra por parte de los agentes erosivos (Foster y Meyer 1977). En un sentido más amplio, se puede entender la erosión geomorfológica como “la transformación del paisaje debida a la eliminación o reubicación de una parte del material que lo conforma, y como tal comprende los procesos de disgregación, movilización, transporte y sedimentación de partículas de suelo o roca, en los cuales pueden intervenir diversos mecanismos como la acción de la lluvia y la escorrentía superficial, del viento, del empuje glaciar, o simplemente la acción de la gravedad” (Beguería 2005)

Las consecuencias de la erosión del suelo tienen lugar tanto en el lugar donde se produce la pérdida de partículas como en los lugares donde se produce el transporte y la sedimentación. Uno de los efectos más importantes se presenta en los suelos agrícolas, donde la redistribución y pérdida de suelo, así como la ruptura de la estructura y el descenso del contenido de materia orgánica y nutrientes hace que se reduzca la profundidad cultivable y la fertilidad del suelo, promoviendo la dependencia de los fertilizantes e incluso el abandono de terrenos agrícolas (Pimentel *et al*, citado por Alatorre 2010). Los factores involucrados en los procesos erosivos de una cuenca según Alatorre se ve representada en la Figura 3.

Por todo ello, el estudio de la erosión y la producción de sedimento tiene también un interés socioeconómico, más allá del interés teórico en relación con la formación y el modelado del paisaje

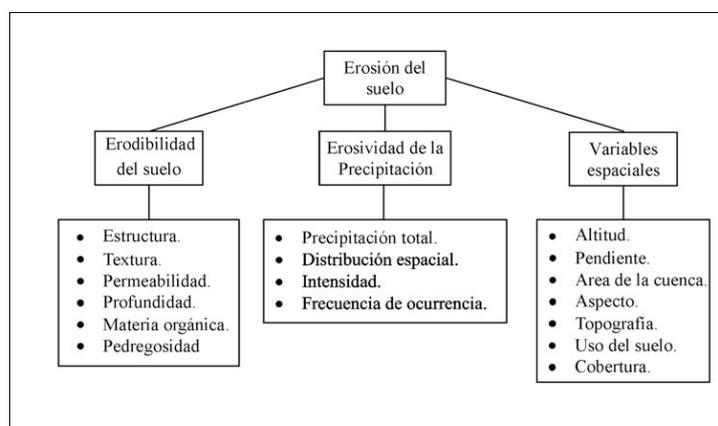


Figura 3. Principales factores que controlan el proceso de erosión hídrica
Fuente: Tomado de Alatorre 2010:23

2.3.1 METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Tradicionalmente, las medidas sobre el terreno han constituido la única forma de estimar la erosión en las laderas, y especialmente en pequeñas parcelas o cuencas monitorizadas. Algunas de las técnicas más usadas son: tazas de salpicadura para medir la erosión y transporte de partículas producido por el impacto de las gotas de lluvia (Salles y Poesen 2000)

A continuación se analizan brevemente algunas de las nuevas tecnologías a disposición para investigación acerca de la erosión.

a. Estimación de Tasas de Erosión y Sedimentos a con Información Radioisotópica

El uso de radioisótopos ambientales para la estimación de tasas de erosión y sedimentación ha ido en aumento en las últimas décadas (Ritchie y McHenry, citado por Alatorre 2010).

b. Aplicaciones de la Teledetección a la Evaluación de la Erosión

La teledetección o percepción remota, basada en el análisis de imágenes generalmente multiespectrales de sensores montados en satélites, aviones u otros soportes, también ha sido aplicada con éxito a los estudios sobre la erosión, proporcionando información generalmente de tipo cualitativo (p. ej. zonas de riesgo de erosión), pero también cuantitativo (tasas de erosión). Existe en la actualidad una gran diversidad de métodos para determinar la erosión, los cuales difieren grandemente en cuanto a la escala espacial y los objetivos (Warren 2002).

c. Modelización de la Erosión del Suelo

La investigación aplicada sobre la erosión ha conocido un importante avance en los últimos años gracias a la incorporación de modelos de simulación numérica por computador. Actualmente, la incorporación de modelos de simulación de los procesos de erosión a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) hace que sea relativamente sencillo para el investigador explorar el creciente número de escenarios posibles.

Los modelos de simulación permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de procesos de erosión y transporte de sedimento, analizar su evolución temporal y simular los

efectos de cambios en diferentes variables climáticas y paisajísticas, como por ejemplo los usos del suelo.

d. Modelación de la Erosión Mediante SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

La producción de erosión y sedimentos se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo MUSLE (William 1975). Mientras el USLE utiliza lluvia como un indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimento.

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \dots\dots\dots (3)$$

Sed : Producción de sedimentos en un día dado (Toneladas métricas)

Qsurf : Volumen de superficie de escorrentía

Qpeak : Escorrentía máxima

Areahru : Área de HRU

Kusle : Factor de erodabilidad del suelo

Cusle : Factor de cobertura y gestión de USLE

Pusle : Factor de prácticas de conservación de USLE

LSusle : Factor topográfico

CFRG : Factor fragmento macro

La sustitución tiene como resultado varios beneficios: la certeza de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y una sola tormenta de producción de sedimento puede ser calculada. El modelo en la parte de la hidrología suministra estimaciones de volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que con el área de la subcuenca se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía. El factor de manejo de cosecha se calcula nuevamente cada día que la escorrentía ocurre, Es una función de la biomasa en la superficie, del residuo del suelo en la superficie, y el factor C mínimo para plantas. Otros factores de la ecuación de erosión son evaluados como los descritos por Wischmeier y Smith (1978).

2.4 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras (IPCC 2000).

En el Quinto Informe IPCC del año 2013 se han definido 4 nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés).

Las cuatro trayectorias RCP se pueden apreciar en la Figura 4, las cuales comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los escenarios de emisión utilizados en el IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) (denominados SRES, por sus siglas en inglés) que no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones.

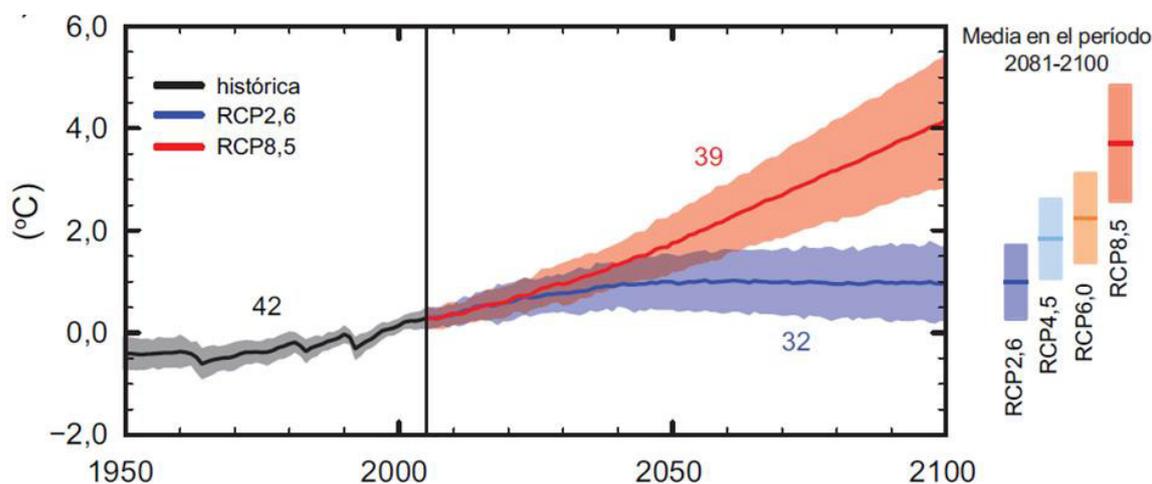


Figura 4. Escenarios del Calentamiento global de la superficie hasta el año 2100

Fuente: Tomado de IPCC 2013:21

2.5 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

Un modelo de circulación Global esquematizada en la Figura 5 es una representación matemática simplificada del sistema climático de la tierra (McAvaney *et al.* 2001). Resuelve, en términos de ecuaciones diferenciales sobre una rejilla tridimensional, la dinámica de la atmósfera considerando ecuaciones de movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), la conservación de masa, energía y calor además de las interacciones con la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e iosfera.

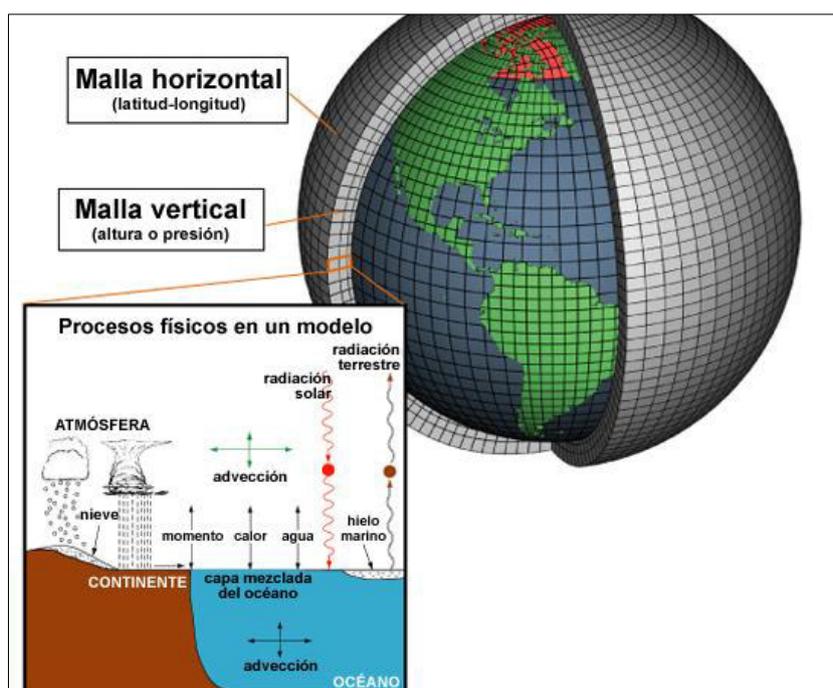


Figura 5. Representación de un modelo de Circulación Global (MCG).
Fuente: Adaptado de UCAR 2009.

2.6 DOWNSCALING ESTADÍSTICO

Amador y Alfaro (2009) mencionan que los Modelos de Circulación General Atmosféricos-Oceánicos Acoplados muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de escala global. Sin embargo, esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Es importante tomar esto en cuenta al estudiar impactos del clima en las actividades del hombre, en la biodiversidad, en ambientes marino-costeros y en arrecifes en las regiones tropicales, por ejemplo. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala dinámica y estadística.

El downscaling se conoce generalmente como la técnica para la obtención de información a escala local a través de la integración de la información a baja resolución en el modelo sinóptico (Zorita y Storch, citado por Carreño 2013).

El downscaling estadístico tiene su origen en el post proceso de las salidas de los modelos sinópticos. En un principio se utilizaban como una herramienta para eliminar los errores del modelo de predicción (Wilks 1995).

2.7 MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Este modelo hidrológico fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). SWAT son las siglas para la herramienta de Evaluación del Suelo y Agua, una vertiente del río o cuenca. El modelo tiene por finalidad predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en el agua, el sedimento y producción de sustancias agrícolas químicas en cuencas grandes.

Además SWAT se puede definir como un software para el modelaje integral de cuencas que permite conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo escenarios actuales y futuros permitiendo una visión holística de la cuenca. El software permite realizar los análisis necesarios en la planificación vinculada al cambio de uso del suelo, actividades de reforestación, establecimiento de centros poblados, establecimiento de obras hidráulicas (como captación, embalses, canales, corrección de cauces, etc.), entre otros (Ruiz 2014).

2.7.1 PRINCIPIOS DE LA MODELACIÓN EN SWAT

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, la salida y el almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica es dividida en subcuencas y unidades de respuesta hidrológica (HRU), las cuales son obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo, pendiente y coberturas presentes tal como se muestra en la Figura 6.

La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la fase de tierra del ciclo hidrológico. Esta fase controla la cantidad de agua, el sedimento, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al principal canal de cada subcuenca.

La segunda división es el agua o fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, el que puede ser definido como el movimiento del agua, sedimento, pesticidas, nutrientes, etc. A través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

Este modelo está basado en principios físicos, en otras palabras no solo genera resultados con el uso de ecuaciones sino que también necesita ser alimentado con información de la zona de estudio, tales como, el clima, las propiedades físicas del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo, constituyéndose en una herramienta cuyo principal objetivo es predecir el efecto de las decisiones en cuanto al manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales (Ruiz 2014).

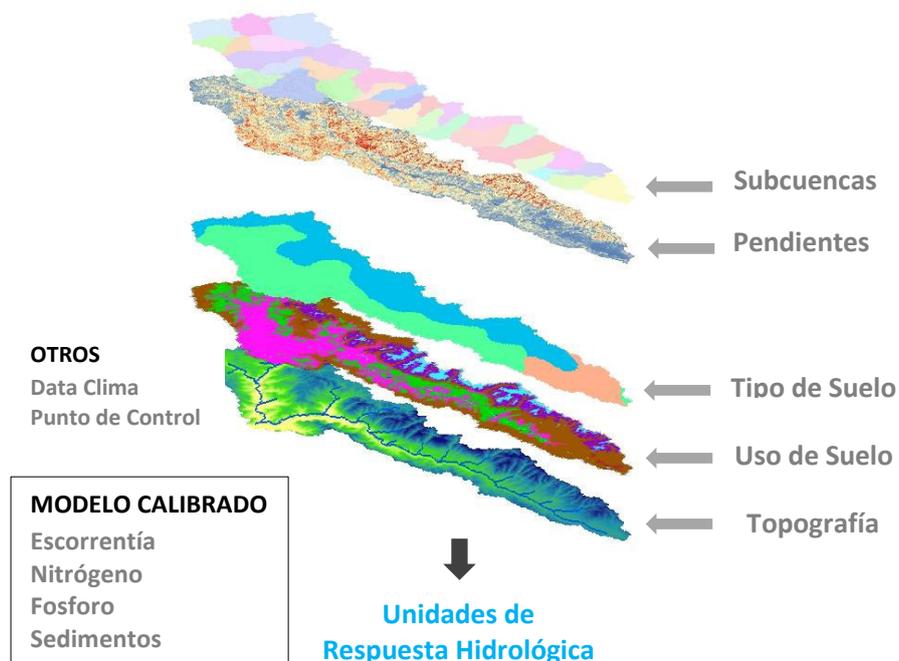


Figura 6. Componentes para la formulación del modelo en el análisis de Cuencas por SWAT

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE INVESTIGACION

3.1.1 REGIÓN DE ESTUDIO

El área de estudio comprendió aproximadamente una extensión de 10419.26 km² hasta la estación hidrosedimentológica “Condorcerro”. Las aguas recogidas por esta unidad hidrográfica desembocan en el océano pacífico.

La zona de estudio como se muestra en la Figura 7 se encuentra por encima de los 450 m.s.n.m. Con respecto a su ubicación geográfica; la cuenca se localiza entre los paralelos 7°58'3.43" - 10°13'35.29" de latitud sur y los meridianos 78°15'42.33" - 77°10'8.75" de longitud oeste.

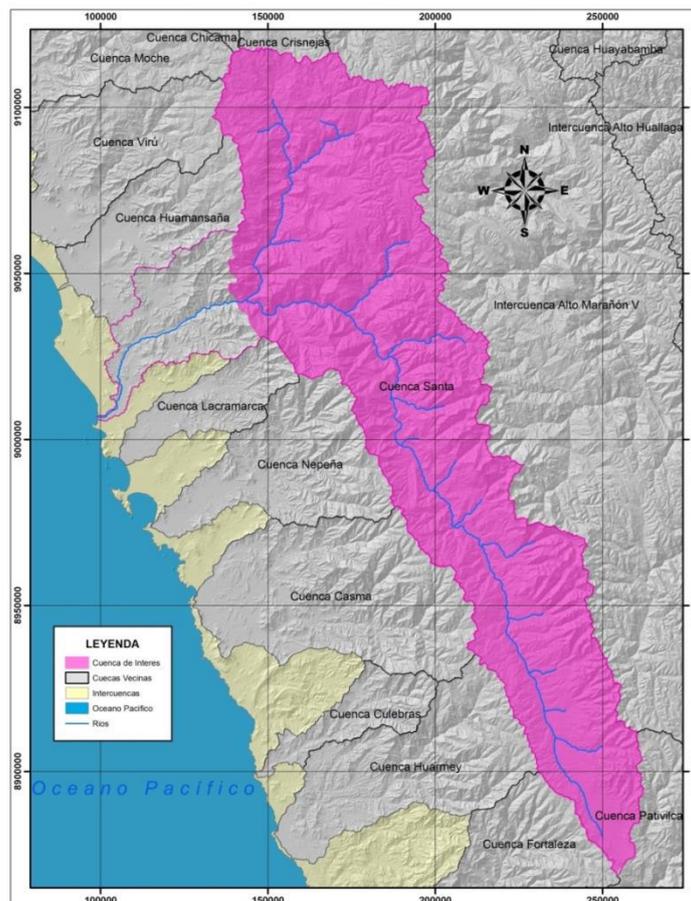


Figura 7. Mapa de ubicación de la zona en estudio

3.1.2 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA OBSERVADA

Se utilizó información meteorológica de precipitación y temperatura proporcionada por el SENAMHI y la ANA; mientras que, la información de caudales y sedimentos fue facilitada por el proyecto especial CHAVIMOCHIC. La distribución espacial de las estaciones se muestra en la Figura 8. Todas las variables meteorológicas se solicitaron a nivel diario puesto que SWAT requiere información a este nivel de detalle.

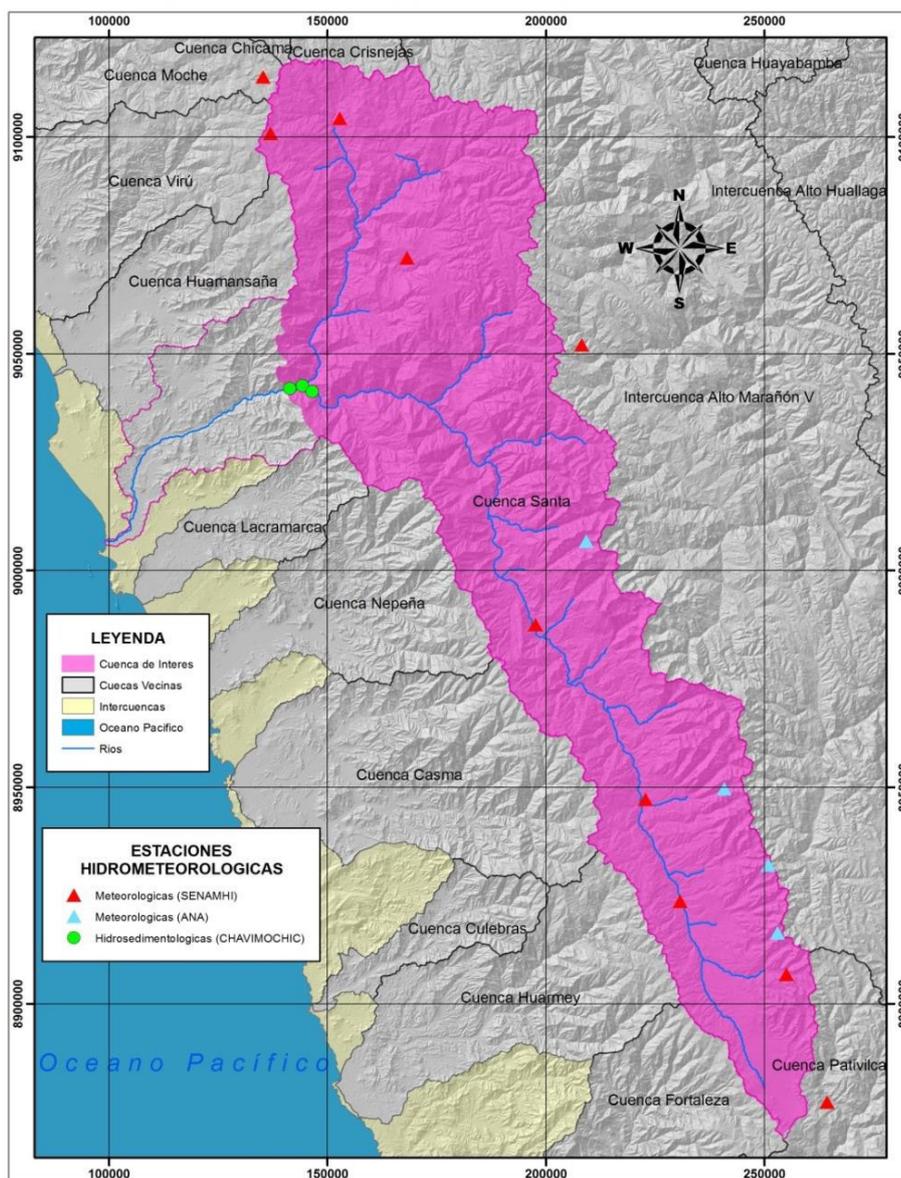


Figura 8. Mapa de Ubicación de estaciones hidrometeorológicas

La información detallada de las estaciones meteorológicas e hidrosedimentológicas se muestra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas e hidrométricas disponibles

ESTACIONES					
Estación	Este	Norte	Variables	Periodos	Fuente
CHIQUIAN	264398.08	8876885.42	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
MILPO	255060.87	8906636.03	Pp	2005 - 2015	SENAMHI
RECUAY	230751.92	8923522.91	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
SANTIAGO A.M	222801.94	8947030.83	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
YUNGAY	197638.00	8987418.39	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
MOLLEPATA	174467.72	9093316.41	Pp, Temp	1968 - 1978	SENAMHI
CACHICADAN	814183.73	9104467.42	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
HUACAMARCANGA	798321.41	9101286.26	Pp	2005 - 2015	SENAMHI
QUIRUVILCA	796783.36	9114270.04	Pp	2005 - 2015	SENAMHI
SIHUAS	208259.10	9052019.07	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
CABANA	829072.34	9072041.17	Pp, Temp	2005 - 2015	SENAMHI
YANAMAREY	250962.34	8931854.92	Pp	2005 - 2015	ANA
SHALLAP	240831.83	8949530.88	Pp	2005 - 2015	ANA
GUESHGUE	253077.48	8916239.59	Pp	2005 - 2015	ANA
ARTESONCOCHA	209211.84	9006655.23	Temp	2005 - 2015	ANA
CONDORCERRO	804665.20	9043008.47	Q, Sd	2001 - 2015	CHAVIMOHIC
SANTA	801360.50	9041882.96	Q, Sd	2003 - 2015	CHAVIMOHIC
TABLACHACA	806878.39	9041537.96	Q, Sd	2003 - 2015	CHAVIMOHIC

3.1.3 INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) requiere información básica fundamental que represente espacialmente la distribución de las características físico-químicas del área en estudio, a través de distintos mapas temáticos; por lo tanto, se representó a la cuenca de la forma más detallada posible, obteniendo información de distintas fuentes nacionales e internacionales, la Tabla 2 muestra detalladamente la información requerida.

Tabla 2. Fuentes de información geográfica utilizadas en la formulación del modelo

Información	Descripción	Fuente
Topografía	Imagen Raster ASTER GDEM resolución 30x30m	METI - NASA
Cobertura Vegetal	Mapa Vectorial	MINAM
Suelos	Mapa Vectorial	FAO
Pendientes	Imagen Raster reclasificada	SWAT

3.1.4 INFORMACIÓN CLIMÁTICA GLOBAL

Como se muestra en la Tabla 3 se consideraron once Modelos de Circulación General (MCG) de la base de datos CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5); con el fin de, obtener proyecciones de precipitación para el periodo 2050 que correspondan al escenario climático rcp 4.5 (Representative Concentration Pathways 4.5W/m²).

Tabla 3. Modelos de circulación general utilizados en el estudio

MODELO	INSTUTUCION	RESOLUCION	
		xRes	yRes
bcc_csm1_1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2.81	2.79
bcc_csm1_1m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	1.13	1.12
csiro_mk3_6_0	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1.88	1.86
ipsl_cm5a_mr	Institut Pierre-Simon Laplace	2.50	1.27
miroc_miroc5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine	1.41	1.40
mohc_hadgem2_cc	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	1.88	1.25
mohc_hadgem2_es	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	1.88	1.25
mpi_esm_mr	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1.88	1.86
mri_cgcm3	Meteorological Research Institute	1.13	1.12
ncar_ccsm4	National Center for Atmospheric Research	1.25	0.94
ncc_noresm1_m	Norwegian Climate Centre	2.50	1.89

3.2 MATERIALES

3.2.1 HARDWARE Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Se utilizó una laptop con procesador Intel core i5 @ 2.67 GHz de 64 bits y 4GB de memoria RAM. Para la modelación hidrológica de la zona de estudio se utilizó el modelo hidrológico semidistribuido SWAT para ello se instaló la extensión ArcSwat 2009 10.1 la cual funciona en la plataforma ArcGis 10.1. El análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo fue procesado por el programa SWATCUP 2012. Para elaborar el formato de datos que ingresan al modelo; así como, el análisis de los resultados obtenidos por medio de cálculos y gráficos se utilizó Matlab R2010 y Microsoft Office 2010.

3.3 PROCEDIMIENTO

El diagrama de flujo que se muestra en la Figura 9 representa la metodología seguida en el presente estudio donde se emplea el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

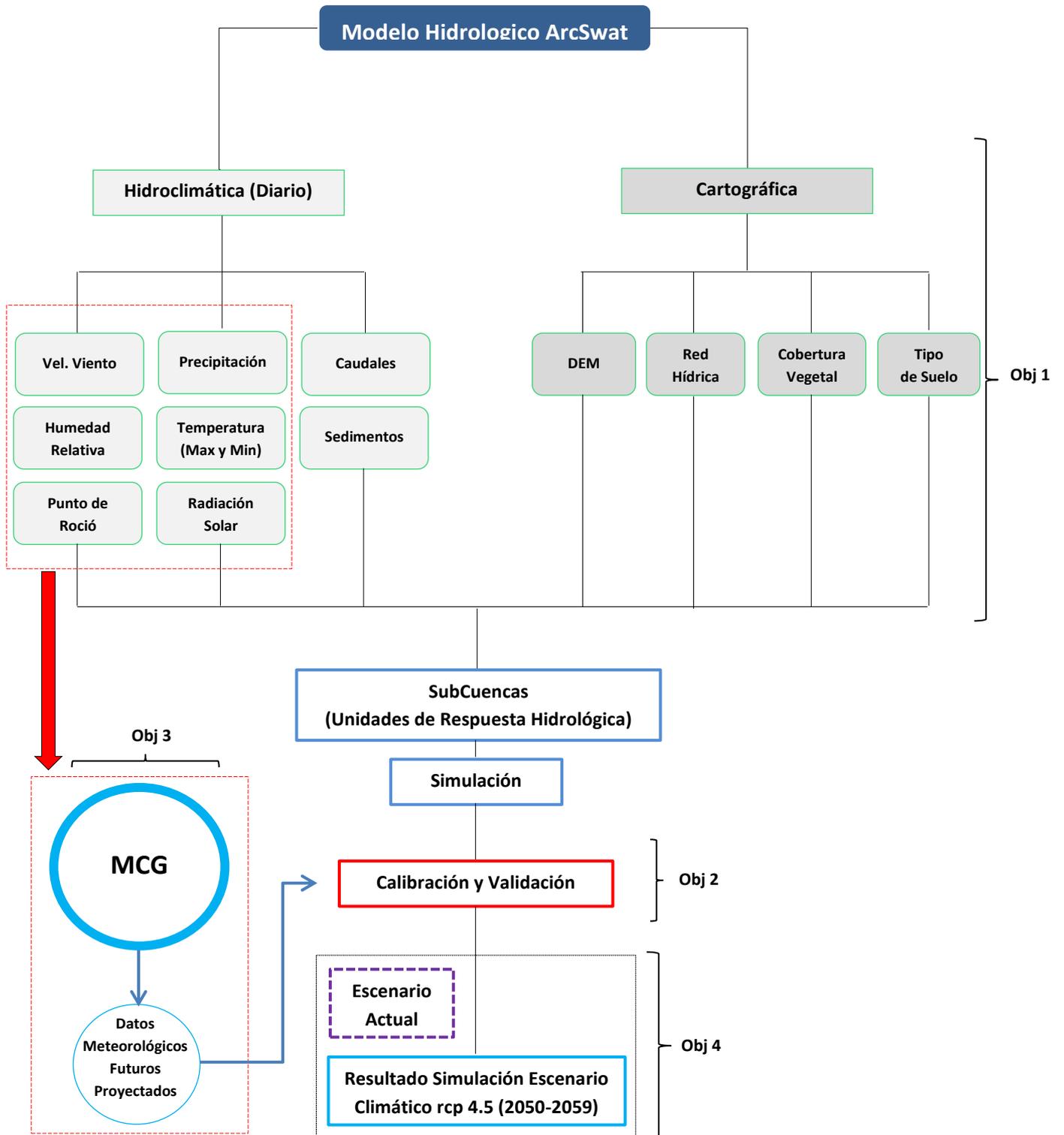


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada

3.3.1 FORMULACION DEL MODELO SWAT

a. Control de calidad y homogenización de datos meteorológicos

Con la finalidad de reducir el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos en la simulación hidrológica se otorgó cierto nivel de confiabilidad a la información meteorológica ingresada al modelo. Para ello se realizó el análisis exploratorio de datos empleando el método gráfico y estadístico a la serie histórica mensual obtenida a partir de información diaria de las estaciones.

Para ayudarnos a identificar valores extremos, máximos o mínimos, en la serie histórica se utilizó los gráficos de cajas. Además se compararon registros históricos diarios de estaciones cercanas para verificar posibles eventos extremos en zona., en la Figura 10 se aprecia la variabilidad histórica de las precipitaciones diarias de las estaciones en la cuenca de estudio

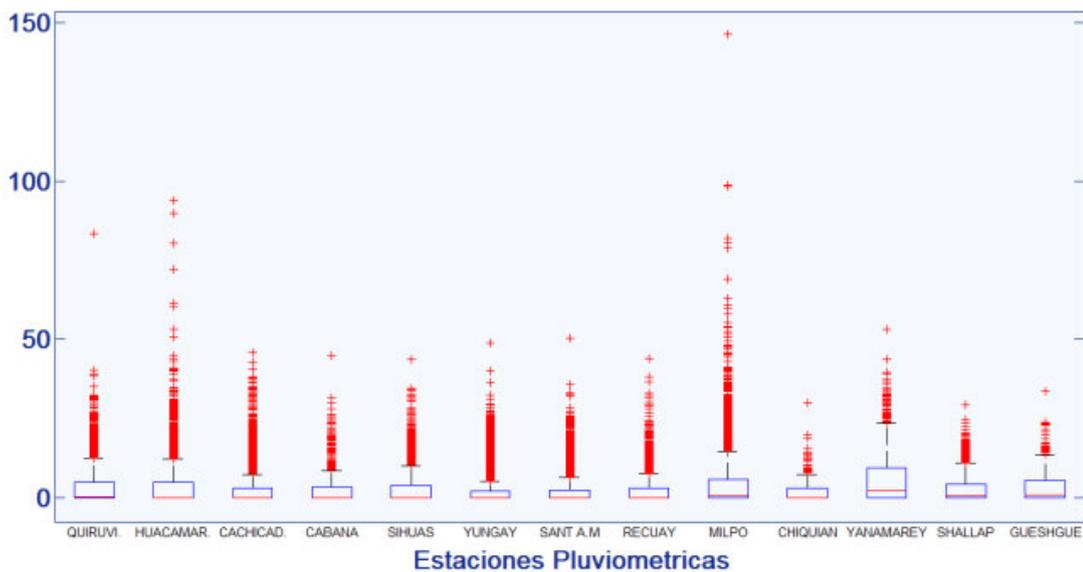


Figura 10. Variabilidad histórica de las precipitaciones diarias

Para emplear el análisis exploratorio de datos por el método gráfico se ploteó la información histórica mensual para de esta manera mostrar los gráficos de series de tiempo e identificar de manera visual comportamientos atípicos (saltos en la media y desviación estándar además de posibles tendencias) en las series de tiempo. En la Figura 11 se muestra las series históricas de precipitaciones a nivel diario y en la Figura 12 se presenta la serie histórica de precipitaciones a nivel mensual.

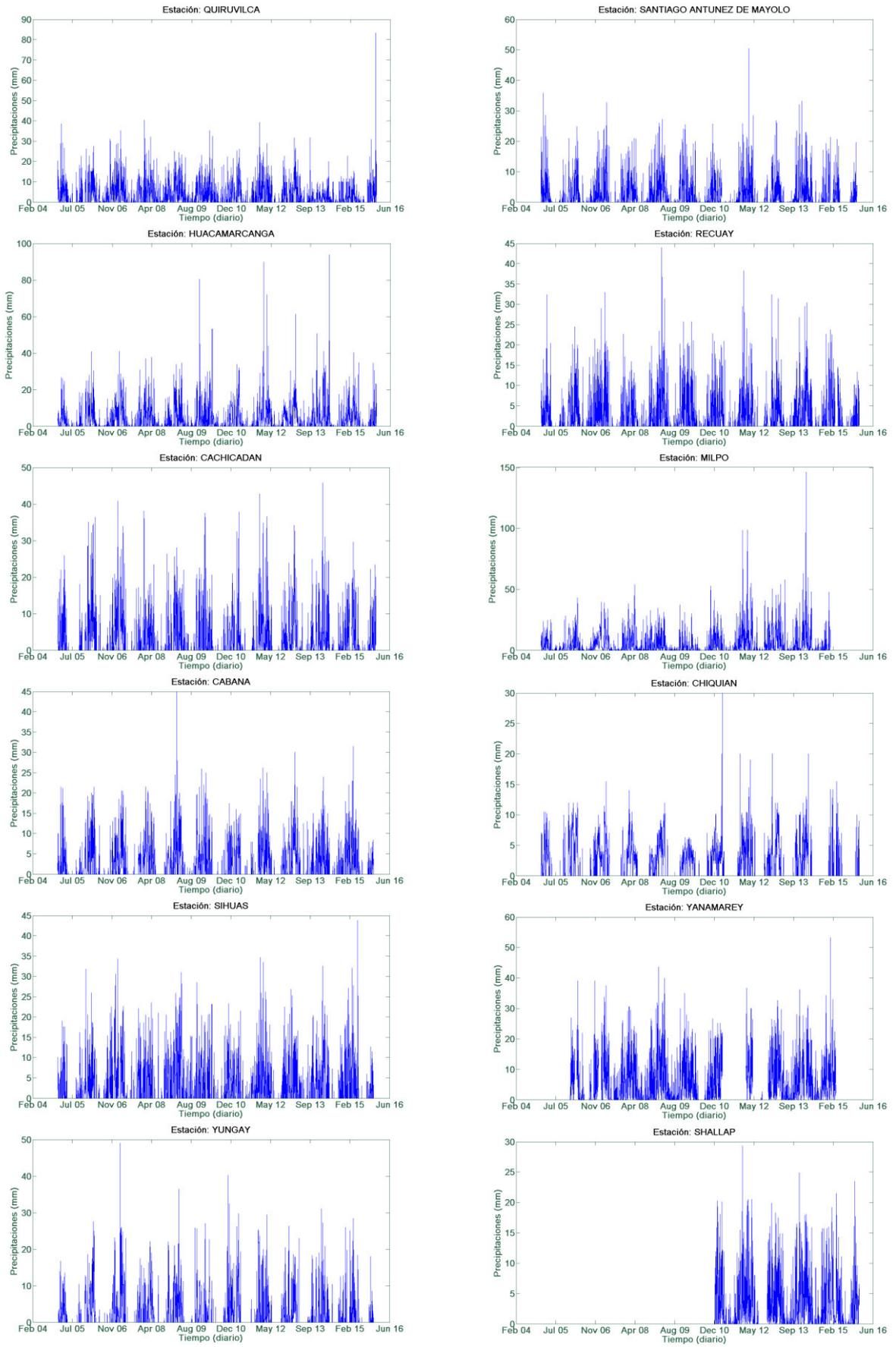


Figura 11. Grafica de series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones

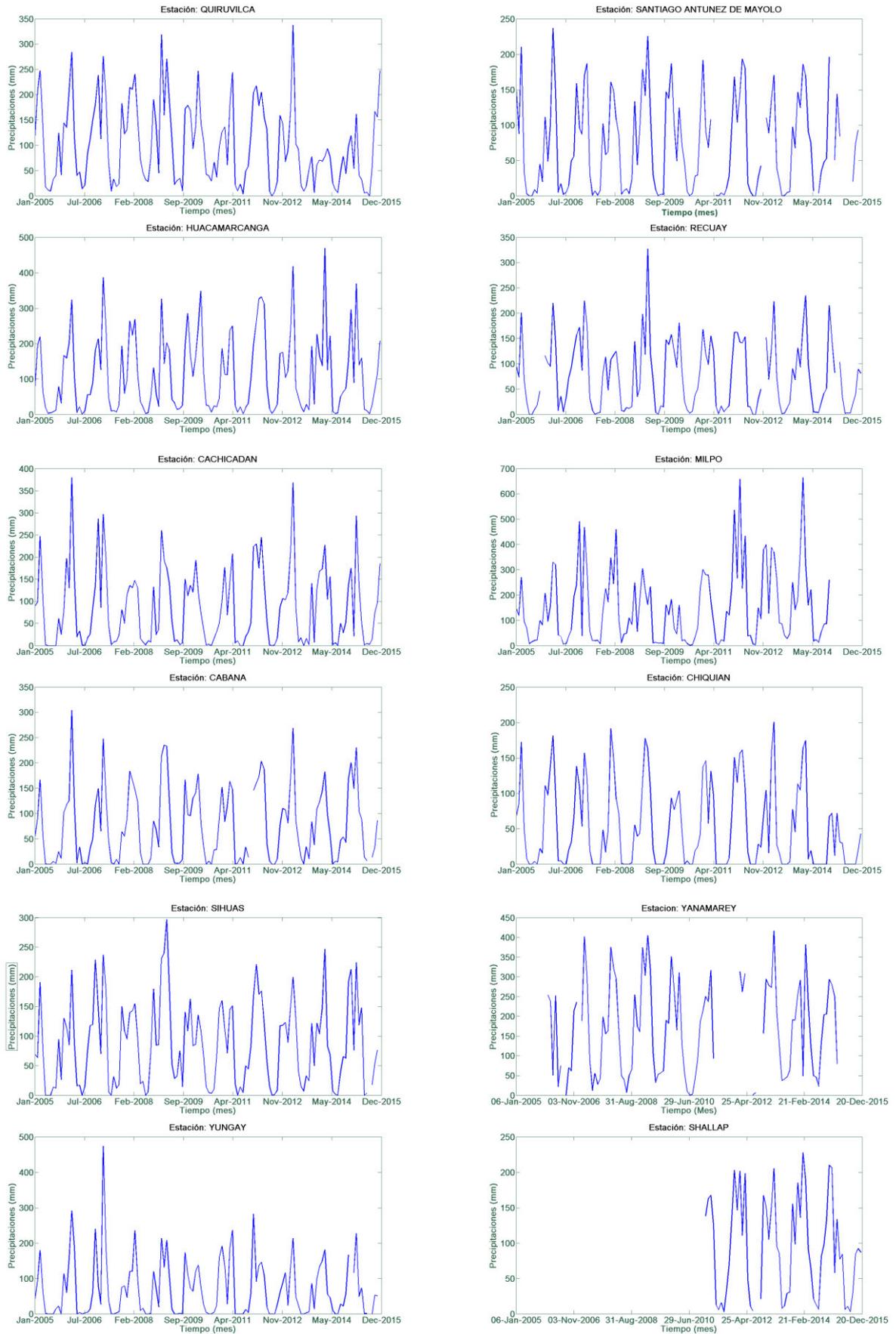


Figura 12. Grafica de series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones

Con el análisis exploratorio de datos por el método estadístico se pudo verificar si los valores de la media y desviación estándar de la serie histórica se encuentran dentro de un rango apropiado a un determinado nivel de significancia. Para ello se empleó la prueba de T de Student con (n_1+n_2-2) grados de libertad al 5 por ciento de nivel de significancia y la prueba F de Fisher con (n_1-1) , (n_2-1) grados de libertad al 5 por ciento de nivel de significancia.

El análisis estadístico realizado a nivel mensual a todas las estaciones nos indica que la estación Quiruvilca presentó inconsistencia para el estadístico T de student, gráficamente se notó un registro de precipitaciones menores en los últimos años. En la Tabla 4 se muestra el análisis estadístico realizado a la estación Quiruvilca.

Tabla 4. Análisis de consistencia de la media en la estación Quiruvilca

T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	118.31	84.78
Desviacion Estandar	83.28	72.96
varianza	6935.51	5323.35
Numero de Datos	66.00	66.00
Varianza Agrupada	6365.81	
Grados de Libertad	130.00	
T calculado con (2 colas)	2.44	
T excel	0.00	
T tabla	1.96	
Resultado	INCONSISTENTE	

Tabla 5. Análisis de consistencia de la desviación estándar en la estación Quiruvilca

F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene92-Dic00	Ene01-Dic08
Media	118.31	84.78
Desviacion Estandar	83.28	72.96
Varianza	6935.51	5323.35
Observaciones	66.00	66.00
Varianza Agrupada	6365.81	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	65.00
F calculado	1.30	
F tabla	1.51	
Resultado	CONSISTENTE	

Dado que el modelo requiere de información pluviométrica a nivel diaria, se optó por reemplazar la información del periodo dudoso de la estación Quiruvilca con información autogenerada de precipitaciones, incorporado en SWAT, basado en un modelo de cadena de primer-orden de Markov para definir un día como húmedo o seco.

Tabla 6. Cuadro resumen de la identificación, análisis y procedimiento considerado

ESTACIONES PLUVIOMETRICAS										
N°	Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Histograma	Homogeneidad		Outlier	Procedimiento	Uso en SWAT
						Media	Desv. Estándar			
1	QUIRUVILCA	-8.0042	-78.3078	3950	Anómalo	Inconsistente	Consistente	No	Se eliminó periodo dudoso	Si
2	HUACAMARCANGA	-8.1214	-78.2931	3883	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
3	CACHICADAN	-8.0917	-78.1494	2760	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
4	CABANA	-8.3836	-78.0123	3160	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
5	SIHUAS	-8.5669	-77.6503	3375	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
6	YUNGAY	-9.1499	-77.7510	2527	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
7	SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO	-9.5165	-77.5249	3079	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
8	RECUAY	-9.7295	-77.4540	3444	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
9	MILPO	-9.8836	-77.2336	4400	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
10	CHIQUIAN	-10.1531	-77.1503	3382	Normal	Consistente	Consistente	No		Si
11	YANAMAREY	-9.6554	-77.2694	4698	Normal	Consistente	Consistente	No	Apoyo para comparar con estación MILPO	Si
12	SHALLAP	-9.4951	-77.3606	4259	Normal	Consistente	Consistente	No	Apoyo para comparar con estación MILPO	Si
13	GUESHGUE	-9.7967	-83.2511	4610	Normal	Consistente	Consistente	No	Apoyo para comparar con estación MILPO	No

Continuando con la formulación del modelo, la herramienta SWAT para simular los procesos físicos de la cuenca estudiada requiere información geográfica básica elaborada por diferentes instituciones dedicadas elaborar dicho contenido, los cuales fueron empleado en la construcción del modelo.

b. Topografía de la zona de estudio (DEM)

Con la finalidad de definir la red de drenaje y los límites de la cuenca se utilizó el modelo digital del terreno ASTERGDEM cuya resolución es de 30x30m. El DEM utilizado que se muestra en la Figura 13 sirvió para que el modelo SWAT genere un raster de pendientes, componente importante para generar las unidades de respuesta hidrológica del modelo.

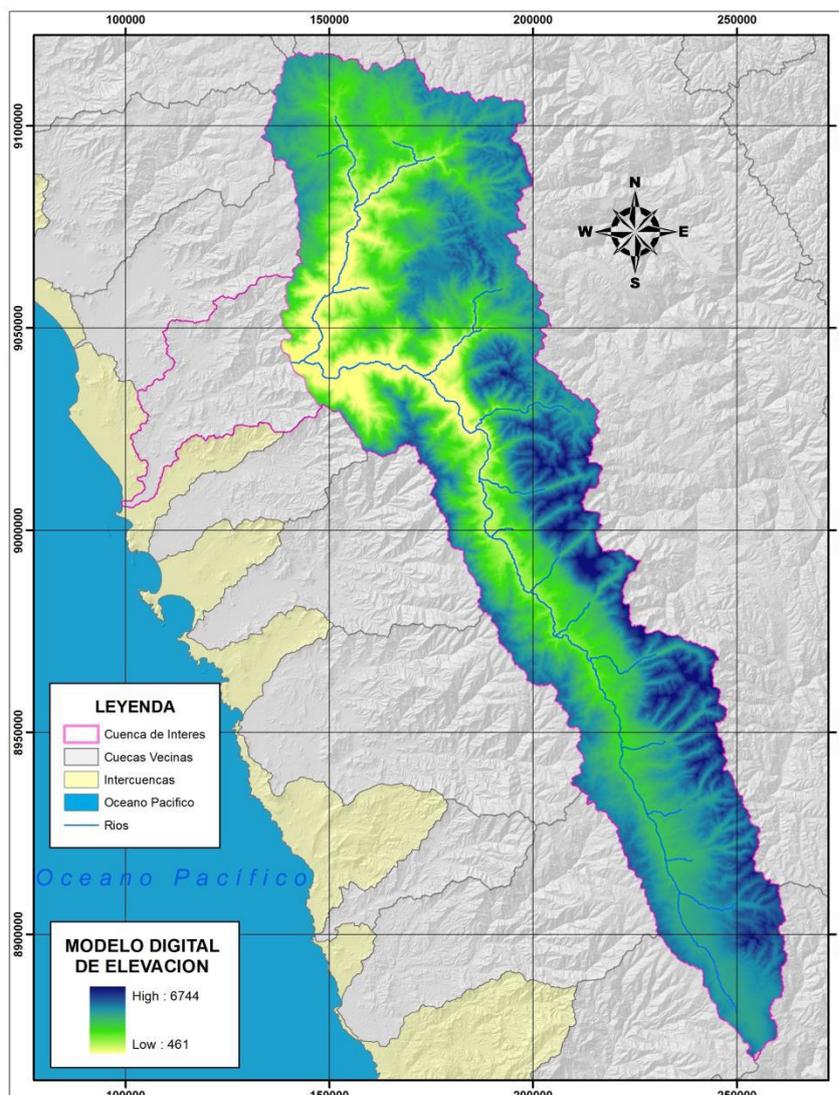


Figura 13. Mapa de elevaciones de la zona en estudio

c. Mapa de Cobertura Vegetal

En la Figura 14 se muestra la cobertura vegetal elaborada por el ministerio de ambiente en el ámbito del proyecto. Los componentes de este mapa fue agrupado en función de características similares a los cuales se les asigno coberturas equivalentes propias de SWAT y de esta manera poder ser reconocidas por el modelo hidrológico. La Tabla 7 indica las equivalencia entre la cobertura vegetal del mapa utilizado con el uso de suelo en SWAT.

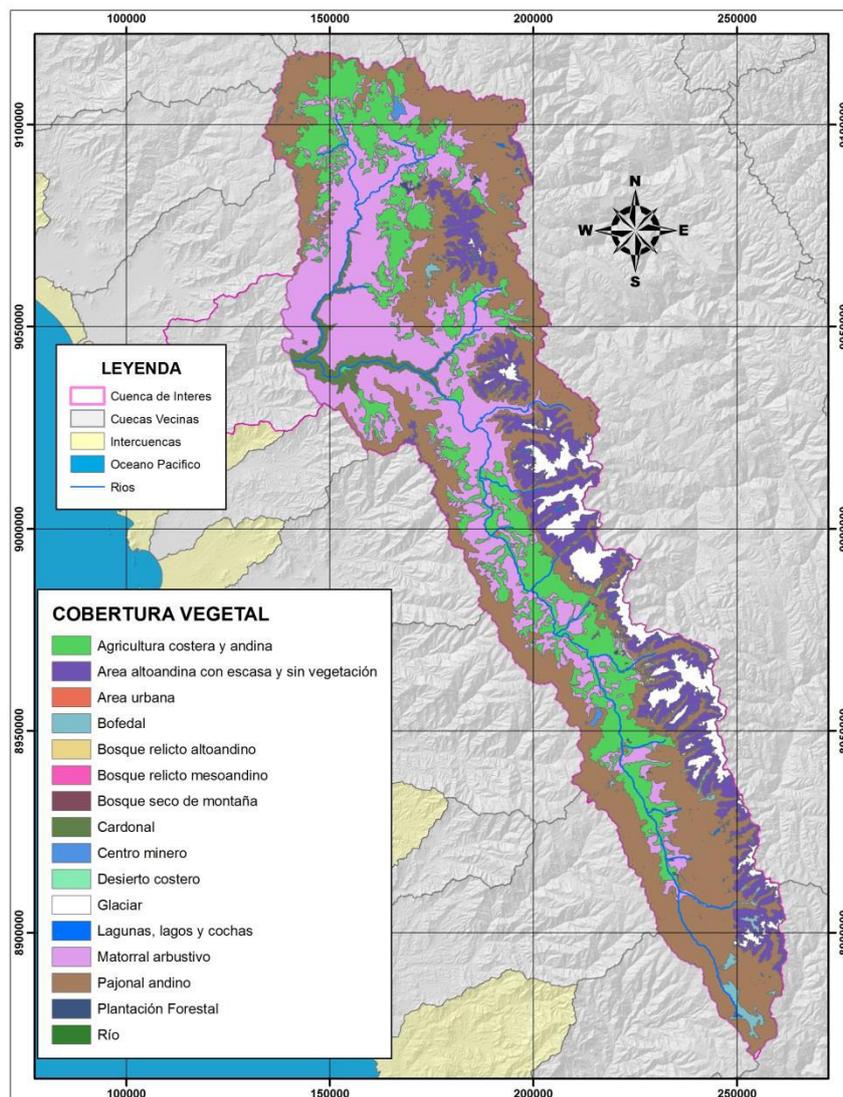


Figura 14. Mapa de cobertura vegetal de la zona en estudio

Tabla 7. Reclasificación de coberturas reconocidas por el modelo SWAT

Unidades	Cobertura Vegetal	Aprox. SWAT Código Uso de Suelo	SWAT Uso de Suelo Descripción
1	Agricultura costera y andina	AGRR	Agricultural Land-Row Crops
2	Área altoandina con escasa y sin vegetación	BARR	Barren
3	Área urbana	URML	Residential-Med/Low Density
4	Bofedal	WETN	Wetlands-Non-Forested
5	Bosque relicto altoandino	FRST	Forest-Mixed
6	Bosque relicto mesoandino	FRST	Forest-Mixed
7	Bosque seco de montaña	FRSD	Forest-Deciduous
8	Cardonal	RNGB	Range-Brush
9	Centro minero	UIDU	Industrial
10	Desierto costero	BARR	Barren
11	Glaciar	WATR	Water
12	Lagunas, lagos y cochas	WATR	Water
13	Matorral arbustivo	RNGB	Range-Brush
14	Pajonal andino	RNGE	Range-Grasses
15	Plantación Forestal	PINE	Pine
16	Río	WATR	Water

d. Mapa de tipo de Suelos

El mapa de tipo de suelo en la Figura 15 se obtuvo de un estudio realizado por la Oficina Nacional de Recursos Naturales (ONER). En la cual se identificaron tres tipos de suelo nombrados según la nomenclatura FAO para clasificar los tipos de suelo.

Los valores correspondientes a los parámetros de suelo necesarios para formular el modelo SWAT, tanto de la capa superficial como la sub superficial del suelo se obtuvieron en base a los estudios desarrollados por la FAO en América Latina y se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Características del Suelo pertenecientes a la zona de estudio

NOMBRE FAO	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	CLAY	SILT	SAND	SOL_ALB	USLE_K
Leptosol Dístico	300	1.5	0.16	7.68	0.9	24	19	58	0.0863	0.2846
Leptosol Dístico	1000	1.4	0.16	7.65	0.6	33	17	49	0.154	0.2846
Leptosol Eutrítico	300	1.7	0.104	2.82	0.8	22	23	55	0.1047	0.2759
Leptosol Eutrítico	1000	1.6	0.104	2.73	0.3	32	20	48	0.2747	0.2759
Regosol Dístico	300	1.6	0.143	16.31	0.4	10	18	72	0.2265	0.2759
Regosol Dístico	1000	1.6	0.143	19.57	0.2	10	15	75	0.3331	0.2759

En la Tabla 9 se observa tres grupos de suelo presente la zona de estudio que fue elaborada por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO.

Tabla 9. Clasificación del Tipo de suelo con nomenclatura FAO

NOMBRE FAO	CODIGO
Leptosol Districo	Lp4-1532
Leptosol Eutrico	Lp9-1543
Regosol Dístrico	Rd15-1-2b-929

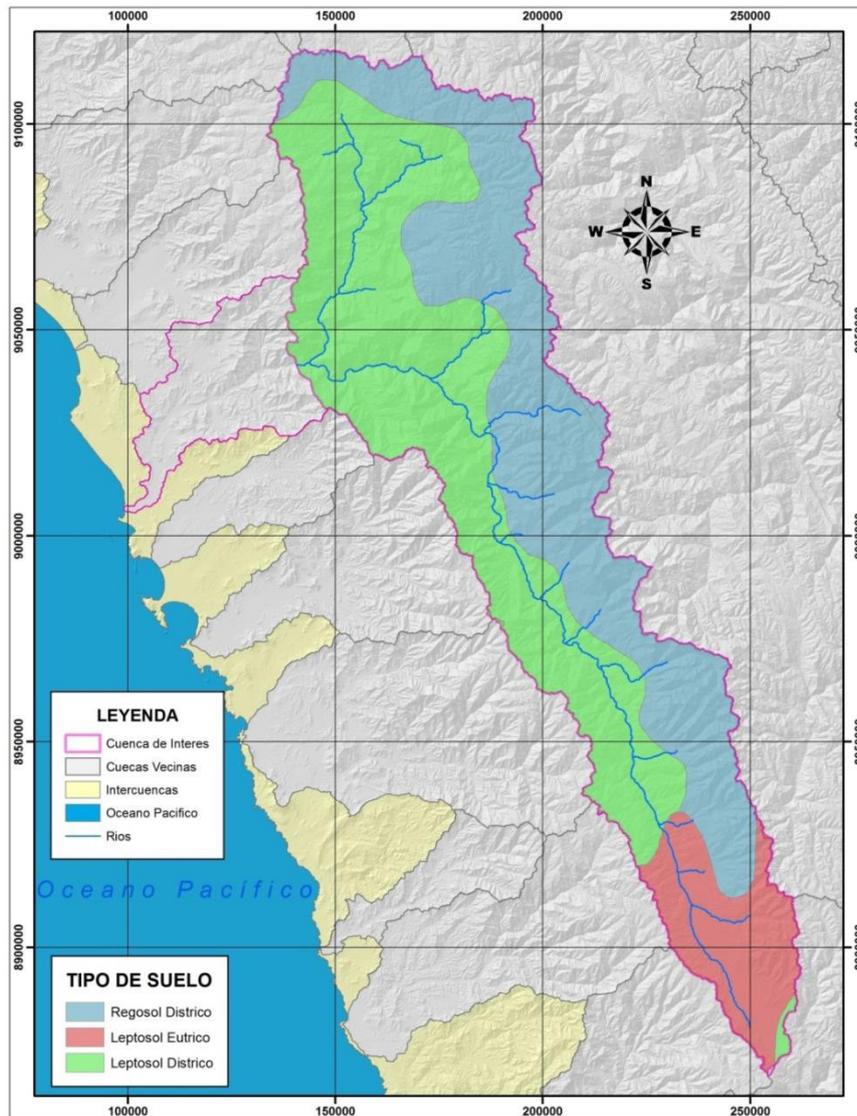


Figura 15. Mapa de tipo de suelos de la zona en estudio

3.3.2 ANALISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT

El análisis de sensibilidad es un proceso que permitirá identificar los parámetros que generan mayores impactos en el modelo. Estos parámetros de mayor significancia explican la producción de agua y sedimentos de la zona estudiada.

Para la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT se definió un periodo de seis años (2006 - 2011) y cuatro años (2012 - 2015) respectivamente. Se utilizaron tres estaciones hidrométricas: La estación Tablachaca, la cual afora las aguas que provienen de la zona norte de la cuenca; La estación Santa, que afora las aguas que provienen de la zona sur de la cuenca; y la estación Condorcero, esta última reúne aguas abajo el caudal líquido y sólido de las estaciones Tablachaca y Santa.

a. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad del proyecto fue trabajado con el programa SwatCUP. Usando el algoritmo SUFI2 del programa, se realizaron 500 iteraciones para cada punto de control, para lo cual se empleó la información observada de caudales y sedimentos a nivel mensual correspondiente al periodo (2006 – 2011). Cada parámetro toma un valor; el cual se encuentra dentro de un rango de valores admisibles, para todos los parámetros se define la función objetivo y luego de múltiples iteraciones SwatCUP permite identificar a aquellos parámetros que variando un poco su valor reflejaron cambios importantes en las variables de salida de la cuenca. Con este análisis reducimos la incertidumbre sobre que parámetros se debe trabajar la calibración y por consiguiente esto se ve reflejado en un mejor desempeño del modelo.

Se seleccionaron 23 parámetros a fin de evaluar el grado de influencia que tienen en la zona de estudio sobre la variables caudal y sedimento, la Tabla 10 muestra los parámetros seleccionados con su respectiva descripción

Primero se realizó el análisis de sensibilidad y la respectiva calibración de caudales; solo después se procedió con las iteraciones de sensibilidad para la variable sedimentos y de esta manera asegurar un correcto proceso de calibración, en la siguiente etapa, del modelo hidrológico correspondiente a la zona en estudio.

Tabla 10. Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

PARAMETROS	DEFINICION
CN2	Numero de curva inicial para la condición de humedad II
GW_DELAY	Tiempo de retardo del flujo subterráneo
GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno
RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo
HRU_slp	Es la pendiente o inclinación del canal dado.
GW_REVAP	Coefficiente de evaporización del agua subterránea
REVAPMN	Profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que ocurra percolación en el acuífero inferior
ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo
CANMX	Es el máximo almacenamiento por retención, debido a la cobertura vegetal.
EPCO	Factor de compensación para la cantidad de agua catada por las plantas
CH_K2	Conductividad hidráulica del canal principal
CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning para el canal
SURLAG	Coefficiente de retraso del agua lluvia en la superficie.
SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada
ALPHA_BF	Es una constante de recesión del caudal base.
SOL_BD	Densidad aparente del suelo
ADJ_PKR	Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en la subcuenca.
SPCON	Parámetro lineal para calcular la máxima cantidad de sedimentos que puede ser reencausada en el enrutamiento de sedimentos del flujo.
USLE_K	Factor de erosibilidad del suelo
USLE_P	Predice la erosión en función de la energía de la precipitación
SPEXP	Exponente del parámetro que calcula la cantidad de sedimentos reencausados en el enrutamiento de sedimentos de caudal.
CH_COV	Factor de cubrimiento del factor se define como el radio entre la degradación de un canal con cierta cobertura vegetal y un canal sin ninguna cobertura vegetal.

Luego de evaluar los parámetros de caudales y sedimentos a través del algoritmo SUFI2 en SwatCUP, dieciséis parámetros fueron prioridad para ser utilizados más adelante, en la calibración el modelo hidrológico.

Swat CUP se vincula con el modelo SWAT intercambiando archivos de formatos de texto. En la Figura 16 se muestra el proceso que desarrolla el programa SwatCUP empleando el algoritmo de optimización SUFI2 utilizado.

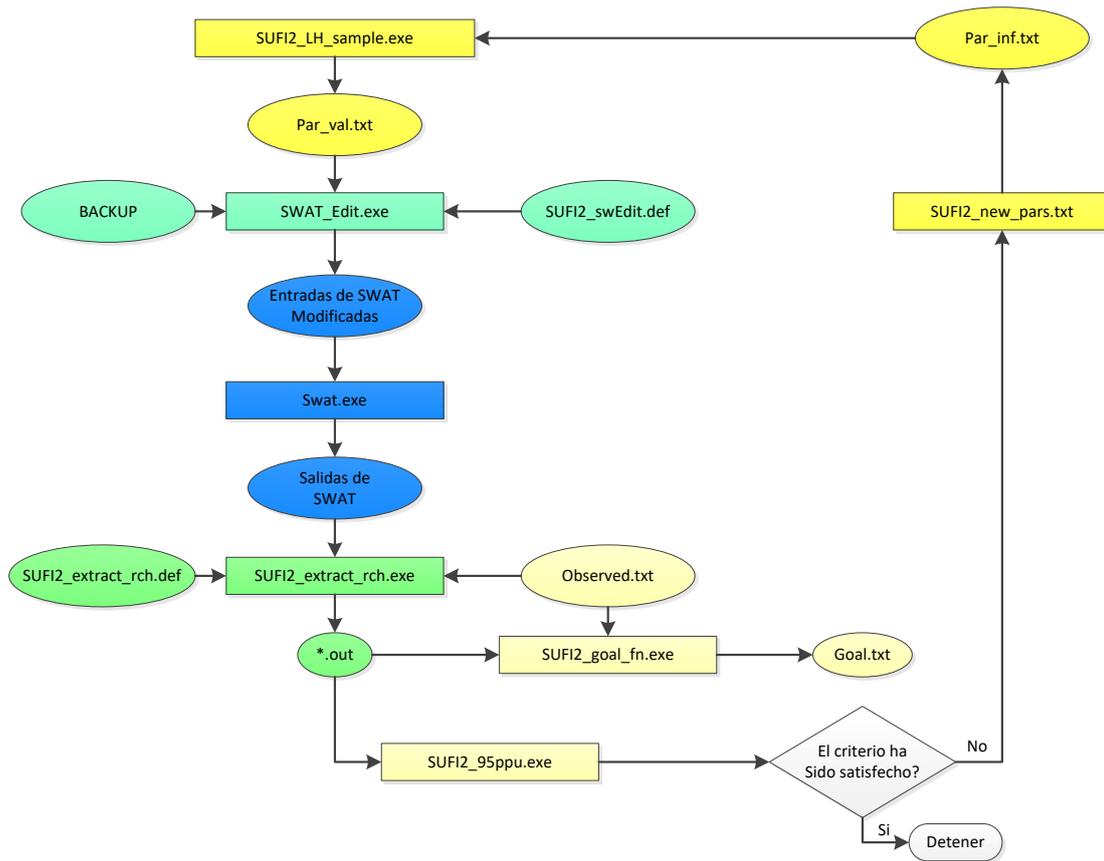


Figura 16. Paso a paso para la creación de archivos de entrada en SwatCUP.

b. Calibración del Modelo

En el proceso de Calibración se utilizó el periodo 01/01/2006 al 31/12/2011; es decir, seis años que sirvieron para comparar los resultados obtenidos en la simulación con los valores observados en campo. Para conseguir calibrar de modelo se modificaron los valores de aquellos parámetros importantes; es decir, Aquellos parámetros de mayor sensibilidad.

En este proceso se evaluó estadísticamente ambas informaciones, simuladas y observadas, verificando la eficiencia del modelo a través de coeficientes que demuestren la eficiencia del modelo hasta conseguir su calibración.

Se muestran los siguientes coeficientes para evaluar el desempeño del modelo hidrológico Swat.

Coefficiente Nash-Sutcliffe (NSE): Representado por la siguiente ecuación.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \bar{E})^2} \dots\dots\dots(4)$$

Donde NSE es el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe que puede variar desde menos infinito hasta 1; siendo 1 el ajuste perfecto entre los datos simulados y los observados, Em es el evento observado, Es el evento simulado, \bar{E} es la media de del evento observado del periodo a simular.

Coefficiente de Determinación (R2)

El estadístico R2 puede oscilar entre 0 y 1, donde 0 indica sin correlación y 1 representa una correlación perfecta, y proporciona una estimación de lo bien que la varianza de los valores observados se replican por las predicciones del modelo (Krause, citado por Arnold et al. 2012)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Donde R² es el coeficiente de determinación, que puede variar de -∞ a 1 n es el número de observaciones en el periodo considerado, O_i es el valor observado iesimo, \bar{O} es el valor observado medio, P_i es el valor iesimo pronosticado por el modelo, \bar{P} es el valor medio pronosticado del modelo.

Estadístico RSR

El estadístico RSR (ecuación 6), es el cociente entre la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) y el desvío estándar, por lo que es una forma de estandarizar el RMSE. Moriasi et al. (2007) plantean que al combinar un índice de error (RMSE) con información adicional, se incorporan los beneficios de las estadísticas de índices de error y se incluye un factor normalizador. Su valor óptimo de cero, indica que no existe variación residual y que por lo tanto el modelo cuenta con un ajuste perfecto, se toma como aceptable un valor menor o igual a 0,70 (Moriasi et al., 2007).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right] \dots\dots\dots(6)$$

Donde n es el número de observaciones en el periodo considerado, O_i es el valor observado iesimo, \bar{O} es el valor observado medio, P_i es el valor iesimo pronosticado por el modelo.

Estadístico PBIAS

El estadístico PBIAS mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (ecuación 7). Valores positivos de este estadístico indican un sesgo hacia la sobreestimación, mientras que en los negativos, el sesgo es hacia la subestimación. Valores cercanos a cero (el óptimo) indicarían una alta precisión de la modelación (Gupta et al., citado po Moriasi et al., 2007)

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \dots\dots\dots(7)$$

Donde n es el número de observaciones en el periodo considerado, O_i es el valor observado iesimo, P_i es el valor iesimo pronosticado por el modelo.

Los valores admisibles para demostrar la eficiencia del modelo calibrado en SWAT se muestra a través de las calificaciones de desempeño que se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Interpretación de parámetros estadísticos para Calibrar y Validar el Modelo

Performance Rating	PBIAS (%)			
	RSR	NSE	Streamflow	Sediment
Very good	0.00 < RSR < 0.50	0.75 < NSE < 1.00	PBIAS < ±10	PBIAS < ±15
Good	0.50 < RSR < 0.60	0.65 < NSE < 0.75	±10 < PBIAS < ±15	±15 < PBIAS < ±30
Satisfactory	0.60 < RSR < 0.70	0.50 < NSE < 0.65	±15 < PBIAS < ±25	±30 < PBIAS < ±55
Unsatisfactory	RSR > 0.70	NSE < 0.50	PBIAS > ±25	PBIAS > ±55

Fuente: Moriasi, et al. (2007)

c. Validación del Modelo

Para validar el modelo se ha considerado cuatro años observados, comprendidos desde el periodo 01/01/2012 al 31/12/2015, para las estaciones mencionadas anteriormente. Las variables consideradas en la validación fueron los caudales y sedimentos; de esta manera, se evaluó la predictibilidad del modelo y la eficiencia de este.

3.3.3 REDUCCIÓN DE ESCALA Y PROYECCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

En vista de la baja resolución de los modelos de circulación general para representar condiciones climáticas locales se realizó una reducción de escala; para ello, empleamos la información meteorológica observada (2015 - 2016) y se utilizó el portal de datos climáticos desarrollado por el programa de investigación sobre el Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS), el cual permite realizar una reducción de escala de tipo estadística de los modelos de circulación general y además realiza la corrección del sesgo. Para corregir el error del sesgo se optó por el método de “Quantile Mapping”, este es un método más sofisticado que proporciona el portal para este tipo de variables estocásticas como son la precipitación y temperatura.

La validación de la data climática proyectada para el periodo 2050 se realizó comparando las series históricas de referencia generada por los modelos climáticos con las series históricas observadas por las estaciones meteorológicas, el desempeño de cada modelo se verifico a través del parámetro de eficiencia Nash y la correlación de Pearson.

3.3.4 COMPARACION DE LA PRODUCCION HIDRICA Y SEDIMENTARIA ACTUAL CON LAS PROYECCIONES FUTURAS.

Luego de seleccionar los modelos climáticos de mejor ajuste estos se ingresaron al modelo hidrológico calibrado y validado. Para generar así una cantidad modelos hidrológicos, bajo el escenario climático rcp4.5, similar al número de modelos considerados de mejor ajuste.

Se obtuvo así series históricas de caudales y sedimentos para el periodo de análisis 2050 en los diferentes puntos de interés dentro de la cuenca estudiada.

Para poder realizar la comparación de las variables Caudal y sedimentos en dos condiciones climáticas diferentes, es decir, en condiciones actuales y en condiciones de cambio climático, se emplearon herramientas estadísticas y gráficas para conocer de qué manera son afectados los caudales líquidos y sólidos. Esto a través del análisis de la

distribución de caudales diarios, mensuales u anuales. Se utilizaron gráficos de barras, diagrama de cajas y percentiles para conocer las persistencias de los caudales y el ciclo de los sedimentos.

a. Análisis de caudales a nivel diario

Para este análisis se construyó la curva de duración de caudales con la información diaria proyectada y la información observada en la estación Condorcerro, para ello se presenta la relación de los caudales ordenados de mayor a menor en el eje de ordenadas y en el eje de abscisas los valores correspondientes a los valores obtenidos de la fórmula de probabilidad de Weibull para conocer la probabilidad en que algún determinado caudal es igualado o excedido en el tiempo. En la Figura 17 se muestra la forma de la curva de duración de caudales para el análisis de frecuencia de datos de caudal para representar la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado.

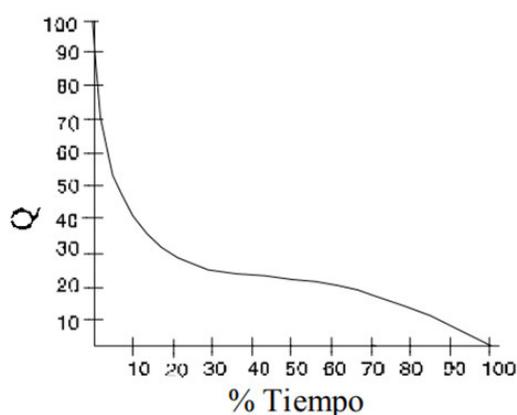


Figura 17. Procedimiento gráfico para el análisis de frecuencia de datos de caudales

b. Análisis de caudales a nivel mensual

Los efectos del cambio climático en la producción hídrica se analizaron mediante la comparación de caudales medios mensuales proyectados por los ocho modelos de mejor ajuste y los caudales promedios mensuales observados provenientes de la estación Condorcerro, por medio de la gráfica de variación relativa de caudales se consigue conocer las variaciones positivas o negativas para cada mes del año.

Los impactos en la oferta hídrica se analizaron mediante las curvas de probabilidad de ocurrencia construidas para tres categorías de persistencia; al 50%, que representa al caudal medio; al 75%, que representa la oferta para emplearla con fines de riego; y al 90%, el cual representa la oferta para consumo humano.

c. Análisis de sedimentos a nivel mensual

Los efectos del cambio climático en la producción de sedimentos se analizaron a través de comparar los sedimentos en suspensión medios mensuales proyectados y observados en la estación Condorcerro por medio de la gráfica que represente la variabilidad promedio mensual de esta variable.

d. Análisis de caudales y sedimento a nivel anual

Las variaciones por efecto del cambio climático sobre estas dos variables de salida del modelo en el punto de control Condorcerro son analizadas por medios de histogramas de los resultados proyectados así como por grafico de barras y diagramas de caja.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 FORMULACION DEL MODELO EN SWAT

Considerando a la estación Condorcerro como el punto de drenaje de la cuenca se obtuvo como resultado una región de estudio equivalente a 10,419 km². Sobre esta área de estudio el modelo encontró 159 unidades de respuesta hidrológica (HRUs), el cual es el resultado de combinar los diferentes mapas temáticos. Las unidades de respuesta hidrológica tienen implicancia importante en la transformación de la precipitación a escorrentía y producción de sedimentos.

De los once años (2005 - 2015) de información meteorológica histórica registrada en la zona de estudio; se consideró al año 2005 como periodo de calentamiento para que el modelo SWAT establezca las condiciones iniciales previo a realizar la calibración.

En la Figura 18 se muestra el resumen de la información obtenida luego de completar la construcción del modelo luego de la primera corrida por defecto.

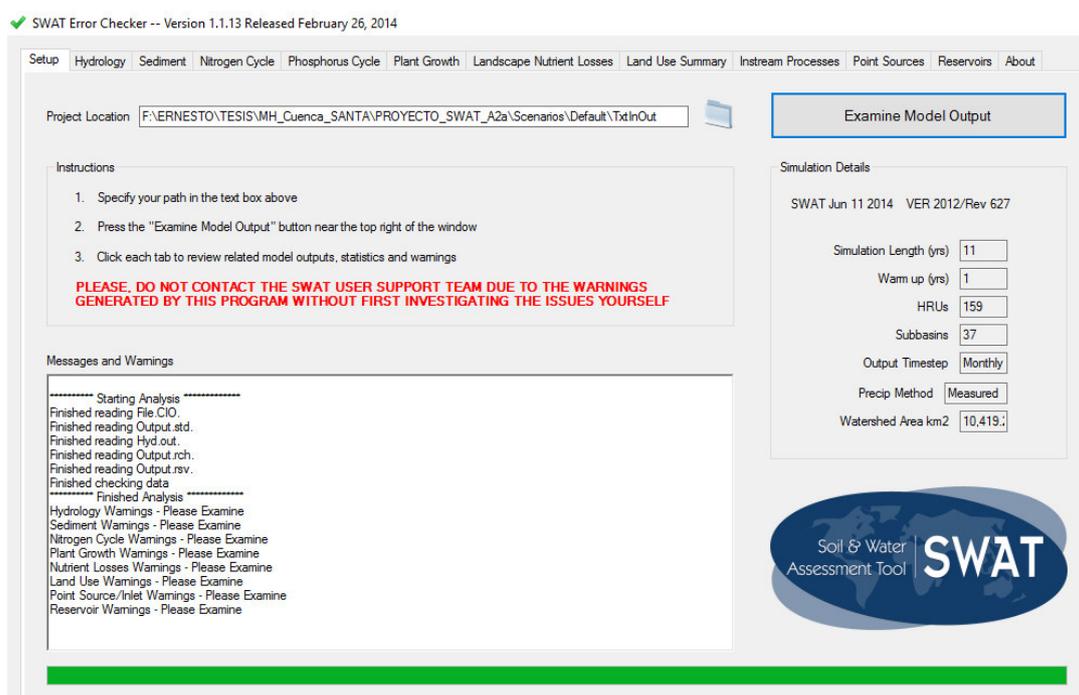


Figura 18. Resumen del modelo SWAT Implementado

La Figura 19 muestra como la zona de estudio se subdividió en 37 unidades hidrográficas de menor tamaño las cuales fueron agrupadas en dos grandes grupos; es decir, dos Subcuencas de apoyo a las que llamaremos Subcuenca A y Subcuenca B cada una de ellas con sus respectivas estaciones de aforo (Santa y Tablachaca) que permitieron calibrar y validar la zona total de estudio. A sí mismo el área total estudiada cuenta con la estación hidrosedimentológica Condorcerro en un punto de drenaje aguas más abajo.

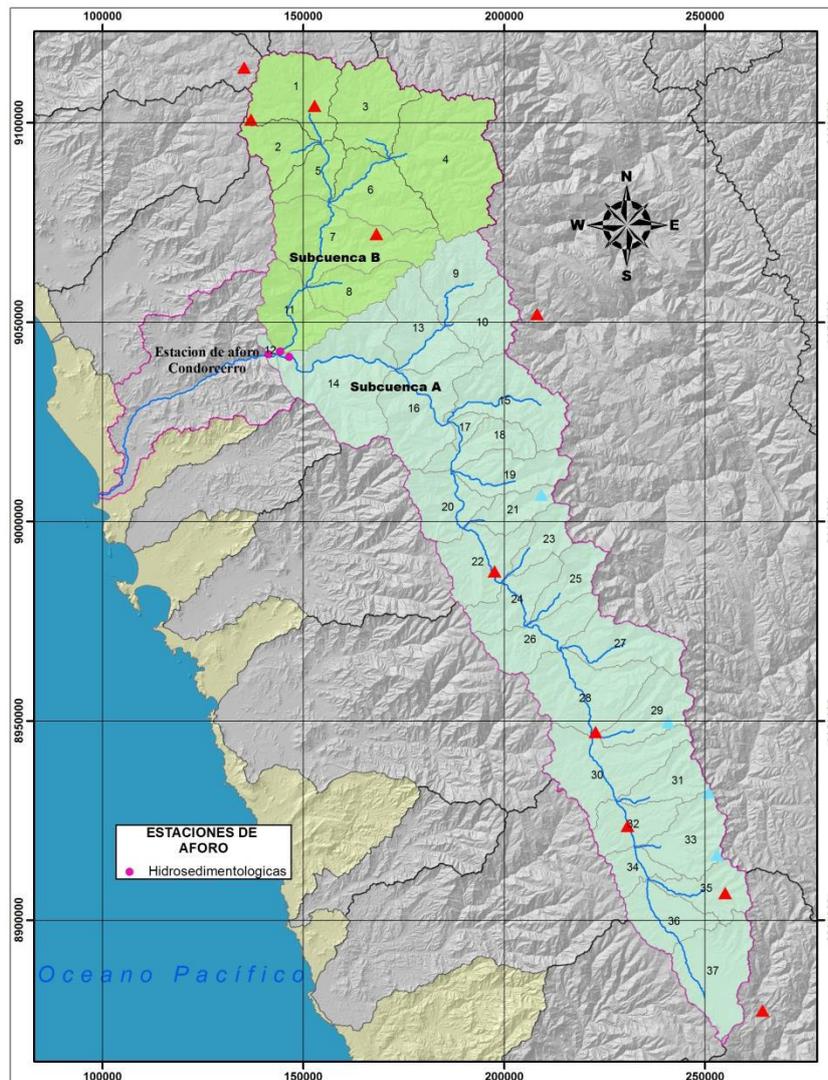


Figura 19. Cuenca discretizada en la zona de estudio

La discretización de la cuenca en 37 subunidades ayudó a obtener una mejor simulación, puesto que si trabajáramos con menos de ellas podría generar desfase entre el caudal observado y el simulado, esto hubiese hecho más complicado la etapa de calibración que se desarrolló posteriormente. Respecto a los mapas temáticos, es deseable un mapa de suelo con mayor número de categorías para representar mejor la zona de estudio.

4.2 ANALISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO

4.2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite conocer los parámetros de entrada que al experimentar cambios pequeños generaron variaciones importantes en las variables dependientes caudal y sedimento.

A continuación en la Figura 20 se muestra la sensibilidad de parámetros que inciden sobre la producción hídrica en la subcuenca da apoyo “A”, donde se puede notar que las mayores sensibilidades corresponden a SOL_BD, parámetro que modifican la escorrentía superficial; CN2, parámetro que modifican la escorrentía superficial y CH_K2, parámetro que modifica rutina de agua en el canal.

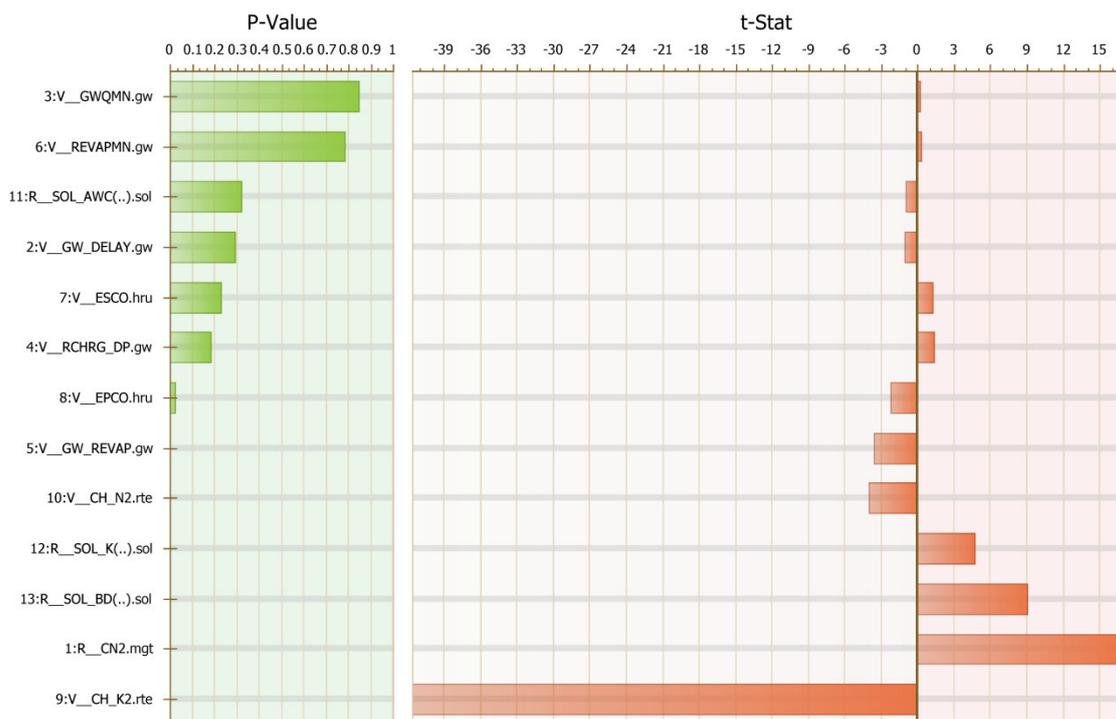


Figura 20. Análisis de sensibilidad Caudales, subcuenca de Apoyo A.

En la Figura 21 se muestra la sensibilidad de parámetros que inciden sobre la producción hídrica en la subcuenca da apoyo “B”, donde se puede notar que las mayores sensibilidades corresponden a SOL_BD, parámetro que modifican la escorrentía superficial; CN2, parámetro que modifican la escorrentía superficial y CH_K2, parámetro que modifica rutina de agua en el canal.

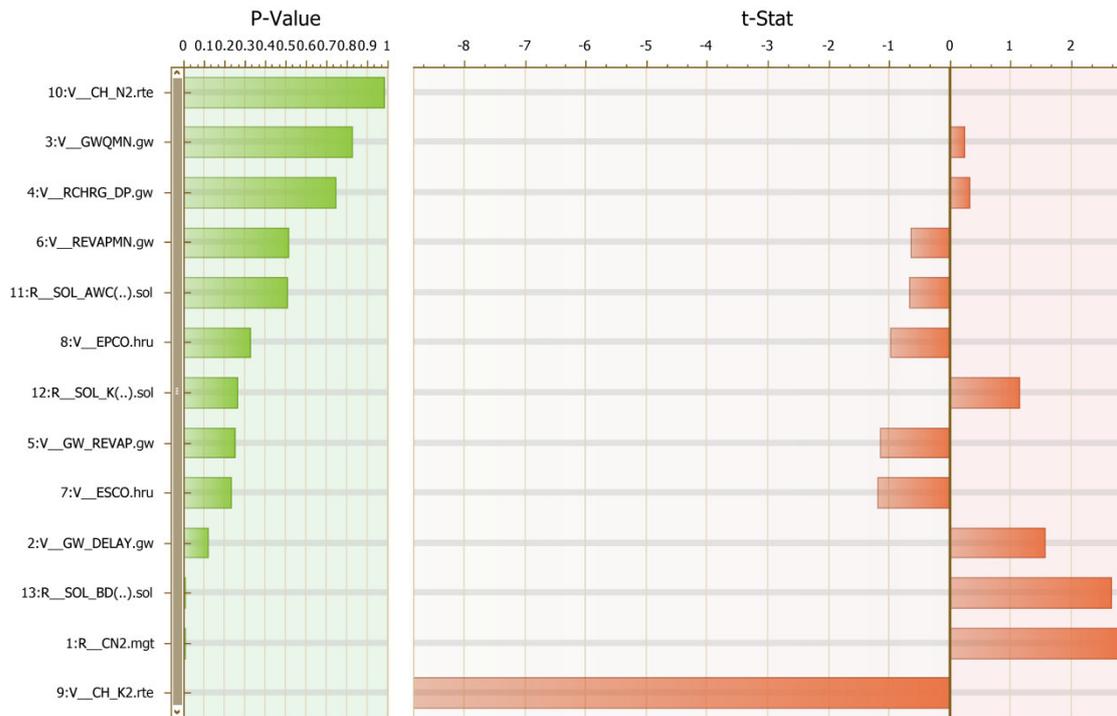


Figura 21. Análisis de sensibilidad Caudales, Subcuenca de apoyo B.

De acuerdo a las gráficas, los resultados del análisis de P-Value para aquellos parámetros con valores más cercanos al cero indica que fueron los más sensitivos, así mismo, t-Stat indicó que los parámetros más sensibles fueron aquellos con mayor valor absoluto.

El análisis de sensibilidad de los parámetros que rigen la producción de sedimentos en la zona de estudio se muestra en la Figura 22 para la subcuenca de apoyo “A” y Figura 23 para la subcuenca de apoyo “B”.

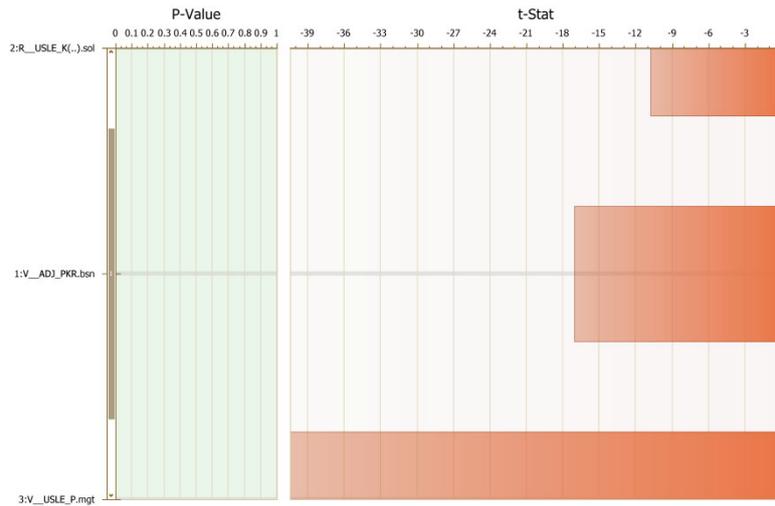


Figura 22. Análisis de sensibilidad Sedimentos, Subcuenca de apoyo A.

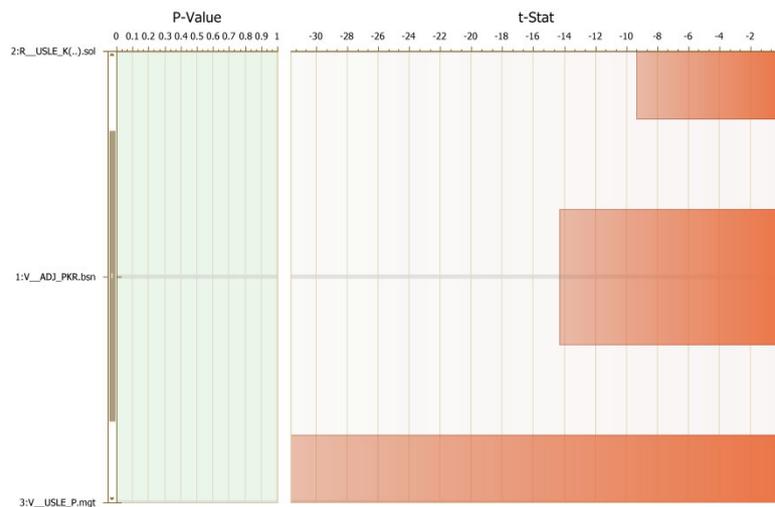


Figura 23. Análisis de sensibilidad Sedimentos, Subcuenca de apoyo B.

Parámetros con p-Value más cercanos a cero y con mayor valor absoluto t-Stat fueron los más sensibles al momento de analizar los sedimentos en la zona estudiada. El factor p-value muestra a los parámetros con un mismo nivel de sensibilidad mientras que t-Stat hizo visible el nivel de importancia.

El nivel de sensibilidad de los parámetros que gobiernan la producción hídrica se muestra a continuación según el grado de importancia en la Tabla 12 para la subcuenca de apoyo “A” y la Tabla 13 para la subcuenca de apoyo “B”.

Tabla 12. Ranking de parámetro según análisis de sensibilidad para caudales.

Parámetros SubCuenca “A”	t-Stat	P-Value	Ranking
v__CH_K2.rte	-41.66	0.00	1
r__CN2.mgt	16.67	0.00	2
r__SOL_BD(..).sol	8.96	0.00	3
r__SOL_K(..).sol	4.70	0.00	4
v__CH_N2.rte	-4.00	0.00	5
v__GW_REVAP.gw	-3.63	0.00	6
v__EPCO.hru	-2.27	0.02	7
v__RCHRG_DP.gw	1.34	0.18	8
v__ESCO.hru	1.20	0.23	9
v__GW_DELAY.gw	-1.06	0.29	10
r__SOL_AWC(..).sol	-1.00	0.32	11
v__REVAPMN.gw	0.27	0.78	12
v__GWQMN.gw	0.20	0.85	13

Tabla 13. Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad para caudales.

Parámetros SubCuenca “B”	t-Stat	P-Value	Ranking
v__CH_K2.rte	-8.84	0.00	1
r__CN2.mgt	2.82	0.01	2
r__SOL_BD(..).sol	2.65	0.01	3
v__GW_DELAY.gw	1.57	0.12	4
v__ESCO.hru	-1.20	0.23	5
v__GW_REVAP.gw	-1.15	0.25	6
r__SOL_K(..).sol	1.13	0.26	7
v__EPCO.hru	-0.99	0.32	8
r__SOL_AWC(..).sol	-0.67	0.50	9
v__REVAPMN.gw	-0.66	0.51	10
v__RCHRG_DP.gw	0.33	0.74	11
v__GWQMN.gw	0.22	0.82	12
v__CH_N2.rte	-0.02	0.98	13

El nivel de sensibilidad de los parámetros que gobiernan la producción de sedimentos se muestra a continuación según el grado de importancia en la Tabla 14 para las subcuencas de apoyo “A” y “B”

Tabla 14. Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad, para sedimentos.

Parámetros Subcuencas “A” y “B”	t-Stat	P-Value	Ranking
v_USLE_P.mgt	-40.47 a -31.65	0.00	1
v_ADJ_PKR.bsn	-17.07 a -14.29	0.00	2
r_USLE_K(..).sol	-10.76 a -9.33	0.00	3

Respecto a la variable caudal y sedimentos, los parámetros más sensitivos fueron: Curva número (CN2) y el factor practica de soporte (USLE_P) respectivamente, pero debemos considerar que no son los únicos involucrados en el proceso de producción hídrica y sedimentaria en la zona de estudio.

4.2.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En el proceso de calibración y validación se trabajó con las subcuencas de apoyo A y B, para ello es imprescindible; en primer lugar, calibrar y validar los caudales para a continuación proceder con la calibración y validación de sedimentos.

Para calibrar el modelo se emplearon 16 parámetros, 13 para calibrar los caudales líquidos y 3 para la calibración de caudales solidos o sedimentos en suspensión. Las calibraciones de ambas variables se realizaron a paso mensual para un periodo comprendido de seis años (01/01/2006 al 31/12/2011) mientras que la validación se realizó con los cuatro años siguientes, es decir, durante el periodo (01/01/2012 al 31/12/2015).

En la Tabla 15 y Tabla 16 se muestra en detalle el parámetro, la descripción correspondiente y su respectivo valor ajustado. Esto para las subcuencas de apoyo “A” y “B” respectivamente.

Tabla 15. Parámetros dentro de la Subcuenca A, utilizados en la calibración del caudal

PARAMETRO SubCuenca A	DEFINICION Y UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR AJUSTADO
r__CN2	Numero de curva inicial para la condición de humedad II (s/u)	74 - 92	68.64 - 85.34
v__GW_DELAY	Tiempo de retardo del flujo subterráneo (días)	31.000	133.080
v__GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm)	1000.000	296.800
v__RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo (fracción)	0.050	0.170
v__GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días)	0.020	0.177
v__REVAPMN	Profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que ocurra percolación en el acuífero inferior (mm)	750.000	633.000
v__ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo (s/u)	0.950	0.832
v__EPCO	Factor de compensación para la cantidad de agua catada por las plantas (s/u)	1.000	0.859
v__CH_K2	Conductividad hidráulica del canal principal (mm/hr)	0.014	19.638
v__CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning para el canal (s/u)	0.000	0.263
r__SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (mm/mm)	0.104 - 0.160	0.11 - 0.17
r__SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	2.82 - 16.31	4.91 - 28.44
r__SOL_BD	Densidad aparente del suelo (gr/cm ³)	1.5 - 1.7	1.95 - 2.21

La Curva Numero (CN) es uno de los parámetros más influyentes en la subcuenca de apoyo "A". Se calculó mediante el método desarrollado por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS). En nuestro resultado notamos como su valor calibrado se reduce. Ello implica una mayor infiltración así como una reducción de picos respecto a los caudales obtenido de la simulación por defecto.

Tabla 16. Parámetros dentro de la Subcuenca B, utilizados en la calibración del caudal

PARAMETRO SubCuenca B	DEFINICION Y UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR AJUSTADO
r_CN2	Numero de curva inicial para la condición de humedad II (s/u)	74 - 92	72.98 - 86.953
v_GW_DELAY	Tiempo de retardo del flujo subterráneo (días)	31.000	44.100
v_GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm)	1000.000	766.000
v_RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo (fracción)	0.050	0.279
v_GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días)	0.020	0.192
v_REVAPMN	Profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que ocurra percolación en el acuífero inferior (mm)	750.000	652.500
v_ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo (s/u)	0.950	0.564
v_EPCO	Factor de compensación para la cantidad de agua catada por las plantas (s/u)	1.000	0.789
v_CH_K2	Conductividad hidráulica del canal principal (mm/hr)	0.014	12.034
v_CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning para el canal (s/u)	0.000	0.090
r_SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (mm/mm)	0.104 - 0.160	0.120 - 0.134
r_SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	2.82 - 16.31	11.02 - 23.42
r_SOL_BD	Densidad aparente del suelo (gr/cm ³)	1.5 - 1.7	0.91 - 0.97

En la subcuenca de Apoyo “B” el parámetro Densidad Aparente (SOL_BD) es uno de los parámetros más sensibles vemos que sus valores calibrados se han reducido, ello indica una disminución en la capacidad para retener humedad en suelo respecto al modelo corrido sin previa calibración.

Se ingresan los nuevos valores de los parámetros que fueron más representativos en el modelo para que sean procesados de manera definitiva por SWAT, Se establece el año

2005 como periodo de calentamiento. Por ello las predicciones del modelo SWAT corresponden al periodo 2006 – 2015.

Los resultados a modo de comparación estadística entre la información observada y simulada de caudales para la zona de estudio definitiva en la estación Condorcero se muestra a continuación en la Tabla 17 y la Tabla 18.

Tabla 17. Parámetros de eficiencia del Modelo a paso mensual de caudales

Caudales Paso Mensual CONDORCERRO			
Parámetro de Eficiencia		Calibración	Validación
Coficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe	NS	0.89	0.86
Porcentaje BIAS	PBIAS	8.26	-0.35
Relación de RMSE y la desviación estandar	RSR	0.34	0.37
Coficiente de determinación de Pearson	R ²	0.92	0.87

Tabla 18. Parámetros de eficiencia del modelo a paso diario de caudales

Caudales Paso Diario CONDORCERRO			
Parámetro de Eficiencia		Calibración	Validación
Coficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe	NS	0.64	0.62
Porcentaje BIAS	PBIAS	-7.91	0.88
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.6	0.61
Coficiente de determinación de Pearson	R ²	0.75	0.71

En las Figuras 24 y 26 se muestran las correlaciones en la estación condorcero de los caudales observados y simulados a nivel mensual y diario respectivamente. Donde las correlaciones alcanzadas a nivel mensual son mayores a 0.8 y a nivel diario mayor a 0.7.

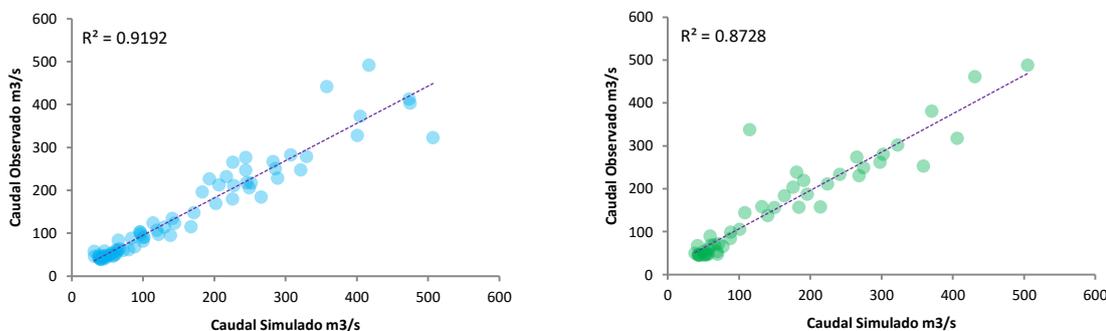


Figura 24. Correlación mensual de los caudales observados y simulados

Los resultados a modo de comparación gráfica de las series históricas de caudales simulados e históricos obtenidos en la estación Condorcero se muestra en la Figura 25 a nivel mensual y a nivel diario en la Figura 27.

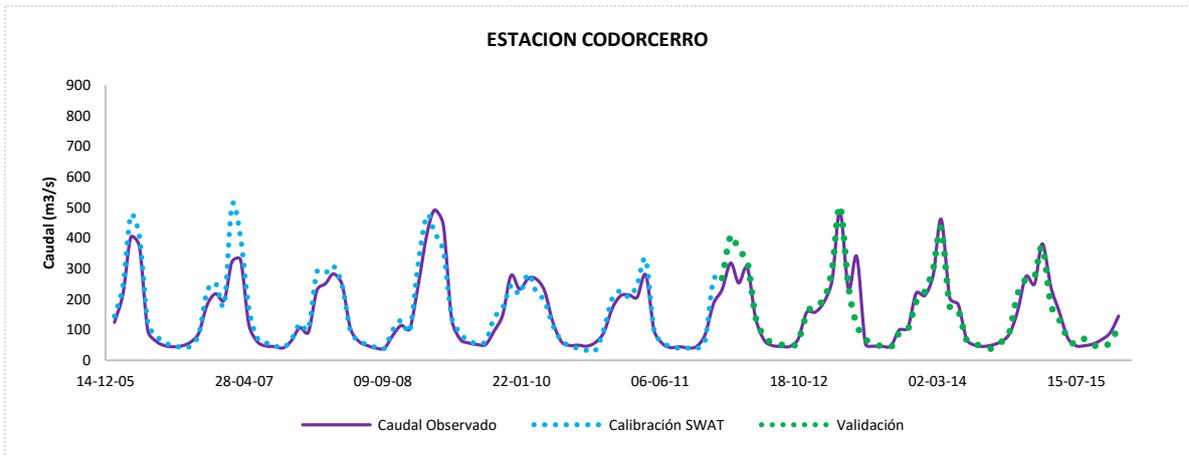


Figura 25. Evolución de caudales observados y simulados a paso mensual

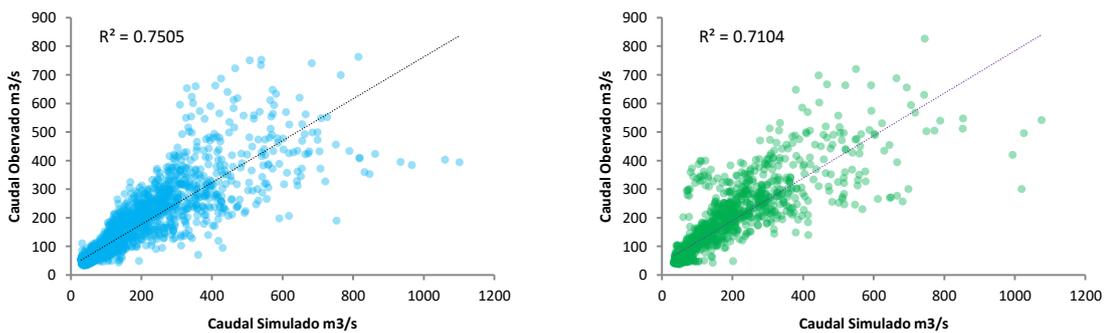


Figura 26. Correlación diaria de los caudales observados y simulados

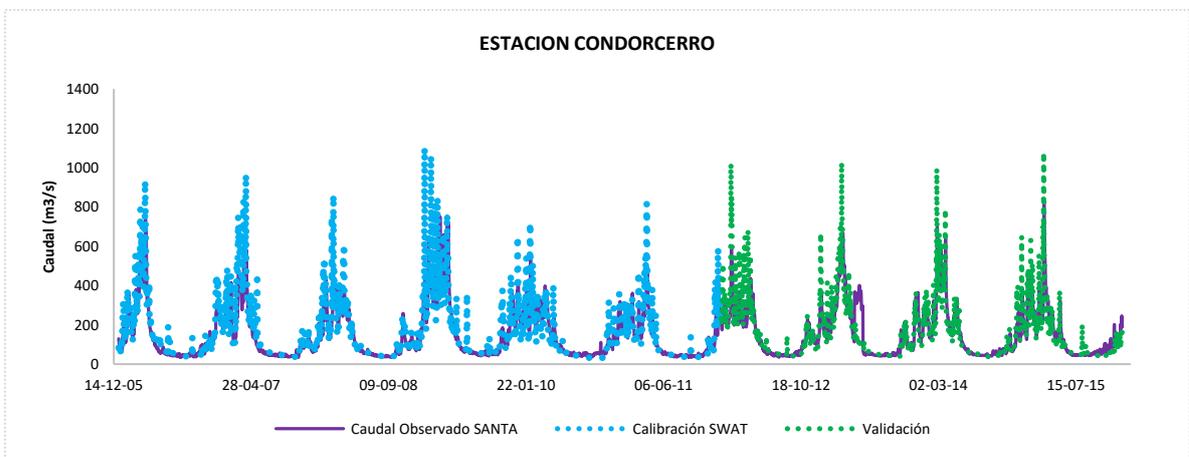


Figura 27. Evolución de los caudales observados y simulados a paso diario

Luego de calibrar los caudales se ingresan los nuevos valores de parámetros de sedimentos más sensibles al modelo, para calibrar sedimentos también utilizamos las subcuencas de apoyo A y B. Las tablas de abajo muestran los nuevos valores para los parámetros seleccionados.

En la Tabla 19 y Tabla 20 se muestra en detalle los parámetros de sedimentos, la descripción correspondiente y su respectivo valor ajustado. Esto para las subcuencas de apoyo “A” y “B” respectivamente.

Tabla 19. Parámetros dentro de la Subcuenca A, utilizados en la calibración de sedimentos

PARAMETRO SubCuenca A	DEFINICION Y UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR AJUSTADO
v__ADJ_PKR	Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en la subcuenca.	1.000	1.918
r__USLE_K	Factor de erosibilidad del suelo	0.275 - 0.284	0.282 - 0.291
v__USLE_P	Predice la erosión en función de la energía de la precipitación	1.000	0.017

Tabla 20. Parámetros dentro de la Subcuenca B, utilizados en la calibración de sedimentos

PARAMETRO SubCuenca B	DEFINICION Y UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR AJUSTADO
v__ADJ_PKR	Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en la subcuenca.	1.000	1.906
r__USLE_K	Factor de erosibilidad del suelo	0.275 - 0.284	0.264 - 0.272
v__USLE_P	Predice la erosión en función de la energía de la precipitación	1.000	0.035

Los resultados a modo de comparación estadística entre la información observada y simulada de sedimentos para la zona de estudio definitiva en la estación Condorcero se muestra a continuación en la tabla 21.

Tabla 21. Parámetros de eficiencia del modelo a paso mensual de sedimentos

Parámetro de Eficiencia CONDORCERRO		Calibración	Validación
Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe	NS	0.64	0.69
Porcentaje BIAS	PBIAS	-7.42	53.59
Relación de RMSE y la desviación estándar	RSR	0.6	0.56
Coefficiente de determinación de Pearson	R ²	0.66	0.82

Los resultados a modo de comparación gráfica de las series históricas de sedimentos simulados e históricos obtenidos en la estación Condorcero se muestra a continuación en la Figura 28. Mientras que la correlación de los sedimentos observados y simulados durante los periodos de calibración y validación se muestran en la Figura 29.

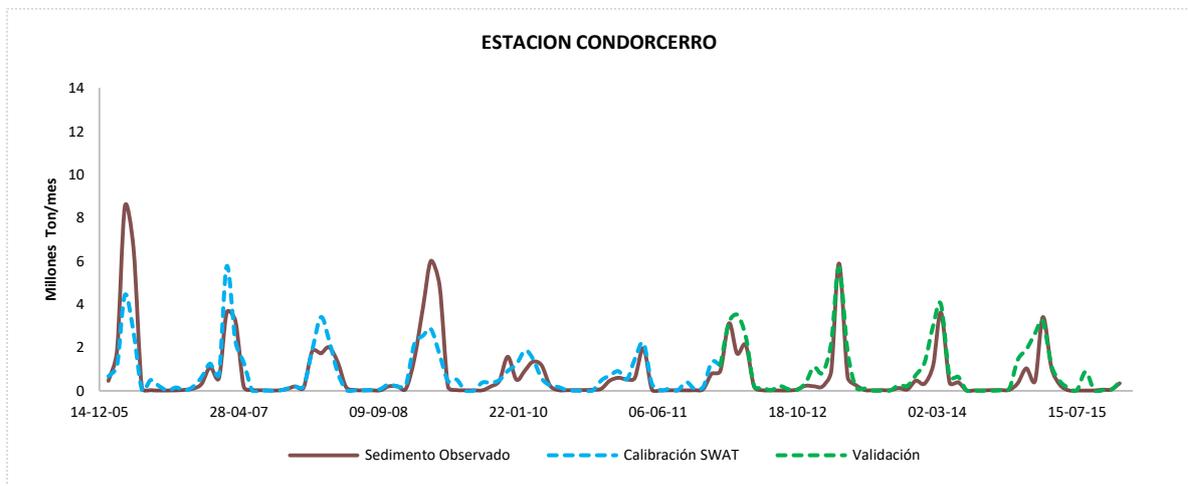


Figura 28. Evolución de sedimentos observados y simulados a paso mensual

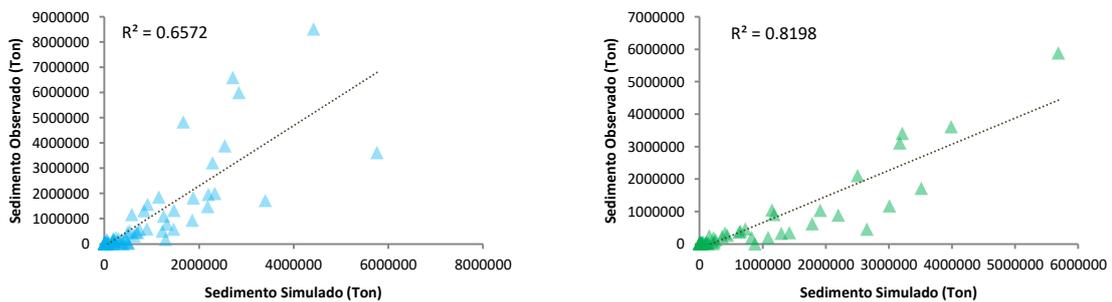


Figura 29. Producción de sedimentos observados y simulados a nivel mensual

Los resultados obtenidos en la calibración de caudales y sedimentos para la estación de aforo Condorcero muestran un muy buen desempeño del modelo desarrollado, prueba de ello son los valores de los parámetro de eficiencia obtenidos que se encuentran dentro de los estándares de desempeño considerado por moriasi et al (2007).

4.3 REDUCCION DE ESCALA Y PROYECCION DE DATOS CLIMATICOS

Para la información de precipitaciones futuras; con la finalidad de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca de estudio a mediano plazo (periodo 2050 - 2059), se seleccionó un escenario intermedio con trayectoria de concentración representativa 4.5 (rcp 4.5). Se consideró además 11 modelos de circulación general que forman parte del protocolo experimental CMIP5, los cuales fueron previamente sometidos a una reducción de escala de tipo estadística y corrección del sesgo por el método del Mapeo de cuantiles, considerando para ello el periodo de referencia 2005 – 2015. Estos procesos fueron trabajados por el Programa de investigación sobre el cambio climático perteneciente al CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research) y que finalmente se utilizaron en el presente trabajo.

Para validar los modelos se usaron los indicadores de Nash, Bias, RSR y Correlación de Pearson. Los resultados de la validación, nos muestra que los modelos CSIRO_Mk3.6.0, MIROC5 y CCSM4 son los que presentaron dificultades para representar la estacionalidad de la lluvia en la zona de estudio presentado valores de eficiencia NASH de 0.34, 0.34 y 0.43 respectivamente. Los ocho modelos restantes si muestran una capacidad aceptable al momento de representar la estacionalidad de las precipitaciones siendo los modelos de más destacados BBC_CSM1, BCC_CSM1_1m y el IPSL-CM5A-MR con valores de eficiencia de NASH ≥ 0.6 y valores de correlación de Pearson ≥ 0.7 . Todos los resultados correspondientes a cada MCG se muestran a continuación en la tabla 22.

Tabla 22. Modelos de circulación general de mayor a menor ajuste

PAIS	MODELO	NASH	R
CHINA	bcc_csm1_1	0.65	0.78
FRANCIA	ipsl_cm5a_mr	0.60	0.76
CHINA	bcc_csm1_1_m	0.60	0.75
REINO UNIDO	mohc_hadgem2_es	0.58	0.76
REINO UNIDO	mohc_hadgem2_cc	0.57	0.74
JAPON	mri_cgcm3	0.56	0.74
NORUEGA	ncc_noresm1_m	0.55	0.73
ALEMANIA	mpi_esm_mr	0.53	0.71
ESTADOS UNIDOS	ncar_ccsm4	0.425	0.670
AUSTRALIA	csiro_mk3_6_0	0.339	0.657
JAPON	miroc_miroc5	0.340	0.647

Las precipitaciones observadas y precipitaciones de referencia producto de la reducción de escala de los modelos se muestran a continuación en la Figura 30 para cada estación

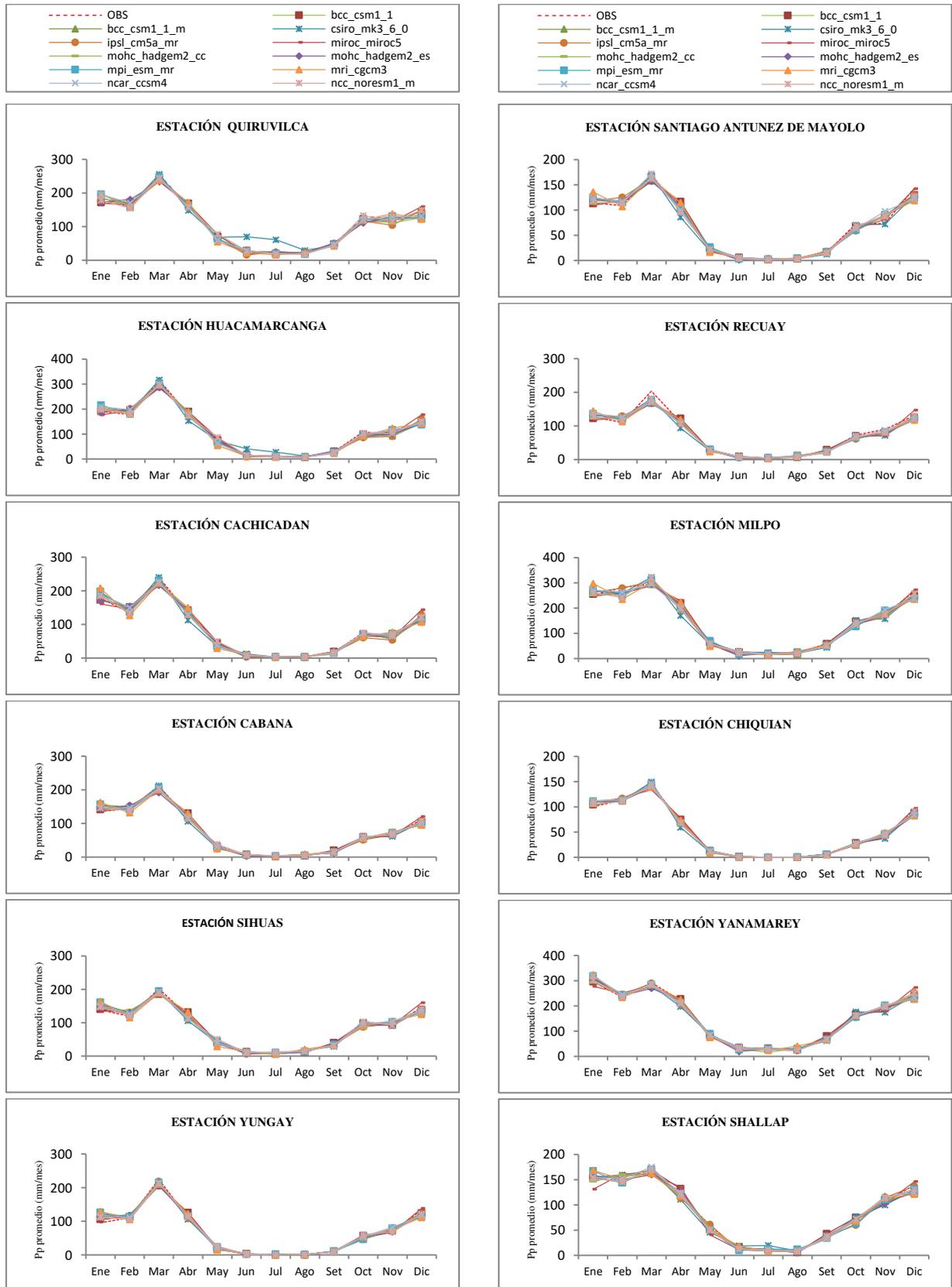


Figura 30. Serie de precipitaciones de referencia generada por los modelos

En la Figura 31 se muestra el mapa de precipitaciones anual promedio del periodo (2005 – 2015) y la variación porcentual al periodo proyectado futuro (2050 - 2059). Las lluvias más importantes se localizan en la cabecera de cuenca en la zona norte del área de estudio y al sur-este en la cordillera blanca. Al periodo proyectado, el promedio de los modelos, señala incrementos en las precipitaciones anuales que van desde el 1.6% al 16.78%, donde la zona nor-oeste en la cordillera negra se esperan los mayores incrementos respecto a las demás áreas de la cuenca.

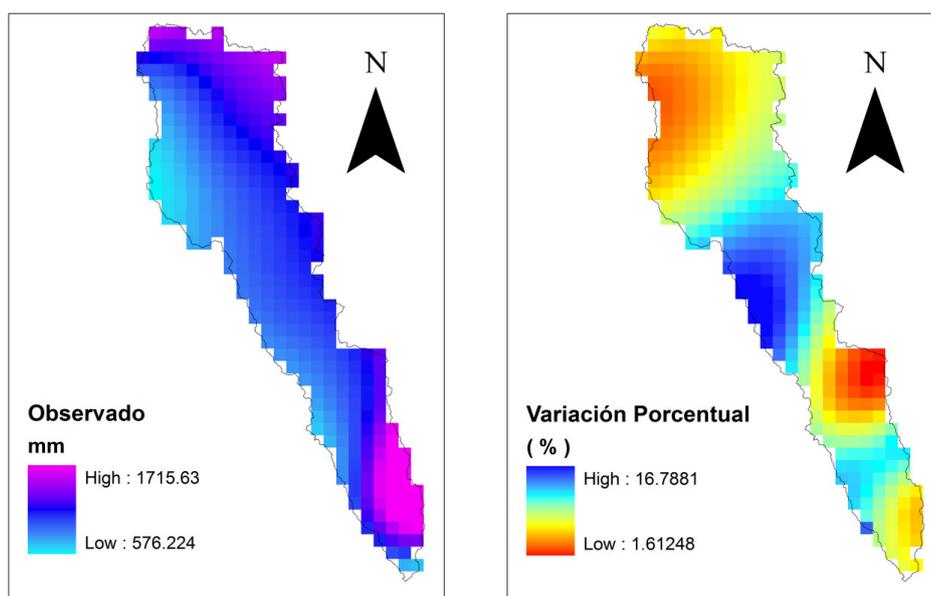


Figura 31. Precipitación anual observada y variación porcentual al periodo (2050 - 2059)

En la Figura 32 se aprecia que en las estaciones ubicadas por encima de los 3500 m.s.n.m. presentan periodos húmedos positivos. En las estaciones Quiruvilca, Huacamarcanga, Milpo y Yanamarey con excepción del mes de Octubre se proyectan precipitaciones mayores en los meses de Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril.

En la zona norte del área de estudio total, se observa que durante la época húmeda (Octubre – Abril) las cuatro estaciones; Quiruvilca, Huacamarcanga, Cachicadan y Cabana presentan incrementos en la precipitación pero con excepción del mes de Octubre donde estas cuatro estaciones experimentarían reducción en las lluvias. En la zona sur de la cuenca la estación Yungay es la única que señala aumentos de precipitación en todos los meses promediados.

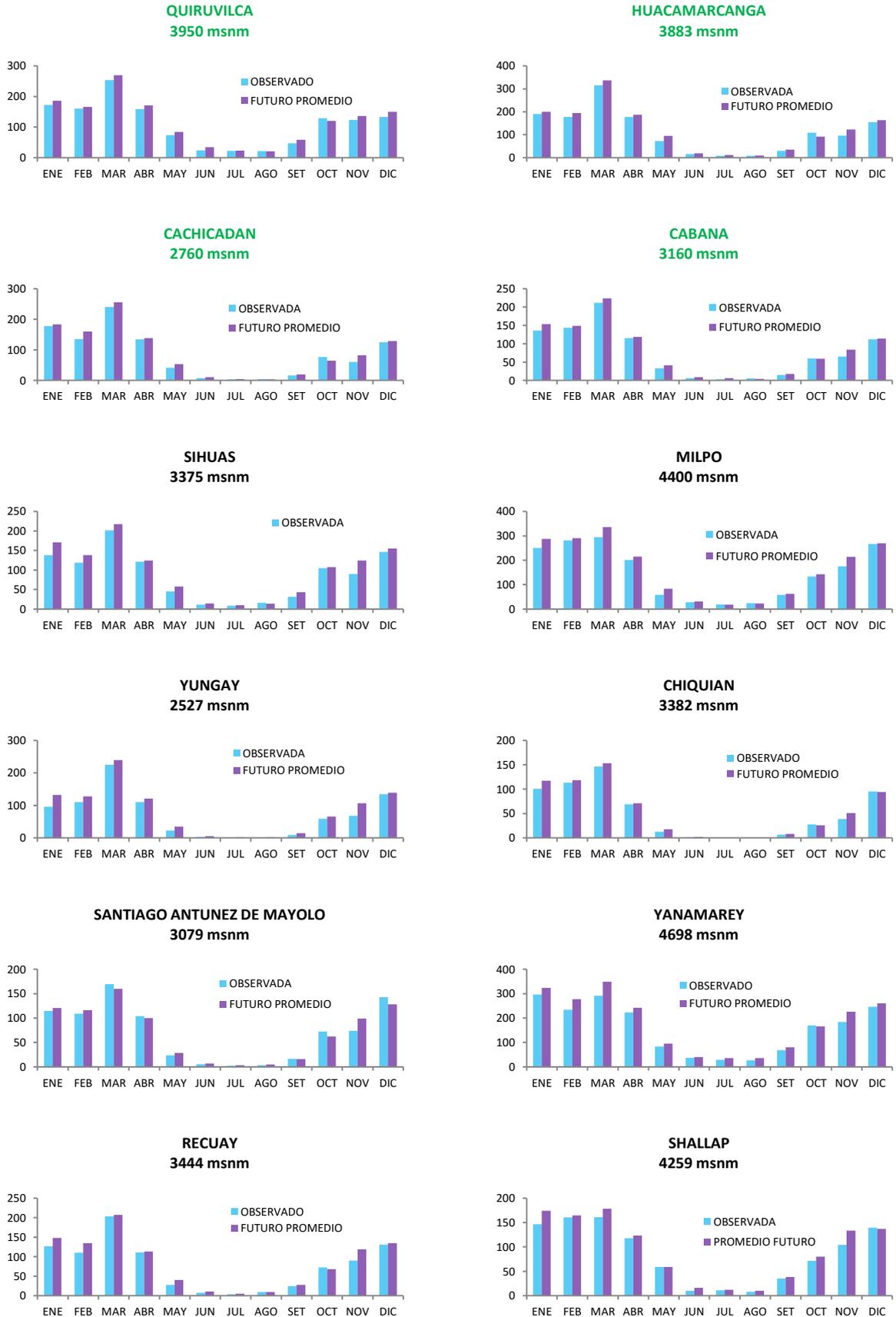


Figura 32. Precipitación mensual observada y proyectada (2050 - 2059) de las estaciones.

4.4 COMPARACION DE LA PRODUCCION HIDRICA Y SEDIMENTARIA ACTUAL CON LAS PROYECCIONES FUTURAS.

4.4.1 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL DIARIO

Se analizó la curva de duración de caudales diarios en el punto de control definido en la estación Condorcero. Para esta estación se proyectaron los caudales diarios en condiciones de escenario climático rcp 4.5 para el periodo 2050 – 2059 considerando para ello los modelos con mejor capacidad de simular la escorrentía.

En la Figura 33 se observan los siguientes resultados descritos a continuación. El caudal observado y los proyectados presentan un buen ajuste para probabilidades de excedencia entre el 85% y 92% con una diferencia máxima de 3.22 m³/s con respecto al modelo Hadgem2-es y una diferencia mínima de 0.12 m³/s con el modelo Hadgem2-cc.

Las descargas proyectadas por el modelo Hadgem2-cc superan visiblemente al resto de modelos para la probabilidad de excedencia comprendida entre 13% y 65%, es así que con respecto a la curva de duración de los datos observados el Hadgem2-cc presenta un caudal mayor, en promedio de 41.2 m³/s.

En el rango de las menores probabilidades de excedencia, es decir, del 0% y 13%, la curva de permanencia de caudales del modelo MRI-cgcm3 supera y empieza a incrementarse notoriamente respecto al resto de modelos proyectados.

Las descargas igualadas o excedidas el 13% del tiempo para el modelo de proyección más intensa vale decir el MRI cgcm3 equivale a 395.9 m³/s. Mientras que a esa misma probabilidad de excedencia el menor valor es 302.2 m³/s perteneciente al modelo Noresm1-m. Siendo los incrementos 98.38 m³/s y 4.68 m³/s respectivamente.

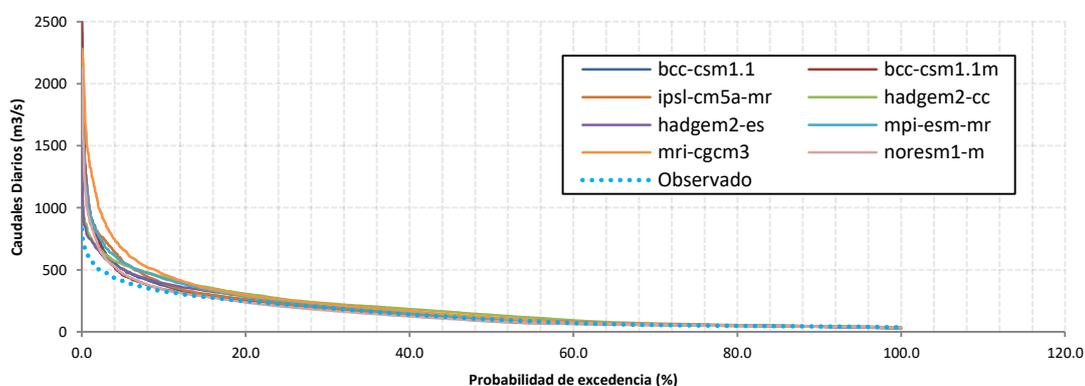


Figura 33. Curva de duración de caudales diarios proyectados y observado

De la Figura 34 podemos mencionar que la curva de duración de caudales del periodo observado supera a los valores más bajos de los modelos para probabilidades de excedencia comprendidas entre 15.05% y 100%, mientras que los caudales mínimos proyectados por los modelos superan a los caudales observados para probabilidades de excedencia por debajo del 15.05%, cabe mencionar que el caudal que ocurriría o sería superado el 15.05% equivale a 281.46 m³/s.

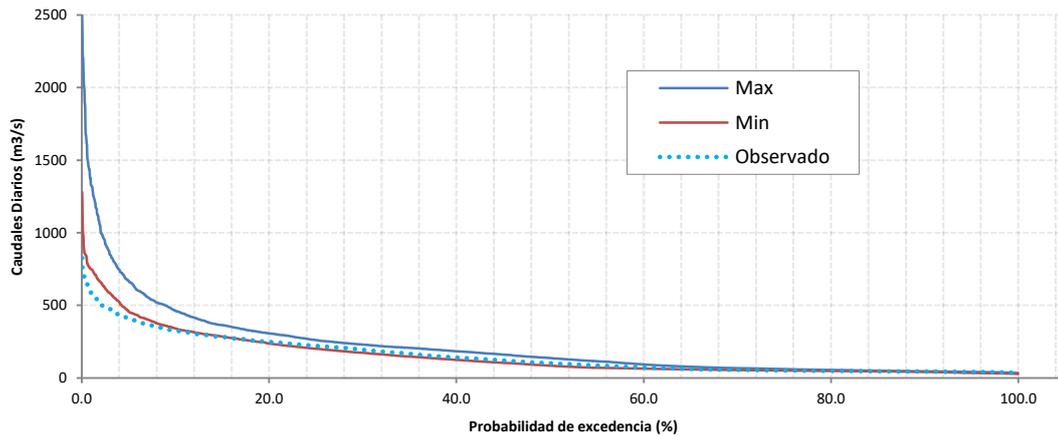


Figura 34. Rango de variación de caudales diarios

El diagrama de cajas en la Figura 35 muestra los caudales diarios, en donde podemos apreciar que el mayor caudal es proyectado por el modelo BCC-CSM1-1m mientras que el caudal diario más bajo lo proyecta el modelo Hadgem2-cc, además el modelo que proyecta mayor cantidad de caudales altos es el modelo MRI-cgcm3.

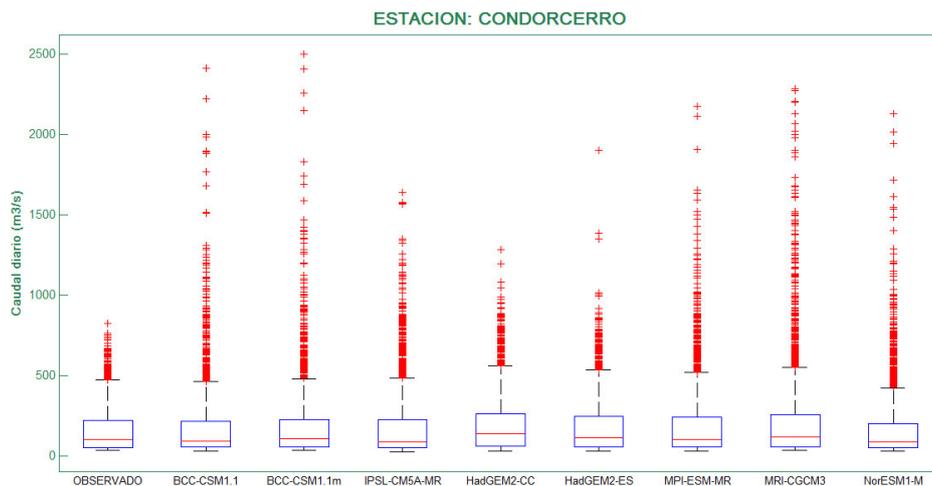


Figura 35. Diagrama de caja de los caudales diarios proyectados

4.4.2 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL MENSUAL

a. Impactos en la producción hídrica

A continuación se muestra en la Figura 36 los caudales promedios por cada mes del año donde se aprecia que en época de lluvia, de acuerdo a los caudales observados en punto de control durante (2006 - 2015), las descargas más intensas se presentan en el mes de marzo. En tanto que durante los meses anteriores y posteriores se produce respectivamente los incrementos y reducciones progresivas del caudal. De acuerdo a los caudales proyectados durante el periodo (2050 - 2059), el mes de enero incrementaría significativamente el caudal, llegando a alcanzar niveles muy similares al mes de febrero; mientras que el mes de marzo mantendría su liderazgo en la producción hídrica de la cuenca estudiada.

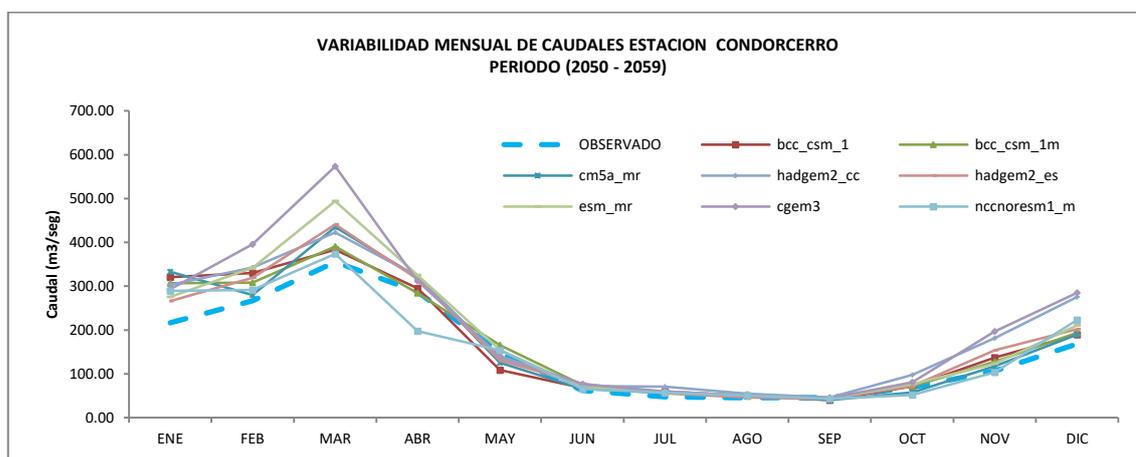


Figura 36. Caudales promedio mensual proyectados periodo (2050 - 2059)

De acuerdo a la Figura 36 notamos las variaciones que experimentarían las descargas para cada mes de año en condiciones del escenario climático rcp 4.5 proyectado por cada modelo. Según esto, vemos que durante la época húmeda (Octubre - Abril) la mayor variación correspondería al mes de noviembre con el + 84%, según el modelo MRI-cgcm3 y la menor variación dentro de este mismo periodo lo tiene el mes de Abril con el -31%, según el modelo noresm1_m. Considerando ahora el periodo seco (Mayo - Setiembre) la mayor variación ocurriría en Julio siendo esta el +48% según el modelo Hadgem2_cc y la variación menor se produciría en Mayo con el -27% de acuerdo al modelo bcc_csm1_1.

La Figura 36 también muestra una menor variabilidad proyectada por los modelos respecto a la variación relativa de caudales en el periodo seco, específicamente en los

meses Junio, Agosto y Setiembre; ello indicaría una mayor fiabilidad de la proyección durante estos meses.

La curva de variación relativa promedio mostrada en la Figura 37 indica que durante la periodo húmedo (Octubre - Abril) se esperan incrementos en todos los meses correspondientes, solo que Noviembre y Enero serían los meses con mayores incrementos de descarga siendo estos +34% y +38% respectivamente, en tanto que para el periodo seco (Mayo – Setiembre) ocurriría un descenso en los meses de Mayo y Setiembre pero incrementos en Junio, Julio y Agosto siendo en Mayo la mayor caída equivalente al -6% y Julio el de mayor ascenso con el +25%.

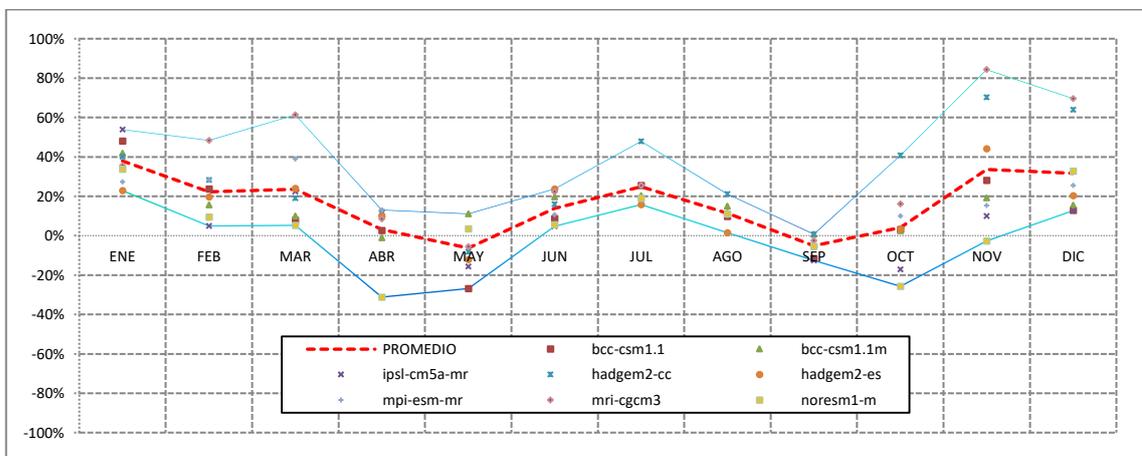


Figura 37. Variación relativa de caudales medios mensuales proyectados respecto del observado

En la Figura 38 nos permite observar como el caudal promedio Futuro mensual, Promedio de los ocho modelos proyectados, presenta picos ligeramente más homogéneos durante todo el decenio analizado (2050 - 2059) en comparación del periodo actual observado; estos picos seguirán siendo registrados durante los meses de Marzo. A lo largo de todo el periodo del 2050 los caudales picos mensuales superarían los 350 m³/s, se esperaría además que en el año 2052 se presente el mayor caudal de la década proyectada, con una descarga promedio de 547.83 m³/s.

Aunque el caudal promedio de los modelos proyectados no muestra que los caudales picos de estos, en su mayoría, sobrepasen con mayor frecuencia a los máximos observados en la actualidad, si vemos una ligera tendencia a que sean más sostenidos superando los 350 m³/s durante todo el decenio futuro.

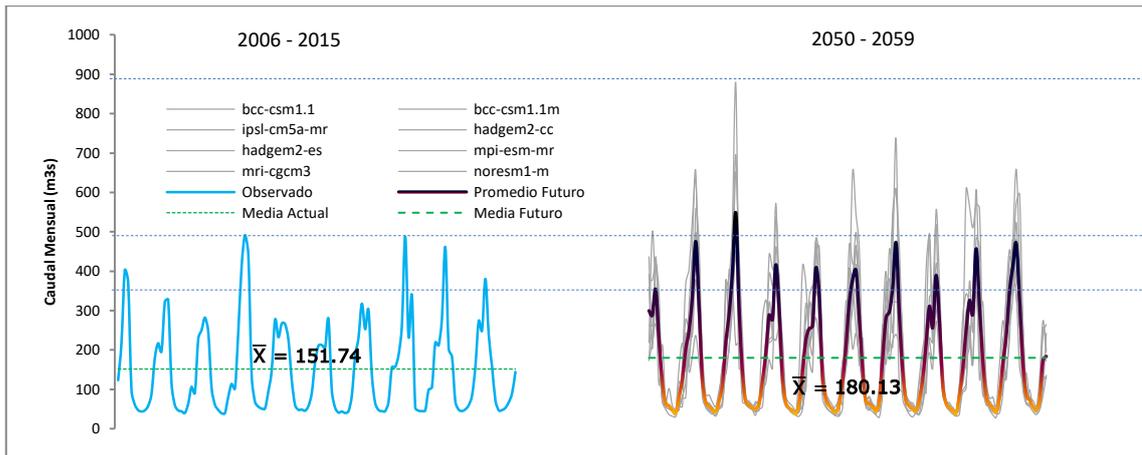


Figura 38. Evolución de caudales proyectados a paso mensual

De la Figura 39 se aprecia una proyección mayor en la media de caudales mensuales futuros así como una clara concordancia entre los modelos usados a superar el caudal máximo observado (491.74 m³/s). El modelo que pronostica el un mayor caudal para la década del 2050; es el MRI-cgcm3 con una descarga de 876.7 m³/s mientras que el modelos NorESM1-M, el más conservador, pronostica un caudal de 510.6 m³/s.

Es importante mencionar que los modelos de circulación general no consideran eventos ENSO o ENOS por lo que de ocurrir uno de estos eventos en el periodo (2050 - 2059) podría esperarse descargas mayores o menores según corresponda respecto lo proyectado por los modelos.

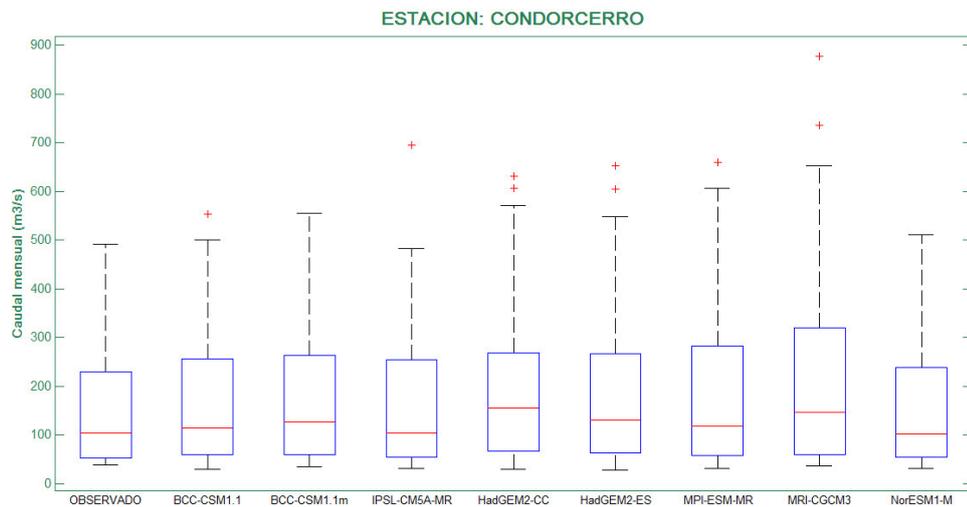


Figura 39. Diagrama de cajas de caudales mensuales proyectados

b. Impactos en la oferta hídrica

A continuación se muestra en la Figura 40 las curvas de probabilidad de ocurrencia de las descargas observadas y proyectadas para tres categorías de persistencia. Con respecto a la persistencia al 50%, todos los modelos coinciden en incrementos mínimos para los meses de Junio, Julio y Agosto, vale decir en periodo seco e incrementos mayores en periodo húmedo para los meses de Enero y Marzo. La persistencia al 75% muestra que todos los modelos concuerdan en un incremento mínimo para el mes de Julio e incrementos significativos para el mes de Marzo. La disponibilidad hídrica al 90% muestra similitud en los modelos para proyectar incrementos considerables para los meses de Enero y Marzo; en tanto que para los meses de Abril y Setiembre indican un descenso de las descargas.

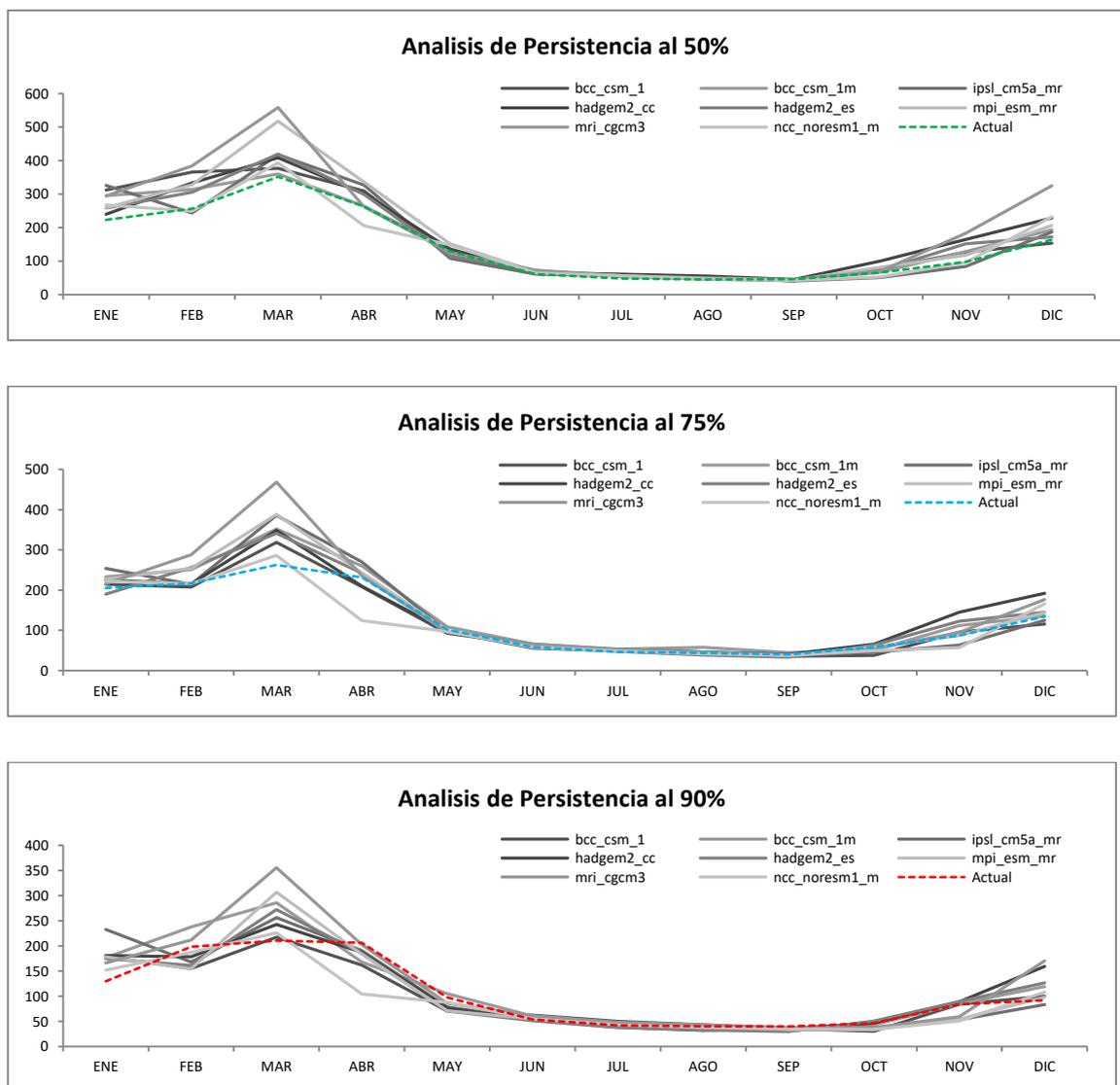


Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de las disponibilidades hídricas al 50%, 75% y 90%

4.4.3 ANÁLISIS DE SEDIMENTOS A NIVEL MENSUAL

Con respecto al ciclo de los sedimentos en la zona de estudio para el escenario climático rcp 4.5, la Figura 41 muestra que las proyecciones indican que durante el periodo húmedo se presentaría una tendencia a incrementar los sedimentos en suspensión en el río durante los meses Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero, pero la mayoría de modelos advierten menores valores de carga sedimentaria para los meses de Marzo y Abril.

Lo que ocurre durante los meses de Marzo es una presencia excesiva de sedimentos observados como consecuencia de eventos ENSO de intensidad débil y moderada para los años 2006 y 2009 respectivamente, esto según registros del SENAMHI durante el siglo XXI.

Cabe recordar que los modelos de circulación general no consideran eventos ENOS es por ello la subestimación casi unánime por parte de las proyecciones obtenidas de los modelos para los meses de Marzo y Abril. En la Figura 42 se muestra el ciclo de los sedimentos proyectados comparados con la información observada sin considerar los eventos ENOS 2006 y 2009.

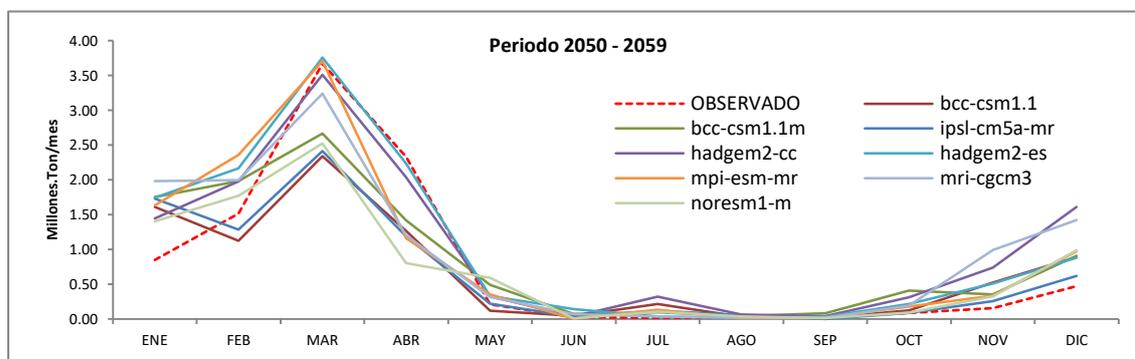


Figura 41. Sedimentos mensuales proyectados considerando evento ENOS en data observada

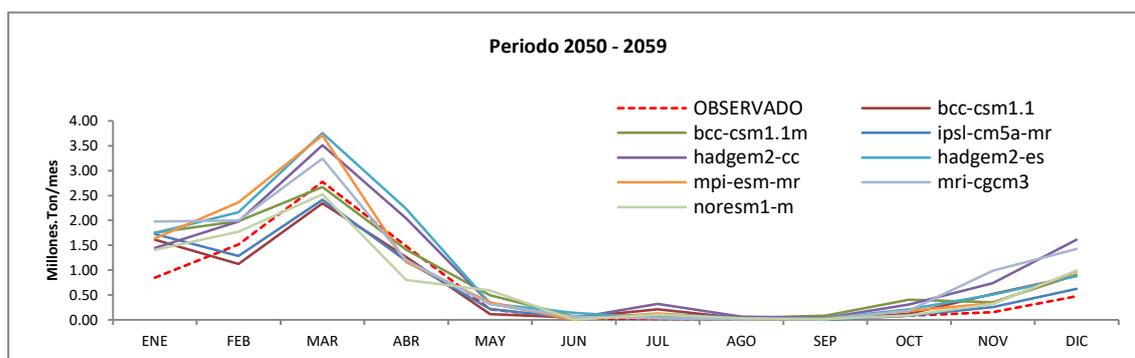


Figura 42. Sedimentos mensuales proyectados excluyendo evento ENOS en data observada

4.4.4 ANÁLISIS DE CAUDALES A NIVEL ANUAL

En la Figura 43 se puede apreciar una tendencia al incremento de caudales a lo largo de la década proyectada, en el periodo 2050 el promedio de los caudales proyectados no supera los 206.38 m³/s del cuarto año observado pero sí pronostica años bajo con mayor producción hídrica respecto a los años observados en el punto de control.

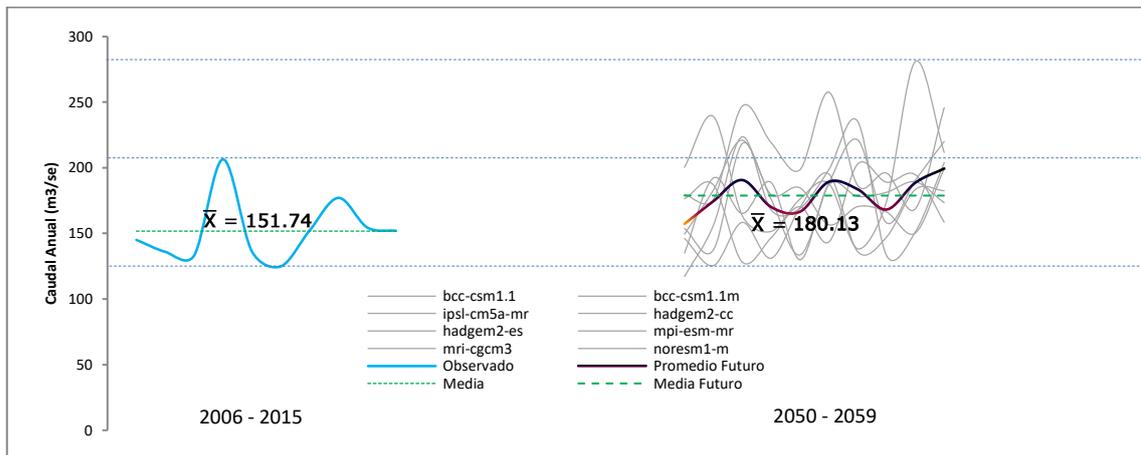


Figura 43. Evolución de caudales proyectados a paso anual

La Figura 44 construida en base a los caudales medios anuales observamos la tendencia a pronosticar caudales futuros mayores a los observados, de los modelos que señalan años de mayor producción hídrica respecto al punto de control actual se extrae una descarga de anual media de 280.9 m³/s, según Hadgem2-cc; mientras que el más conservador, ipsl-cm5a-mr indica un caudal medio anual de 218.4 m³/s.

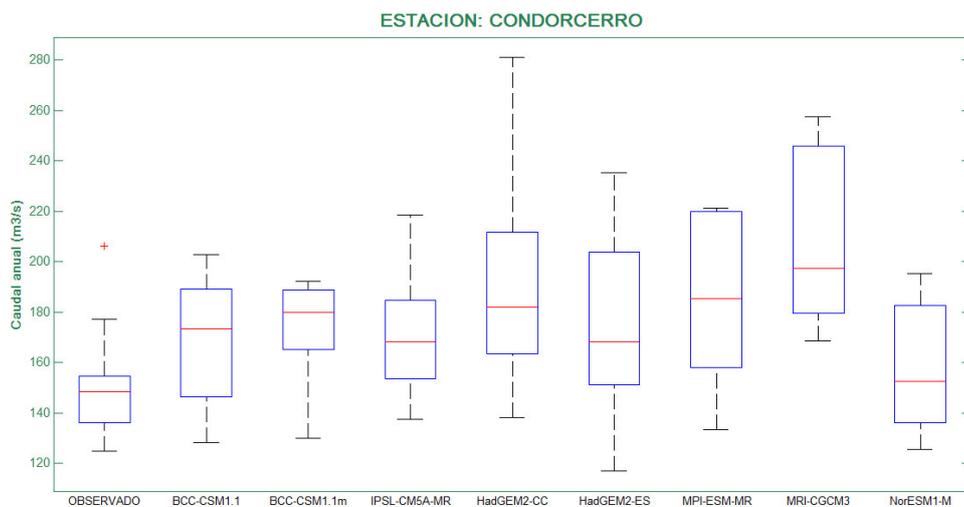


Figura 44. Diagrama de caja de caudales anuales proyectados

4.4.5 ANÁLISIS DE SEDIMENTOS A NIVEL ANUAL

Los resultados de este análisis muestran en la Figura 45 la tendencia de los modelos a incrementar la producción de sedimentos anuales con respecto a los históricos observados, se esperaría a lo largo de todo el decenio bajo condiciones del escenario rcp 4.5 una carga sedimentaria en el rio de 17.32 Millones de toneladas para el 2055.

Es importante recordar que en el año 2006 y 2009 la cueca experimentó evento ENOS, razón por la cual en la gráfica se ve con claridad que lo observado supera a lo pronosticado en dos años, puesto que los MCG no consideran este tipo de eventos extremos; es por ello que de ocurrir el fenómeno el niño durante el periodo 2050, deberíamos esperar valores superiores a los pronosticados.

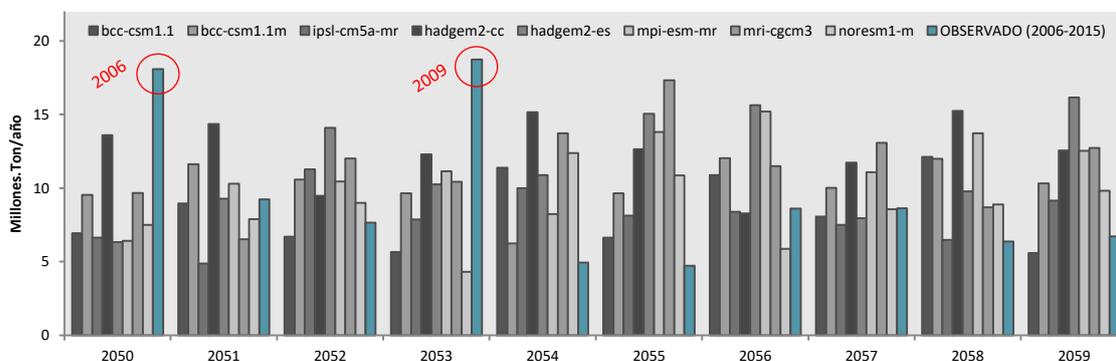


Figura 45. Sedimentos proyectados durante el decenio 2050 - 2059

En la Figura 46 se muestra la producción de sedimentos promedio durante todo el periodo 2050, al usar el promedio futuro de los modelos podemos decir que el periodo 2050 tendría una producción de sedimentos superior al periodo observado, de 9.3 a 10.23 Millones.Ton/mes.

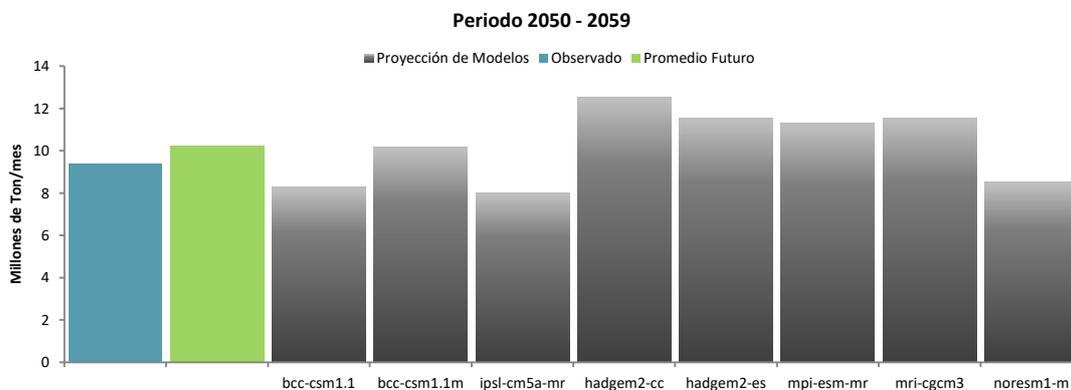


Figura 46. Sedimentos promedios a lo largo del decenio 2050 - 2059

V. CONCLUSIONES

1. La formulación del modelo hidrológico en función de la disponibilidad de datos pudo representar física y espacialmente la zona de estudio. Esto permitió al modelo ser capaz de simular los procesos hídricos y sedimentológicos de la cuenca en estudio y con ello la representación de caudales y sedimento medios mensuales en el punto de control Condorcerro.
2. En la etapa de calibración el modelo hidrológico demuestra ser lo suficientemente capaz para simular los caudales mensuales de la zona estudiada; puesto que, se obtuvieron valores de NS, PBIAS, RSR y R2 de 0.89, 8.26, 0.34 y 0.92 respectivamente, en el punto de control Condorcerro. Estos parámetros de eficiencia son considerados muy buenos según los rangos de desempeño a paso mensual recomendado por Moriasi et al. (2007).
3. La calibración del modelo hidrológico demuestra capacidad para simular los ciclos de los sedimentos mensuales; dado que, se obtuvieron valores de NS, PBIAS, RSR y R2 de 0.64, -7.42, 0.6 y 0.66 respectivamente, en el punto de control Condorcerro. Estos parámetros de eficiencia son considerados satisfactorios según los rangos de desempeño a paso mensual recomendado por Moriasi et al. (2017).
4. Para el decenio proyectado 2050-2059, durante el periodo húmedo (Octubre - Abril) se registrarían incrementos en las descargas medias. Las mayores descargas continuarán produciéndose en el mes de marzo; pero, es el mes de Enero el que experimentaría la mayor variación de caudal medio siendo este incremento equivalente al 38%. Durante el periodo seco (Mayo - Setiembre) se registrarían incrementos en Junio, Julio, Agosto; mientras que, en Mayo y Setiembre se proyectan reducciones de -6% y -5%.
5. La disponibilidad hídrica proyectada sugiere que los caudales al 50% de persistencia incrementarían en +18% durante el periodo húmedo y en +7% durante el periodo seco. Los caudales al 75% de persistencia aumentarían en + 10% para el periodo húmedo y en +2% durante el periodo seco. En lo que respecta a la

persistencia del 90% las descargas se incrementan en +6% durante el periodo húmedo pero se reducirían en -5% durante el periodo seco.

6. En el punto de control de nombre estación Condorcerro se proyecta un caudal de 180.13 m³/s como caudal medio del decenio (2050 – 2059); vale decir, el área de estudio produciría 19% más agua que el decenio observado (2005 - 2015).
7. En lo que respecta al ciclo de los sedimentos durante el decenio proyectado el periodo (2050 – 2059) bajo escenario rcp 4.5, el promedio de los modelos indican un incremento del +9.25%; es decir, durante el periodo futuro se producirían 10.23 Millones de toneladas respecto de los 9.37 Millones de toneladas observadas en el periodo actual 2006 – 2015.

VI. RECOMENDACIONES

1. Emplear la herramienta SWAT para diferentes áreas de estudio en nuestro país puesto que resulta ser una herramienta muy útil para simular los caudales y sedimentos así como el ciclo de los nutrientes.
2. Realizar estudios de suelos más detallados a nivel nacional; puesto que, es una información básica relevante que involucra conocer diferentes e importantes parámetros los cuales son usados en las diferentes ecuaciones usadas en la herramienta SWAT.
3. Utilizar la mayor cantidad de años posible y estaciones para obtener una mejor variabilidad temporal y espacial del área estudiada.
4. Instalar una mayor cantidad de estaciones hidrométricas en la zona de estudio a fin de calibrar y validar modelos de cuencas de menor tamaño y poder realizar estudios de cambio climático a menor escala y conseguir proyecciones más finas y detalladas.
5. Instalar una mayor cantidad de estaciones sedimentarias dentro de la cuenca y a nivel nacional con registros diarios para próximas investigaciones; dado que, la erosión es un proceso importante que afecta obras hidráulicas concernientes a proyectos agrícolas, agua potable y energía.
6. Considerar los resultados de la presente investigación para tomar decisiones de índole política, económica y social.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alatorre, LC. 2010. Erosión del suelo y fuentes de sedimentos en la cuenca del río Ésera (Pirineo Central): Análisis espacial y dinámica temporal mediante técnicas de simulación y teledetección. Tesis Dr en Geog. Zaragoza, ES. Universidad de Zaragoza. 318 p.

Alatorre, LC; Beguería, S. 2009. Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riego mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el pirineo central español. Zaragoza, ES. Se.

Amador, JA; Alfaro EJ. 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. San Jose, CR. Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Física. P 39.

Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, RD; Griensven, A van; Liew, MW van; Kannan, N; Jha, MK. 2012. Sawat: model use, calibration and validation. Michigan, US. ASABE. 55(4): 1491-1508.

Beguería, S. 2005. Erosión y fuentes de sedimentos en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo Occidental): ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. Zaragoza, ES. CSIC. p 13.

Cabrera, J. 2014?. Modelos Hidrológicos (en línea). Lima, s.e. Consultado 18 feb. 2016. Disponible en http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf

Carreño, S. 2013. Aplicaciones en meteorología de modelos funcionales de predicción en componentes principales. Tesis Mag. Sc. Estad. Apl. Granada, ES. Universidad de Granada. p. 5

Chávarri, EA. 2008. Métodos de Análisis en Ingeniería de Recursos Hídricos (en línea). Lima, s.e. Consultado 17 feb. 2016. Disponible en http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase_ii_met_el_ciclo

Foster, GR; Meyer, LD. 1977. Soil erosion and sedimentation by water. Chicago, US. ASAE. p 13.

Guerra, JC. 2012?. Meteorología y Climatología (en línea). España. S.e. Consultado 20 feb. 2016. Disponible en <http://jcg Guerra.webs.ull.es/docencia/meteorologia/docu/T2.pdf>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2000. Informe especial del ipcc: escenarios de emisiones. Ginebra, CH, grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. p. 4-8.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2001. Tercer informe de evaluación cambio climático 200:1 impactos, adaptación y vulnerabilidad. (en línea) Suiza, s.e. Consultado 8 mar 2016. Disponible en <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2008. El cambio climático y el agua. Ginebra, CH, grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. p 15.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2013. Cambio Climático 2013: bases físicas. 1 ed. Ginebra, CH. grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. p. 104-124.

Kuroiwa, JM. 2012. Recursos Hidraulicos en el Perú: una visión estratégica (en línea). Lima. s.e. Consultado 19 mayo 2016. Disponible en http://181.177.232.117/anc_j28.1/images/stories/agua/recursoshidraulicosjuliokuroiwa.pdf

McAvaney, BJ. 2001. Model evaluation Climate Change 2001. Eds. Y Qian; J Stones. Reyno Unido. s.e. p. 471-524.

Morera, SB. 2010. Dinámica de la Producción de Sedimentos en la cuenca del Río Santa. Tesis Mag. Sc. Recursos Hídricos. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria la Molina. P. 12.

Moriasi, DN; Arnold, JG; Liew, MW van; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Michigan, US. ASABE. 50 (3): 885-900.

Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (en línea). Texas, USA. Agricultural Research Service. 494 p.

Ponce, VM. 1989. Engineering hydrology: principles and practices. Edición. Englewood Cliffs. US. Prentice Hall. 640 p.

Pouyaud, B; Yerren, J; Zapata, M. 2003. Glaciares y Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Santa (en línea). Lima. s.e. Consultado 12 marzo 2016. Disponible en http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/paper_RRHHSANTA.pdf

Rojas, F. 2010. Recursos Hidricos – Perú 2010 (en línea). México. Centro de Agua para América Latina y el Caribe. Consultado 19 mayo 2016. Disponible en <http://blogcdam.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2012/03/Recursos-Hidricos-Peru-2010.pdf>

Ruiz, LE. 2014. Vision general sobre el software swat. (en línea). Merida,VE. Consultado 3 mar. 2014. Disponible en <https://plus.google.com/+LeonardoERuizB>

Salles, C; Poesen Jean. 2000. Rain properties controlling soil splash detachment: Hydrological Processes. Leuven, BE. se. p 14.

UCAR (University Corporation for Atmospheric Research), US. 2009. Cambio climático (en línea). Colorado, US. Consultado 7 mar 2016. Disponible en http://www.meted.ucar.edu/broadcastmet/climate_es/media/graphics/AtmosphericModelSchematic.jpg

Uribe, N. 2010. Análisis de Vulnerabilidad hídrica frente a escenarios de cambio climático en las cuencas de los ríos Tuluá, Guabas, Fraile y Desbaratado en el Departamento del Valle del Cauca (en línea). Bogotá, CIAT. Consultado 10 mar 2016. Disponible en <https://es.slideshare.net/CIAT/anlisis-de-vulnerabilidad-hdrica-frente-a-escenarios-de-cambio-climtico-en-las-cuencas-de-los-ros-tulu-guabas-fraile-y-desbaratado-en-el-departamento-del-valle-del-cauca>

Warren, A. 2002. Land degradation is contextual. London, UK. se. p 13.

Wilks, DS. 1995. Statistical Method in the Atmospheric Sciences. 2 ed. San Diego, US. Elsevier. v. 91, 649 p.

Williams, JR. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. Texas, US. Water Resources Bulletin. 11 (5): 965-974.

Wishmeier, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide conservation planning. Washington, US. Government printing Office.

Xu, Ch. 2002. Hydrologic Models. Upsala, SE. p

VIII. ANEXOS

ANEXO 1. Registro de precipitaciones mensuales dentro de la cuenca del Río Santa

AÑOS	ESTACION QUIRUVILCA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	113.6	206.8	247.3	137.8	17.7	11.7	9.2	32.8	40.2	124.1	41.5	144.4
2006	135.2	210.0	284.2	116.5	40.3	47.0	13.5	21.3	83.2	112.3	150.2	180.5
2007	238.4	112.6	276.0	194.3	65.6	9.4	32.8	18.2	23.8	182.8	122.6	130.8
2008	214.0	210.3	240.7	151.6	72.1	45.0	32.1	28.2	75.5	190.3	137.8	45.4
2009	318.9	159.6	270.4	187.4	112.0	21.9	29.9	34.5	10.0	171.8	179.1	168.7
2010	93.6	137.0	246.8	143.5	109.1	42.6	39.7	29.1	66.6	36.8	96.9	126.1
2011	136.1	61.1	176.5	243.8	22.7	10.0	23.0	3.5	49.3	59.1	120.6	204.7
2012	217.6	178.1	204.9	154.2	131.1	10.0	0.0	7.8	29.0	159.0	142.4	67.7
2013	88.7	171.1	337.3	102.1	92.4	20.5	9.1	19.5	52.3	77.1	7.0	61.2
2014	70.9	68.4	76.8	93.3	77.5	26.3	12.5	6.1	48.3	77.9	44.0	98.7
2015	119.4	54.2	161.7	40.6	32.1	5.5	7.2	0.0	58.4	167.1	155.5	247.5

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION HUACAMARCANGA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	71.8	195.2	219.0	65.6	19.4	3.2	4.0	7.3	12.0	78.0	31.5	166.4
2006	158.7	201.1	323.3	107.7	4.6	21.1	0.4	9.9	55.7	54.9	88.6	181.5
2007	213.2	126.6	387.0	242.3	47.3	8.9	10.8	6.7	27.1	193.0	59.1	95.9
2008	263.9	223.2	268.7	111.2	36.3	20.1	1.9	4.0	49.3	131.7	57.3	22.1
2009	325.9	143.5	202.5	183.8	41.9	32.9	14.2	16.1	25.0	193.8	285.1	164.5
2010	106.7	164.1	242.6	348.3	119.2	26.1	24.4	6.4	23.8	21.1	45.0	185.8
2011	112.7	111.6	237.1	249.3	26.6	6.3	21.2	1.4	19.3	30.6	98.4	196.9
2012	260.0	325.9	331.4	312.3	81.5	15.8	2.5	12.8	30.0	171.9	174.9	103.4
2013	123.1	240.8	417.7	75.2	47.5	21.5	7.3	28.3	12.0	192.1	28.9	225.7
2014	163.8	137.3	469.3	125.0	221.2	8.5	2.0	4.0	50.6	63.4	72.5	151.9
2015	295.6	89.8	369.0	138.6	159.6	14.8	9.7	1.4	27.8	70.0	115.4	207.9

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CACHICADAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	88.9	98.3	246.9	108.9	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	61.0	25.5	76.6
2006	197.2	130.6	379.7	153.8	19.8	32.9	1.0	0.5	17.6	26.0	84.2	134.9
2007	286.7	86.3	297.2	193.9	46.5	2.2	8.2	9.9	24.1	81.4	50.1	115.1
2008	135.5	130.9	147.4	130.3	16.5	7.8	1.2	11.0	8.1	132.7	24.3	37.0
2009	259.9	191.0	176.8	141.4	55.4	9.3	13.1	2.0	5.5	150.1	112.5	136.0
2010	120.9	192.6	118.9	73.7	36.8	1.2	3.2	0.0	16.0	30.9	50.3	99.0
2011	176.5	69.4	142.0	207.6	5.7	10.6	0.0	0.0	20.5	30.1	51.0	224.0
2012	229.4	174.8	244.9	140.6	55.8	1.2	0.0	1.7	18.1	87.0	106.2	103.8
2013	119.8	215.4	367.9	87.8	8.3	17.5	0.0	16.6	1.8	140.9	7.9	126.2
2014	167.7	173.1	227.4	104.9	155.9	1.6	6.4	0.0	50.1	28.8	53.1	136.9
2015	175.2	21.8	293.5	135.1	50.2	1.2	4.4	3.0	14.9	74.6	96.4	185.4

AÑOS	ESTACION CABANA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	52.9	90.1	166.8	58.0	0.6	0.0	0.0	5.1	1.3	24.9	11.5	102.4
2006	117.0	125.3	304.0	118.5	2.3	33.5	0.0	2.5	0.0	31.1	50.0	116.5
2007	149.5	65.0	247.5	134.5	45.7	2.3	0.0	9.3	0.0	63.8	54.9	89.0
2008	184.0	165.1	146.3	123.2	22.6	0.0	0.0	0.0	11.3	85.0	68.0	33.5
2009	213.0	235.1	233.2	126.0	22.5	1.7	1.5	1.8	9.3	166.5	97.3	95.5
2010	130.4	141.1	178.3	81.0	35.0	0.0	5.7	0.0	28.0	29.0	90.7	151.8
2011	83.5	115.5	164.0	148.3	0.0	2.0	13.0	0.0	33.5	14.0	NA	146.0
2012	159.8	172.2	203.2	187.5	40.5	6.0	0.0	0.0	11.0	76.0	110.0	107.0
2013	81.5	172.5	269.0	86.5	46.0	12.5	0.0	34.5	10.5	84.0	38.0	108.5
2014	122.2	144.0	183.0	97.5	58.0	0.0	5.0	4.5	47.0	53.5	43.0	168.5
2015	200.5	149.5	230.1	104.5	88.8	14.0	6.5	NA	13.5	33.0	86.3	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SIHUAS											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	69.5	63.8	190.5	79.9	0.0	0.0	0.0	13.9	12.1	94.5	26.9	130.2
2006	113.7	85.3	211.8	88.6	15.8	16.8	0.0	15.4	74.5	117.8	119.6	228.5
2007	145.9	70.1	237.1	176.9	5.9	0.0	31.7	12.1	17.8	150.0	108.3	94.8
2008	139.4	142.8	154.5	96.1	19.3	23.3	0.0	5.6	73.3	179.6	84.7	85.5
2009	231.0	240.7	296.8	183.1	53.1	28.1	32.2	75.1	14.6	140.7	108.8	162.8
2010	83.5	86.4	135.7	109.3	67.6	14.4	4.5	3.1	10.1	65.3	146.6	159.9
2011	109.7	71.5	144.6	150.9	19.6	0.0	14.1	4.7	49.6	44.3	82.1	166.9
2012	221.0	170.6	176.2	119.4	57.5	15.0	0.0	1.3	8.6	117.5	117.8	122.9
2013	89.6	151.9	199.6	128.3	40.8	14.8	6.9	32.9	24.5	121.4	49.8	122.2
2014	103.9	147.5	246.7	82.7	68.7	7.2	1.8	0.0	39.8	65.3	62.5	191.3
2015	212.8	76.2	224.1	118.8	147.6	0.0	3.1	NA	18.1	53.5	76.5	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION YUNGAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	39.5	93.9	179.5	64.7	2.0	0.0	0.0	0.0	13.8	22.0	0.0	113.0
2006	60.4	157.7	291.0	188.2	0.0	3.4	0.0	2.6	4.3	13.6	59.9	240.0
2007	78.3	27.3	474.2	182.9	38.4	0.0	0.0	3.1	5.5	75.3	78.8	46.2
2008	119.9	119.8	235.2	98.1	9.2	15.4	0.0	0.0	1.1	119.4	71.2	19.4
2009	212.9	131.4	207.5	107.4	12.8	0.0	0.0	1.8	0.0	172.5	110.2	71.9
2010	63.7	120.4	137.8	74.6	26.1	4.2	0.0	0.0	4.2	23.5	159.3	191.1
2011	133.6	27.9	183.6	236.4	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	3.6	58.0	281.7
2012	91.2	136.6	146.0	108.1	20.4	0.0	0.0	0.0	26.9	60.5	87.0	116.2
2013	24.4	135.8	213.1	48.6	24.3	0.0	0.0	2.8	5.2	85.4	14.1	97.8
2014	132.8	150.4	181.1	55.1	45.9	10.4	0.0	0.0	27.1	22.0	56.2	166.9
2015	NA	115.7	227.2	49.0	72.9	1.2	1.3	NA	0.0	52.3	51.0	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	151.1	87.7	210.1	34.6	2.9	0.0	0.0	8.7	3.8	44.9	20.1	111.3
2006	48.7	100.8	236.9	146.1	4.8	17.2	1.6	5.2	14.4	49.5	56.0	159.0
2007	96.2	87.0	170.1	186.9	31.8	0.7	6.9	0.9	8.0	102.2	57.8	62.1
2008	160.8	148.2	108.0	86.1	2.2	7.4	9.8	3.1	23.7	133.1	43.9	94.9
2009	178.5	141.6	225.6	118.4	30.2	9.1	0.3	2.2	2.0	146.9	137.4	187.0
2010	101.7	49.4	124.5	71.9	46.2	6.1	0.0	3.4	27.8	29.2	109.0	191.5
2011	90.4	68.2	108.1	NA	0.7	0.0	4.1	1.1	11.0	28.2	98.9	168.0
2012	104.0	142.6	193.2	180.2	17.8	5.9	0.0	0.0	26.4	42.6	NA	110.3
2013	88.7	137.6	170.5	39.8	21.4	0.0	0.4	4.7	5.9	97.6	67.6	146.6
2014	124.5	186.1	170.3	91.1	74.4	7.1	NA	3.9	34.9	47.7	53.0	196.3
2015	NA	50.9	143.8	84.3	NA	NA	NA	NA	20.3	74.1	92.8	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION RECUAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	95.7	73.7	200.8	69.9	25.6	0.0	0.0	9.5	18.1	45.7	NA	115.7
2006	101.0	94.8	219.9	141.6	7.1	35.7	4.5	32.6	72.5	92.4	126.0	156.7
2007	171.9	87.1	224.6	173.3	33.0	8.3	0.0	2.3	4.0	80.4	113.2	47.6
2008	107.9	116.6	124.3	72.0	7.9	5.6	13.6	11.4	16.2	144.2	34.8	51.1
2009	198.3	118.8	327.5	121.2	68.5	4.0	0.0	16.4	14.6	147.2	137.8	157.9
2010	124.9	92.8	180.8	85.4	25.3	8.7	2.0	6.3	37.9	49.7	92.0	167.9
2011	118.4	98.8	155.0	125.4	16.3	1.2	16.6	4.9	11.6	17.3	95.2	162.1
2012	162.2	142.6	141.3	153.4	15.6	14.5	0.0	0.0	30.8	49.9	NA	152.1
2013	69.1	131.1	223.2	74.0	23.6	1.2	2.0	12.6	23.2	90.5	68.1	131.1
2014	93.4	176.4	234.6	99.9	46.6	4.7	3.9	3.5	23.9	41.8	51.4	215.2
2015	146.1	82.4	NA	103.0	34.1	2.0	2.4	2.5	21.2	38.6	89.1	81.2

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION MILPO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	148.5	119.4	270.7	96.0	69.9	6.9	14.5	20.7	21.7	98.6	82.0	207.7
2006	95.1	155.6	329.6	320.1	42.2	36.6	6.1	7.6	39.0	63.1	192.8	240.3
2007	491.2	39.6	468.6	291.9	58.8	19.9	19.9	20.8	6.6	135.2	225.9	173.1
2008	347.2	244.7	459.3	99.3	10.9	45.5	48.6	109.7	82.4	248.8	55.6	180.7
2009	305.1	216.5	162.3	233.4	10.7	12.8	9.7	10.2	8.3	160.9	122.0	182.6
2010	68.4	45.0	159.8	19.2	22.8	8.0	1.3	2.8	33.2	69.4	225.3	300.9
2011	279.8	278.9	177.4	95.7	10.1	3.2	23.0	17.4	135.6	119.6	232.8	536.4
2012	266.7	658.3	227.0	433.1	38.3	41.0	5.6	3.3	149.2	106.1	380.7	399.3
2013	127.7	388.2	370.4	264.8	90.0	86.4	39.4	28.1	47.8	250.1	141.3	179.1
2014	371.8	665.1	323.1	160.3	221.6	17.7	23.6	12.1	56.5	84.8	86.3	259.5
2015	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CHIQUIAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	67.0	84.9	172.3	50.5	8.0	0.0	0.0	3.5	0.0	22.0	15.5	110.8
2006	97.4	138.6	181.2	99.0	4.5	4.5	0.0	0.0	20.0	31.0	66.0	138.4
2007	108.4	53.5	157.2	119.2	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.2	16.7	46.5
2008	191.6	148.8	92.2	71.0	1.0	0.0	0.0	0.0	2.0	55.5	39.0	43.5
2009	112.1	177.6	162.8	105.8	21.5	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	46.0	93.2
2010	77.0	91.4	103.6	47.2	0.0	4.5	0.0	0.0	19.0	24.5	42.4	136.8
2011	146.0	57.5	131.4	97.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	69.5	150.9
2012	115.5	156.4	161.3	105.2	17.0	0.0	0.0	0.0	28.0	23.5	68.3	104.5
2013	16.0	159.0	200.8	27.5	16.0	0.0	0.0	0.0	3.0	77.5	45.5	113.5
2014	104.5	164.9	174.5	7.0	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.9
2015	71.9	12.1	71.9	31.0	29.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	43.0

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION YANAMAREY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2006	253.6	238.1	50.7	252.5	22.2	74.7	NA	0.5	69.9	61.4	213.5	236.1
2007	NA	188.8	401.3	295.9	91.2	11.6	56.0	27.5	42.2	198.3	155.3	163.3
2008	375.1	321.9	294.4	161.1	49.3	39.6	7.0	51.0	66.1	254.8	175.6	161.0
2009	374.3	303.8	405.4	316.4	110.6	32.3	52.8	57.0	61.6	189.5	181.9	351.3
2010	269.4	165.3	310.6	130.4	56.7	10.1	0.1	2.1	40.5	91.3	187.3	213.3
2011	250.5	237.3	316.3	93.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2012	NA	313.0	262.4	308.2	NA	NA	0.6	6.4	NA	NA	157.0	294.1
2013	278.0	272.9	416.5	212.5	126.4	37.2	40.8	46.5	63.5	190.8	190.6	254.0
2014	292.1	48.8	382.0	233.1	123.1	49.3	46.6	22.4	134.2	204.4	205.6	293.7
2015	279.3	249.8	79.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: SENAMHI

ANEXO 2. Registro de Temperaturas mínimas (°C) dentro de la cuenca del Río Santa

AÑOS	ESTACION CACHICADAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	7.8	8.8	8.6	8.4	6.1	6.2	5.3	NA	7.1	7.7	7.1	7.3
2006	7.8	9.3	9.2	7.2	4.8	5.1	4.8	5.9	5.5	6.6	7.2	7.9
2007	9.3	7.6	8.4	7.1	6.2	5.4	5.2	5.6	5.9	6.9	7.4	6.5
2008	7.7	7.5	6.7	7.1	4.7	3.2	2.7	4.5	6.1	7.2	7.4	7.2
2009	8.3	7.7	7.9	7.3	5.5	3.5	3.8	5	6	7.7	7.2	8.1
2010	8	8.2	9.1	7.4	5.9	4.7	3.7	3	3.5	3.7	4.1	NA
2011	NA	NA	NA	NA	NA	7.2	NA	6.7	6.5	6.2	7.6	7.7
2012	8.2	6.1	3.6	3.8	6.5	5.7	5.3	6.3	NA	7.9	8.3	7.7
2013	8.1	8.1	8.4	7.9	8	6.6	5.9	6.4	6.7	7.7	6	5.8
2014	7.6	8	8.7	8	7.6	6.4	6.6	5.7	7.2	7.4	6.7	8.4
2015	8.3	8.1	8	7.8	7.6	7.5	7.9	6.4	7.5	8.6	8.5	8.9

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CABANA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	7	7.5	7.9	7.4	6.8	6	5.9	6.2	6.6	7.2	6.3	6.2
2006	6.8	7.9	7.6	7.1	6.9	6.8	6.7	7	6.8	7	7.3	7.7
2007	8	7.3	7.6	7.6	7.4	7	7	6.5	6.9	7.7	6.8	7.1
2008	8.3	7	8.4	9	7.6	6.3	7.3	7.2	7.8	8.4	8.2	8
2009	8.5	9.2	8.7	8.5	7.9	7.6	7.8	7.2	7.6	8.5	8.4	8.2
2010	8.2	8	8.2	8	7.7	7	7.6	6.7	7.4	7.8	7.2	8.1
2011	7.7	8.3	6.8	8.1	7.5	6.4	6.6	6.2	7.7	6.3	NA	7.5
2012	7.2	6.4	7.4	7.1	7.3	6.8	6.4	6.9	6.4	7.2	7.5	6.3
2013	7.6	7.7	7.5	7.4	6.7	6.5	6.5	7.4	6.7	7.2	6.7	7.2
2014	7.7	7.7	7.5	7.5	6.9	6.3	6.7	6.7	7.2	6.6	6.9	7.4
2015	7.6	7.3	7.5	7.5	7.4	6.7	6.3	NA	7.2	7.3	7.4	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SIHUAS											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	10	11.2	10.1	9.9	8.6	8.8	7.3	8.5	9.8	9.8	9.4	9.7
2006	10.1	10.7	10.1	9.9	8.8	9.4	8.5	9.7	9.7	9.9	10.3	9.2
2007	9.2	8.5	9.3	9.7	8.8	7.7	8.6	9	8.8	9	9.9	9.3
2008	8.1	8.8	9.1	9.5	8.6	8.3	7.7	8.6	7.9	9.7	9.4	8.8
2009	9	9	8.5	9.4	8.3	7.3	7.8	8.3	9	9.5	9.3	9.7
2010	10.5	9	9.4	9.6	8.1	7.9	7.5	7.2	8.5	8.6	8.5	9
2011	9.3	9.2	9.4	9.5	8.8	7.8	7.7	9	10.5	10.3	10.3	10.6
2012	11	10	10.4	10.3	9.9	8.8	7.8	9.4	9.9	11.2	11.5	10.9
2013	11.4	11	11.7	9.9	10.8	10.1	9	9.8	10.9	11.5	11.4	11.6
2014	11.5	11	10.9	12	10.8	9.9	9.3	9.6	10.9	10.5	10.6	10.5
2015	11	11.7	10.9	11	10.2	9.4	8.8	NA	11.7	11.9	12.5	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION YUNGAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	5.6	7.5	7.1	6.2	6.3	4.4	4.6	5.2	5.9	6.8	6.4	6.5
2006	6.9	6.5	7.8	6.2	5.5	5	4.8	5.9	6.4	5.5	6.7	7
2007	7.4	7.8	5	5.9	5.8	4.4	4.9	5.8	5.7	8.8	10	9.4
2008	10.6	11.2	9.6	10.5	9.6	8.1	7.2	8.2	9.7	9.9	10	9.4
2009	9.7	11.2	10.6	10.5	10.5	8.3	8.5	8.1	8	11.3	10.6	12
2010	11.5	12.2	12.9	11.6	9.5	7.7	9	7.5	9.4	9.2	9	8.6
2011	10.1	9.4	7.2	6.2	9.2	5.7	6.4	7.1	7.7	6.8	7.1	7.6
2012	10.5	9.6	8.2	7.9	7	3.9	2.9	2.8	3.4	6	6.9	7.3
2013	9.2	7.7	8.4	7.6	6.1	5.3	2.2	3.6	4.5	5.7	6.5	6.1
2014	7.8	6.5	5	5.5	4.9	2.9	2.9	3.1	4.6	4.9	3.9	5.3
2015	NA	5	4.8	4.7	3.9	2.8	2.5	NA	3.9	4.7	5.1	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	5.4	9.3	8.9	8.1	4.9	4.1	3.4	4.5	6.3	7.6	6.2	7.6
2006	7.3	9	8.5	8	5.1	5.4	4.3	5.9	5.8	6.6	7.9	8
2007	8.7	7.8	8.6	8.4	7.1	4.1	4.7	4.9	6.4	7.1	7.9	7
2008	8.5	7.9	7.7	7.8	6.2	3.9	2.9	3.1	5.7	8	8.4	7.4
2009	8.4	8.4	7.9	8.1	6.7	5.2	4.5	5.2	6.2	7.8	8	8.7
2010	8.6	9.4	9.2	9.3	7.2	5.2	4.6	4.4	6	5.3	6.8	8
2011	8.2	7.7	7.8	NA	5.6	4.6	4.4	4.6	5.2	5.2	7.5	8.1
2012	9	8.2	8.3	8.6	7	4.8	3.8	3.9	5.6	8	NA	8.5
2013	9.2	8.9	9.4	8.3	7	5.2	4.5	5.5	6.6	8.3	7.3	8.7
2014	8.8	8.9	9.2	8.4	8.2	5.8	NA	5.4	7.2	7.3	7.6	8.6
2015	NA	9	9.5	8.5	NA	NA	NA	NA	7.4	8.3	7.5	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION RECUAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	5.5	7.5	7.5	6.5	2.7	1	-0.5	0.1	2.6	NA	NA	NA
2006	NA	NA	NA	NA	1.1	2.2	0.2	2.1	2.7	4	6	7
2007	7.7	6.2	6.9	5.8	4	1	1.1	1.3	3.1	4.5	4.9	4.4
2008	5.3	5.6	5	5.6	3.3	2.1	0.4	2.3	3	5.6	6.7	5.6
2009	6.8	7.2	6.4	6.4	5.3	4.2	3.5	1.9	3.4	5.1	5.8	7.5
2010	7	7.6	7.1	6.9	4.4	1.4	1.1	0.7	2.8	2.7	2.9	4.4
2011	6.1	6.1	5.7	5.5	2.7	1.5	1	1.6	4.1	3.9	5.7	5.9
2012	7	6.1	6.5	6	3.8	0.9	0.5	1	3.9	5.4	NA	6.3
2013	7.5	7	6.9	5.9	3.8	1.4	1	1.9	3.6	6.1	4.8	6.4
2014	6.8	4.4	2.8	2.6	2.3	0.9	2.1	0.5	2.7	3.5	3.7	4.2
2015	4.3	5.6	NA	5	4.5	2.5	0.6	1.2	3.5	6.4	6.4	6.8

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CHIQUIAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	3.8	4.8	4.4	4.4	4.3	2.6	2.2	3.5	3.8	3.8	3.2	3.9
2006	4.3	4.5	4.7	4.6	3.2	3.8	3.9	3.8	4.1	4.3	4.3	4.7
2007	4.8	4.3	4.5	4.7	3.8	3.1	2.9	3.6	4.8	4.8	4.5	4.2
2008	4.7	4	4.4	4.2	3.6	3.4	2.7	3.4	4.1	4	4.2	4
2009	4.4	5.2	4.4	4.4	4.4	3.8	4.3	3.4	4.7	4.4	4.7	4.6
2010	5	4.9	4.6	4.7	4	3.4	2.8	2.8	4.1	3.8	4.1	4.1
2011	4.4	4.1	4.3	4.6	3.3	3.3	3.4	3.7	3.9	3.9	4.3	4.3
2012	4.5	4.4	4.4	4.3	4.1	3.8	4.2	3.9	4.1	4.2	4.4	4
2013	3.9	4.1	4.3	4.3	4	3.7	3.7	4.1	4.4	4.7	4.5	4.7
2014	4.5	4.5	4.4	4.6	4.3	4.5	4.1	3.9	3.7	4	3.5	3.5
2015	4.2	4.5	3.8	4.7	4.7	4.5	3.7	4	4.6	4.4	4.3	5.2

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION ARTESONCOCHA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	-0.7	0.1	-0.3	0.1	-0.9	-1.8	-1.2	-1.7	-1.4	-1.2	-0.7	-1.1
2006	-0.4	-0.1	-0.4	-0.6	-1.6	-0.9	-1.6	-1.7	-1.5	-1.1	-1.1	-0.5
2007	0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.4	-1	-2	-1.7	-1.5	-1.3	-1	-1
2008	-0.8	-1.1	-1.5	-1.5	-1.6	-2.1	-2.3	-1.9	-1.7	-1.2	-0.6	-1
2009	-1	-0.9	-0.8	-0.3	-1.2	-1.4	-1.6	-1.4	-0.8	-0.7	-0.6	-0.3
2010	0.3	0.5	0.4	0.5	0	-0.6	-1.3	-1.6	NA	NA	NA	NA
2011	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-1	-0.9	-0.8
2012	-1.1	-0.7	NA	NA	NA	-1.4	-1.2	-1.7	-1.1	-0.8	NA	NA
2013	NA	NA	NA	NA	NA	-1	-1.6	-1.9	-1.2	-0.9	-1	-0.7
2014	-0.7	-0.6	-0.6	-0.3	-1	-0.6	-1.3	-2.3	-1.2	-1	-1	-0.5
2015	-0.8	-0.4	-0.3	-0.3	-0.7	-0.5	-1.4	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: SENAMHI

ANEXO 3. Registro de Temperaturas máximas (°C) dentro de la cuenca del Río Santa

AÑOS	ESTACION CACHICADAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	21.8	21.6	19.8	21.5	22.7	23.1	23	22.9	22.8	21	22	19.9
2006	20.5	19.4	19.1	19.8	21.6	21.2	22.6	22.7	22.3	22	21.4	20.5
2007	20.5	19.9	19.3	19.7	21.1	22.5	21.8	21.8	22	20.5	20.8	20.6
2008	18.8	19	18.2	19.3	20.3	21.4	21.9	22.1	22.7	21.1	20.9	21.2
2009	19.4	18.7	18.8	19.5	21	22.4	22.1	23.1	23.5	21.6	22.1	21.5
2010	22	21.9	22	22	22.2	22.9	24.2	23.8	23.5	23.2	22.2	21.1
2011	20.4	20.6	19.2	19.6	22.6	23	23.1	23.2	23.2	21.4	22.5	20.9
2012	19.6	19.7	20.2	19.7	21.1	22	23.1	22.8	NA	21.1	21.1	20.6
2013	21.2	20.8	19.9	21.9	22.3	22.7	22	22.2	22.9	20.8	21.7	21.4
2014	20.8	20.8	19.7	21.2	20.9	22.6	22.5	22.3	21.9	21.5	21.4	20.8
2015	20.6	20.7	20	21.3	21.8	23	23	23.7	23	22	22.5	22.8

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CABANA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	15.4	14.8	13.5	16.2	16.8	17	16.9	17.1	17.3	16.1	16.4	14.1
2006	14.5	12.8	12.6	14.1	16.1	16.3	17.3	16.6	17.2	16.5	14.6	13.3
2007	13.5	14.3	11.3	13.1	16.2	16.9	16.6	16.6	16.5	15.4	14.9	14.7
2008	12.5	11.6	12.1	12.2	15.5	17	17	16.9	17	14.7	14.7	15.7
2009	13.7	13.1	12.7	13.4	15.8	16.7	16.8	17.8	17.8	14.8	15.7	15.5
2010	15.3	15.2	15.1	15.9	16.6	17	16.6	16.8	16.5	16.5	15.6	14.1
2011	14.4	13.9	12.8	12.8	16	16.3	15.4	16	15.9	15.2	NA	13.5
2012	13.3	13.9	14.1	13.9	15.1	16.2	16.5	16.9	17	14.7	14	13.6
2013	15.2	13.8	13.4	15.1	15.5	16.1	16.7	16.4	17.4	14.5	15.4	14.8
2014	15.1	14.6	13.9	15.5	15.5	16.5	16.8	17	15.2	16.6	16.5	14.6
2015	14.5	14.5	14.2	15	15.9	17.5	17.6	NA	18.1	16.7	16.1	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SIHUAS											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	24.3	24.6	23.3	24.9	26.6	26.2	26.1	25.3	25.8	25.6	27.5	23.5
2006	24.6	24.6	24	24.8	25.9	25.1	25.3	25.9	26.2	25.9	25.3	25.8
2007	25.1	25.9	22.5	23.7	25.1	24.5	24.4	25.4	24.8	25.4	25.3	25.5
2008	25.1	24.7	23.8	24.3	25.6	25.6	25.3	25.7	25.4	24.9	25.5	25.1
2009	24.3	23.8	23.2	22.8	24.2	24.7	23.1	24.7	25.3	24.7	24.4	23.3
2010	24.2	24.2	23.8	24.7	24.8	24.7	25.3	25.4	25.4	24.8	23.9	22.3
2011	23	21.8	22.4	23	24.5	24.2	23.9	25.3	24.1	24	24.4	22.5
2012	22.9	22.5	22.4	23.3	23.1	23.7	24.1	25.3	24.5	24.3	24.1	23.1
2013	23.9	23.1	22	24.9	24.3	24.1	24.9	24.9	26.1	24.8	25.7	25.5
2014	25.3	23.8	23.4	23.8	23.8	24.8	24.7	24.6	24.7	23.9	24.2	23.7
2015	23.6	23.9	22.5	23.3	22.7	23.9	24.8	NA	25.4	25.8	25.4	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION YUNGAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	23.8	24.6	22.6	21.4	24.2	24.6	24.6	24.9	25.3	25	23.7	21.4
2006	23.1	22.1	20.6	20.1	24.5	23.3	25.6	24.8	26.5	27.8	24.7	23.9
2007	25.4	25.5	24	22.8	25.1	24.7	25.3	26	24.9	23.9	24.6	24.6
2008	23.6	23.3	22.6	23.7	24.4	23.7	24.2	23.7	25.8	24.6	24.1	24.2
2009	24	22.1	22.4	22	24.7	25.4	24.8	25.1	25.5	24.7	24.4	23.7
2010	24.1	24	23.9	24.1	23.5	23.4	24.3	24.4	24.2	24.8	24	23
2011	23.3	22.7	21	20.7	25.3	25.1	25.6	25.8	25.3	22.5	23	21.2
2012	22.5	21.2	21.6	20.2	22.7	25.6	25.3	25.4	24.9	22.7	20.3	20.6
2013	25.2	22.5	23.2	24.6	24.1	24.1	24.8	24.1	25.7	24.8	24.7	24.2
2014	23.1	23.1	20.7	24.8	25.3	26.7	26.3	25.5	24.4	25.3	23.5	23.4
2015	NA	23.3	23	24.1	24.1	24	23.8	NA	24.7	24.1	24.2	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	22	23.2	20.6	22.7	23.3	23.8	24.2	24.5	24.8	23.7	24.1	22
2006	22.5	21.5	21	21.3	22.7	22.4	23.9	24.2	24.4	23.3	22.3	21.4
2007	22.6	22.3	21.2	21.5	22	22.8	22.8	23.7	23.9	23.2	23.1	22
2008	21	20.8	20.2	21.4	22	22.5	22.6	24.2	24.5	22.6	22.3	22.3
2009	21.5	20.2	20.5	22	22.4	23.4	23.4	24.7	25.9	23.7	22.2	21.5
2010	22.5	23	22.9	23.4	23.1	22.8	23.4	24.3	24.3	24.1	22.5	20.3
2011	20.7	20.2	20.2	NA	23.2	23.1	23.1	24.6	23.4	23.4	22.9	21.5
2012	21.8	21	22.5	21.4	22.9	23.5	24.1	24.9	24.8	23.8	NA	21.9
2013	24	21.7	21.7	23.4	23.2	23.7	23.6	24.5	25.5	23.6	22.9	23
2014	22.5	22.1	21.4	24.2	23	24.5	NA	24	24.5	23.7	23.7	22.9
2015	NA	22.4	22.3	22.5	NA	NA	NA	NA	25.8	25	23.8	NA

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION RECUJAY											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	20.2	20.9	18.5	20.2	21.1	21.7	22.4	22.4	22.5	NA	NA	NA
2006	NA	NA	NA	NA	23.5	22.1	22.7	22.1	22.4	21.7	21	19.9
2007	20.6	20.5	20	19.8	20.3	21	21.1	22	21.4	21.1	20.7	21.5
2008	19.5	20.6	18.5	19.7	20.8	21.4	21.3	22	22	20.2	20.4	19.9
2009	19.2	17.7	18.3	19.3	19.7	21.2	21.3	22.4	22.9	20.8	19.5	18.7
2010	20.2	20.5	20.2	22.1	22.2	22.7	22.5	22.8	22.1	21.7	21	18.8
2011	19.3	18.2	19.2	19.9	21.2	22.5	21.5	21.6	21.3	21.2	20.9	19.4
2012	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	19.5
2013	21.9	19.8	19.4	21	21	20.9	20.8	21.9	22.4	20.3	20.8	20.3
2014	20	19.6	19.1	20.2	19.8	21.8	21.5	21.7	21.8	21.7	21.6	21.7
2015	21	20.8	NA	21.1	21	22.9	22.7	22.9	22.6	21.4	21	20.9

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION CHIQUIAN											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	21.2	22.4	20.9	21.9	22.4	22	21.6	23	22.9	22	21.9	21.1
2006	21.8	21.1	20.9	20.7	20.7	21.1	21.9	21.9	21.6	21.8	20.7	20.9
2007	21.6	21.3	20.6	21.7	20.2	19.6	20.1	20.6	22.2	22	21.7	21.4
2008	21.7	20.2	20.9	20.3	20.1	20.2	19.5	20.9	21.9	21.4	21.8	21.5
2009	21.2	20.4	21.4	21.1	21.2	20.6	21.5	21.3	21.9	21.5	21.8	22
2010	22.5	21.9	21.4	21.9	21.2	20.6	20	20.6	20.9	20.7	20.8	20.3
2011	20.5	20.6	20.6	21.2	20.3	20.1	20.5	20.8	21	20.9	21.3	21.1
2012	21.3	21.3	21.3	21.1	21	20.5	21.1	20.8	21.1	21.1	21.1	20.7
2013	20.7	20.8	21.2	21.1	20.7	20.6	20.4	20.8	21.5	21.6	21.7	21.6
2014	21.4	21.3	21.1	21.6	20.5	21.9	21	21.3	21.4	21.9	21.1	20.6
2015	21.8	22.5	20.9	23.7	23.5	23.3	22.5	22.9	23.7	23.4	23.4	24.5

Fuente: SENAMHI

AÑOS	ESTACION ARTESONCOCHA											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	7.6	7.3	6.3	6.5	7.3	6.6	6.3	5.5	6.4	7.3	8.5	6.4
2006	5.5	7.5	6.3	7	7.6	5.5	5.4	5.3	6.6	7.5	6.5	6.5
2007	7.4	7.2	6.3	6.2	6.8	4.9	6.7	5.9	4.6	6.5	7.3	6.8
2008	6.6	6.2	5.4	6.5	6.8	6.4	6.1	6.4	7	6.3	7	8.8
2009	7.6	6.5	6.7	6.9	6.7	6.5	6.3	7.3	6.5	6.9	7.5	6.9
2010	7.5	7.7	7.5	8.3	7.7	6.1	7.4	6.1	NA	NA	NA	NA
2011	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.7	6.7	7.1
2012	7.8	6.2	NA	NA	NA	3.5	5.3	6.1	5.8	6.7	NA	NA
2013	NA	NA	NA	NA	NA	5.9	4.1	6.1	7.5	8	8.9	9.4
2014	8.9	7.8	7.2	6.9	8.9	7.5	6.5	6.1	6.9	6.8	9.5	8.8
2015	8.3	9.3	8.2	7.7	7.3	6.4	7.4	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: SENAMHI

ANEXO 4. Registro histórico de Caudales mensuales en la Estación Condorcerro

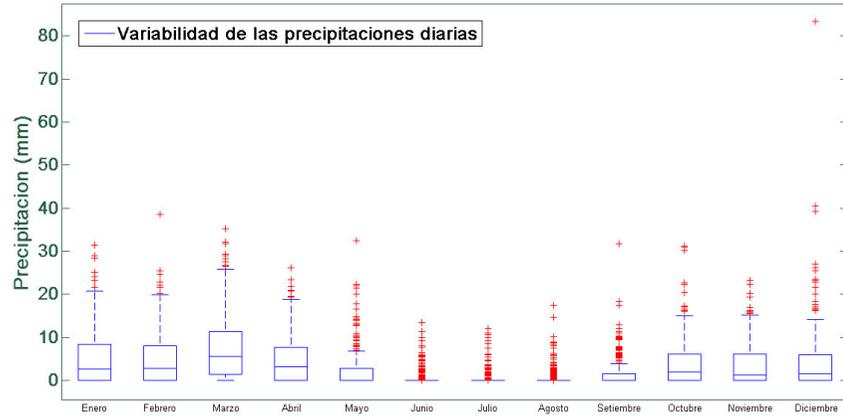
AÑOS	ESTACION CONDORCERRO (m3/seg)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2006	123.4	218.1	402.9	372.5	97.6	61.5	47.6	43.9	46.8	58.3	88.3	180.0
2007	217.5	196.6	322.7	327.7	115.3	60.0	46.6	44.4	40.2	63.5	106.8	90.8
2008	228.4	250.4	282.4	247.0	103.3	61.1	47.9	39.4	39.8	81.6	114.1	102.2
2009	247.9	412.8	491.7	442.3	134.3	68.3	56.3	51.2	51.5	95.2	148.2	276.8
2010	232.3	267.3	265.9	226.8	124.0	60.1	48.2	49.0	45.9	57.8	91.0	169.4
2011	211.0	212.9	205.9	278.8	97.5	53.5	41.2	43.9	40.1	44.7	83.9	184.5
2012	230.7	317.7	252.8	301.9	137.9	65.3	47.8	45.0	44.9	68.2	156.0	156.9
2013	187.7	261.7	488.2	233.5	337.9	53.6	46.0	45.1	46.7	99.2	105.8	219.1
2014	211.5	280.5	461.2	204.1	183.7	68.8	48.7	45.1	49.4	59.8	84.1	157.7
2015	273.8	249.5	380.7	239.1	158.1	72.1	46.9	47.6	53.2	67.4	90.2	144.4

ANEXO 5. Registro histórico de sedimentos en la Estación Condorcerro

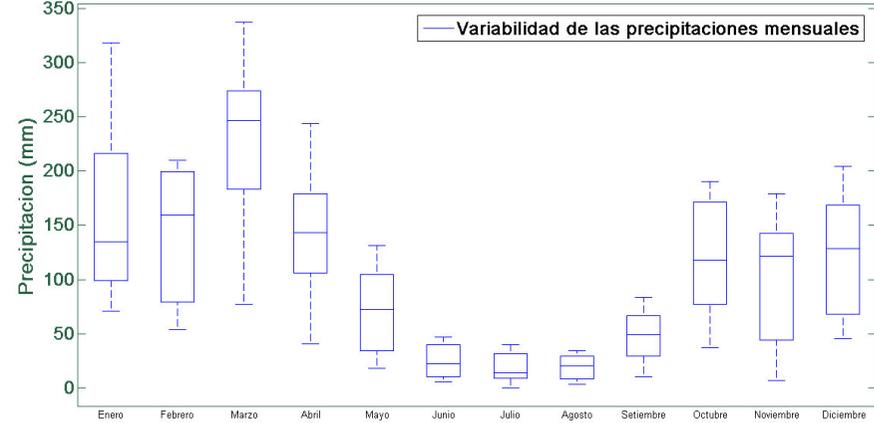
AÑOS	ESTACION CONDORCERRO (Millones .Ton)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2006	0.458158	1.861023	8.514593	6.598101	0.123796	0.028512	0.010818	0.012825	0.017302	0.042485	0.101722	0.318558
2007	1.107007	0.579603	3.628124	3.225416	0.183506	0.037184	0.023172	0.016617	0.015459	0.076916	0.200825	0.135507
2008	1.832416	1.728882	2.009356	1.325366	0.169116	0.034698	0.021242	0.018361	0.020721	0.203055	0.207960	0.087219
2009	1.492095	3.885865	6.002372	4.844045	0.190766	0.034539	0.022298	0.018966	0.022265	0.196232	0.458720	1.573051
2010	0.510016	0.943650	1.339905	1.176134	0.243190	0.027750	0.025884	0.030460	0.032265	0.045200	0.094551	0.462548
2011	0.598072	0.517978	0.591499	1.964537	0.069206	0.021423	0.021018	0.022158	0.019042	0.025507	0.080699	0.788236
2012	0.913221	3.115582	1.718965	2.112200	0.193456	0.024581	0.016393	0.012987	0.012813	0.053277	0.229382	0.206613
2013	0.198837	0.890653	5.883766	0.629738	0.255921	0.033108	0.022701	0.030452	0.024285	0.127870	0.063130	0.466691
2014	0.325391	1.171799	3.614061	0.367587	0.398319	0.015585	0.017276	0.017754	0.030908	0.029932	0.043008	0.346639
2015	1.035733	0.455124	3.405653	1.043038	0.269838	0.020983	0.010525	0.008432	0.012507	0.049180	0.061123	0.343760

ANEXO 6. Grafica de cajas de los datos de precipitación a nivel diario y mensual

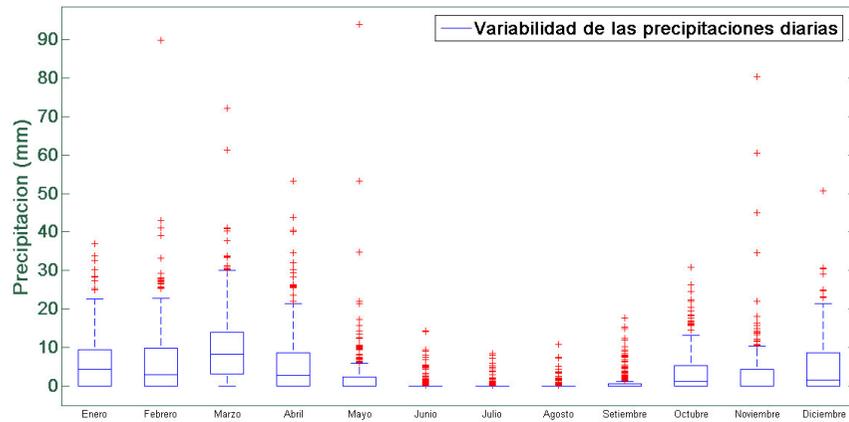
ESTACIÓN: QUIRUVILCA



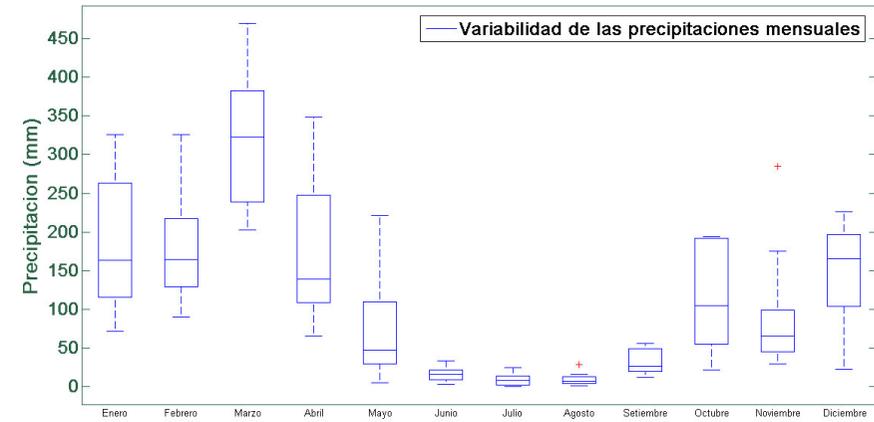
ESTACIÓN: QUIRUVILCA



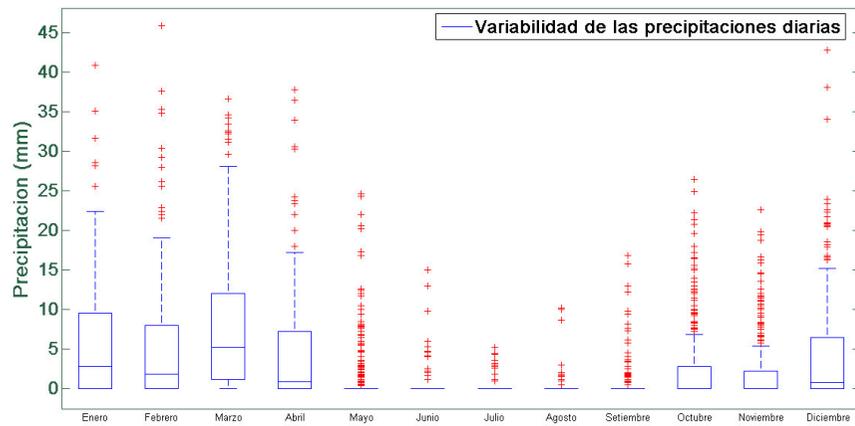
ESTACIÓN: HUACAMARCANGA



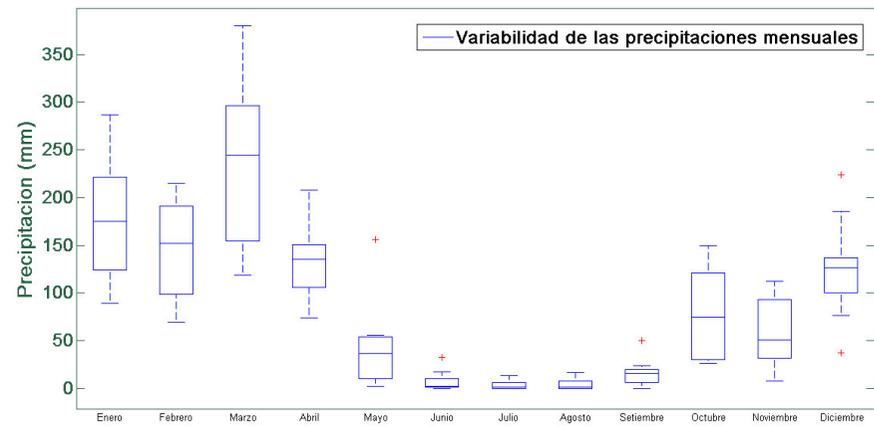
ESTACIÓN: HUACAMARCANGA



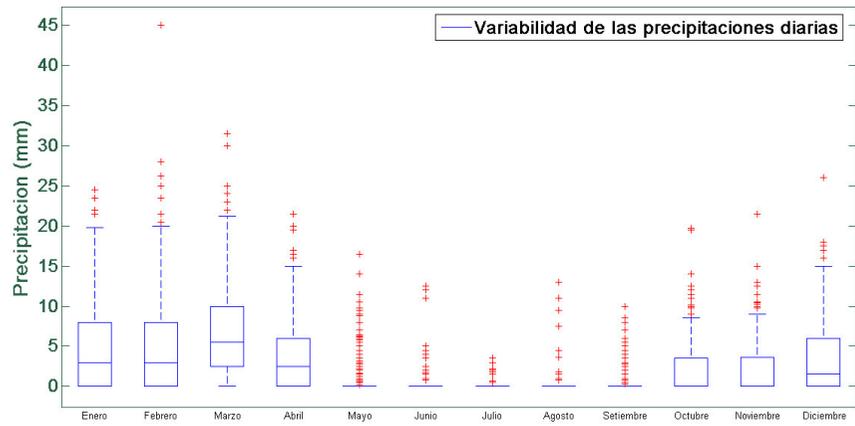
ESTACIÓN: CACHICADAN



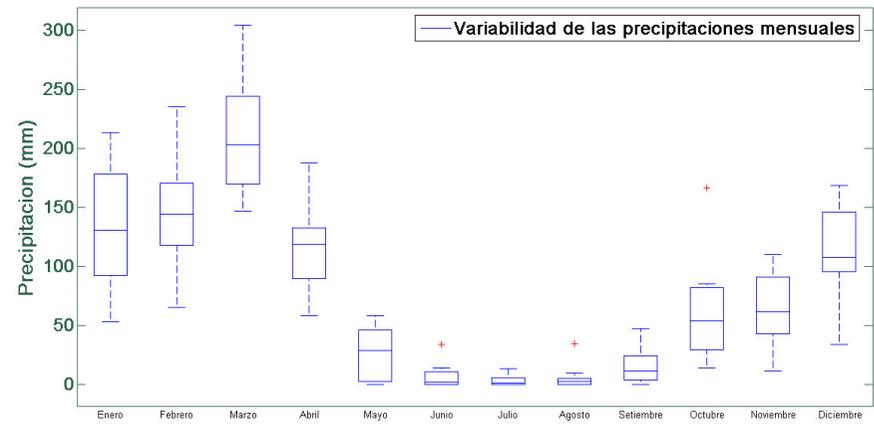
ESTACIÓN: CACHICADAN



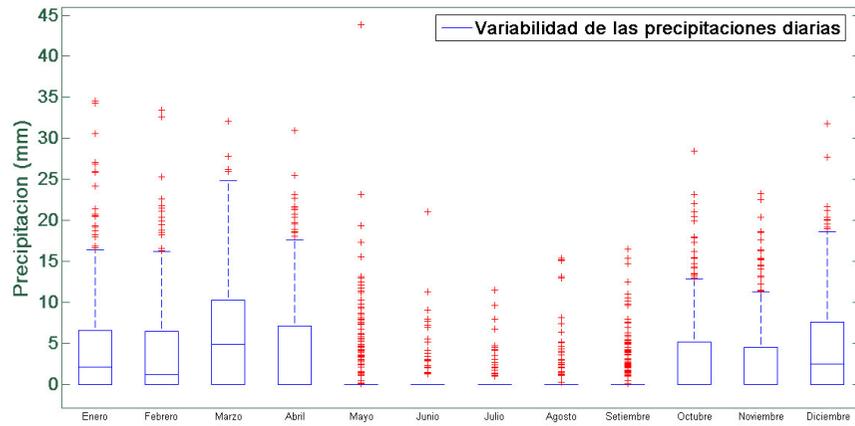
ESTACIÓN: CABANA



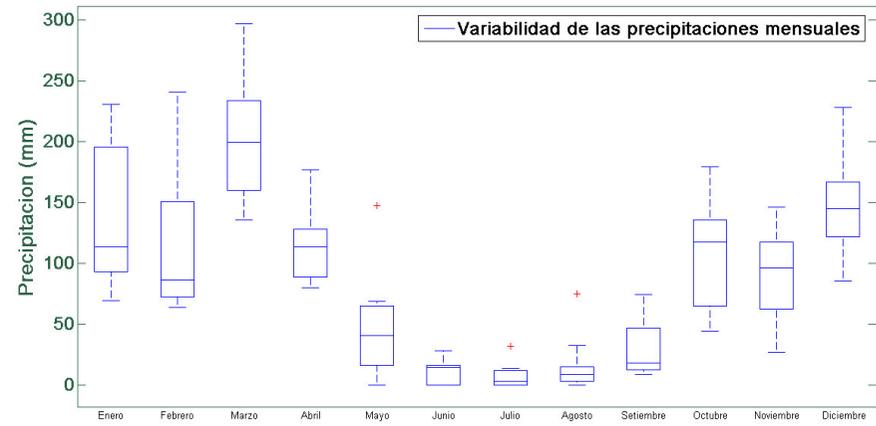
ESTACIÓN: CABANA



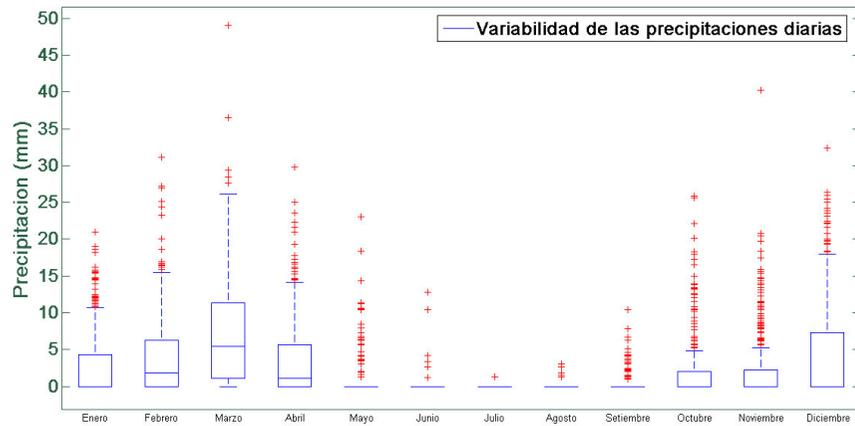
ESTACIÓN: SIHUAS



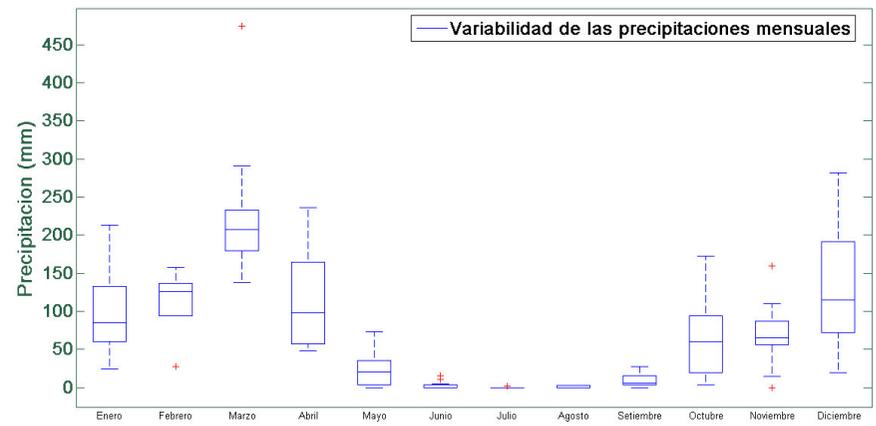
ESTACIÓN: SIHUAS



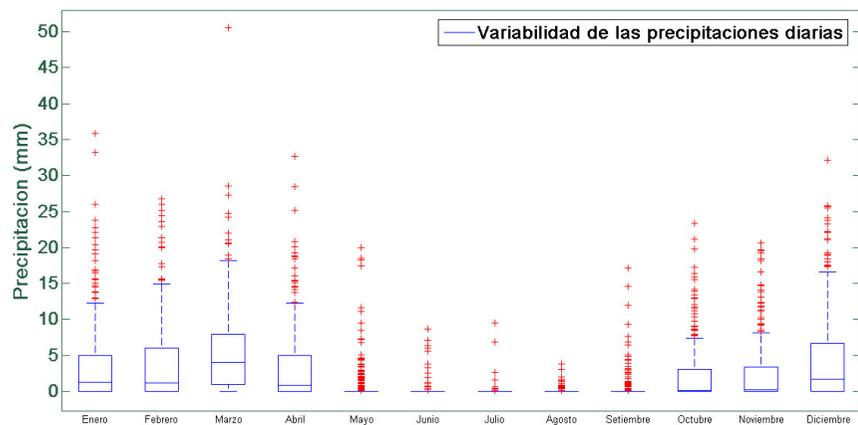
ESTACIÓN: YUNGAY



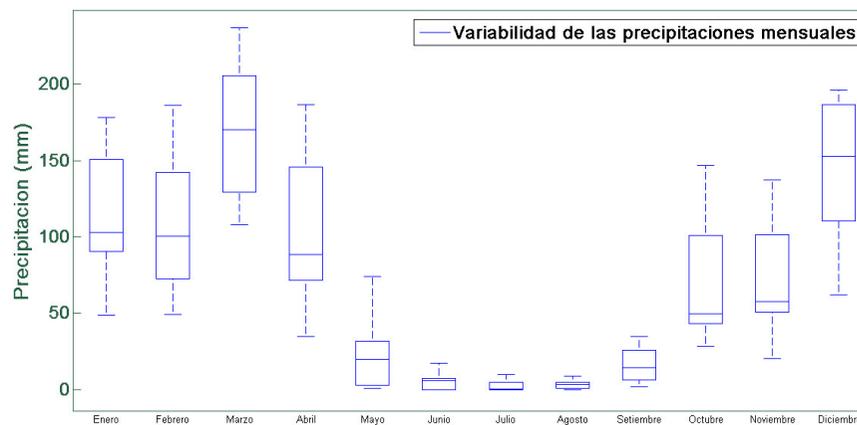
ESTACIÓN: YUNGAY



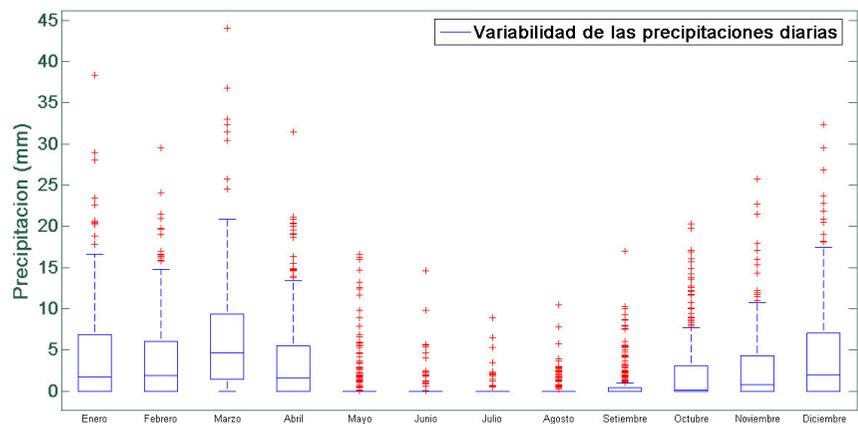
ESTACIÓN: SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO



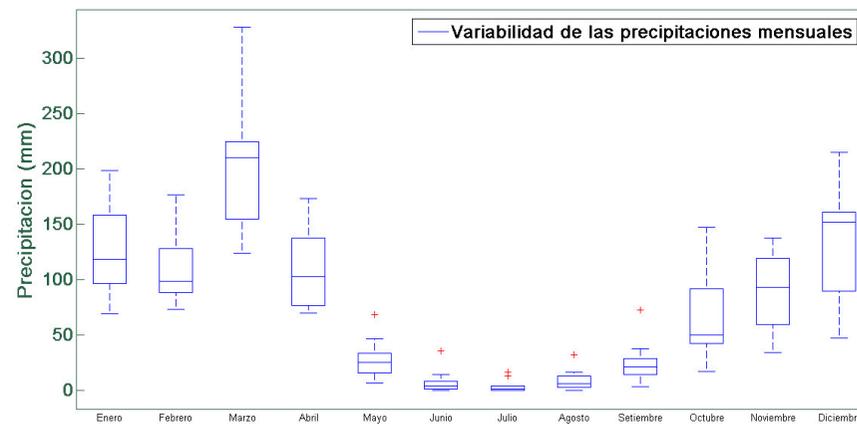
ESTACIÓN: SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO



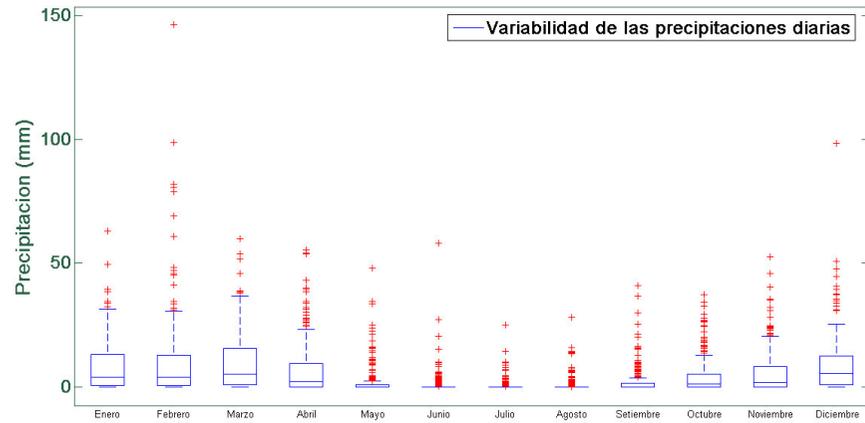
ESTACIÓN: RECUAY



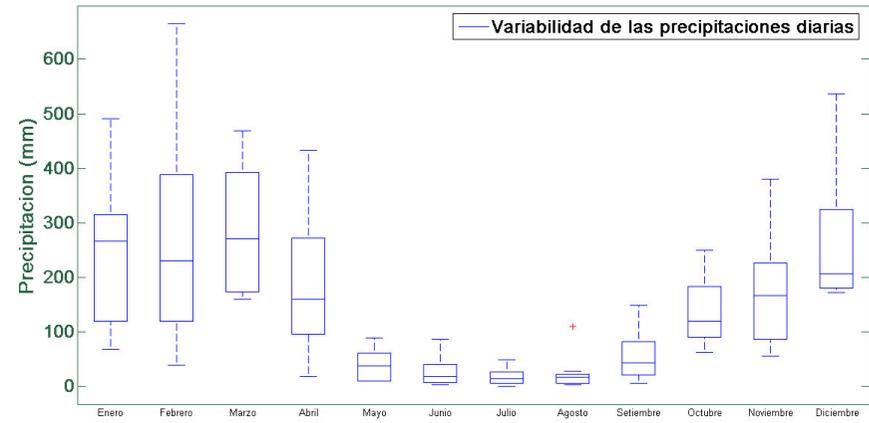
ESTACIÓN: RECUAY



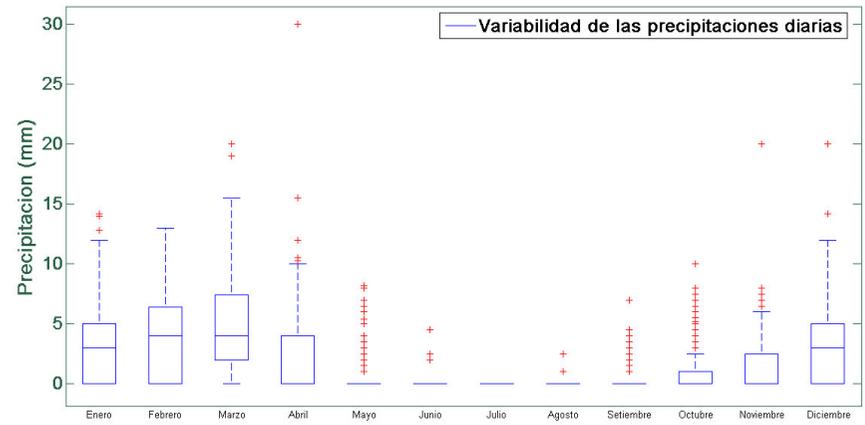
ESTACIÓN: MILPO



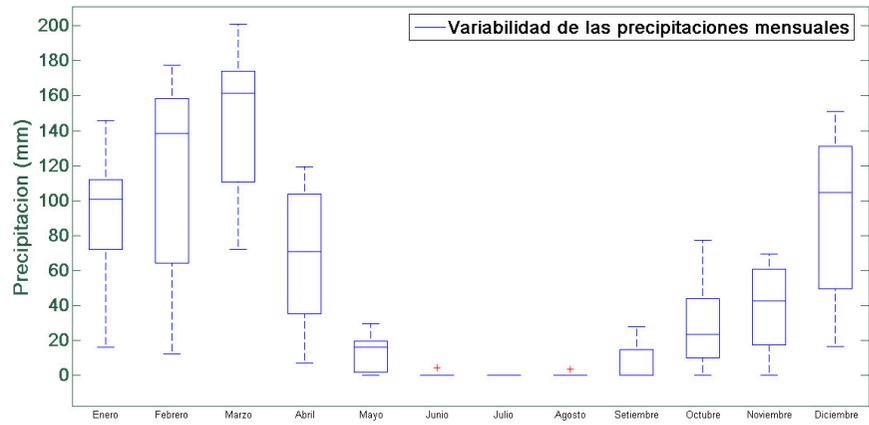
ESTACIÓN: MILPO



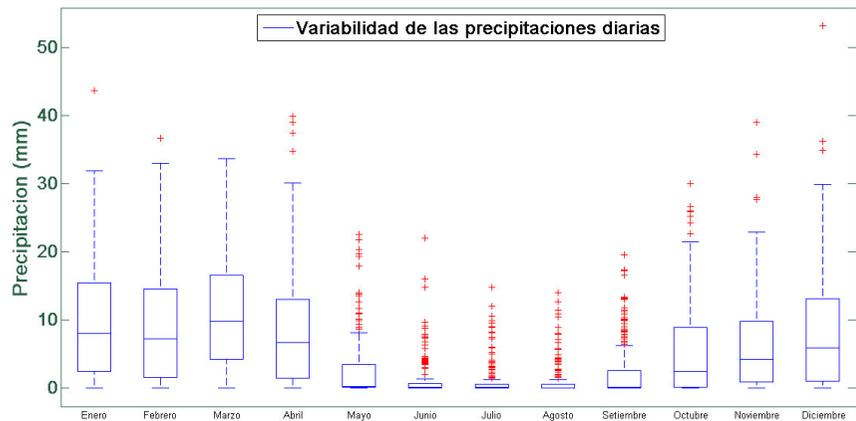
ESTACIÓN: CHIQUIAN



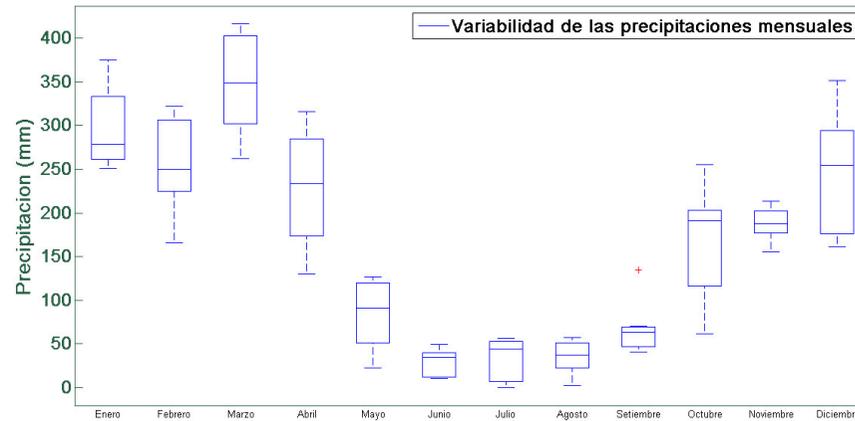
ESTACIÓN: CHIQUIAN



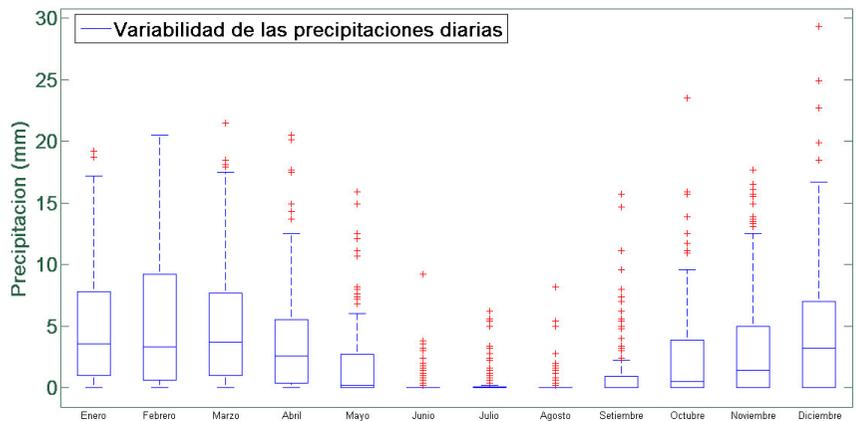
ESTACIÓN: YANAMAREY



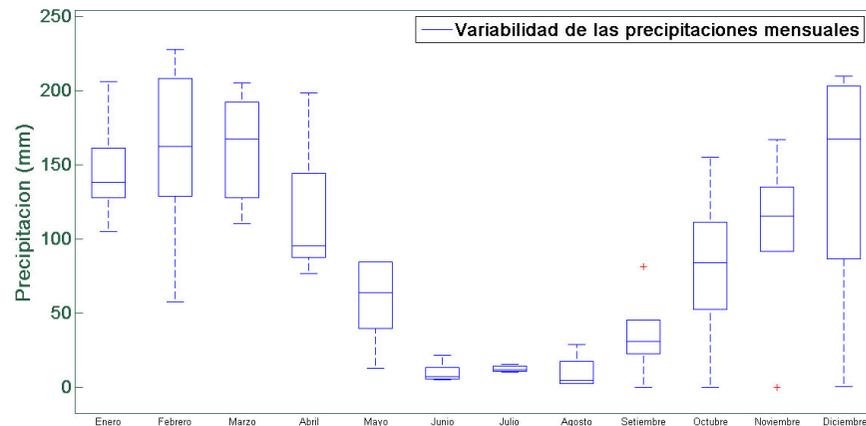
ESTACIÓN: YANAMAREY



ESTACIÓN: SHALLAP



ESTACIÓN: SHALLAP



ANEXO 7. Análisis de consistencia de las precipitaciones mensuales

Quiruvilca T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun09	Jul09-Dic13
Media	119.29	96.52
Desviacion Estandar	85.91	77.48
varianza	7380.53	6002.76
Numero de Datos	54.00	54.00
Varianza Agrupada	6759.92	
Grados de Libertad	106.00	
T calculado con (2 colas)	1.43	
T excel	-	
T tabla	2.00	
Resultado	CONSISTENTE	

Quiruvilca - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun09	Jul09-Dic13
Media	119.29	96.52
Desviacion Estandar	85.91	77.48
Varianza	7380.53	6002.76
Observaciones	54.00	54.00
Varianza Agrupada	6759.92	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	53.00	53.00
F calculado	1.23	
F tabla	1.57	
Resultado	CONSISTENTE	

Huacamarcanga - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	110.98	115.60
Desviacion Estandar	102.61	115.07
varianza	10529.64	13240.55
Numero de Datos	66.00	66.00
Varianza Agrupada	11799.74	
Grados de Libertad	130.00	
T calculado con (2 colas)	0.24	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Huacamarcanga - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	110.98	115.60
Desviacion Estandar	102.61	115.07
Varianza	10529.64	13240.55
Observaciones	66.00	66.00
Varianza Agrupada	11799.74	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	65.00
F calculado	1.26	
F tabla	1.51	
Resultado	CONSISTENTE	

Cachicadan - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	85.88	84.42
Desviacion Estandar	86.43	86.87
varianza	7469.83	7546.65
Numero de Datos	66.00	66.00
Varianza Agrupada	7451.46	
Grados de Libertad	130.00	
T calculado con (2 colas)	0.10	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Cachicadan - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	85.88	84.42
Desviacion Estandar	86.43	86.87
Varianza	7469.83	7546.65
Observaciones	66.00	66.00
Varianza Agrupada	7451.46	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	65.00
F calculado	1.01	
F tabla	1.51	
Resultado	CONSISTENTE	

Cabana - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	74.00	77.69
Desviacion Estandar	75.92	70.50
varianza	5764.41	4970.22
Numero de Datos	66.00	63.00
Varianza Agrupada	5338.13	
Grados de Libertad	127.00	
T calculado con (2 colas)	0.28	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Cabana - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	74.00	77.69
Desviacion Estandar	75.92	70.50
Varianza	5764.41	4970.22
Observaciones	66.00	63.00
Varianza Agrupada	5338.13	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	62.00
F calculado	1.16	
F tabla	1.52	
Resultado	CONSISTENTE	

Sihuas - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	89.21	82.91
Desviacion Estandar	73.22	69.29
varianza	5360.98	4800.59
Numero de Datos	66.00	64.00
Varianza Agrupada	5055.74	
Grados de Libertad	128.00	
T calculado con (2 colas)	0.50	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Sihuas - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	89.21	82.91
Desviacion Estandar	73.22	69.29
Varianza	5360.98	4800.59
Observaciones	66.00	64.00
Varianza Agrupada	5055.74	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	63.00
F calculado	1.12	
F tabla	1.52	
Resultado	CONSISTENTE	

Yungay - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	73.08	66.32
Desviacion Estandar	89.48	73.56
varianza	8006.18	5410.40
Numero de Datos	66.00	63.00
Varianza Agrupada	6697.83	
Grados de Libertad	127.00	
T calculado con (2 colas)	0.46	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Yungay - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	73.08	66.32
Desviacion Estandar	89.48	73.56
Varianza	8006.18	5410.40
Observaciones	66.00	63.00
Varianza Agrupada	6697.83	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	62.00
F calculado	1.48	
F tabla	1.52	
Resultado	CONSISTENTE	

Santiago Antunez de Mayolo - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	71.61	70.16
Desviacion Estandar	67.75	63.44
varianza	4590.19	4024.83
Numero de Datos	66.00	57.00
Varianza Agrupada	4293.58	
Grados de Libertad	121.00	
T calculado con (2 colas)	0.12	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Santiago Aantunez de Mayolo - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	71.61	70.16
Desviacion Estandar	67.75	63.44
Varianza	4590.19	4024.83
Observaciones	66.00	57.00
Varianza Agrupada	4293.58	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	56.00
F calculado	1.14	
F tabla	1.54	
Resultado	CONSISTENTE	

Recuay - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	80.32	70.13
Desviacion Estandar	71.13	64.99
varianza	5059.21	4224.01
Numero de Datos	65.00	64.00
Varianza Agrupada	4634.76	
Grados de Libertad	127.00	
T calculado con (2 colas)	0.84	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Recuay - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	80.32	70.13
Desviacion Estandar	71.13	64.99
Varianza	5059.21	4224.01
Observaciones	65.00	64.00
Varianza Agrupada	4634.76	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	64.00	63.00
F calculado	1.20	
F tabla	1.52	
Resultado	CONSISTENTE	

Milpo - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	126.16	171.16
Desviacion Estandar	123.07	151.77
varianza	15145.53	23033.19
Numero de Datos	66.00	54.00
Varianza Agrupada	19036.57	
Grados de Libertad	118.00	
T calculado con (2 colas)	1.78	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Milpo - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	126.16	171.16
Desviacion Estandar	123.07	151.77
Varianza	15145.53	23033.19
Observaciones	66.00	54.00
Varianza Agrupada	19036.57	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	53.00
F calculado	1.52	
F tabla	1.53	
Resultado	INCONSISTENTE	

Chiquian - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	54.33	47.55
Desviacion Estandar	57.72	58.08
varianza	3331.15	3372.84
Numero de Datos	66.00	66.00
Varianza Agrupada	3338.00	
Grados de Libertad	130.00	
T calculado con (2 colas)	0.67	
T excel	-	
T tabla	1.96	
Resultado	CONSISTENTE	

Chiquian - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	54.33	47.55
Desviacion Estandar	57.72	58.08
Varianza	3331.15	3372.84
Observaciones	66.00	66.00
Varianza Agrupada	3338.00	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	65.00	65.00
F calculado	1.01	
F tabla	1.51	
Resultado	CONSISTENTE	

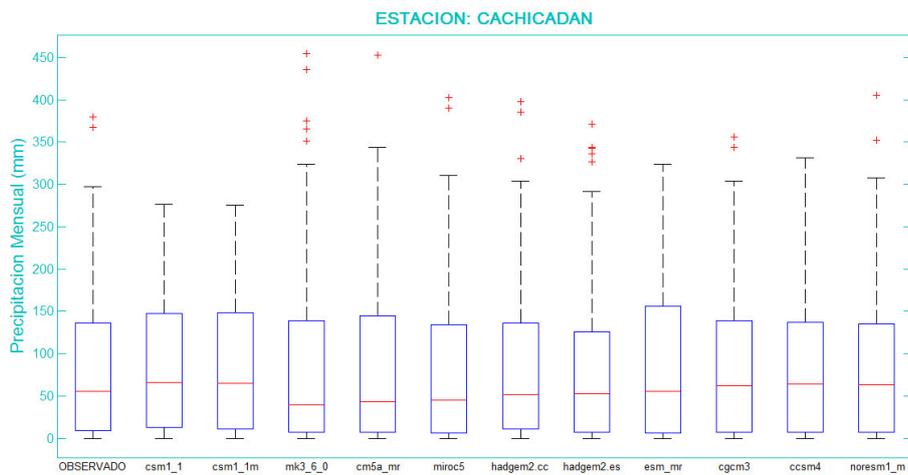
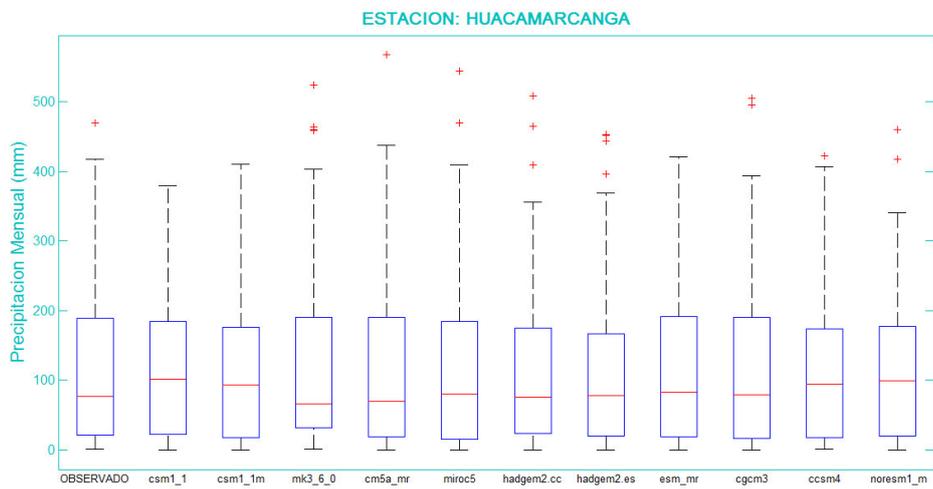
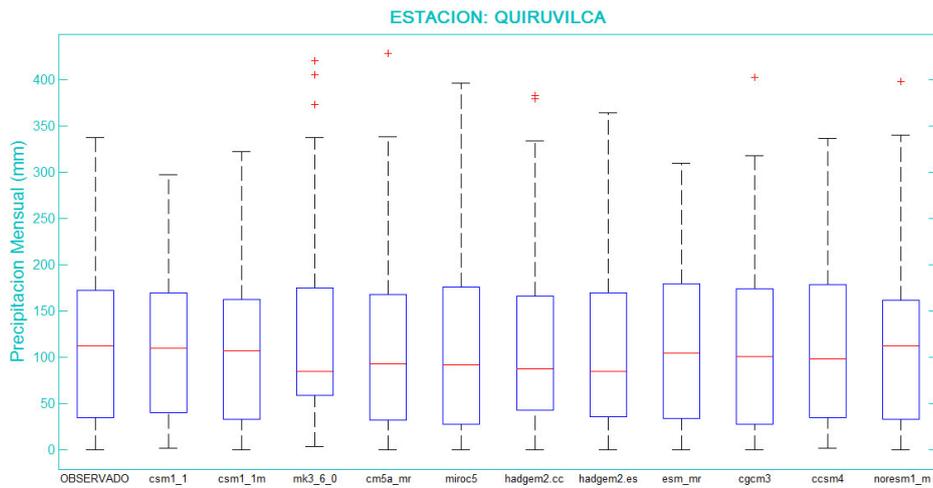
Yanamarey - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	162.33	171.54
Desviacion Estandar	120.49	115.42
varianza	14517.62	13321.16
Numero de Datos	52.00	44.00
Varianza Agrupada	13844.57	
Grados de Libertad	94.00	
T calculado con (2 colas)	0.38	
T excel	-	
T tabla	2.00	
Resultado	CONSISTENTE	

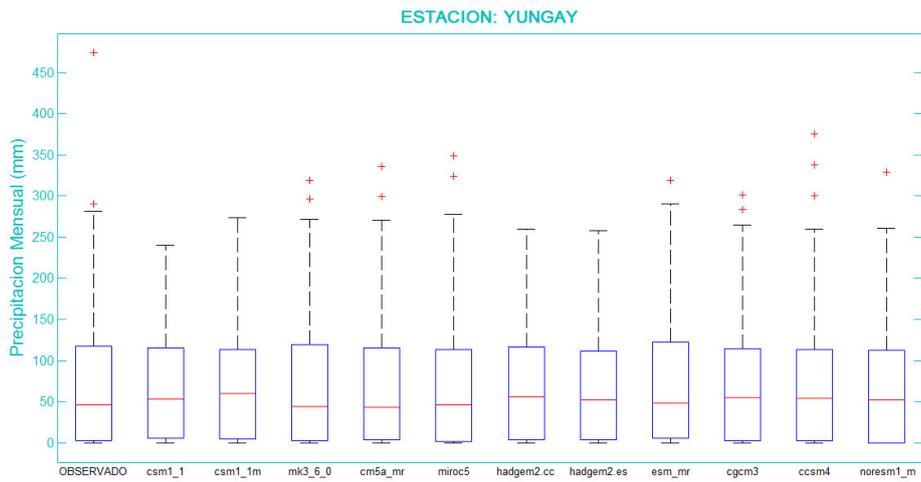
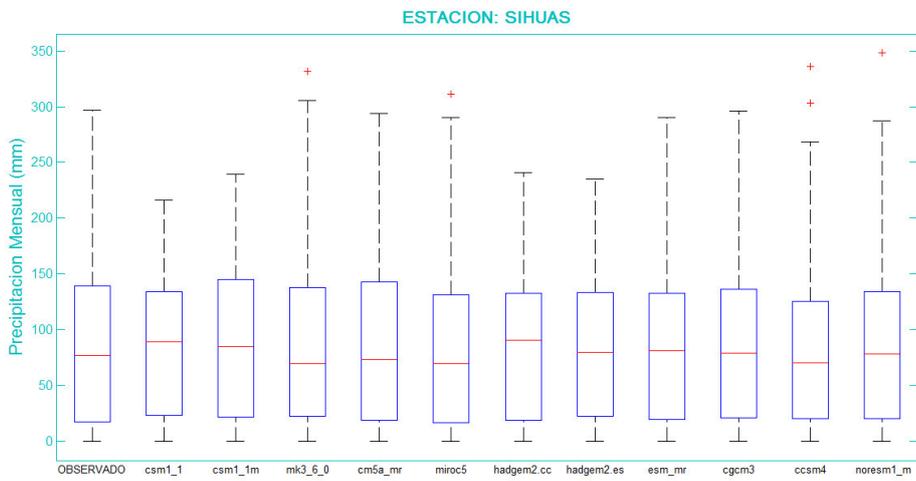
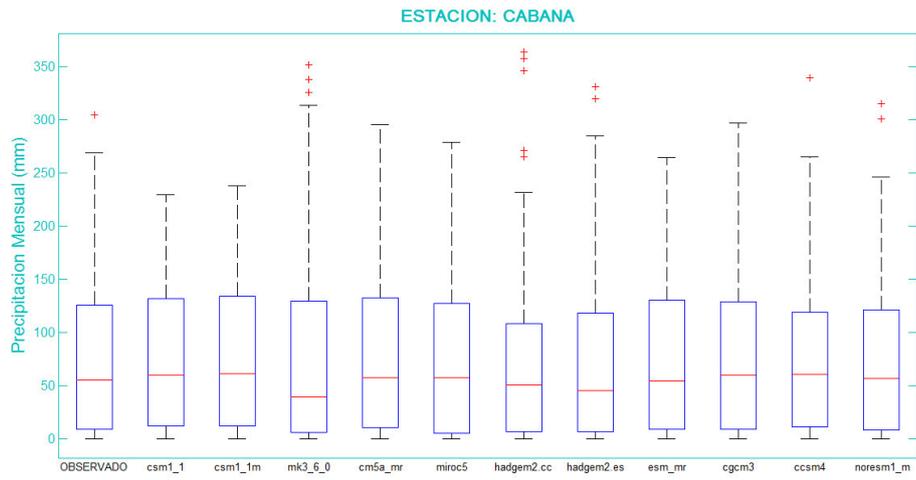
Yanamarey - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	162.33	171.54
Desviacion Estandar	120.49	115.42
Varianza	14517.62	13321.16
Observaciones	52.00	44.00
Varianza Agrupada	13844.57	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	51.00	43.00
F calculado	1.09	
F tabla	1.64	
Resultado	CONSISTENTE	

Shallap - T de STUDENT		
PRUEBA T	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	99.52	88.46
Desviacion Estandar	71.71	67.79
varianza	5142.96	4595.36
Numero de Datos	28.00	30.00
Varianza Agrupada	4805.20	
Grados de Libertad	56.00	
T calculado con (2 colas)	0.59	
T excel	-	
T tabla	2.02	
Resultado	CONSISTENTE	

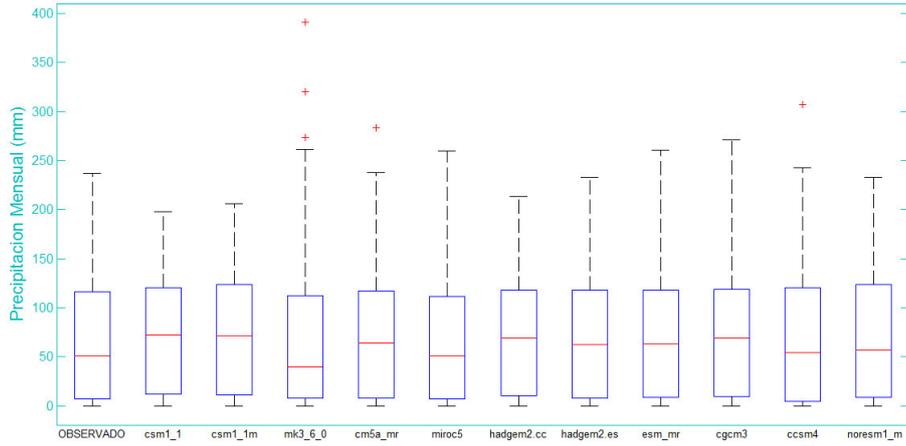
Shallap - F DE FISHER		
PRUEBA F	Ene05-Jun10	Jul10-Dic15
Media	99.52	88.46
Desviacion Estandar	71.71	67.79
Varianza	5142.96	4595.36
Observaciones	28.00	30.00
Varianza Agrupada	4805.20	
Diferencia Hipotetica de las Medias	0	
Grados de Libertad	27.00	29.00
F calculado	1.12	
F tabla	1.88	
Resultado	CONSISTENTE	

ANEXO 8. Diagrama de cajas de los datos de precipitación Observada y Proyectadas

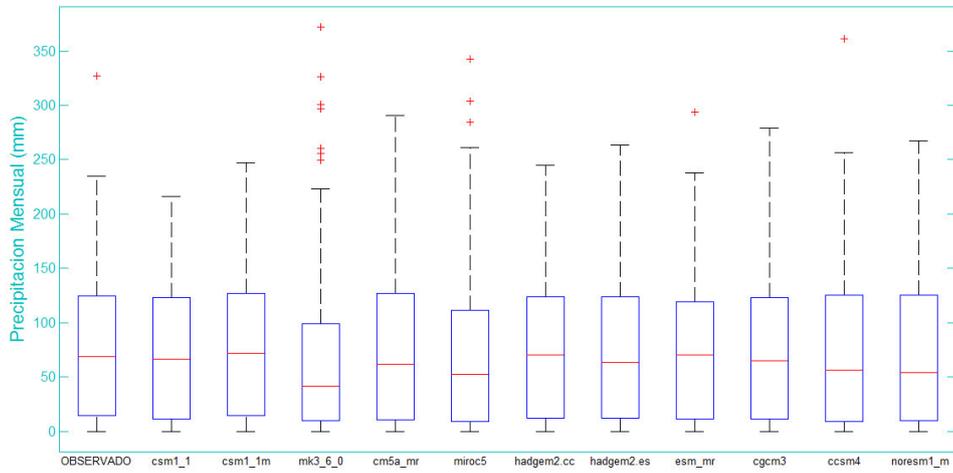




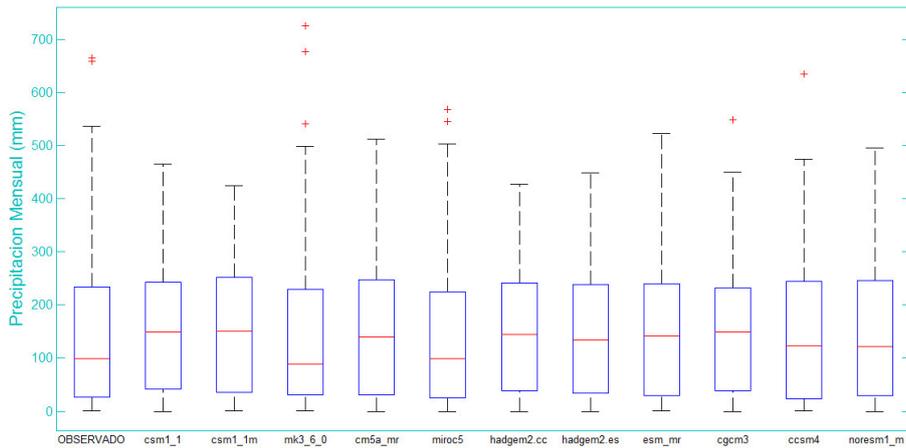
ESTACION: SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO

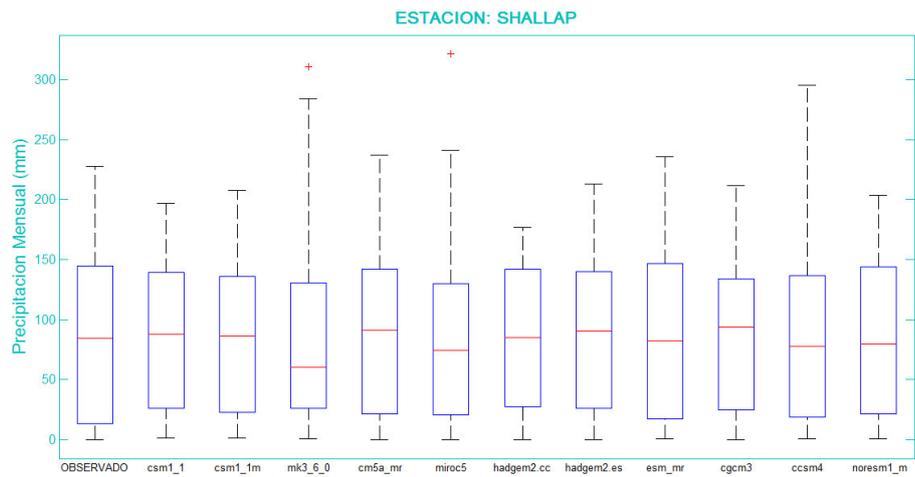
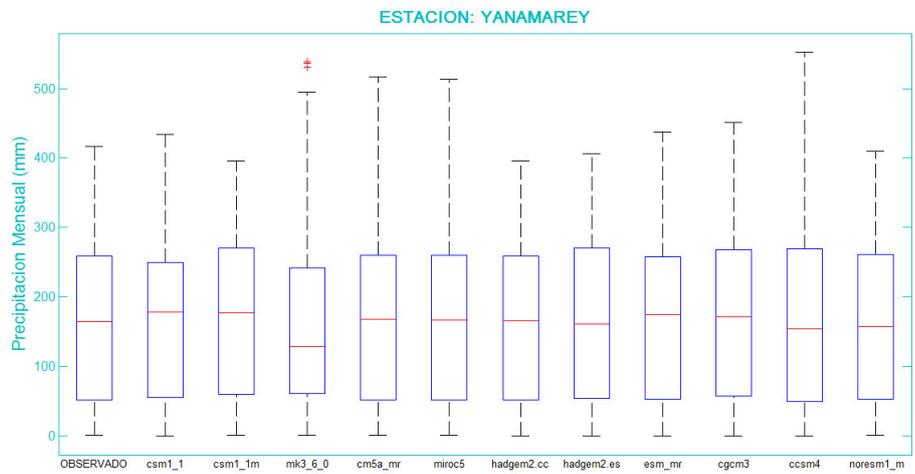
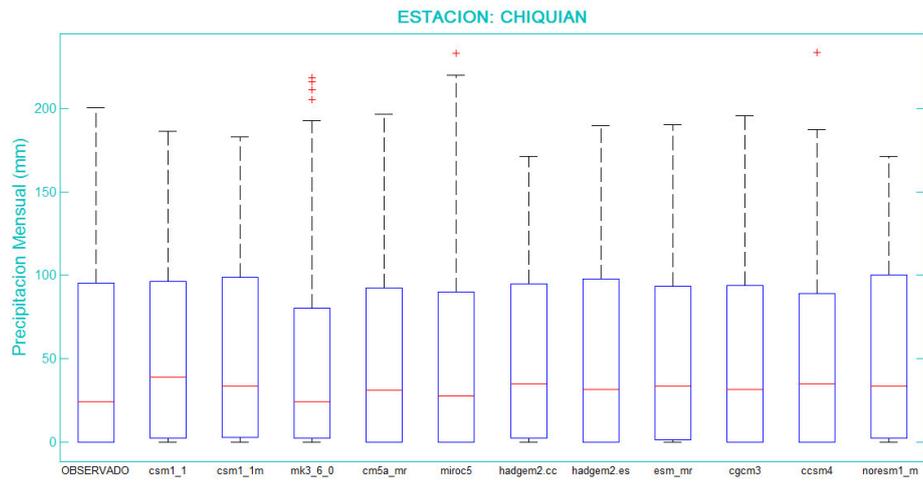


ESTACION: RECUAY

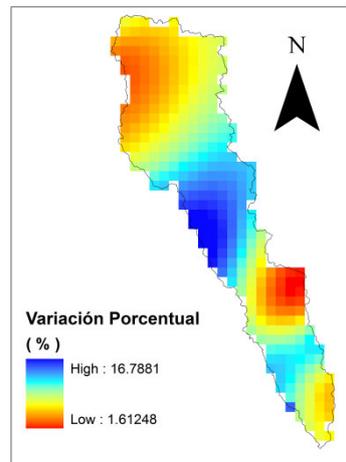
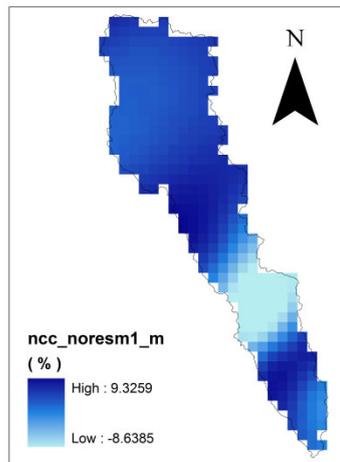
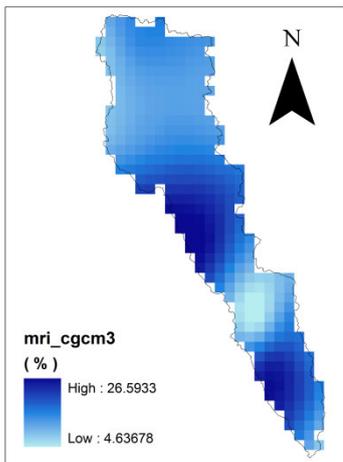
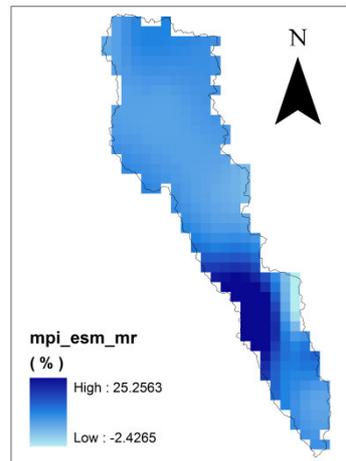
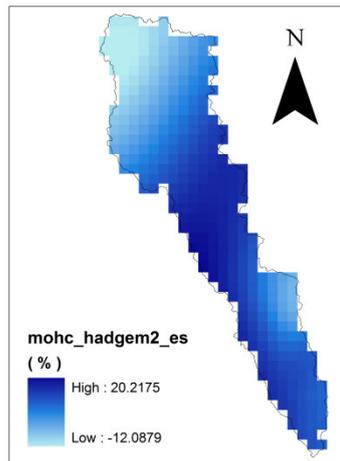
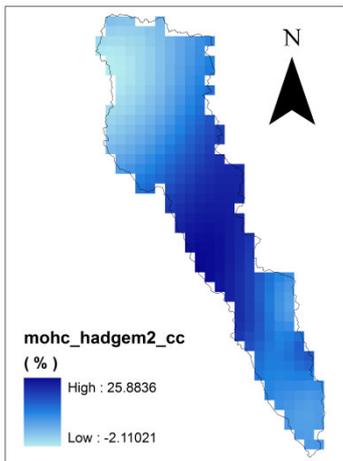
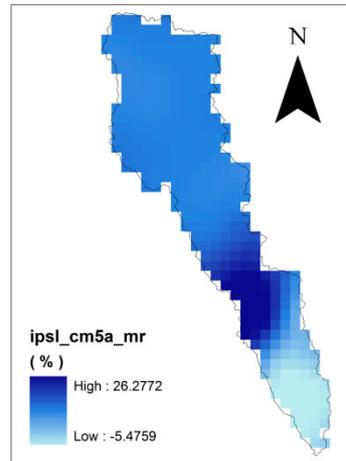
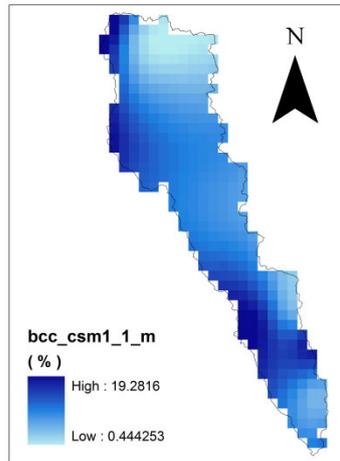
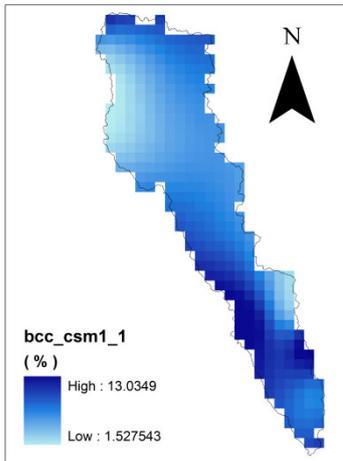


ESTACION: MILPO





ANEXO 9. Graficas de variación porcentual de las precipitaciones Modelos Proyectados



ANEXO 10. Variación relativa de caudales para probabilidades de excedencia

