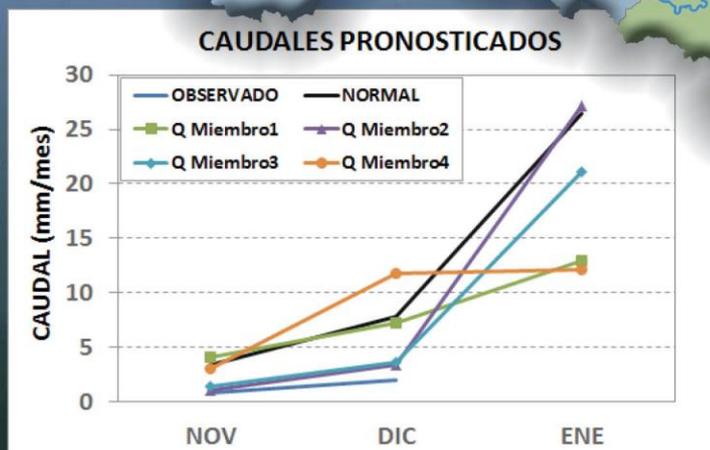
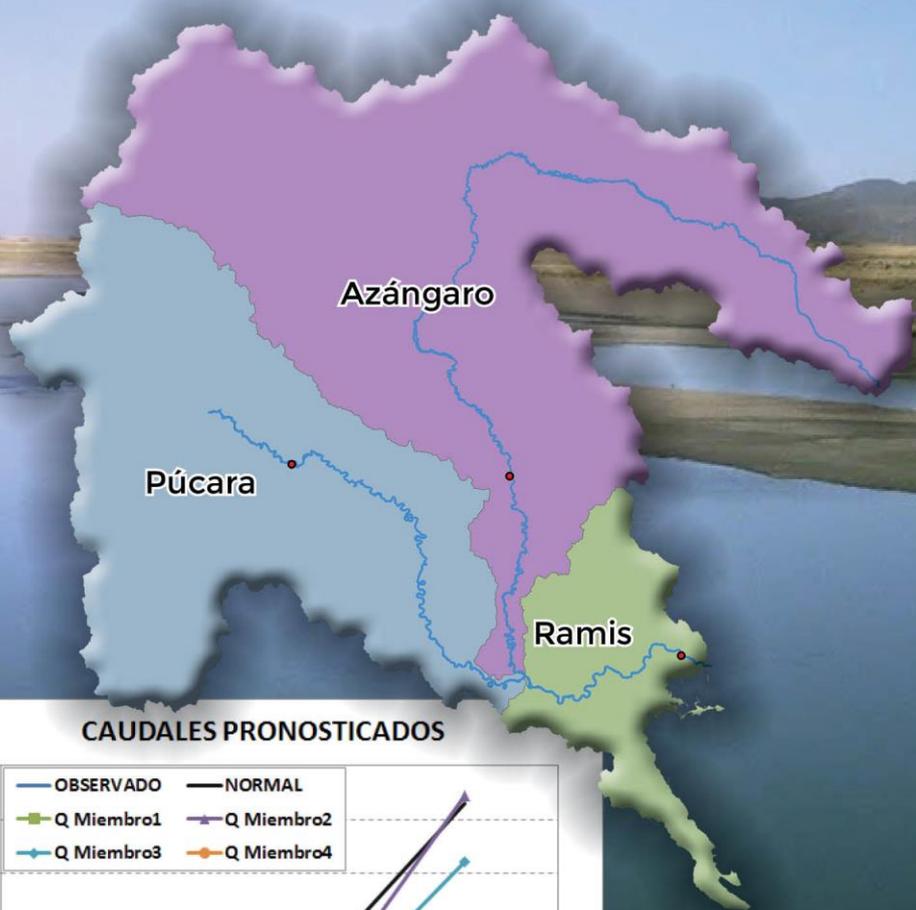


MODELAMIENTO HIDROLÓGICO PARA PRONÓSTICO ESTACIONAL DE CAUDALES DEL RÍO RAMIS



MODELAMIENTO HIDROLÓGICO PARA PRONÓSTICO ESTACIONAL DE CAUDALES DEL RÍO RAMIS





DIRECTORIO

PhD. Ken Takahashi Guevara
Presidente Ejecutivo del SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI

Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI

REVISOR DEL ESTUDIO
Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte
Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del
SENAMHI

RESPONSABLE DEL ESTUDIO
Mg. Sc. Luis Metzger Terrazas
Especialista en Hidrología del SENAMHI

EDICIÓN, DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
Miriam Casaverde Riveros
Especialista en Hidrología VI del SENAMHI

Lima-Perú
Diciembre - 2017

Citar como:

Metzger, J. Modelamiento Hidrológico para Pronóstico estacional de caudales del río Ramis. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Diciembre, 2017.

ÍNDICE

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. JUSTIFICACION.....	5
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Parámetros Fisiográficos	6
2.1.1. Parámetros de Forma	7
2.1.2. Parámetros de Relieve.....	7
2.1.3. Parámetros relativos a la red hidrográfica.....	9
2.2. Tiempo de concentración.....	10
2.3. Datos PISCO.....	10
2.4. Modelo hidrológico GR2M	11
2.5. Medidas de bondad de ajuste.....	13
2.5.1. NASH.....	13
2.5.2. RMSE.....	13
2.5.3. R.....	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Area de Estudio	14
3.1.1. Ubicación geográfica.....	14
3.1.2. Clima	15
3.1.3. Zonas de vida	17
3.1.4. Cobertura vegetal	18
3.1.5. Capacidad de uso de suelo	19
3.1.6. Hidrología.....	20
3.2. Información Utilizada	22
3.2.1. Selección de estaciones	22
3.2.2. Ubicación de estaciones	22
3.2.3. Periodo de información empleado	24
3.3. Metodología	27
3.3.1. Control de calidad de los datos.....	27
3.3.2. Parámetros fisiográficos de la cuenca Ramis.....	28
3.3.3. Estimación de la precipitación media	28
3.3.4. Pronóstico de precipitación del modelo WRF.....	29
3.3.5. Flujograma Metodológico.....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	40
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca.....	7
Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca	8
Figura 2-3 Curvas hipsométricas características	8
Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas.....	9
Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca	9
Figura 2-6 Flujograma de generación de PISCO producto precipitación	11
Figura 2-7 Esquema de la estructura del modelo hidrológico GR2M	12
Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Ramis.....	15
Figura 3-2 Precipitación anual en la cuenca del río Ramis periodo (1966-2016).....	16
Figura 3-3 Temperatura media anual en la cuenca Ramis periodo (1966-2016).....	17
Figura 3-4 Zonas de vida en la cuenca del río Ramis.....	18
Figura 3-5 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Ramis.....	19
Figura 3-6 Capacidad de uso de suelo en la cuenca del río Ramis	20
Figura 3-7 Principales ríos en la cuenca Ramis.....	21
Figura 3-8 Precipitación mensual en la cuenca Ramis	22
Figura 3-9 Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca Ramis.....	23
Figura 3-10 Series de tiempo utilizadas para la calibración del modelo GR2M	25
Figura 3-11 Series de tiempo utilizadas para la validación del modelo GR2M	26
Figura 3-12 Curvas de doble masa de estaciones pluviométricas en la cuenca Ramis.....	27
Figura 3-13 Precipitación areal estimada en la cuenca Ramis con el método inverso de la distancia	28
Figura 3-14 Pronóstico de precipitación (miembro1) para nov-dic-ene 2018 a nivel nacional	29
Figura 3-15 Precipitación normal observada para noviembre-diciembre-enero a nivel nacional.....	29
Figura 3-16 Diagrama de flujo de la metodología para el modelamiento hidrológico de la cuenca Ramis.....	30
Figura 4-1 Precipitación media areal mensual en la cuenca Ramis	31
Figura 4-2 Evapotranspiración media mensual en la cuenca Ramis	31
Figura 4-3 Caudal medio mensual en la cuenca Ramis	31
Figura 4-4 Pronóstico de precipitación WRF (Nov-Ene) Vs. Precipitación observada en la cuenca Ramis.....	33
Figura 4-5 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación aritmética.....	34
Figura 4-6 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Inv. Distancia.....	34
Figura 4-7 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Krigging	34
Figura 4-8 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Thiessen	35
Figura 4-9 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación PISCO.....	35
Figura 4-10 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación aritmética.....	36
Figura 4-11 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Inv. Distancia	36
Figura 4-12 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Krigging.....	36
Figura 4-13 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Thiessen	37
Figura 4-14 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación PISCO	37
Figura 4-15 Pronóstico de caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (Nov-Dic-Ene).....	38
Figura 4-16 Pronóstico del caudal para los noviembre y diciembre 2017 y enero 2018 generado con el pronóstico WRF (miembros 1, 2, 3 y 4)	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Valores referenciales de NASH.....	13
Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Ramis	24
Tabla 3-2 Estación hidrológica ubicada en la cuenca Ramis	24
Tabla 3-3 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Ramis	28
Tabla 4-1 Resultados de la calibración y validación con el modelo GR2M	32
Tabla 4-2 Rango de los parámetros del modelo GR2M	32
Tabla 4-3 Puntos pronosticados por el modelo WRF en la cuenca Ramis	33

RESUMEN

El Estudio modelamiento hidrológico para pronóstico estacional de caudales del río Ramis (ubicada en la Región hidrográfica del Titicaca y pertenece al Sistema TDPS Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa con una extensión superficial de 15408,027 Km²), señala como una herramienta operacional al modelo GR2M agregado que simula caudales en intervalos mensuales, fue calibrado y validado con información hidrometeorológica terrena de la base de datos de SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). Cabe mencionar que los datos de precipitación histórica han pasado por un control de calidad riguroso, resultando información consistente.

Se concluye, que la cuenca Ramis presenta 10 estaciones con información de precipitación: Ananea, Arapa, Azangaro, Chuquibambilla, Crucero, Huancane, Llally, Mañazo, Pampahuta y Yauri en el período de 22 años entre los años 1994 a 2015, consistente basado en el análisis de doble masa. Asimismo el modelo hidrológico GR2M simuló de forma eficiente los eventos de avenida y estiaje del caudal observado, obteniéndose un NASH de 82% para la etapa de calibración y 80.7% para la etapa de validación. La base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations Precipitación v2.0) se utilizó como datos de entrada para el modelamiento, y se ha obtenido un buen desempeño en la etapa de calibración pero ha sido el menos eficiente en la etapa de validación.

Finalmente, el pronóstico de caudal en el periodo noviembre y diciembre 2017 y enero 2018, evaluado para 4 ventanas/miembros resultó que los miembros 1 y 4 han sobreestimado los pronósticos en noviembre y diciembre 2017, el miembro 2 ha pronosticado muy bien el caudal de noviembre 2017 y el miembro 3 ha generado mejores pronósticos de caudal que los miembros 1 y 4 pero no tan bueno como el miembro 2.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio ha sido elaborado por la Dirección de Hidrología del SENAMHI a través de la Subdirección de estudios e investigaciones hidrológicas, la cual se encarga de desarrollar tres líneas de investigación: asimilación de datos y construcción de información hidrometeorológica, hidroclimatología y modelamiento hidrológico e hidráulico, con el fin de generar y difundir información hidrológica que pueda ser útil para fines de prevención y planificación de los recursos hídricos por parte de las autoridades correspondientes.

En el marco de las actividades del Plan Operativo Institucional 2017 que realiza la Dirección de Hidrología, se ha programado el “Estudio de modelamiento hidrológico para el pronóstico estacional del caudal del río Ramis”, el cual ha permitido realizar un primer análisis de la información disponible en la cuenca.

Un aspecto muy importante en la elaboración de todo estudio tiene que ver con la calidad de la información que se va utilizar, por lo general se requiere que la información sea representativa de la zona de estudio y también debe tener un registro de datos lo suficientemente largo como para estimar el comportamiento promedio de las variables hidrometeorológicas, por este motivo se ha considerado un ítem para evaluar la calidad de los datos.

Un aspecto muy importante en la elaboración de todo estudio tiene que ver con el control de calidad de la información de entrada al modelo hidrológico, por lo general se requiere que la información sea representativa de la zona de estudio y también debe tener un registro de datos lo suficientemente largo como para estimar el comportamiento promedio de las variables hidrometeorológicas, por este motivo se ha considerado un ítem para evaluar la calidad de los datos; así como para calibración y validación del modelo hidrológico GR2M seleccionado por sus bajo requerimiento de datos, para la performance del GR2M se evaluado con los estadísticos NASH, r (coeficiente de correlación) y RMSE (error de la raíz cuadrada media).

Es así, que se ha logrado obtener el modelo hidrológico GR2M (modelo que hace simplificaciones en el modelamiento de cuencas, como la homogeneidad de procesos que es característico de los modelos agregados) calibrado y validado operativo y eficiente para realizar el pronóstico estacional del caudal del río Ramis, respecto al punto de control hidrométrico Puente Carretera Ramis, esta herramienta requiere como datos de entrada la precipitación y caudales observados; y el pronóstico de precipitación trimestral.

1.1. JUSTIFICACION

La cuenca del río Ramis está ubicada en la región del altiplano, que es una zona en la cual se ha observado un gradual proceso de desertificación (**Rivasplata, 2012**) debido en gran medida a la disminución de las precipitaciones.

En ese sentido es importante y necesario el monitoreo permanente y el pronóstico del caudal del río Ramis, con el fin de determinar posibles anomalías en el comportamiento del caudal; esta información será de gran utilidad para los tomadores de decisión ya que podrán tomar las acciones

correspondientes con fines de planificación los impactos negativos y positivos de los eventos de origen hidrometeorológico, sustentada en información técnica.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M con fines de pronóstico estacional de caudal en la cuenca del río Ramis.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar toda la información hidrometeorológica en la cuenca Ramis.
- Realizar el análisis de la calidad de los datos hidrometeorológicos disponibles.
- Evaluar los pronósticos de precipitación mensual del modelo WRF.
- Evaluar la performance del modelo hidrológico GR2M.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Parámetros Fisiográficos

Las características fisiográficas de la cuenca pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La cuenca como unidad dinámica natural es un sistema hidrológico en el que se reflejan acciones recíprocas entre parámetros y variables. Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidas como entradas y salidas al sistema, tales como: precipitación, escorrentía directa, evaporación, infiltración, transpiración; y variables de estado, tales como: contenido de humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros.

Los parámetros en cambio permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfométricas de la cuenca. En general, las variables del sistema hidrológico cambian de tormenta a tormenta, en contraste con los parámetros que permanecen invariables. En hidrología superficial existe una relación muy estrecha entre parámetros y variables, relaciones que son muy bien aprovechadas por el ingeniero para solucionar problemas cuando se carece de información hidrológica en la zona de estudio.

La morfología de la cuenca se define mediante tres tipos de parámetros:

- Parámetros de forma
- Parámetros de relieve
- Parámetros relativos a la red hidrográfica

2.1.1. Parámetros de Forma

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento (hidrógrafa).

Existe una fuerte componente probabilística en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje. Por esta razón se han buscado relaciones de similitud geométrica entre las características medias de una cuenca y de su red de canales con esas de otras cuencas. Los principales factores de forma son:

2.1.1.1. Factor de forma de Horton

Las observaciones de un buen número de cuencas reales en todo el mundo permiten establecer la siguiente relación entre el área de la cuenca A y el área de un cuadrado de longitud L, siendo L la longitud del cauce principal:

$$\frac{A}{L^2} = \frac{A^{-0.136}}{2} \dots\dots(1)$$

Despejando el valor de L se tiene:

$$L = 1.41 \times A_{0.568} \dots\dots(2)$$

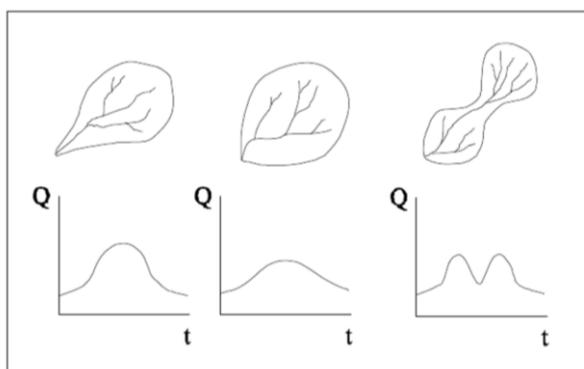


Figura 2-1 Hidrógrafas según la forma de la cuenca

2.1.1.2. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

Está definido como la relación entre el perímetro P de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots(3)$$

2.1.2. Parámetros de Relieve

Son muy importantes ya que el relieve de una cuenca puede tener mas influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma misma de la cuenca. Los parámetros relativos al relieve son:

2.1.2.1. Pendiente promedio de la cuenca

Este parámetro es de importancia pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca.

Uno de los métodos más representativos para el cálculo es el muestreo aleatorio por medio de una cuadrícula; llevando las intersecciones de la cuadrícula sobre el plano topográfico y calculando la pendiente para todos los puntos arbitrariamente escogidos (Ver figura 2-2). Con todos estos valores se puede construir un histograma de pendientes que permite estimar el valor medio y la desviación estándar del muestreo de las pendientes.

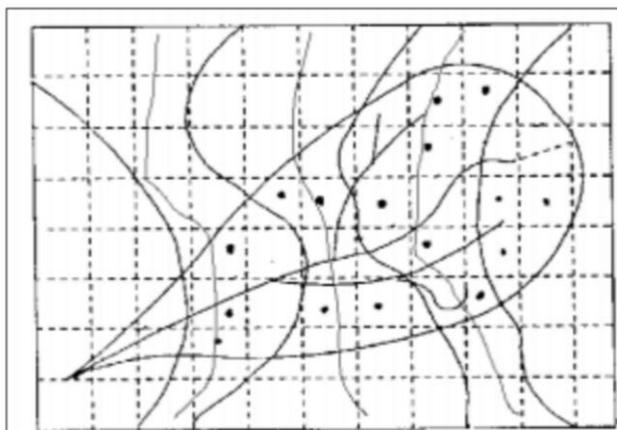


Figura 2-2 Método para hallar la pendiente S en una cuenca

2.1.2.2. Curva hipsométrica

Esta curva representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. También podría verse como la variación media del relieve de la cuenca.

La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en km^2 o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros. Normalmente se puede decir que los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas.

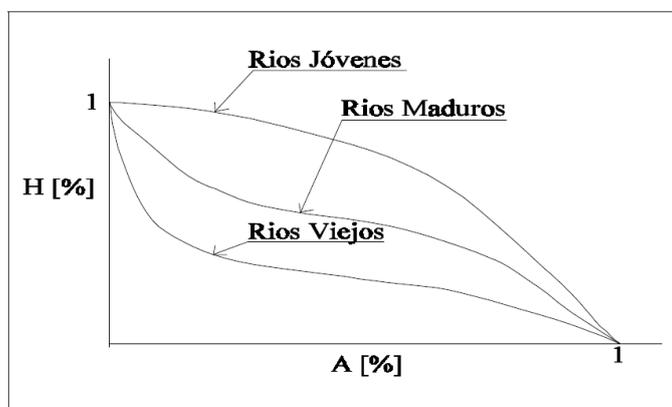


Figura 2-3 Curvas hipsométricas características

2.1.2.3. Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación de la superficie, en km^2 o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene los mismos datos de esta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca.

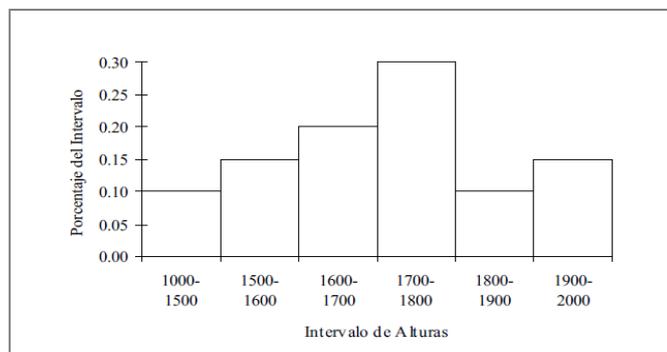


Figura 2-4 Histograma de frecuencias altimétricas

2.1.3. Parámetros relativos a la red hidrográfica

La red de ríos de una cuenca hidrográfica esta constituida por el cauce principal y sus tributarios o afluentes. La forma en que estén conectados estos cauces en una cuenca determinada, influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. Se han desarrollado una serie de parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del sistema de rios en la escorrentía superficial directa.

2.1.3.1. Orden de la cuenca

Es un número que refleja el grado de ramificación de la red de ríos. La clasificación de los cauces de una cuenca se realiza a través de las siguientes premisas:

- Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
- Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y en general, los cauces de orden n se forman cuando dos cauces de orden $n-1$ se unen.
- Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.
- El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida.

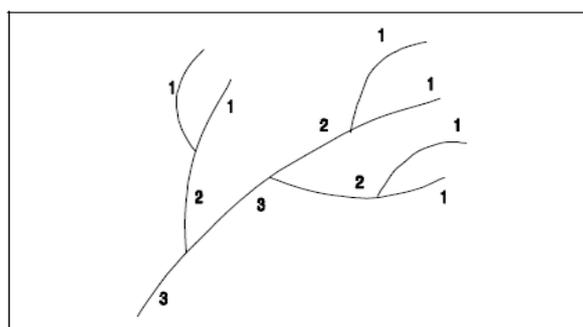


Figura 2-5 Orden de ríos en una cuenca

2.1.3.2. Densidad de drenaje

Está definida como la relación, D_d entre la longitud total de los cursos de agua: efímeros, intermitentes o perennes de una cuenca ($\sum l_i$) y el área total de la misma (A).

$$D_d = \frac{\sum l_i}{A} \dots\dots(4)$$

Donde:

$\sum l_i$ = Longitud total de todos los ríos en km

A = Área en Km²

l_i = Longitud de cada río

La densidad de drenaje tiende a uno en ciertas regiones desérticas de topografía plana y terrenos arenosos. Valores bajos de D_d generalmente están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Valores altos fundamentalmente son encontrados en regiones húmedas, de suelos impermeables, con poca vegetación y de relieve montañoso.

El valor inverso de D_d significa un promedio del número de unidades cuadradas que se necesita para mantener un caudal de una unidad de longitud. Por esta razón: $1/D_d$ suele ser llamada constante de mantenimiento de un canal.

2.2. Tiempo de concentración

Es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca llegue a la salida. Según Kirpich la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$t_c = 0.01947 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \dots\dots(5)$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (minutos)

L = Máxima longitud del recorrido (m)

S = Pendiente media de la cuenca (m/m)

2.3. Datos PISCO

PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) producto precipitación es una base de datos espacial grillada de aproximadamente 5 km y cobertura a nivel nacional. Es una base continua y disponible desde el 1 de enero de 1981 hasta el presente.

PISCO en su primera versión es el producto resultado de la combinación (“merging”) entre los datos de precipitación estimados por el satélite del producto CHIRP (“Climate Hazards Group InfraRed Precipitation”) y los datos de precipitación observada de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Para generar PISCO producto precipitación diaria, se desarrolló un algoritmo de interpolación que selecciona la mejor técnica de interpolación para cada día entre “Inverse Distance Weighting” (IDW), “Kriging with External Drift” (KED) y “Regression Inverse Distance Weighting” (RIDW), el procedimiento consta de 2 etapas y se describe en las siguientes líneas (ver Figura 2-6):

i) Primero se evalúa el p-valor obtenido al correlacionar espacialmente para cada día los datos de las estaciones convencionales y los datos para su correspondiente CHIRP, si el valor no presenta significancia estadística al 95% ($p\text{-valor} > 0,05$), se procederá a realizar el IDW optimizando el exponente de ponderación, siendo la función objetivo la minimización del promedio del error medio cuadrático (EMC) obtenido en la validación cruzada. Si el p-valor es menor a 0,05 se procederá a evaluar cual técnica de interpolación de las restantes (KED y RIDW) se utilizará, esto se realiza también en función al EMC obtenido en la validación cruzada. Este procedimiento se realiza para todos los días desde 1981 hasta el 2015, generándose un producto de precipitación grillado preliminar diario y mensual (Pd y Pdm).

ii) En una segunda parte se plantea corregir la sub-estimación o sobre-estimación encontrada en el producto de precipitación grillado preliminar (Pd). Para ello utilizamos los datos CHIRP mensuales y la precipitación mensual de las estaciones del SENAMHI para generar un producto grillado mensual bajo las mismas condicionales (Pm en Figura 3). El producto grillado mensual generado (Pm) y el producto de precipitación grillado preliminar de datos diarios previamente acumulados a paso mensual (Pdm) son comparados, generando proporciones grilladas mensuales que son utilizados para corregir los datos diarios (producto de precipitación grillado)

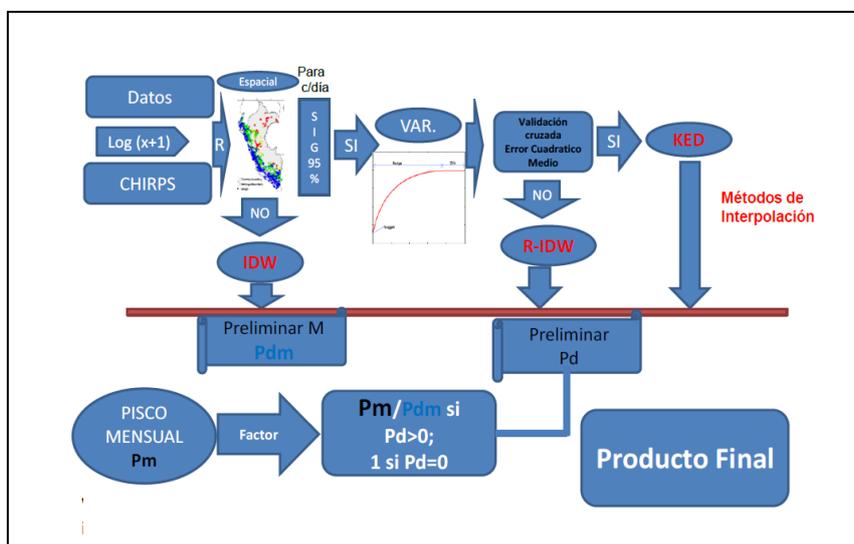


Figura 2-6 Flujograma de generación de PISCO producto precipitación

2.4. Modelo hidrológico GR2M

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo que por lo general es una cuenca hidrográfica. Los modelos hidrológicos son pues herramientas que nos ayudan a comprender y analizar eventos extremos como sequías e inundaciones, generar escenarios de disponibilidad hídrica y en general realizar un óptimo y adecuado manejo de los recursos hídricos.

El modelo hidrológico GR2M es conceptual fue desarrollado por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia). Su uso en el Perú fue introducido por el IRD (Instituto de Investigación y Desarrollo) de Francia, primero en estudios de modelización hidrológica en cuencas de la vertiente del Pacífico (SOFI CONSULT S.A.) y luego en cuencas de la región hidrográfica del Atlántico (Lavado W.) y del Titicaca (Vera H.), es así que se ha extendido en estudios de simulación hidrológica bajo escenarios de cambio climático, sobre todo los elaborados por SENAMHI (PACC-PRAA).

GR2M es un modelo hidrológico agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia.

Su estructura consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional. La Figura 2-6 muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo. De acuerdo a este esquema, **P** es la precipitación media de la cuenca, **P1** es la escorrentía superficial, **E** es la evapotranspiración actual, **P2** la percolación profunda, **S** el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, **R** el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y **Q** el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es X_1 y la del reservorio gravitacional es asumida como 60mm.

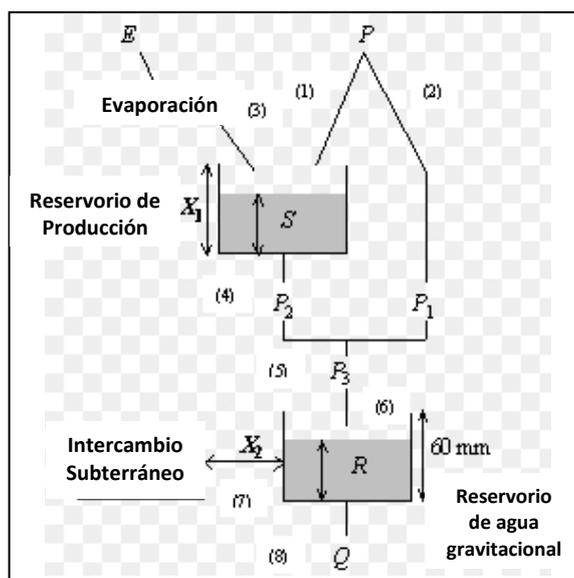


Figura 2-7 Esquema de la estructura del modelo hidrológico GR2M
Fuente: Cemagref (2007)

El modelo GR2M sólo tiene dos parámetros a calibrar:

- X1: Capacidad del reservorio suelo en milímetros (mm)
- X2: Coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional)

X2 oscila entre 1 y 2. Si $X_2=1$ significa que toda la precipitación neta del mes es transferida a la salida de la cuenca sin ser retenida en el reservorio de transferencia. En el caso extremo si $X_2=2$ toda la precipitación es retenida en el reservorio de transferencia.

El modelo ha sido implementado en diferentes programas como Fortran y hoja de calculo, utiliza métodos de optimización para la calibración de los parámetros maximizando la eficiencia del modelo con el criterio de Nash-Sutcliffe (E).

2.5. Medidas de bondad de ajuste

La calibración de los modelos se enfocan usualmente en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este estudio, se han utilizado los siguientes criterios estadísticos o coeficientes:

2.5.1. NASH

El criterio de Nash-Sutcliffe (E) es uno de los más usados en hidrología. Su valor se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

Qsim = Caudales simulados

Qi = Caudales observados

\bar{Q} = Promedio de los caudales observados

A continuación se muestra los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

Tabla 2-1 Valores referenciales de NASH

NASH	AJUSTE
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011)

2.5.2. RMSE

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Su expresión se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

Qsm = Caudales simulados

Q_i = Caudales observados

n = Número de valores simulados

2.5.3. R

El coeficiente de correlación (R) expresa la dependencia lineal entre dos variables, para este estudio nos referimos a los caudales observados y los caudales simulados. Su expresión se define como:

$$r = \frac{S_{obs, sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

$S_{obs, sim}$ es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Area de Estudio

3.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del río Ramis pertenece a la Región hidrográfica del Titicaca y pertenece al Sistema TDPS Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa (Sistema Hídrico TDPS). Limita al norte con la cuenca Inambari, al este con la cuenca Huancané y Suches, por el sur con la cuenca del río Coata e intercuenca Ramis y por el oeste con la cuenca Alto Apurímac y Urubamba.

La cuenca tiene un área total de 15408,027 Km². Geográficamente la cuenca del río Ramis se ubica entre las latitudes 14° 00' y 15°30' sur y las longitudes 69° 20' y 71° 20' oeste. Altitudinalmente se emplaza entre los 3775 msnm en la desembocadura al Lago Titicaca y 5755 msnm hacia su divisoria de cuencas.

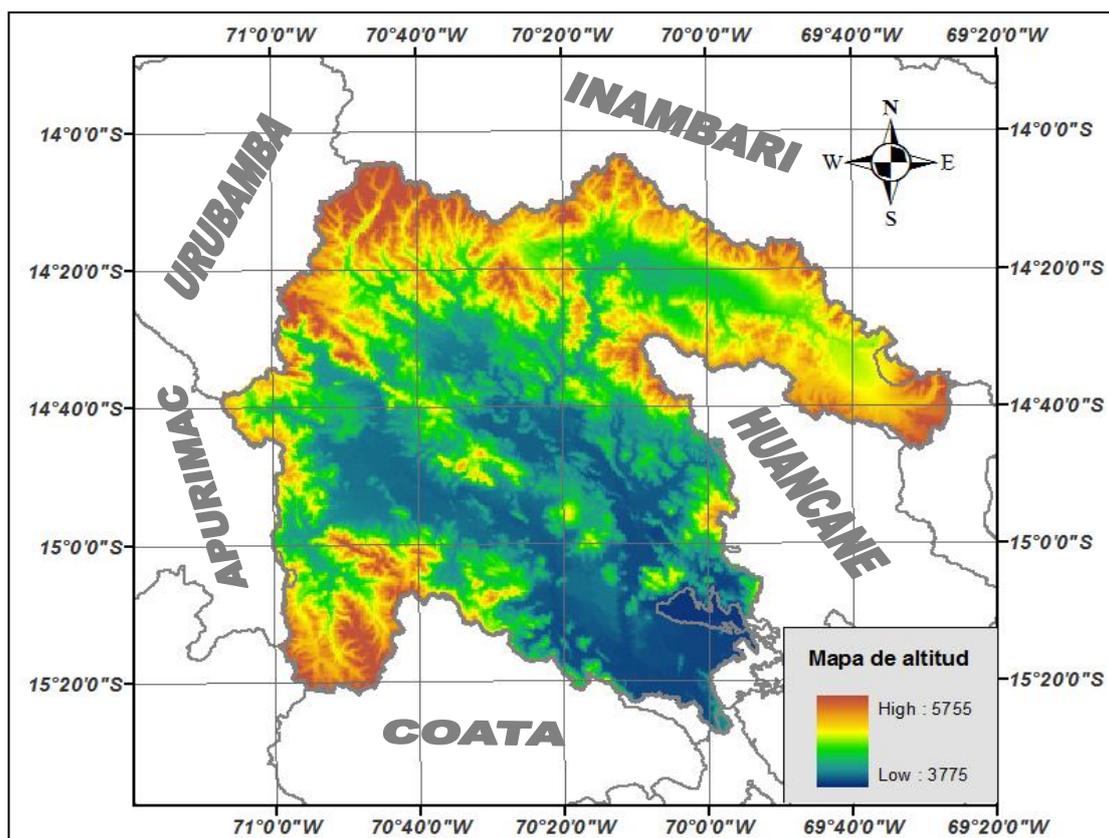


Figura 3-1 Ubicación de la cuenca del río Ramis

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Clima

La cuenca presenta una estación húmeda (Diciembre a Marzo), otra seca (Mayo a Agosto) y dos periodos de transición (Setiembre y Abril).

El 70% de la precipitación anual ocurre en la estación húmeda siendo climatológicamente el mes de enero como el de mayor lluvia con el 21% de la precipitación total anual mientras que el mes de julio es el mes con menor lluvia con 0,6% de la precipitación total anual.

Las localidades de Crucero y Llally son las que registran los mayores valores de precipitación en la cuenca con 800 mm de precipitación por año en promedio, mientras que las localidades de Azángaro y Ananea son las que registran los menores valores de precipitación dentro de la cuenca con 600 mm de precipitación anual en promedio.

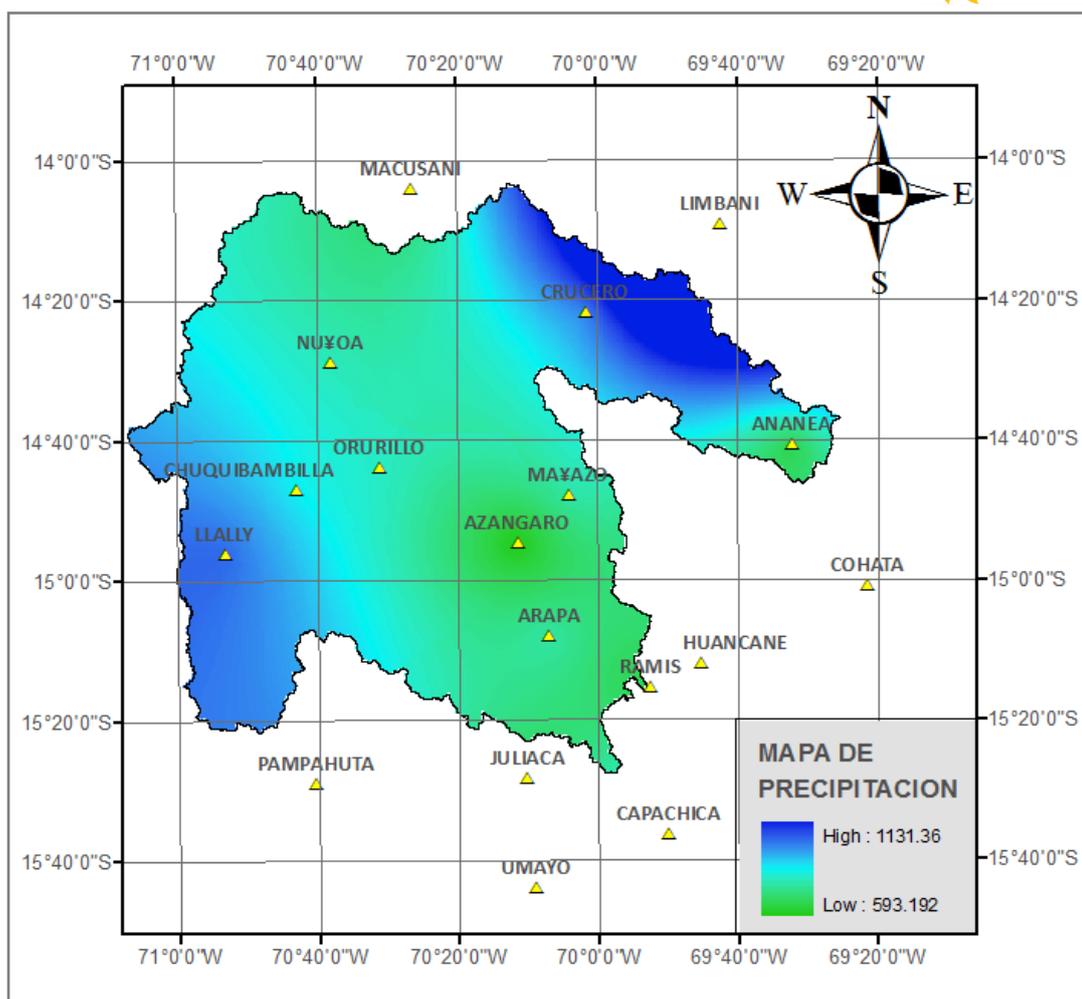


Figura 3-2 Precipitación anual en la cuenca del río Ramis periodo (1966-2016)

Fuente: Elaboración propia

En los meses de verano (Noviembre a Febrero) el viento dominante viene del Sur-Este. Al inicio del mes de Marzo, la entrada del otoño es marcado por un cambio brusco de dirección de viento que sopla del Nor-Este hasta el mes de mayo; de Junio a Agosto el viento es del Oeste, mientras que en la primavera (Setiembre-Octubre) el viento toma una componente Nor-Oeste.

Debido a la altitud en la que se ubica la cuenca, sobre la región se presentan fuertes anomalías de presión provocado por el fuerte calentamiento del suelo árido. Esta situación provoca fuertes movimientos convectivos a lo que se añade la humedad producida por la evaporación del Lago Titicaca dando como resultado la formación de grandes cúmulos y cumulonimbos sobre la región.

En relación a la temperatura del aire, la localidad de Arapa es la que registra el mayor valor de temperatura en la cuenca con 10 °C en promedio, mientras que la localidad de Ananea es la que registra la menor temperatura en la cuenca con 4,5 °C en promedio.

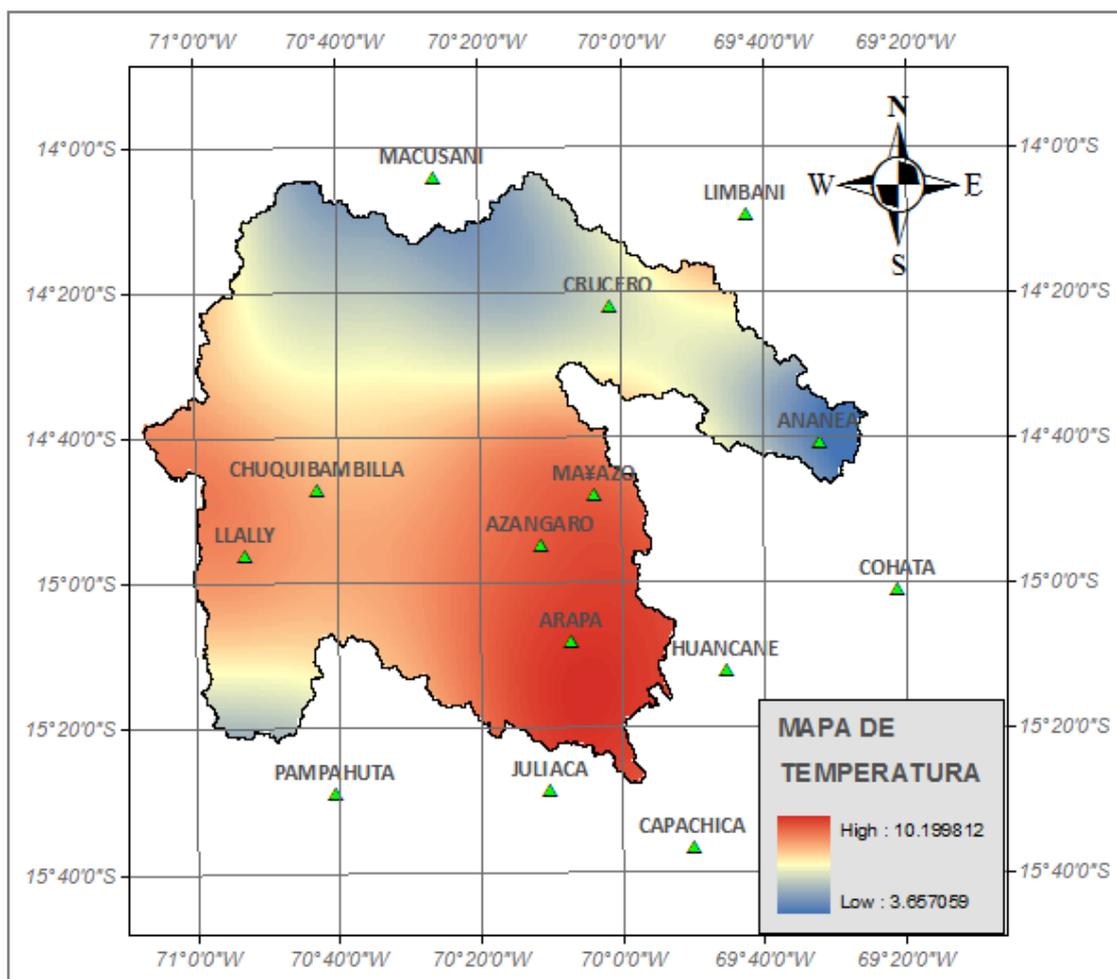


Figura 3-3 Temperatura media anual en la cuenca Ramis periodo (1966-2016)

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan la clasificación de zonas de vida, cobertura de suelo y capacidad de uso de suelo para la cuenca del río Ramis basado en el estudio de Plan de Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario. Periodo 2012-2021 (PLANGRACC) 2012. Disponible en: <http://minagri.gob.pe/porta1/download/pdf/especiales/plangracc/plangracc.pdf>

3.1.3. Zonas de vida

La parte baja de la cuenca Ramis esta formada por bosque humedo montano subtropical (bh-M), en la parte media de la cuenca encontramos paramo muy humedo subalpino subtropical (pmh) y en la parte alta encontramos area nival subtropical (NS), tundra pluvial alpino subtropical (tp-A) y páramo pluvial subalpino subtropical (pp-s).

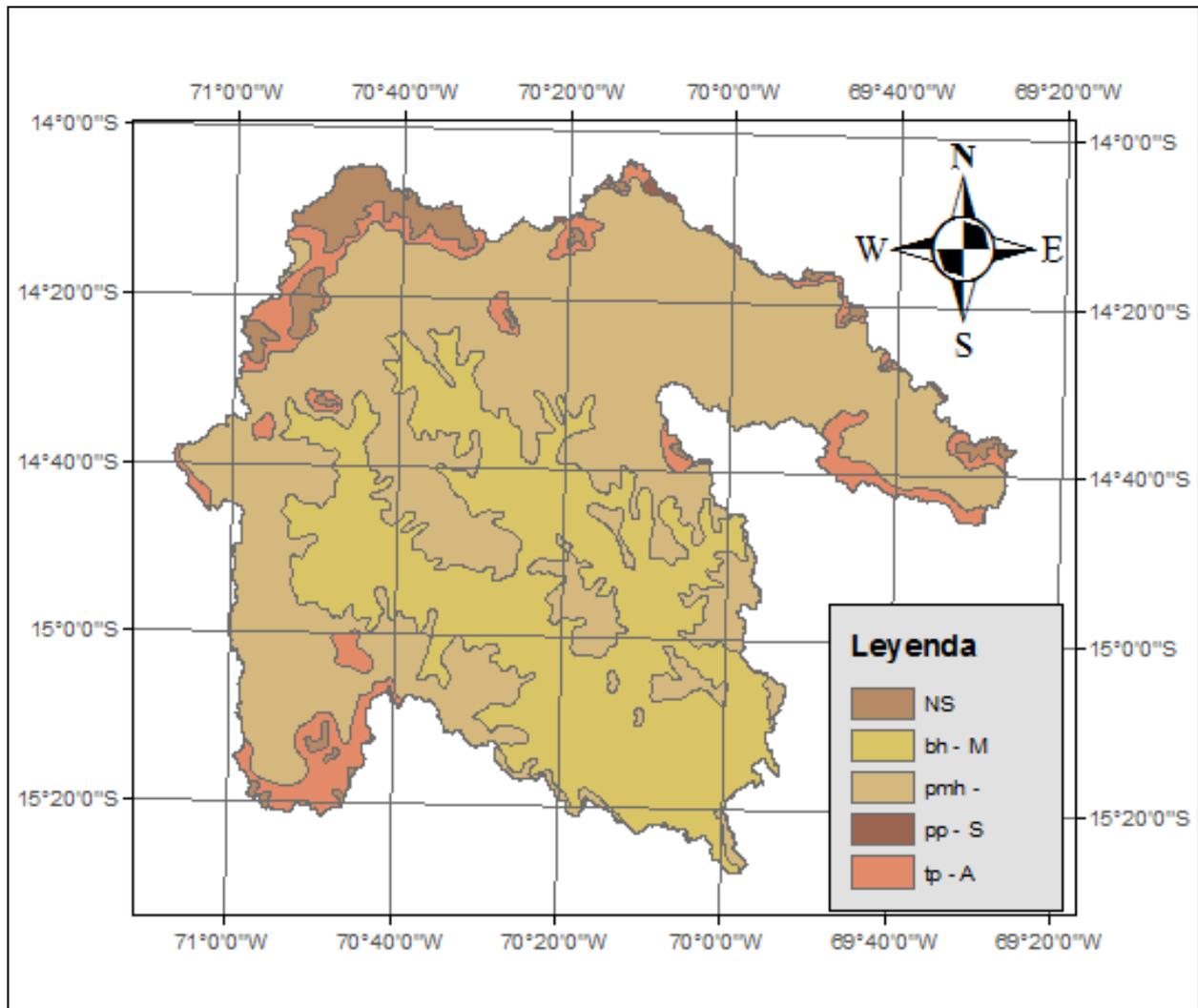


Figura 3-4 Zonas de vida en la cuenca del río Ramis

Fuente: PLANGRACC, 2012

3.1.4. Cobertura vegetal

En la parte baja de la cuenca Ramis se tiene Pajonal y césped de puna (Pj/Cp), cultivos agropecuarios (Cuap) y bofedales (Bo). En la cuenca media se tiene cultivos agropecuarios (Cuap), bofedales (Bo), lagunas (Lag) y en mayor cantidad se tiene pajonal y césped de puna (Pj/Cp). En la cuenca alta se tiene tierras altoandinas sin vegetación (Al Sv), nevados (Nv), herbazal de tundra (Ht), lagunas (Lag) y pajonal y césped de puna (Pj/Cp).

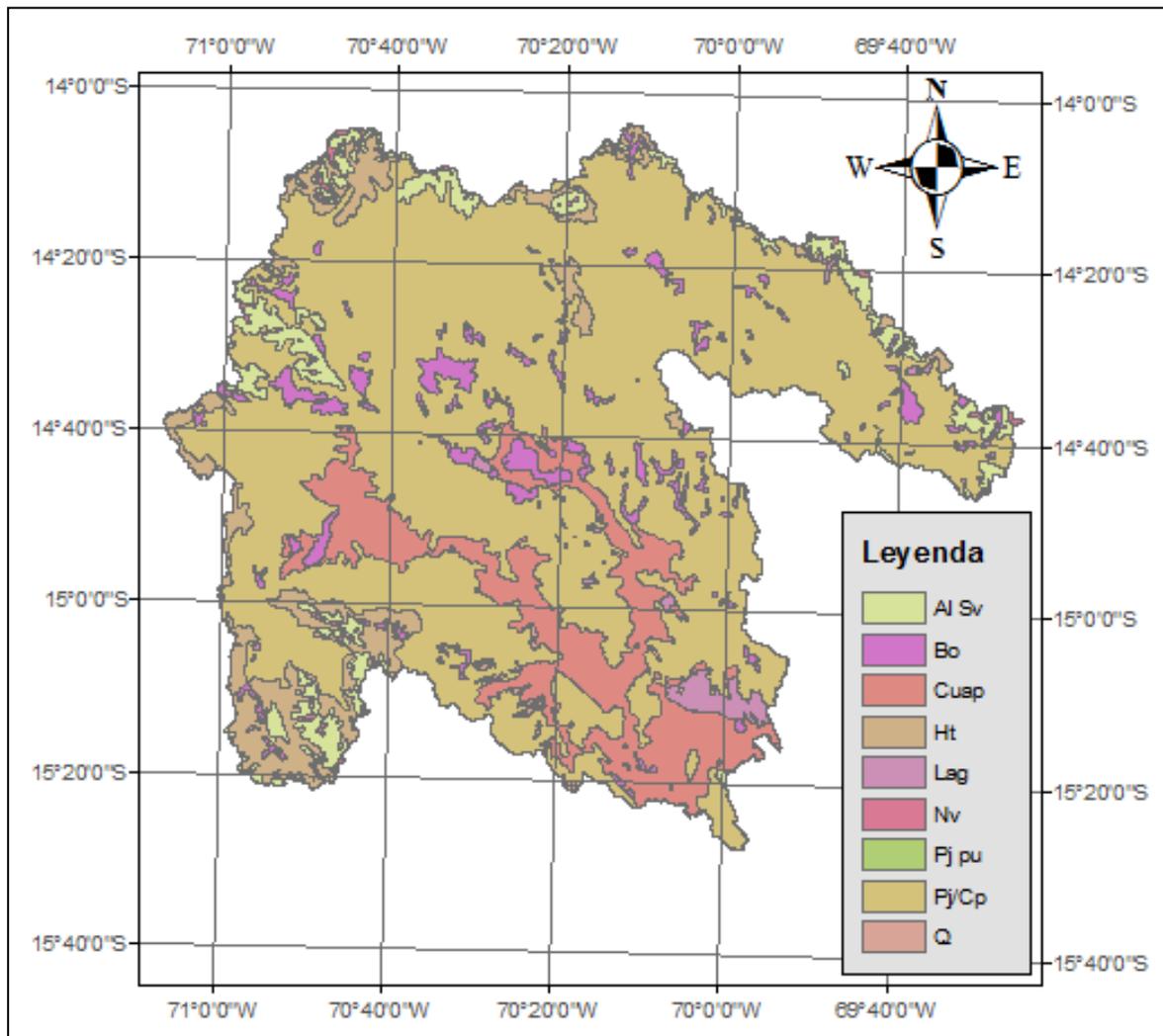


Figura 3-5 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Ramis
Fuente: PLANGRACC

3.1.5. Capacidad de uso de suelo

La parte baja de la cuenca del río Ramis cuenta con lagunas y pastos de calidad agrológica media, la parte media cuenta con cultivos en limpio, pastos y nevados. En la parte alta de la cuenca se tiene laderas de montaña glaciaria y pastos de calidad agrológica baja.

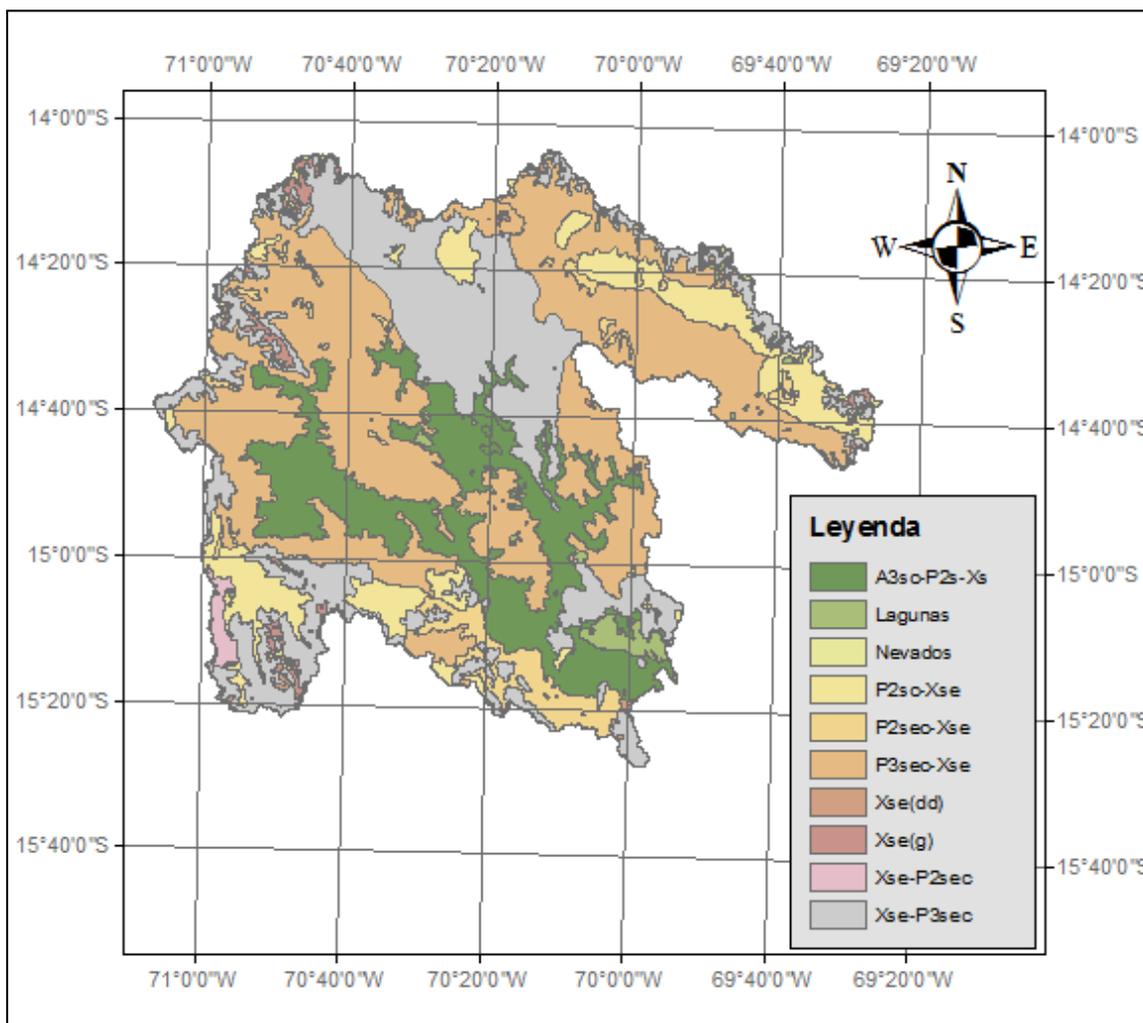


Figura 3-6 Capacidad de uso de suelo en la cuenca del río Ramis
Fuente: PLANGRACC

3.1.6. Hidrología

La vertiente del Titicaca es una típica cuenca endorréica de montaña, donde la porción del Altiplano es amplia y las vertientes circundantes, oriental y occidental son muy irregulares, con pendientes moderadas a altas. Están constituidas por montañas y colinas de rocas sedimentarias, volcánicas y metamórficas, en gran parte disectadas y con importantes acumulaciones de material detrítico, especialmente fluvio-glacial en las partes altas.

De los ríos que desembocan en el lago Titicaca, el Ramis es el más importante, y abarca el 26 % de su cuenca, extendiéndose desde los 5828 m en el nevado Ananea, hasta los 3815 m de altitud, comprendiendo varias subcuencas con ríos principales. En general, la cuenca presenta una crecida anual por precipitaciones en invierno (diciembre a abril) y mantiene un caudal regular entre el verano y primavera por los deshielos de la zona de cordillera y de las infiltraciones.

La cuenca del río Ramis tiene un área de 15408 Km² dentro del cual se incluyen las cuencas del río: Ramis, Ayaviri y Azángaro. Se origina al pie de los nevados Ananea y Ccorhuani, cuyos

3.2. Información Utilizada

3.2.1. Selección de estaciones

Existen 9 estaciones meteorológicas con registro de información de precipitación dentro de la cuenca del río Ramis: Llally, Chuquibambilla, Orurillo, Nuñoa, Crucero, Ananea, Mañazo, Azángaro y Arapa; y 9 estaciones con registro de precipitación fuera de la cuenca: Limbani, Macusani, Combapata, Capachica, Pampahuta, Juliaca, Yauri, Cohata y Huancane. Las estaciones se encuentran adecuadamente distribuidas lo cual permite estimar la serie de precipitación areal en la cuenca de forma representativa.

Cabe resaltar que las estaciones Arapa, Chuquibambilla, Crucero y Llally son estaciones tienen largo registro de información y son las más representativas y su variación temporal se observa en la Figura 3-8.

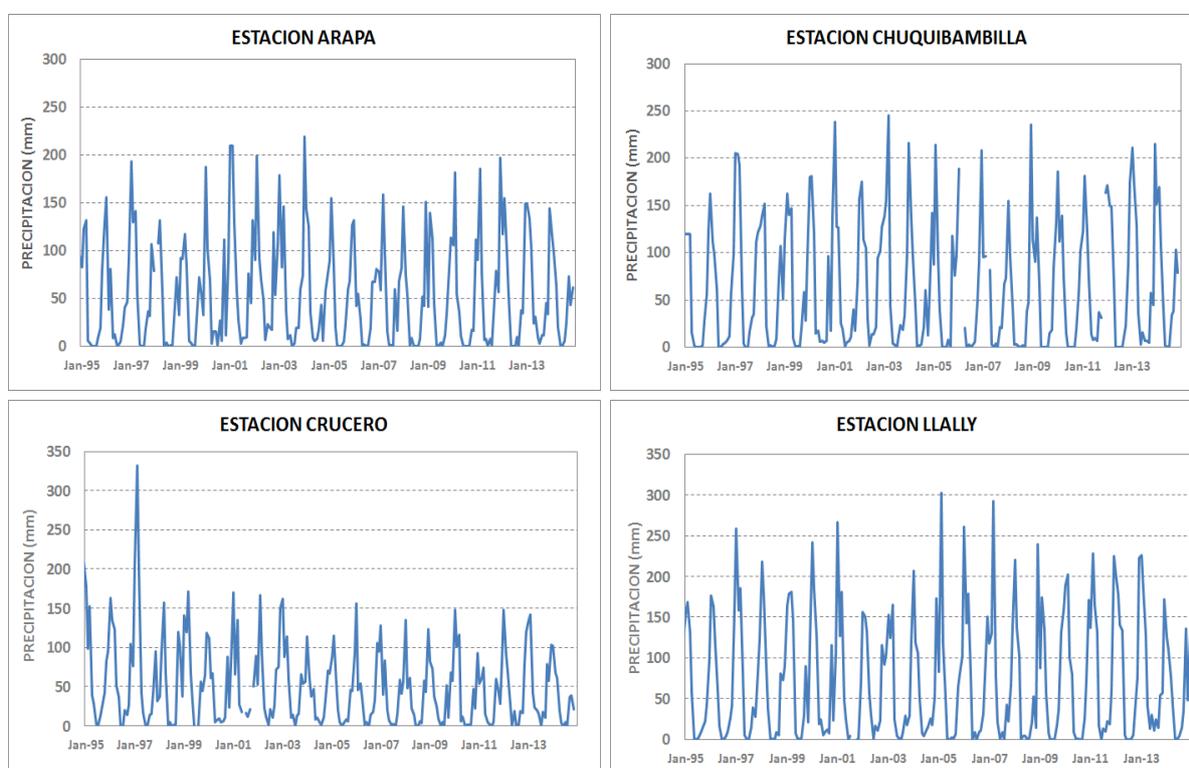


Figura 3-8 Precipitación mensual en la cuenca Ramis

En la cuenca del río Ramis existe una estación hidrológica con información disponible de caudal, es la estación Puente Carretera Ramis, que cuenta con datos diarios desde enero de 1992 hasta octubre de 2017

3.2.2. Ubicación de estaciones

En las Tablas 3-1, 3-2 y Figura 3-9 se muestra las características y distribución espacial de las estaciones recopiladas para fines del presente estudio respectivamente.

La Figura 3-9 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológica en la cuenca del río Ramis, se puede observar que la estación hidrológica Puente Carretera (cuadrado de color blanco y azul) se encuentra ubicada en la parte baja de la cuenca y las estaciones meteorológicas (triángulo de color rojo) están adecuadamente distribuidas dentro y fuera de la cuenca.

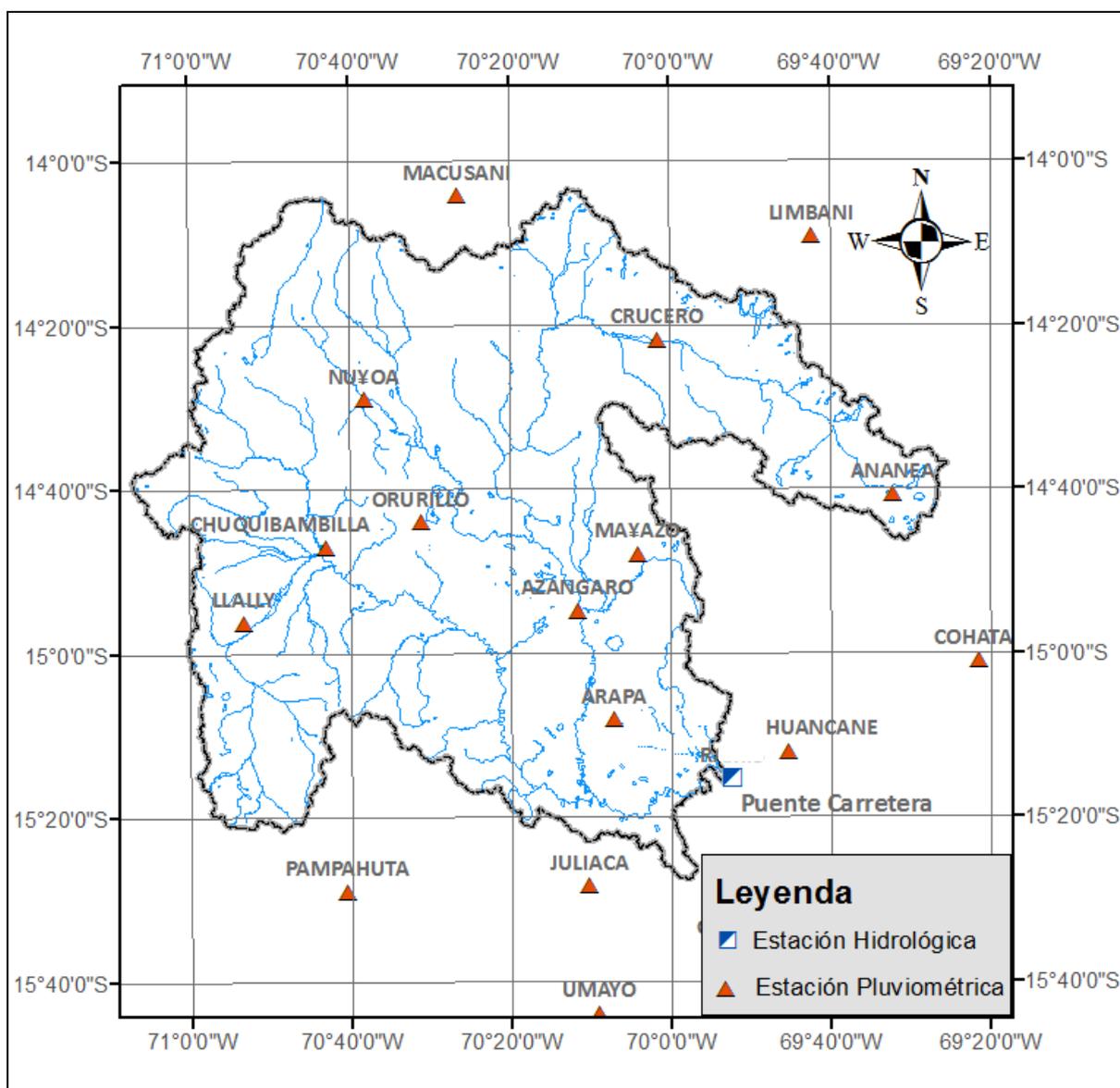


Figura 3-9 Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca Ramis

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-1 Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca Ramis

Nº	ESTACIÓN	TIPO	CUENCA	DPTO	PROV	LON	LAT	ALT
1	Ananea	CO	Ramis	Puno	San Antonio De Putina	69°32'4,3"	14°40'43,4"	4660
2	Arapa	CO	Ramis	Puno	Azángaro	70°07'5,6"	15°08'10,5"	3830
3	Azángaro	CO	Ramis	Puno	Azángaro	70°11'26,7"	14°54'51,7"	3863
4	Chuquibambilla	CO	Ramis	Puno	Melgar	70°42'56,5"	14°47'5,2"	3971
5	Cohata	CO	Intercuenca Del Titicaca	Puno	Huancané	69°21'20"	15°01'00"	4344
6	Crucero	CO	Ramis	Puno	Carabaya	70°01'33,3"	14°21'51,1"	4183
7	Huancané	CO	Huancané	Puno	Huancané	69°45'12,8"	15°12'5,4"	3890
8	Juliaca	CO	Cabanillas	Puno	San Román	70°10'10"	15°28'28"	3820
9	Limbari	CO	Inambari	Puno	Sandia	69°42'20,2"	14°09'13,5"	3320
10	Llally	CO	Ramis	Puno	Melgar	70°53'9,4"	14°56'11,5"	3980
11	Macusani	CO	Inambari	Puno	Carabaya	70°26'20,7"	14°04'12"	4345
12	Mañazo	CO	Illpa	Puno	Puno	70°03'59,7"	14°48'0,2"	3920
13	Nuñoa	PLU	Ramis	Puno	Melgar	70°38'1"	14°29'1"	4013
14	Orurillo	PLU	Ramis	Puno	Melgar	70°31'1"	14°44'1"	4048
15	Pampahuta	CO	Cabanillas	Puno	Lampa	70°40'32,8"	15°29'0,7"	4400
16	Yauri	CO	Apurímac	Cusco	Espinar	71°25'1"	14°49'1"	3927

Tabla 3-2 Estación hidrológica ubicada en la cuenca Ramis

Nº	ESTACIÓN	TIPO	CUENCA	PROV	LON	LAT	ALT
1	Puente Carretera	HLM	Ramis	Huancané	69°52'25,7"	15°15'19,6"	3812

3.2.3. Periodo de información empleado

El periodo común de información de precipitación, temperatura y caudal que se ha podido encontrar en la base de datos del SENAMHI para la cuenca del río Ramis es:

Calibración: 01/01/1992 - 31/12/2007

Validación: 01/01/2008 - 31/12/2015

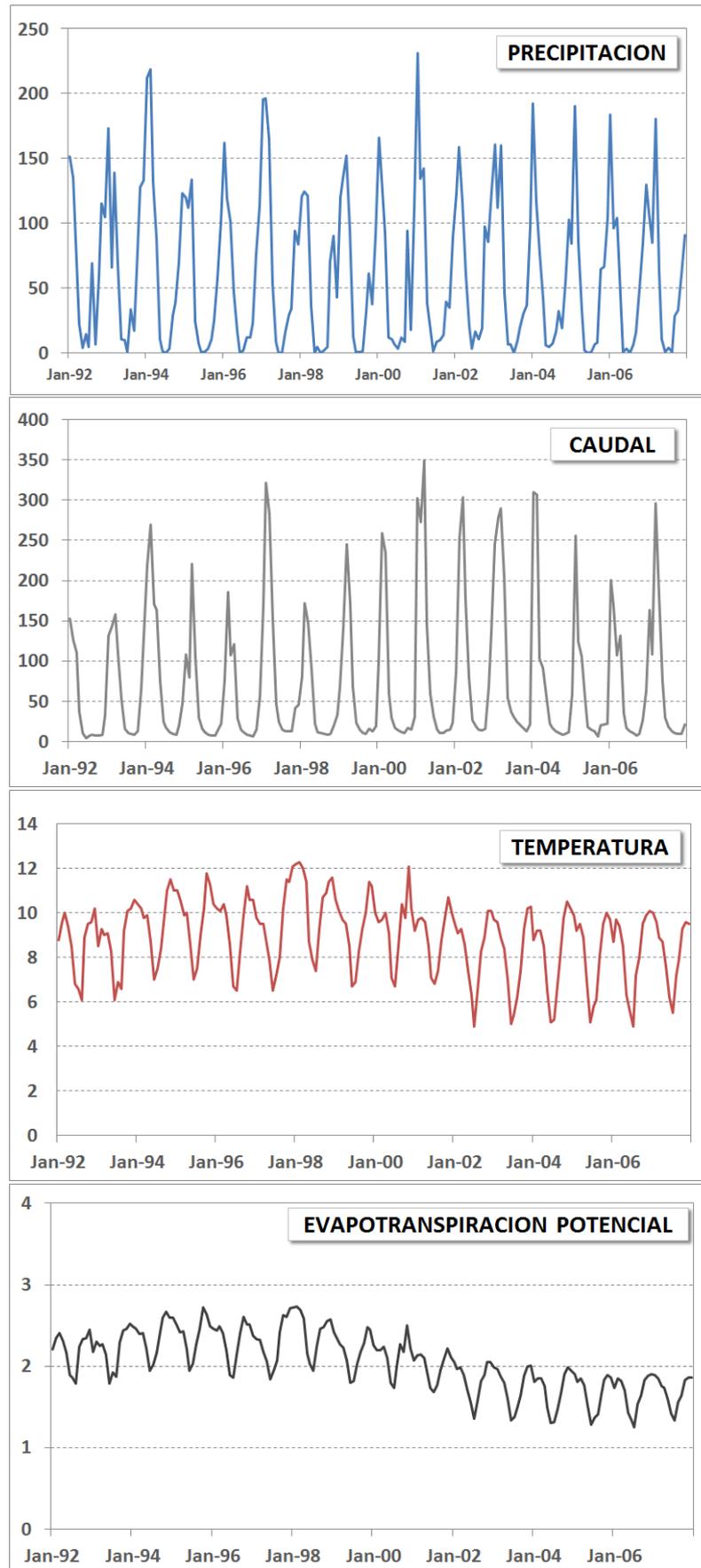


Figura 3-10 Series de tiempo utilizadas para la calibración del modelo GR2M

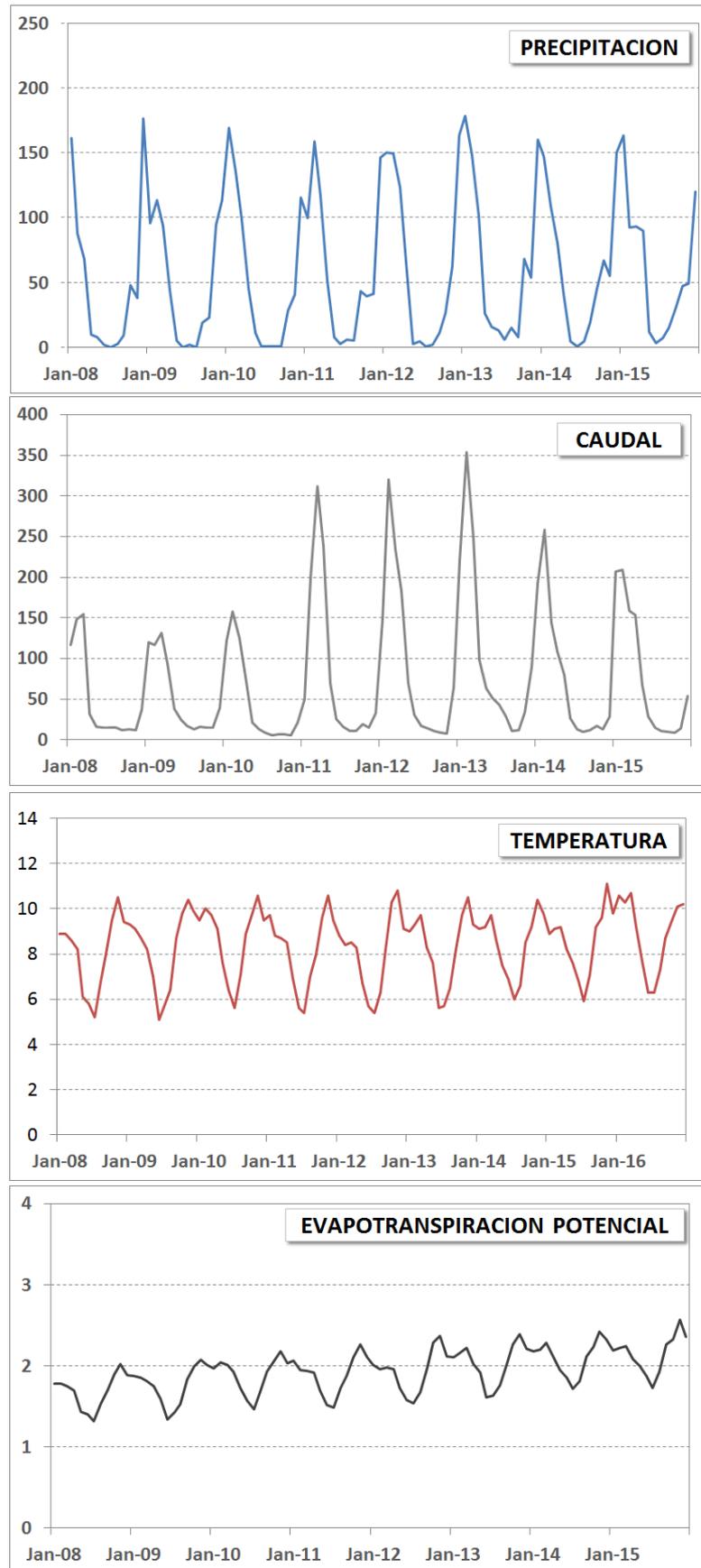


Figura 3-11 Series de tiempo utilizadas para la validación del modelo GR2M

3.3. Metodología

3.3.1. Control de calidad de los datos

La información obtenida de las estaciones pluviométricas pueden dar lugar a un cierto número de errores, los cuales pueden ser: errores de observación, errores de transcripción y cálculo entre otros por eso es necesario realizar un análisis de consistencia de los datos. En este estudio se realizó el análisis de doble masa a los datos de precipitación, el periodo analizado fue 1994-2015.

3.3.1.1. Análisis de Doble Masa

El análisis de doble masa considera que en una zona meteorológica homogénea, los valores de precipitación que ocurren en diferentes puntos de esa zona en periodos anuales o estacionales, guardan una relación de proporcionalidad que puede representarse gráficamente.

La Figura 3-12 muestra el análisis de doble masa de diez estaciones meteorológicas: Ananea, Arapa, Azángaro, Chuquibambilla, Crucero, Huancané, Llally, Mañazo, Pampahuta y Yauri. El periodo analizado corresponde a 22 años de información diaria de 1994 a 2015. Se puede observar que la información pluviométrica se ajusta bastante bien a una ecuación lineal lo cual indica que la información ha sido medida de manera adecuada en las diez estaciones.

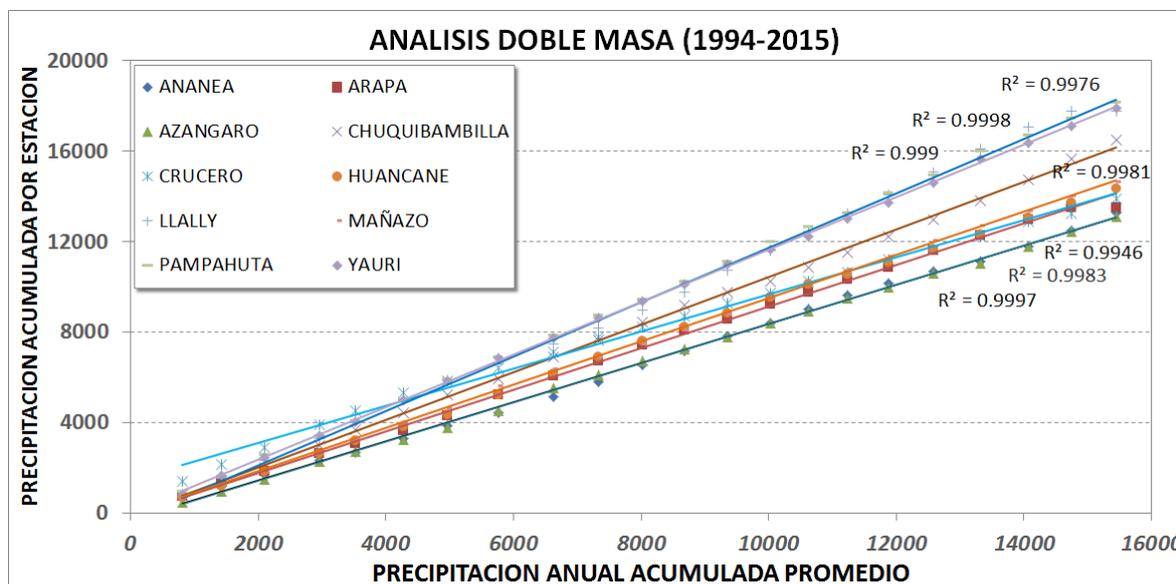


Figura 3-12 Curvas de doble masa de estaciones pluviométricas en la cuenca Ramis

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Parámetros fisiográficos de la cuenca Ramis

En el proceso del modelamiento hidrológico se debe realizar la calibración de los parámetros del modelo. Estos parámetros están por lo general relacionados con información fisiográfica de la cuenca. A continuación se muestran los parámetros fisiográficos de la cuenca del río Ramis.

Tabla 3-3 Parámetros fisiográficos en la cuenca del río Ramis

CUENCA	ÁREA (Km ²)	PERÍMETRO (Km)	LONGITUD DE CAUCE (Km)	ALTITUD MEDIA (msnm)	PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (%)	COEFICIENTE DE COMPACIDAD
Ramis	15408	1323	334,5	3900	0,21	3,006

FUENTE: Elaboración propia

3.3.3. Estimación de la precipitación media

La precipitación media areal en la cuenca del río Ramis hasta la estación Puente Carretera, se calculó empleando la información pluviométrica disponible en la base de SENAMHI. Se utilizó el software Hydraccess (software libre en <http://www.sohybam.org/index.php/esl/logiciels/Hydraccess>).

Este software permite realizar operaciones de interpolación para lo cual requiere dos archivos: el shape de la cuenca y el archivo en formato Excel con información de las estaciones de precipitación. Hydraccess tiene 3 métodos para realizar la interpolación: Thiessen, Inversa Distancia y Krigging. Cada algoritmo de interpolación se puede usar de manera independiente y tiene la opción de generar de la variable interpolada para toda la cuenca tal como se muestra a continuación:

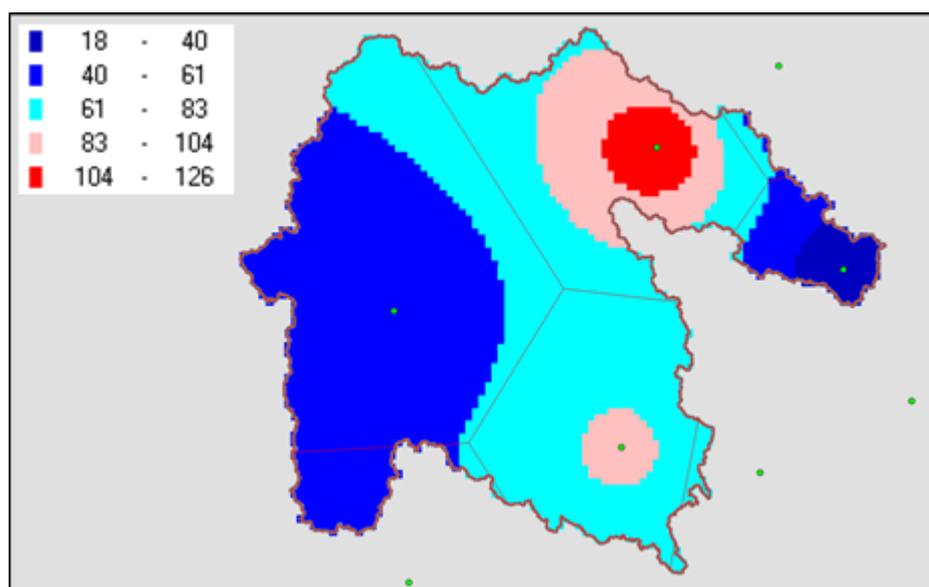


Figura 3-13 Precipitación areal estimada en la cuenca Ramis con el método inverso de la distancia

3.3.4. Pronóstico de precipitación del modelo WRF

La subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera del SENAMHI ha generado 4 miembros de ensemble de pronósticos de precipitación para los meses de noviembre, diciembre y enero del 2018.

Estos pronósticos han utilizado condiciones iniciales y de borde del modelo WRF (datos predictados del modelo CFS v2 de resolución 1°x1° para noviembre-diciembre-enero 2018). Las salidas de la predicción numérica estacional de WRF tienen una resolución espacial inicial de 16 km y una resolución final que es de escala local y que ha tenido una corrección estadística BIAS.

Los datos del hindcast que se han utilizado para generar los pronósticos WRF han sido para los meses noviembre-diciembre-enero 2018 sobre la línea base del periodo 1981-2010.

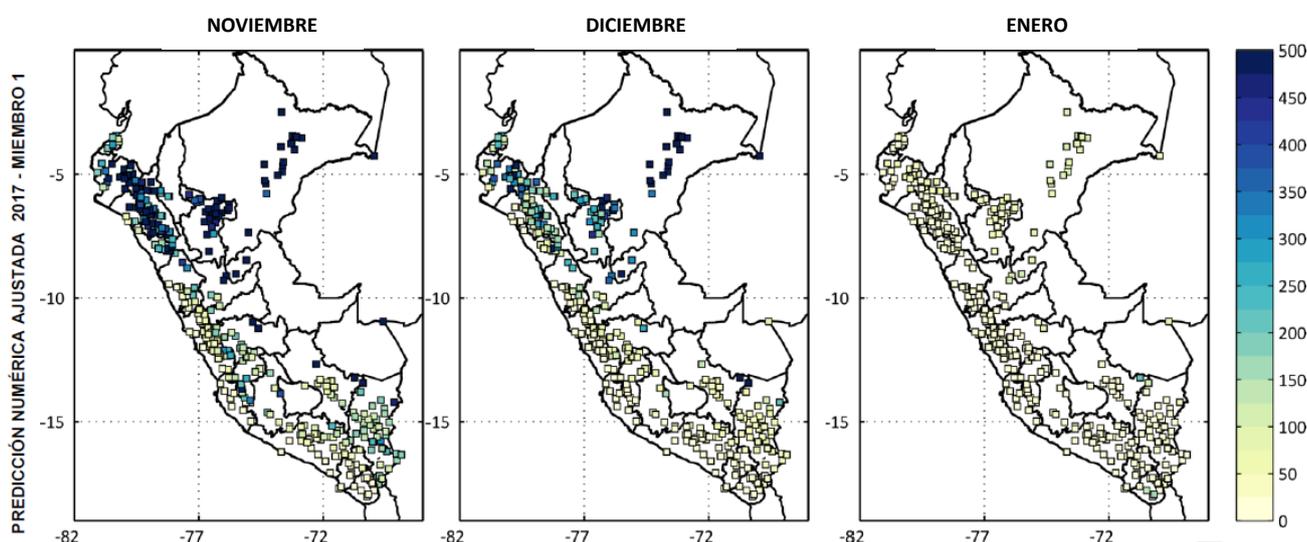


Figura 3-14 Pronóstico de precipitación (miembro1) para nov-dic-ene 2018 a nivel nacional

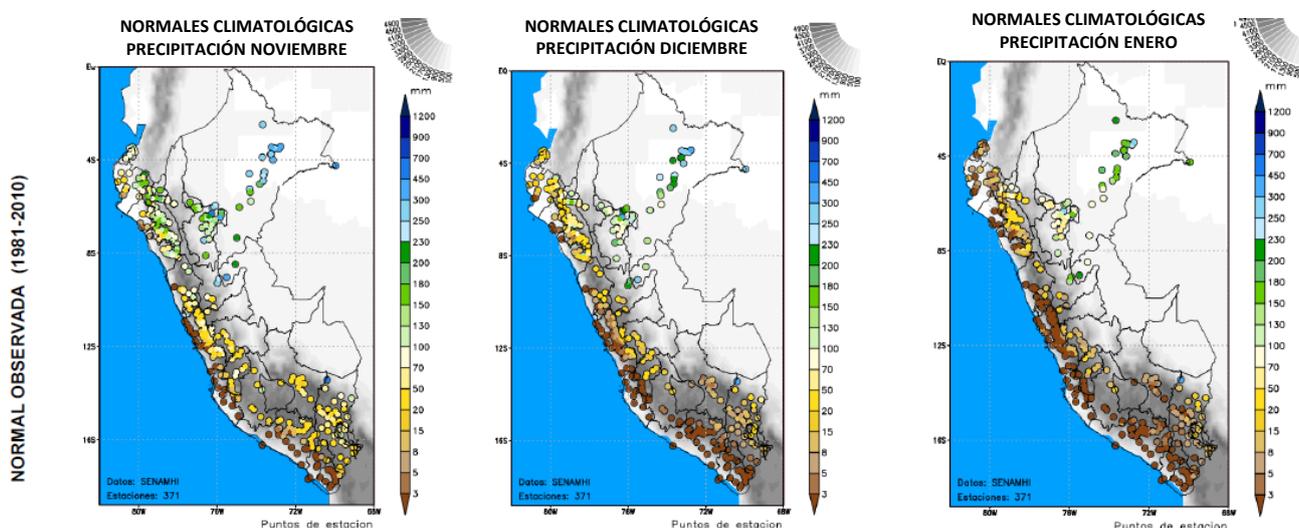


Figura 3-15 Precipitación normal observada para noviembre-diciembre-enero a nivel nacional

3.3.5. Flujograma Metodológico

La Figura 3-16 sintetiza el procedimiento metodológico desarrollado en el modelamiento hidrológico del presente estudio.

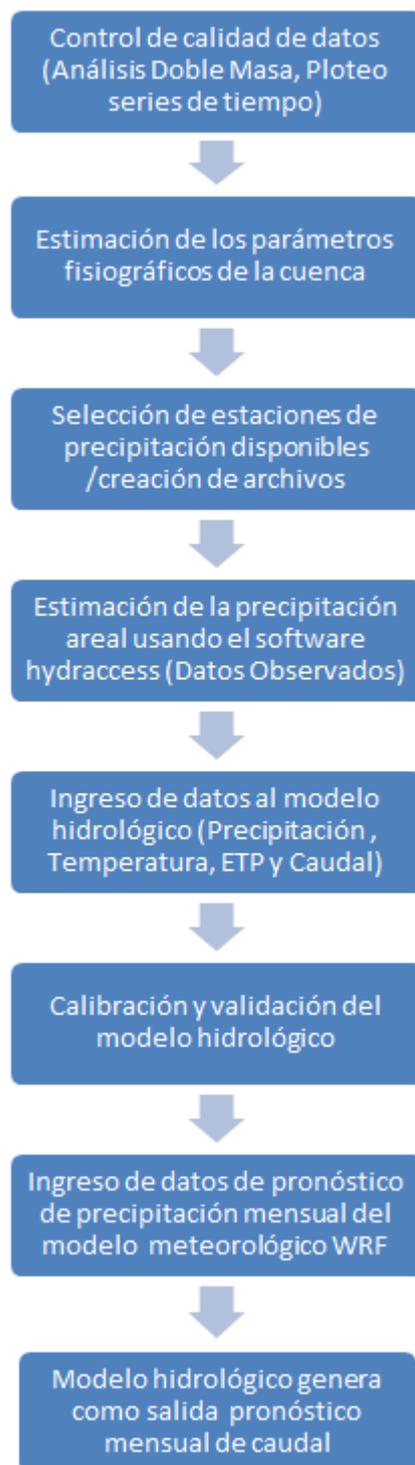


Figura 3-16 Diagrama de flujo de la metodología para el modelamiento hidrológico de la cuenca Ramis

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El periodo de información común para la mayoría de estaciones que se ha encontrado en la base de datos de SENAMHI para las variables precipitación, temperatura y caudal se indica a continuación: Calibración: Ene 1992 – Dic 2007 y Validación: Ene 2008 – Dic 2015.

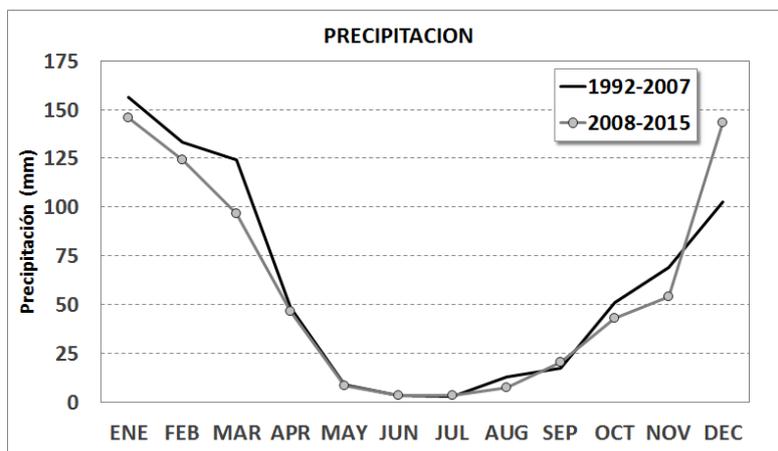


Figura 4-1 Precipitación media areal mensual en la cuenca Ramis

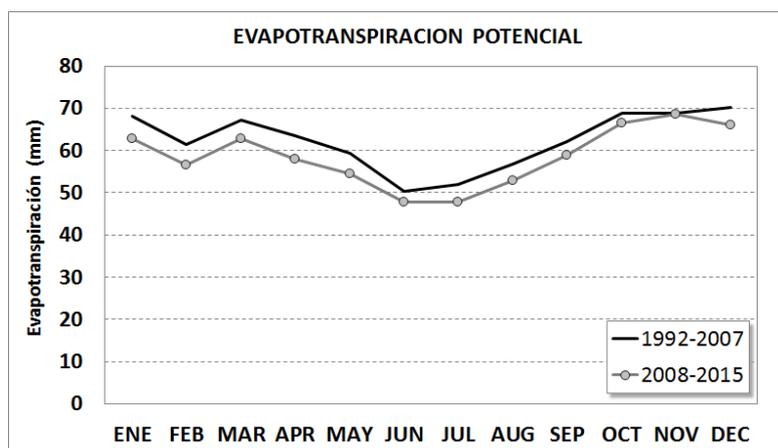


Figura 4-2 Evapotranspiración media mensual en la cuenca Ramis

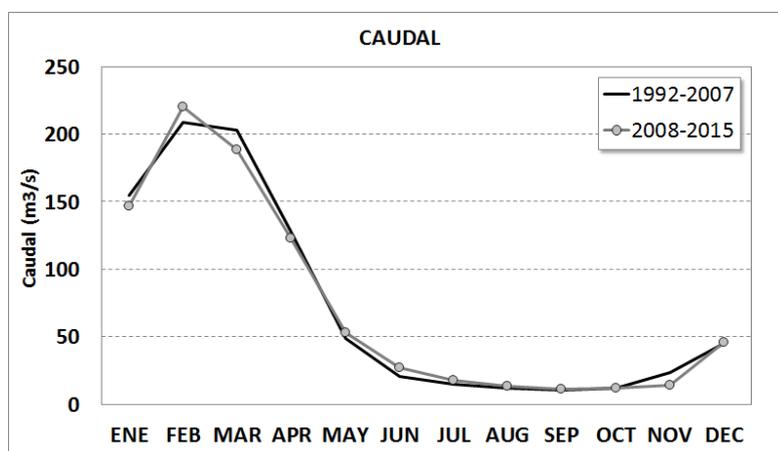


Figura 4-3 Caudal medio mensual en la cuenca Ramis

Como se puede observar en la Figura 4-1, aparentemente el comportamiento pluviométrico no ha variado mucho, solo en los últimos años se ha observado un incremento en la precipitación en el mes de diciembre entre los años 2008-2015, de 100 a casi 150 mm/mes. El mes que registra la mayor precipitación areal es enero mientras que el mes que registra la menor precipitación areal a lo largo de todo el año ha sido julio.

De la Figura 4-2 se puede observar que la evapotranspiración potencial obtenida por el método Oudin, ha decrecido ligeramente del periodo 1992-2007 al 2008-2015, la mayor evapotranspiración ocurre en el mes de diciembre mientras que el menor valor ocurre en junio.

De la Figura 4-3 se puede observar que el caudal medio mensual medido en la estación hidrológica Puente Carretera prácticamente no ha variado nada, los mayores caudales se dan entre febrero y marzo y el caudal mínimo ocurre entre agosto y setiembre.

Para la estimación de la precipitación media areal a partir de las estaciones convencionales en la cuenca Ramis, se ha empleado el software Hydraccess y se han utilizado los 4 métodos de interpolación (Aritmético, Thiessen, Inverso de la distancia y Krigging).

A continuación se muestran los resultados del modelamiento hidrológico en la cuenca Ramis usando el modelo GR2M. Para evaluar la eficiencia de este modelo se han empleado 3 índices estadísticos: NASH, RMSE y R².

Tabla 4-1 Resultados de la calibración y validación con el modelo GR2M

GR2M	CALIBRACIÓN			VALIDACIÓN		
	NASH	RMSE	R2	NASH	RMSE	R2
Pisco	83,56	5,84	0,841	64,51	8,15	0,721
Aritmético	86,85	5,22	0,872	78,69	6,32	0,796
Thiessen	82,04	6,10	0,827	80,77	6,00	0,811
Inverso D.	83,52	5,84	0,840	79,76	6,16	0,802
Krigging	79,74	6,48	0,811	81,19	5,94	0,814

Los valores de los parámetros obtenidos en la fase de calibración con el modelo hidrológico GR2M fueron: X1=6,50, X2=0,77; estos mismos parámetros se utilizaron en el periodo de validación. A pesar de que el valor del parámetro X1 no se encuentra dentro del rango (según el manual del CEMAGREF, ver Tabla 4-2), los índices estadísticos obtenidos en los periodos de validación han sido muy buenos.

Tabla 4-2 Rango de los parámetros del modelo GR2M

PARAMETRO	MEDIANA	Intervalo de Confianza al 90%
X1	380	140 – 2640
X2	0,92	0,21 – 1,31

En este estudio se ha realizado también la validación del pronóstico de precipitación que ha generado el modelo WRF. Los pronósticos que ha generado la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmosfera (SPN) del SENAMHI son a nivel nacional pero para los fines de modelamiento de la cuenca Ramis se han considerado los puntos que se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Puntos pronosticados por el modelo WRF en la cuenca Ramis

PUNTO	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTITUD (msnm)
Chuquibambilla	-14,796	-70,728	3910
Ayaviri	-14,881	-70,593	3920
Progreso	-14,695	-70,356	3905
Lampa	-15,356	-70,373	3900
Azángaro	-14,915	-70,191	3863
Arapa	-15,136	-70,119	3920
Munani	-14,779	-69,966	4119
Huancané	-15,203	-69,763	3860
Pucara	-15,034	-70,373	3885
Taraco	-15,305	-69,983	3820
Santa Rosa	-14,627	-70,796	3940
Ananea	-14,679	-69,534	4660
Crucero	-14,363	-70,024	4130
Putina	-14,915	-69,868	3878
Cuyocuyo	-14,474	-69,542	3494

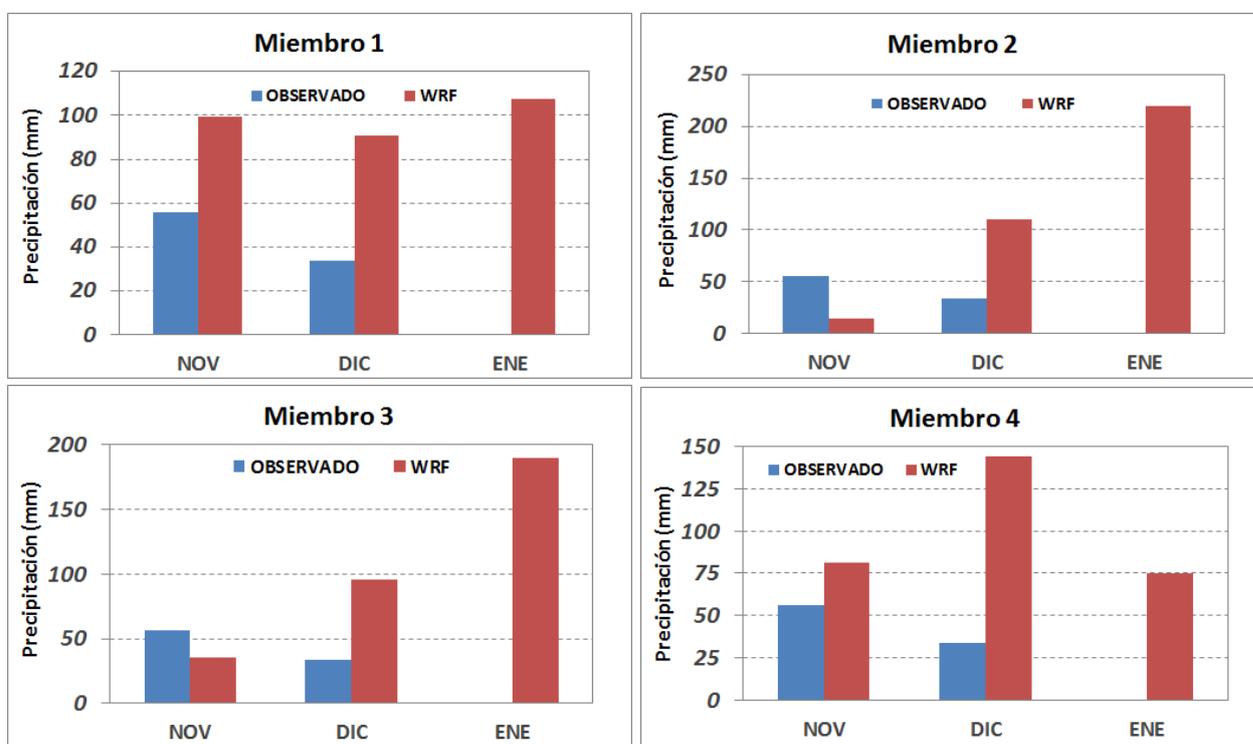


Figura 4-4 Pronóstico de precipitación WRF (Nov-Ene) Vs. Precipitación observada en la cuenca Ramis

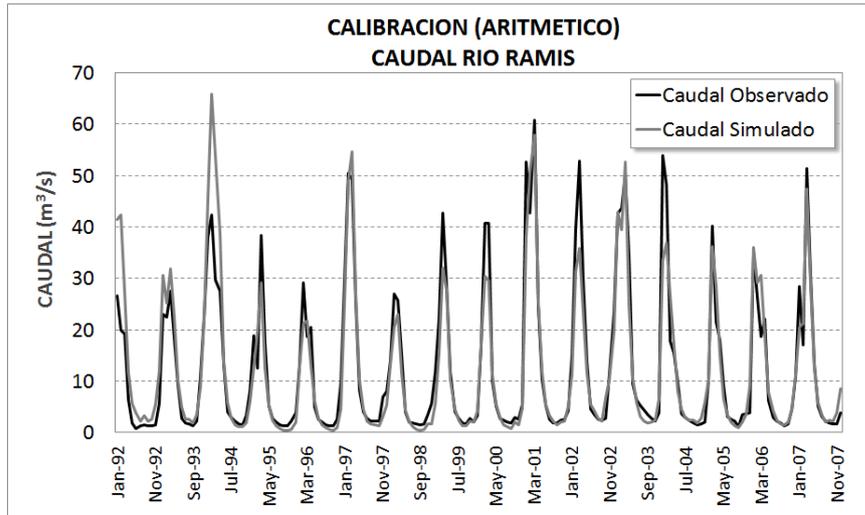


Figura 4-5 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación aritmética

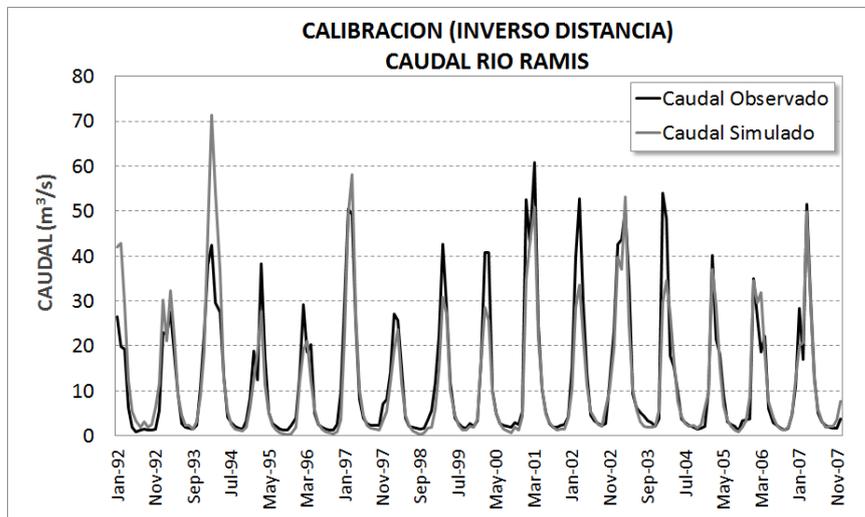


Figura 4-6 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Inv. Distancia

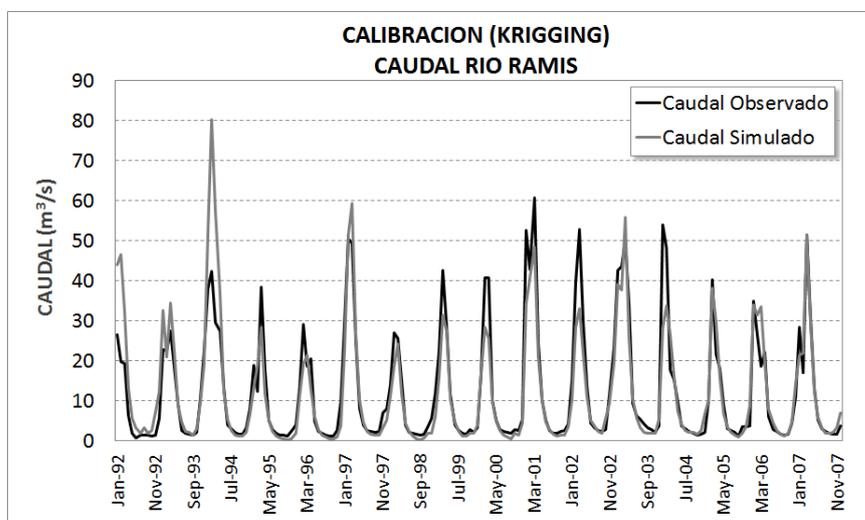


Figura 4-7 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Krigging

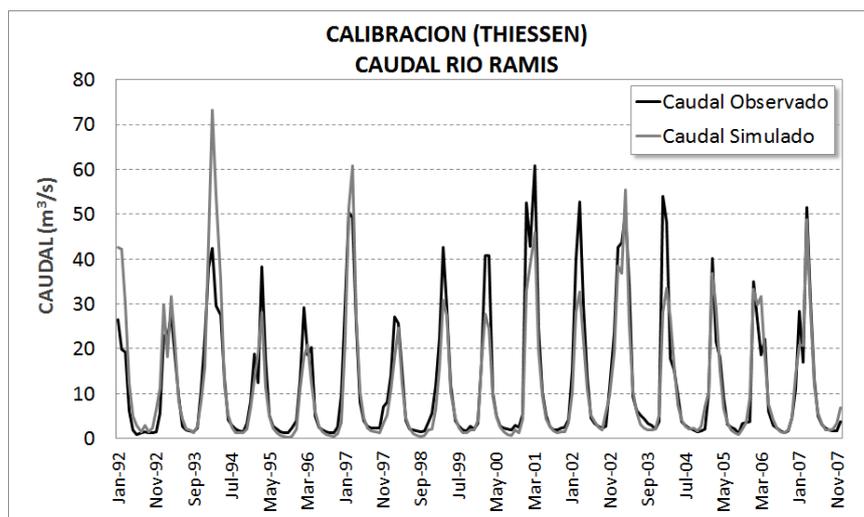


Figura 4-8 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación Thiessen

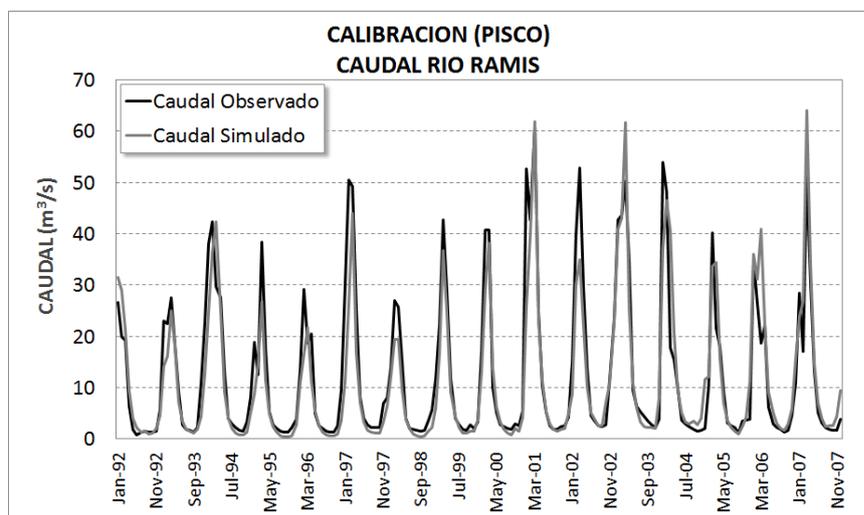


Figura 4-9 Calibración del caudal Ramis con GR2M y precipitación PISCO

En la fase de calibración el modelo GR2M presentó valores altos del coeficiente de NASH; entre 79,7 y 86,8 para los cinco métodos de estimación de precipitación empleados. En cuanto al error cuadrático medio este valor fluctuó entre 5,22 y 6,48, el menor valor se obtuvo usando la precipitación estimada con el método aritmético. El mayor coeficiente de correlación se obtuvo al utilizar la serie de precipitación estimada con el método aritmético, se obtuvo 0,87.

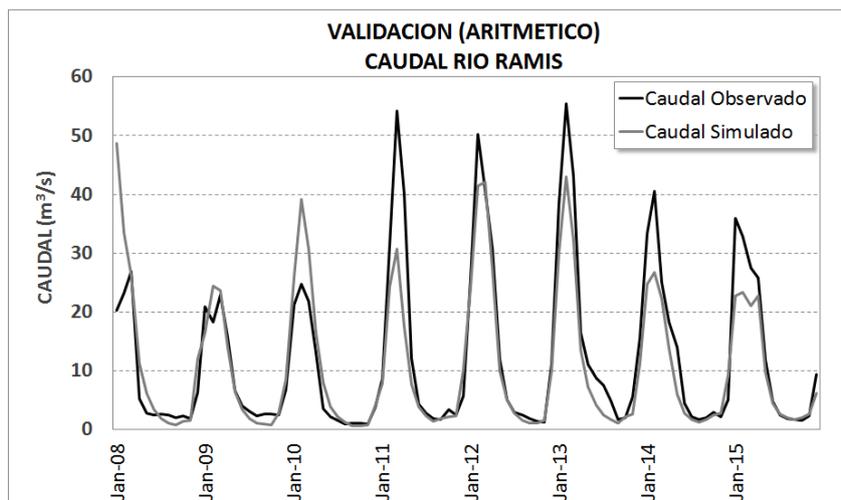


Figura 4-10 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación aritmética

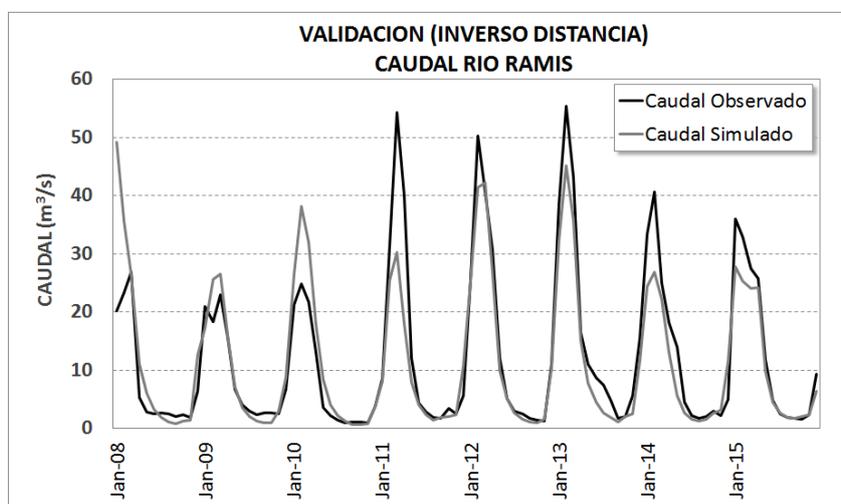


Figura 4-11 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Inv. Distancia

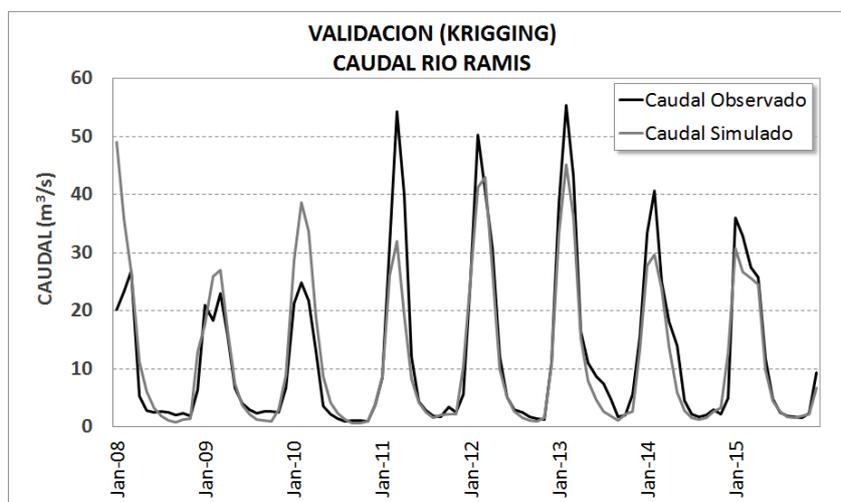


Figura 4-12 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Krigging

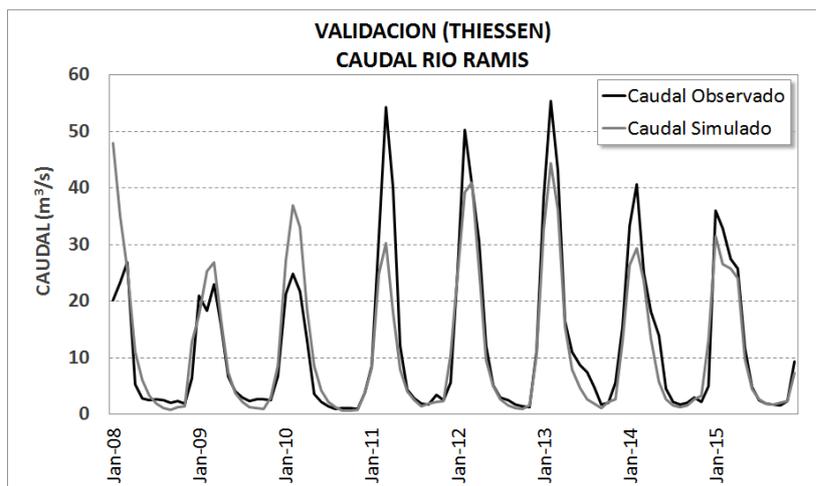


Figura 4-13 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación Thiessen

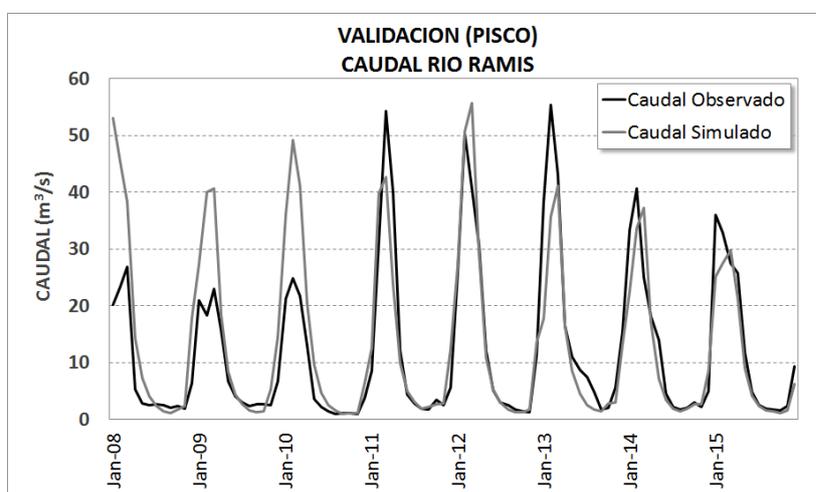


Figura 4-14 Validación del caudal Ramis con GR2M y precipitación PISCO

En la fase de validación el modelo GR2M presentó valores del coeficiente de NASH por encima del 64% para los cinco métodos de estimación de precipitación empleados. El valor más alto de NASH obtenido fue de 81% con el método Krigging. En cuanto al error cuadrático medio (RMSE), este valor fluctuó entre 5,94 y 8,15; el menor valor de 5,94 se obtuvo usando la precipitación estimada con el método Krigging. Asimismo, el mayor coeficiente de correlación se obtuvo al utilizar la serie de precipitación estimada con el método Krigging, se obtuvo un valor de 0,814.

En este estudio se ha utilizado las salidas del modelo de predicción numérica del tiempo WRF que proporcionó la Subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera de SENAMHI. Se usaron los pronósticos de precipitación mensual para la cuenca del río Ramis para los meses de noviembre – diciembre - enero 2018. De las 5 series de tiempo utilizadas, se ha determinado que la precipitación estimada con el método Thiessen es la que ha dado mejores resultados en la fase de validación también con Thiessen se obtuvo buenos resultados durante la fase de calibración.

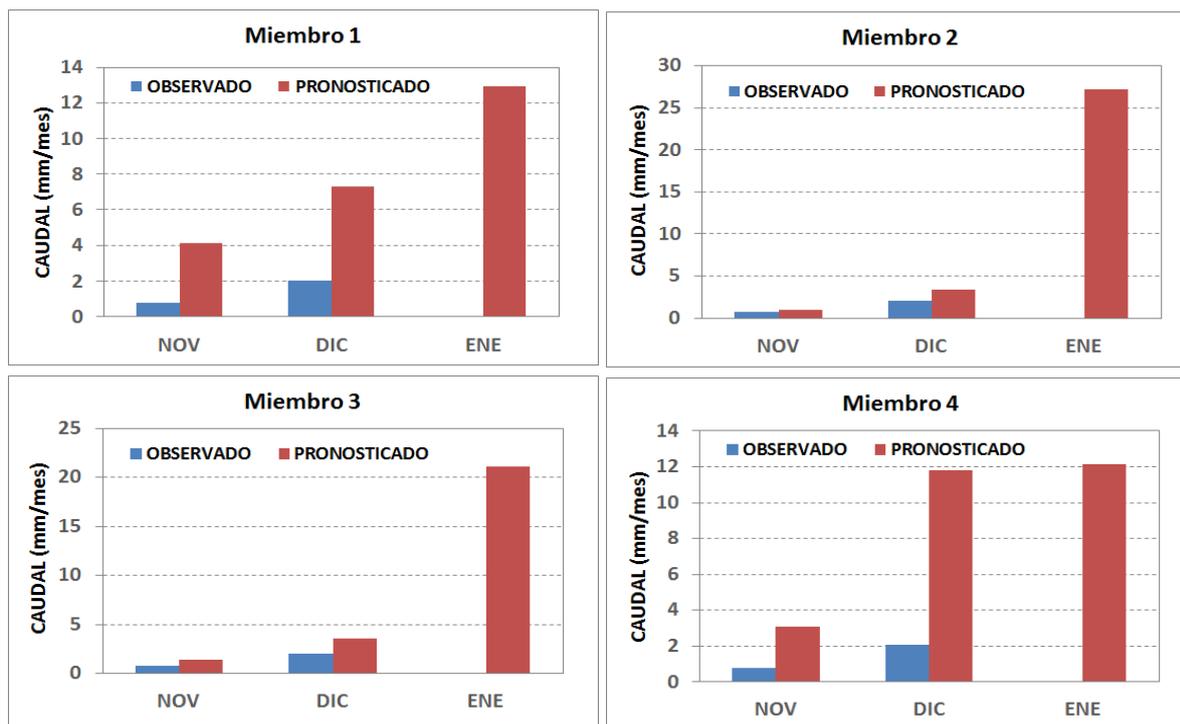


Figura 4-15 Pronóstico de caudal obtenido a partir del pronóstico de precipitación WRF (Nov-Dic-Ene)

Se puede observar en la Figura 4-15 y miembro 1 que el caudal pronosticado (barra de color rojo) es superior a los caudales observados (barra de color azul) en los meses pronosticados en noviembre y diciembre, esto debido principalmente a que el pronóstico de precipitación generado por el modelo WRF en el mes de noviembre también es superior a la precipitación observada en noviembre, situación similar ocurre en el mes de diciembre.

De la Figura 4-16 se puede observar que los caudales generados por los miembros 2 y 3 son los que representaron mejor el caudal en los meses de noviembre y diciembre, los miembros 1 y 4 han sobreestimado los caudales observados.

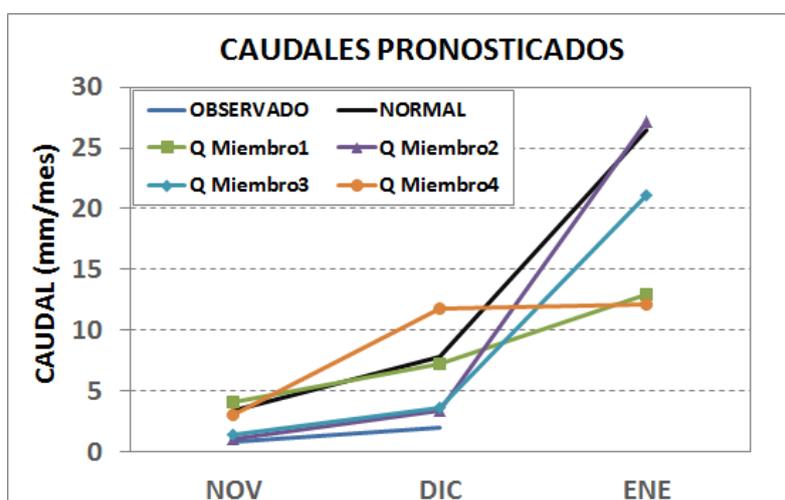


Figura 4-16 Pronóstico del caudal para los noviembre y diciembre 2017 y enero 2018 generado con el pronóstico WRF (miembros 1, 2, 3 y 4)

5. CONCLUSIONES

- La cuenca del río Ramis cuenta con una buena cantidad de estaciones meteorológicas lo cual ha permitido estimar la precipitación media areal de manera adecuada.
- El análisis de la calidad de los datos se ha realizado mediante el análisis de doble masa a las estaciones pluviométricas de la cuenca Ramis. El análisis ha considerado 10 estaciones de precipitación: Ananea, Arapa, Azangaro, Chuquibambilla, Crucero, Huancane, Llally, Mañazo, Pampahuta y Yauri para un periodo de 22 años entre los años 1994 a 2015. El análisis de doble masa muestra que los datos se ajustan bastante bien a una ecuación lineal lo cual indica que la información ha sido medida de manera adecuada en las estaciones evaluadas.
- El comportamiento del caudal observado en la estación Puente Carretera Ramis en los últimos 24 años se ha mantenido sin cambios, es decir el mayor caudal se presenta en el mes de febrero y el caudal mínimo se presenta en el mes de setiembre.
- En cuanto a los pronósticos de precipitación del modelo WRF, el mes de diciembre ha sido el mas variable, por ejemplo el miembro 4 mostro una precipitacion de casi 150 mm y el observado fue de 30 mm en promedio. El miembro 2 es el que ha producido el pronóstico mas acertado y por lo tanto se sugiere que puede ser utilizado para fines de pronóstico.
- En el proceso de calibracion y validacion, la mejor performance del modelo GR2M se ha obtenido empleando la precipitacion areal estimada con el metodo Thiessen y por lo tanto para fines de pronóstico operativo se debe emplear esta metodología para estimar la precipitación areal.
- Para el pronóstico de la precipitación en los meses de noviembre-diciembre-enero se han usado los pronósticos en 15 puntos proporcionados por la Subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera de SENAMHI.
- El pronóstico de caudal en el periodo noviembre-diciembre-enero muestra que los miembros 1 y 4 han sobreestimado los pronósticos en noviembre y diciembre, el miembro 2 ha pronosticado muy bien el caudal de noviembre y el miembro 3 ha generado mejores pronosticos de caudal que los miembros 1 y 4 pero no tan bueno como el miembro 2.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda contar con un período de información de 30 años por lo menos para realizar la calibración y validación de un modelo hidrológico, en este caso se ha utilizado 24 años de información.
- Se insta a que la Subdirección de modelamiento numérico de la atmósfera de SENAMHI continúe trabajando en la mejora de los pronósticos de precipitación con el modelo WRF. Se sugiere tener acceso a mapas grillados de lluvias estacionales pronosticadas e indicando las incertidumbres con fines de optimización del modelamiento hidrológico.
- Se sugiere que el modelo hidrológico calibrado GR2M en este estudio se continúe evaluando durante los próximos 6 meses para determinar finalmente si puede ser usado de manera operacional.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MOLNAR (2011). "Calibration. Watershed Modelling", SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.

RIVASPLATA (2012). "Desertificación y desertización en el altiplano andino peruano: comparación de manejo del territorio por las sociedades pretéritas", Universidad Internacional de Andalucía.