



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE LOS APORTES HÍDRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE
TARAPACÁ A LA PAMPA DEL TAMARUGAL MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN
DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO GSSHA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN DAVID VÁZQUEZ GASTY

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DOLORINDA DANIELE
RENÉ FIGUEROA LEIVA

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Sebastián David Vázquez Gasty
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: XIMENA VARGAS**

**ANÁLISIS DE LOS APORTES HÍDRICOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE
TARAPACÁ A LA PAMPA DEL TAMARUGAL MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL
MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO GSSHA**

En la I Región, uno de los acuíferos más importantes es el de la Pampa del Tamarugal, y de él dependen el agua potable de la ciudad de Iquique, la minería no metálica, la agricultura y los recursos naturales protegidos. La recarga de este acuífero es alóctona (Viguiet, 2013), pues viene dada por la circulación de agua desde la zona altiplánica y precordillerana y uno de los mayores aportes hídricos viene dado por la cuenca de la Quebrada de Tarapacá.

El presente trabajo consiste en el estudio de esos aportes hídricos mediante la implementación del modelo hidrológico GSSHA, el cual permite realizar simulaciones hidrológicas tanto de procesos superficiales como subterráneos y corresponde a un modelo de carácter distribuido y base física.

Para cumplir con el objetivo principal del trabajo, se construyó y adecuó el set de forzantes hidrometeorológicas a escala horaria requerido por el modelo para el periodo 2004-2015. Ahora bien, debido a la inexistencia de una estación fluviométrica a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá se procedió a calibrar y validar la modelación en la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya, obteniendo métricas de eficiencia $NSE=0,66$ y $NSE_{log}=0,63$ para la calibración y $NSE=0,62$ y $NSE_{log}=0,61$ para la validación a nivel mensual.

Analizando los resultados de la modelación se estima un aporte de escurrimiento superficial promedio a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá del orden de 586 (l/s) en que la mayoría de éste sucede durante eventos lluviosos del invierno Altiplánico, específicamente durante los meses de enero a marzo, mientras que el resto del año se aprecia una clara disminución de este flujo promediando el resto de los meses un monto de 127 (l/s). Por otro lado, también se estima la circulación profunda del sistema o bien flujo subterráneo permanente promedio de 99 (l/s), valor cercano a lo entregado por DGA (2014) cuyo valor es de 90 (l/s). Ambos aportes representarían los mecanismos mediante el cual se recarga la Pampa, el primero por la infiltración que ocurriría en el abanico aluvial de la cuenca y el otro por una circulación profunda.

*“One, remember to look up at the stars and not down at your feet.
Two, never give up work. Work gives you meaning and purpose
and life is empty without it. Three, if you are lucky enough to
find love, remember it is there and don't throw it away”*
Stephen Hawking

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por el apoyo incondicional que han mostrado durante toda mi vida, tanto en los buenos como en los malos momentos. En particular, a mis padres quienes se han sacrificado trabajando duro para darnos lo mejor a mí y a mi hermano aun estando lejos de casa; y, además, nos han enseñado a nunca rendirnos hasta conseguir lo que nos proponamos y a perseguir nuestros sueños.

Agradezco a la empresa AQUAVEO por haberme otorgado la licencia de estudiante para ocupar el programa WMS, sin el cual no hubiese logrado realizar este trabajo. Hago mención especial a Tracy Clark quien me ayudó en el proceso de la licencia, además del Dr. Downer y Dr. Follum ambos miembros de la US Army Corps of Engineers, quienes me ayudaron enormemente a comprender más el modelo.

Agradezco a mis amig@s de la vida, a los del colegio (los cabros de siempre que los quiero mucho), a los de Bachi (mis amigos Pedios que saben quiénes son y con ellos hasta el final), mis amigos de Beauchef (los del team Vela, los de la 258 en fin cada uno sí lee esto entenderá) quienes me han brindado su cariño y apoyo siempre y además hemos ido creciendo y afrontando etapas similares con cada uno. A mi Cuchi por su amor y apoyo durante esta última etapa. Los quiero mucho a todos y gracias por tanto, sé que nos veremos siempre.

De igual forma, quiero agradecer a mi profesora guía, Ximena Vargas, quien desde un principio se mostró interesada en el tema y me ofreció su apoyo durante la realización de esta memoria además de su disponibilidad para resolver dudas o simplemente conversar un poco. A Linda Daniele por sus comentarios y sus palabras de motivación para continuar el trabajo. A René por sus observaciones. Agradezco también a la Jaqui por sus consejos y conversaciones y a los compañeros de la pecera con quienes compartí bastante durante el trabajo y forjamos amistades nuevas. Hago una mención honrosa al profesor César Pastén quien sin verse obligado me facilito una computadora potente para poder terminar la memoria.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 General	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	3
2.1.1 El invierno altiplánico	4
2.2 MECANISMOS DE RECARGA DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL	4
2.3 ANTECEDENTES DE LOS APORTES HÍDRICOS PRODUCIDOS POR LA CUENCA EN ESTUDIO	5
2.4 REANÁLISIS ATMOSFÉRICO ERA-INTERIM.....	6
2.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	7
2.5.1 Tipos de modelación	7
2.5.2 El modelo GSSHA.....	7
2.5.3 Criterios de eficiencia de modelación	9
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
3.1 CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ	11
3.1.1 Contexto General de la cuenca.....	11
3.1.2 Caracterización del Área de estudio.....	12
3.1.3 Sistema Físico natural	13
3.1.4 Información fluviométrica	14
3.1.5 Derechos de agua	16
3.1.6 Usos de suelo	19
3.1.7 Geología Regional	20
3.1.8 Hidrogeología.....	22
CAPÍTULO 4: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS	24
4.1 FORZANTES METEOROLÓGICAS.....	24
4.1.1 Precipitación.....	25
4.1.2 Temperatura	27
4.1.3 Velocidad del viento.....	29
4.1.4 Humedad relativa	31
4.1.5 Presión.....	35
4.1.6 Cobertura de nubes.....	36
4.1.7 Radiación.....	36
4.2 CREACIÓN DE MODELO GSSHA	38
CAPÍTULO 5: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	41
5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	41
5.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	43
5.3 ANÁLISIS DE LOS APORTES HÍDRICOS DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.....	45
5.3.1 Aporte superficial	45
5.3.2 Aporte subterráneo	48
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
6.1 CONCLUSIONES PRINCIPALES	49
6.2 RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS.....	54
ANEXO A: MODELO GSSHA	54
ANEXO B: ECUACIONES ÚTILES	56
ANEXO C: MAPAS Y FIGURAS ADICIONALES.....	59
ANEXO D: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA HUMEDAD RELATIVA	61

Índice de tablas

Tabla 2.1: Tabla resumen de la recarga producida por la Quebrada de Tarapacá hacia la Pampa del Tamarugal.....	6
Tabla 2.2: Calificación del desempeño de indicadores de eficiencia para modelación a nivel mensual.....	10
Tabla 3.1: Parámetros Morfométricos Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	13
Tabla 3.2: Descripción de las estaciones en la zona de estudio.....	14
Tabla 3.3: Canales Quebrada de Tarapacá. Fuente: CNR, 2017.....	18
Tabla 3.4: Porcentajes respecto al área total de los respectivos usos de suelo.....	19
Tabla 4.1: Ubicación y Cota estaciones Meteorológicas: Huara-Baquedano, Cerro Colorado y Coyacagua. Fuente: DGA.....	32
Tabla 5.1: Parámetros y valores o ponderadores considerados en el análisis de sensibilidad..	41
Tabla 5.2: Parámetros usados para el análisis de hc, ps y ghc.....	41
Tabla 5.3: Métricas tras modelación.....	45
Tabla A.1: Parámetros de GSSHA asociados a cada módulo 1.....	54
Tabla A.2: Parámetros de GSSHA asociados a cada módulo 2.....	55
Tabla C.3: Parámetros morfométrico cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya.....	59

Índice de figuras

Figura 2.1: Representación esquemática Ciclo Hidrológico. Fuente: USGS (United States Geological Survey).....	3
Figura 2.2: Mapa topográfico cordillera de los Andes, enmarcando zona donde se localiza el altiplano. Fuente: Modificado de Lin et al. (2016).....	4
Figura 2.3: Modelo conceptual a escala regional que representa la circulación de agua subterránea del altiplano y la cordillera de los Andes a la Pampa del Tamarugal. Fuente: Modificado de Jayne et al., 2016 quién adaptó de Magaritz et al., 1990.....	5
Figura 2.4: Tasa de precipitación media (mm/día) en periodo 1989-2009 y comparación decadal del GPCC (a,c) y ERA-Interim (b,d). Fuente: Dee et al. (2011).....	6
Figura 2.5: Diagrama de flujo de la implementación del modelo GSSHA. Fuente: Basado en Wijayarathne, 2015.....	8
Figura 3.1: Mapa cuenca Pampa del Tamarugal. Fuente: CIDERH, 2012.....	11
Figura 3.2: Mapa de la Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	12
Figura 3.3: Climograma Cuenca Quebrada de Tarapacá, periodo 2004-2015.....	13
Figura 3.4: Curva de Variación Estacional Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan, periodo 1984-2001. Fuente: DGA, 2004.....	14
Figura 3.5: Estaciones fluviométricas en la cuenca Quebrada de Tarapacá.....	15
Figura 3.6: Caudal observado medio diario en Quebrada de Tarapacá en Sibaya.....	16
Figura 3.7: Diagrama unifilar general de la subcuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: DGA, 1991.....	17
Figura 3.8: Usos de suelos en la cuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: IDE (2018).....	19
Figura 3.9: Geología cuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: SERNAGEOMIN (2003).....	21
Figura 3.10: Unidades Hidrogeológicas cuenca quebrada de Tarapacá. Fuente: Adaptado de Toro Piñeiro (2015).....	23
Figura 4.1: Mapa de la grilla de forzantes en la zona de estudio.....	24

Figura 4.2: Mapa de las áreas de influencia y de los puntos de la grilla meteorológica seleccionados tras aplicar el Buffer, Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	25
Figura 4.3: Gráfico comparativo del mejoramiento de resolución temporal.....	26
Figura 4.4: Hietograma cuenca Quebrada de Tarapacá periodo 2004-2015.....	26
Figura 4.5: Precipitación anual media grillada en el periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	27
Figura 4.6: Comparación de resolución temporal de temperaturas.....	28
Figura 4.7: Temperatura a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.....	28
Figura 4.8: Gradiente de temperatura.....	29
Figura 4.9: Temperatura anual media anual promedio grillada periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	29
Figura 4.10: Velocidad de viento a nivel horario en periodo 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.....	30
Figura 4.11: Velocidad media anual del viento promedio grillada en el periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.....	30
Figura 4.12: Grilla de los datos espaciales del reanálisis atmosférico ERA-Interim.....	31
Figura 4.13: Ubicación estaciones meteorológicas Cerro Colorado, Huara-Baquedano y Coyacagua. En negro se observa la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya. Fuente: Casanova, 2012.....	32
Figura 4.14: Corrección Bias de la humedad relativa durante el mes de enero, estación Coyacagua.....	33
Figura 4.15: Corrección Bias de la humedad relativa durante el mes de febrero, estación Coyacagua.....	33
Figura 4.16: Comparación del promedio mensual entre lo observado en estación Coyacagua y lo ajustado del reanálisis en periodo 1986-2002.....	34
Figura 4.17: Comparación de la desviación estándar mensual entre lo observado en estación Coyacagua y lo ajustado del reanálisis en periodo 1986-2002.....	34
Figura 4.18: Humedad relativa horaria en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.....	35
Figura 4.19: Presión barométrica a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.....	35
Figura 4.20: Cobertura de nubes a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.....	36
Figura 4.21: Radiación directa a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.....	37
Figura 4.22: Radiación global a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.....	37
Figura 4.23: Esquema de la grilla de modelación de la cuenca Quebrada de Tarapacá en WMS 10.1.....	38
Figura 4.24: Uso de suelo grillado en la cuenca Quebrada de Tarapacá.....	39
Figura 4.25: Hidrogeología grillada en la cuenca Quebrada de Tarapacá.....	39
Figura 4.26: Grilla de precipitaciones en la cuenca Quebrada de Tarapacá.....	40
Figura 5.1: Variación de las métricas de calibración obtenidos para el análisis de sensibilidad.....	42
Figura 5.2: Serie de caudales medios diarios observados y simulados, periodo 2003-2015....	43
Figura 5.3: Serie de caudales medios mensuales observados y simulados, periodo 2003-2015.....	44
Figura 5.4: Curva de duración y variación estacional, periodo 2004-2015.....	44

Figura 5.5: Curva de caudales medios mensuales a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá.	46
Figura 5.6: Comparación caudales simulados mensuales en la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya y en la cuenca Quebrada de Tarapacá.	47
Figura 5.7: Comportamiento del NSElog ante la variación de la tasa de transferencia de agua.	48
Figura A.8: Conceptualización del modelo de humedad de suelo ocupado en GSSHA. Fuente: Downer (2007).	55
Figura B.9: Método de inverso a la distancia para escalar espacialmente la variable de interés.	58
Figura C.10: Mapa de la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya.	59
Figura C.11: Curva hipsométrica Quebrada de Tarapacá.	60
Figura C.12: Curva hipsométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya.	60
Figura D.13: Función de transferencia para el mes de marzo.	61
Figura D.14: Función de transferencia para el mes de abril.	61
Figura D.15: Función de transferencia para el mes de mayo.	62
Figura D.16: Función de transferencia para el mes de junio.	62
Figura D.17: Función de transferencia para el mes de julio.	63
Figura D.18: Función de transferencia para el mes de agosto.	63
Figura D.19: Función de transferencia para el mes de septiembre.	64
Figura D.20: Función de transferencia para el mes de octubre.	64
Figura D.21: Función de transferencia para el mes de noviembre.	65
Figura D. 22: Función de transferencia para el mes de diciembre.	65

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

La modelación hidrológica es el punto de partida para realizar una gestión adecuada del recurso hídrico en una cuenca pues permite simular el comportamiento de ésta tanto en el pasado como en el futuro. Además, dadas las tecnologías actuales se dispone de una alta gama de recursos de información geográfica, así como también de productos de reanálisis atmosféricos y otros, tales como el nuevo balance hídrico de Chile los cuales entregan la información necesaria para llevar a cabo dichas modelaciones.

Ahora bien, las condiciones de extrema aridez que ocurre desde la Región de Arica y Parinacota a la de Atamaca, determinan que los recursos subterráneos de la meseta altiplánica y de las quebradas con vertiente pacífica sean la principal fuente de abastecimiento de recursos de aguas continentales. Sin embargo, corresponden también a sectores con escasa información, en la mayoría de los casos sin estaciones hidrométricas, y con poco conocimiento hidrológico lo que dificulta la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico. Aumentar el conocimiento de los procesos hidrogeológicos e hidrológicos que intervienen y determinan los flujos aprovechables de estos sistemas es un trabajo de largo plazo. No obstante, el incremento de la demanda de agua (compañías mineras principalmente, y en menor grado ganadería y agricultura de los pueblos originarios) implica la búsqueda de soluciones de corto a mediano plazo, que a partir de la información disponible y en forma razonable, se pueda hacer cargo de la evaluación hidrológica dentro de un cierto nivel de certidumbre (DGA, 2012).

En la I Región, uno de los acuíferos más importantes es el de la Pampa del Tamarugal, y de él dependen el agua potable de la ciudad de Iquique, la minería no metálica, la agricultura y los recursos naturales protegidos. En este marco la Dirección General de Aguas ha comenzado a desarrollar un plan de investigación hidrogeológica de las principales cuencas aportantes a la Pampa del Tamarugal, entre las cuales destaca la de la Quebrada de Tarapacá (DGA, 2014).

En esta zona del país es común que las zonas de aportes hídricos que se transforman en recarga subterránea estén alejadas de los sistemas de acuífero y, además, existe una escasez de los datos hidrometeorológicos tanto temporal como espacialmente.

Es por esta razón que surge la necesidad de realizar una nueva modelación, una más actualizada y de características distribuidas donde además se aprovechen las tecnologías actuales, así como también las nuevas fuentes de información con el fin de diferenciar con mayor exactitud los aportes hídricos en este tipo de zona, en particular el que se tiene en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

El modelo hidrológico distribuido que se utilizó corresponde al modelo GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) desarrollado por la USACE ERDC (US Army Corps of Engineers Engineering Research and Development Center). Éste corresponde a un modelo de grilla equiespaciada que permite separar la cuenca y asignar a cada celda el valor de tipo y uso de suelo correspondiente. También permite el ingreso de precipitación uniforme o distribuida, mediante la entrada de un número de estaciones de precipitación que se estime necesario (Sanzana, 2008).

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Analizar de los aportes hídricos de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá a la Pampa del Tamarugal mediante la implementación del modelo hidrológico distribuido GSSHA.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar la zona de estudio y las variables hidrometeorológicas presentes en la modelación, así como también los parámetros del terreno.
- Adecuar, distribuir y trabajar cada forzante hidrometeorológica poder llevarla a una escala temporal y espacial adecuada para que el modelo funcione.
- Modelar la cuenca Quebrada de Tarapacá tanto en su componente superficial como subterránea.
- Calibrar y validar el modelo confeccionado.
- Analizar los resultados y concluir respecto a los aportes hídricos que se entregan a la Pampa del Tamarugal.

1.3 Organización del documento

El siguiente documento se organiza como sigue:

En el Capítulo 2, se presenta la revisión bibliográfica en cuanto a los mecanismos que gobiernan los procesos de recarga a la Pampa del Tamarugal; se muestran también algunos estudios anteriores y se realiza una breve reseña sobre los modelos higrológicos y en particular el GSSHA.

En el Capítulo 3, se describe y caracteriza la zona de estudio, abarcando desde el contexto general de ésta hasta señalar un breve marco hidrogeológico de la zona.

En el Capítulo 4, se muestran las metodologías utilizadas en la construcción y adecuación de las forzantes hidrometeorológicas requeridas por el modelo a escala horaria para el periodo del estudio. Además, se hace una breve descripción de la implementación del modelo.

En el Capítulo 5, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros más sensibles durante la modelación; luego se muestran los resultados de la calibración y validación de la modelación realizada y al final de este capítulo se presenta el análisis de los aportes hídricos que aporta la cuenca en estudio hacia la Pampa.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones finales del estudio realizado en base al cumplimiento de los objetivos planteados al inicio.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

En este capítulo, se presentan los antecedentes bibliográficos referentes a los temas abordados en la presente memoria. En particular, se describe el ciclo hidrológico y el fenómeno del invierno Altiplánico; luego se entregan antecedentes de las formas en las que se recarga el acuífero de la Pampa del Tamarugal y sobre diversos estudios que se han llevado a cabo para evaluar los recursos hídricos que aporta la cuenca Quebrada de Tarapacá hacia éste. Además, se presenta una descripción del reanálisis atmosférico y el modelo hidrológico utilizado a en este estudio, así como de las métricas ocupadas para evaluar la eficiencia de éste.

2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico, definido por Chow et al. (1994) en el campo de la hidrología, se refiere a un ciclo sin un determinado principio ni fin constituido por una serie de procesos que ocurren en forma continua. El ciclo, ilustrado en la Figura 2.1, muestra como el agua se evapora desde los océanos hasta condensarse, precipitando parte de ella sobre el océano y la parte restante se transporta junto al agua evaporada desde la superficie terrestre, donde posteriormente se eleva y finalmente se condensa precipitando sobre la superficie terrestre. Parte de esta precipitación es interceptada por la vegetación, otra fluye sobre el suelo como flujo superficial para finalmente desembocar sobre los ríos convirtiéndose en escorrentía superficial. Asimismo, otra parte puede infiltrarse en el suelo y desembocar como escorrentía superficial, como también percolar profundamente y recargar las aguas subterráneas u escurrir hacia manantiales o ríos para contribuir a la escorrentía superficial. Finalmente, el agua puede fluir hacia el océano o evaporarse hacia la atmósfera a medida que el ciclo sigue su curso.



Figura 2.1: Representación esquemática Ciclo Hidrológico. Fuente: USGS (United States Geological Survey).

2.1.1 El invierno altiplánico

Entre los 15° y 22° la cordillera de Los Andes se divide en dos cadenas originando una alta meseta conocida como el altiplano, con alrededor de 250 km de ancho y una elevación promedio de 3800 m. El altiplano (ver Figura 2.2) exhibe un clima de transición, en medio de los climas contrastantes exhibidos por la región al oeste del altiplano (extrema aridez y estabilidad atmosférica) y las tierras bajas al este del altiplano (Régimen Tropical - Continental) descritas por Aceituno & Montecino (1997 cit. Garreaud, 2000).

La precipitación en el altiplano se concentra entre los meses de noviembre y marzo (80% del total de precipitación), alcanzando un máximo en el mes de enero. Esta estación es conocida como Invierno Altiplánico, en el cual las precipitaciones son provocadas esencialmente por tormentas convectivas producidas durante la tarde y las primeras horas de la noche. Asimismo, los días en los cuales existe actividad convectiva regularmente se agrupan en secuencias de una semana (episodios lluviosos), con un lapso de secuencia de días sin convección y de similar periodo (episodios secos) (Garreaud, 2000). Producto de la escasez de precipitaciones durante el resto del año, las precipitaciones en época estival contribuyen el mayor aporte de agua dulce para uso humano y las distintas actividades económicas del sector.

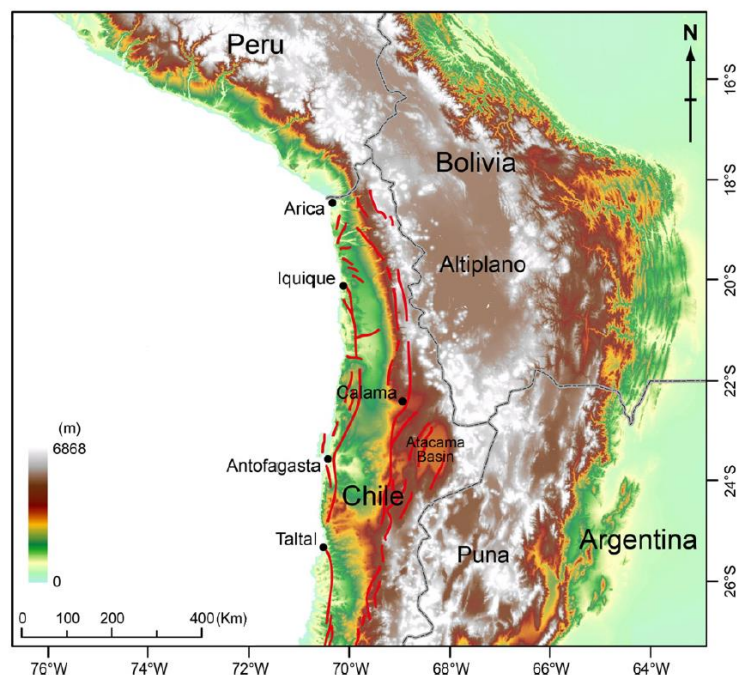


Figura 2.2: Mapa topográfico cordillera de los Andes, enmarcando zona donde se localiza el altiplano. Fuente: Modificado de Lin et al. (2016).

2.2 Mecanismos de recarga de la Pampa del Tamarugal

El estudio isotópico e hidrogeoquímico realizado por Magaritz et al. (1990) da argumentos convincentes acerca de la circulación profunda de agua desde la Cordillera de los Andes y el Altiplano. En dicho estudio se plantea que los flujos con baja salinidad deben emerger de aguas

recargadas desde lo alto de la Cordillera a través de un sistema de fallas que se encuentran debajo de las cuencas hidrográficas.

Además de esta circulación profunda, Houston (2002) estudió la respuesta del hidrograma ocurrida en el evento de inundación del año 2001 tras el cual estimó un flujo superficial de 34 Mm^3 y mostró que la precipitación infiltrante o flujo desde el Altiplano y la Precordillera está gobernado por la topografía superficial a través las quebradas aluviales.

En resumen, existen dos mecanismos fundamentales de recarga al acuífero de la Pampa del Tamarugal, uno por circulación profunda de agua subterránea y otro por infiltración ocurrida tras eventos extremos, los cuales operan a diferentes escalas espaciales y temporales (Jayne et al., 2016). En la Figura 2.3 se presenta un esquema conceptual de estos mecanismos.

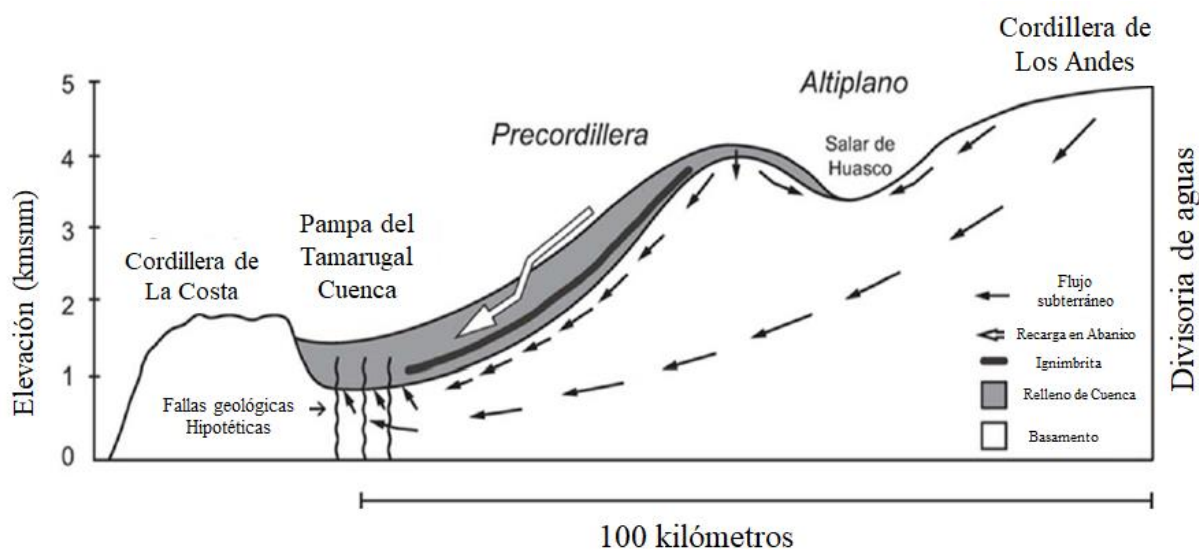


Figura 2.3: Modelo conceptual a escala regional que representa la circulación de agua subterránea del altiplano y la cordillera de los antes a la Pampa del Tamarugal. Fuente: Modificado de Jayne et al., 2016 quién adaptó de Magaritz et al., 1990.

2.3 Antecedentes de los aportes hídricos producidos por la cuenca en estudio

Se destacan cuatro estudios anteriores donde describen la recarga producida por la cuenca Quebrada de Tarapacá hacia la Pampa del Tamarugal: El estudio de Grilli et al. (1986), el de JICA et al. (1995), el de DICTUC (2006) y el de DGA (2014).

El primero hace alusión a que la recarga hacia el acuífero viene dada por el flujo base subterráneo proveniente de las principales quebradas que alimentan el sistema entre las que se encuentran las quebradas de Aroma, Tarapacá, Sagasca, Quipisca, Pica, Chacarilla y Ramada.

El segundo plantea que la recarga es considerada el monto de la escorrentía superficial proveniente de las mismas quebradas. Esta escorrentía la obtuvieron utilizando la precipitación anual media y un coeficiente de escorrentía para la quebrada de Tarapacá del orden de 5,6%.

El tercero mediante la implementación de un modelo hidrológico basado en HEC-HMS plantea que la recarga la constituye el aporte de la precipitación hacia los acuíferos y que no vuelven a aflorar en las cuencas por vías naturales y viaja subterráneamente hasta recargar en este caso al acuífero de la Pampa del Tamarugal.

El último mediante un estudio en terreno en el cual se encontraron unos pozos en la zona del cono aluvial de la cuenca y mediante el uso de perfiles TEM y datos observados estimaron el flujo permanente subterráneo que la Quebrada de Tarapacá aporta a la Pampa.

En síntesis, en la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los montos calculados en los estudios expuestos.

Tabla 2.1: Tabla resumen de la recarga producida por la Quebrada de Tarapacá hacia la Pampa del Tamarugal.

	Grilli et al. (1986)	JICA (1995)	DICTUC (2006)	DGA (2014)
Recarga (l/s)	385	318	295	90

2.4 Reanálisis Atmosférico ERA-Interim

El reanálisis atmosférico ERA-Interim (Dee et al., 2011) desarrollado por la “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts” (ECMWF) es un producto que mediante un análisis variacional en cuatro dimensiones de la atmósfera superior (temperatura, viento, humedad, ozono, presión) y su posterior asimilación puede estimar variables físicas tales como precipitación, radiación, propiedades de las nubes, entre otros. La resolución espacial de la data disponible es de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ y posee 60 niveles verticales desde la superficie hasta que el nivel de presión alcanza 0,1 hPa. Además, posee información desde 1979 hasta el presente, con una actualización mensual y una demora de dos meses hasta la fecha actual. A modo de ejemplo en la Figura 2.4 se muestran las tasas de precipitación media para el periodo 1989-2009 generadas por el reanálisis.

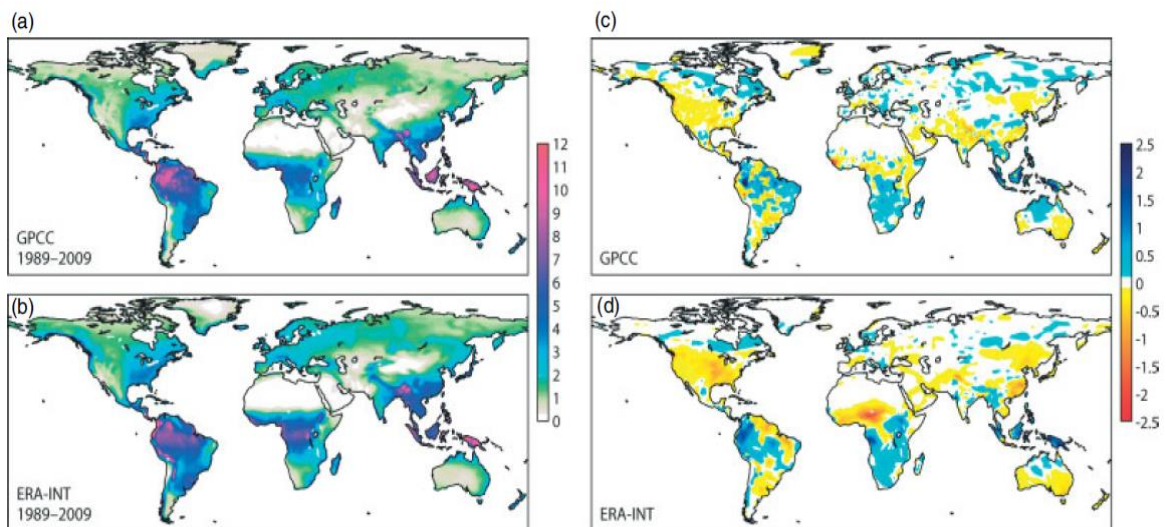


Figura 2.4: Tasa de precipitación media (mm/día) en periodo 1989-2009 y comparación decadal del GPCP (a,c) y ERA-Interim (b,d). Fuente: Dee et al. (2011).

2.5 Modelación Hidrológica

Para analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca en estudio y con ello los aportes hídricos que genera hacia la Pampa del Tamarugal, se ha seleccionado a priori el modelo hidrológico GSSHA. Para generar una mejor comprensión en base a la modelación hidrológica, se presenta a continuación una breve descripción de los distintos tipos de modelación y además una descripción del modelo a utilizar en el presente trabajo.

2.5.1 Tipos de modelación

Los modelos hidrológicos pretenden recrear el comportamiento de un sistema hidrológico real a partir de ecuaciones que relacionan las forzantes del sistema con sus respuestas. Esta recreación corresponde a una simplificación de los sistemas naturales complejos y pretende rescatar los aspectos relevantes de estos sistemas (Flügel, 1995). Estos modelos cuentan con diversos criterios de clasificación, de los cuales se destacan tres y se presentan a continuación (Singh, 1988).

1. De acuerdo con la naturaleza de su algoritmo de cálculo:
 - a. Empírico: Relaciones encontradas de manera empírica para describir los procesos hidrológicos.
 - b. Conceptual: Representación matemática simplificada de los procesos.
 - c. Físicamente basado: Leyes físicas para describir los procesos hidrológicos.
2. De acuerdo con el enfoque con el que maneja sus resultados:
 - a. Estocásticos: Variables de estado poseen una distribución de probabilidad, lo que permite incluir rangos de incerteza.
 - b. Determinísticos: Variables de estado son definidas por forzantes y parámetros del modelo.
3. De acuerdo con su representatividad espacial:
 - a. Agregados: El sistema corresponde a una única unidad de respuesta hidrológica que recibe y entrega agua, considerando homogeneidad en las características geomorfológicas de la cuenca.
 - b. Distribuidos: El sistema se representa espacialmente por una grilla que incorpora la heterogeneidad de las características geomorfológicas de la cuenca.
 - c. Semidistribuidos: Conjunto de respuestas hidrológicas que intercambian el agua entre sí y que representan la heterogeneidad espacial de algunas de las características geomorfológicas de la cuenca.

2.5.2 El modelo GSSHA

Este modelo ha sido desarrollado por el centro de investigación y desarrollo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (U.S army ERDC, por sus siglas en inglés) y liderado por los Doctores Charles Downer y Fred Odgen (Downer & Ogden, 2004). El modelo GSSHA (Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis) corresponde a uno de carácter físicamente basado, determinístico y distribuido que simula la respuesta hidrológica de una cuenca sujeta a inputs hidrometeorológicos. La cuenca está dividida en celdas que responden a una grilla de diferencia finita uniforme. Ahora bien, los procesos que ocurren antes, durante y después de un evento de precipitación son calculados en cada una de éstas y son integradas para producir la respuesta de la

cuenca (Downer & Ogden, 2006). En la Figura 2.5 se describe un diagrama de flujo explicativo de los procesos que reproduce el modelo y su implementación. Además, en el anexo A se puede consultar más detalles del modelo.

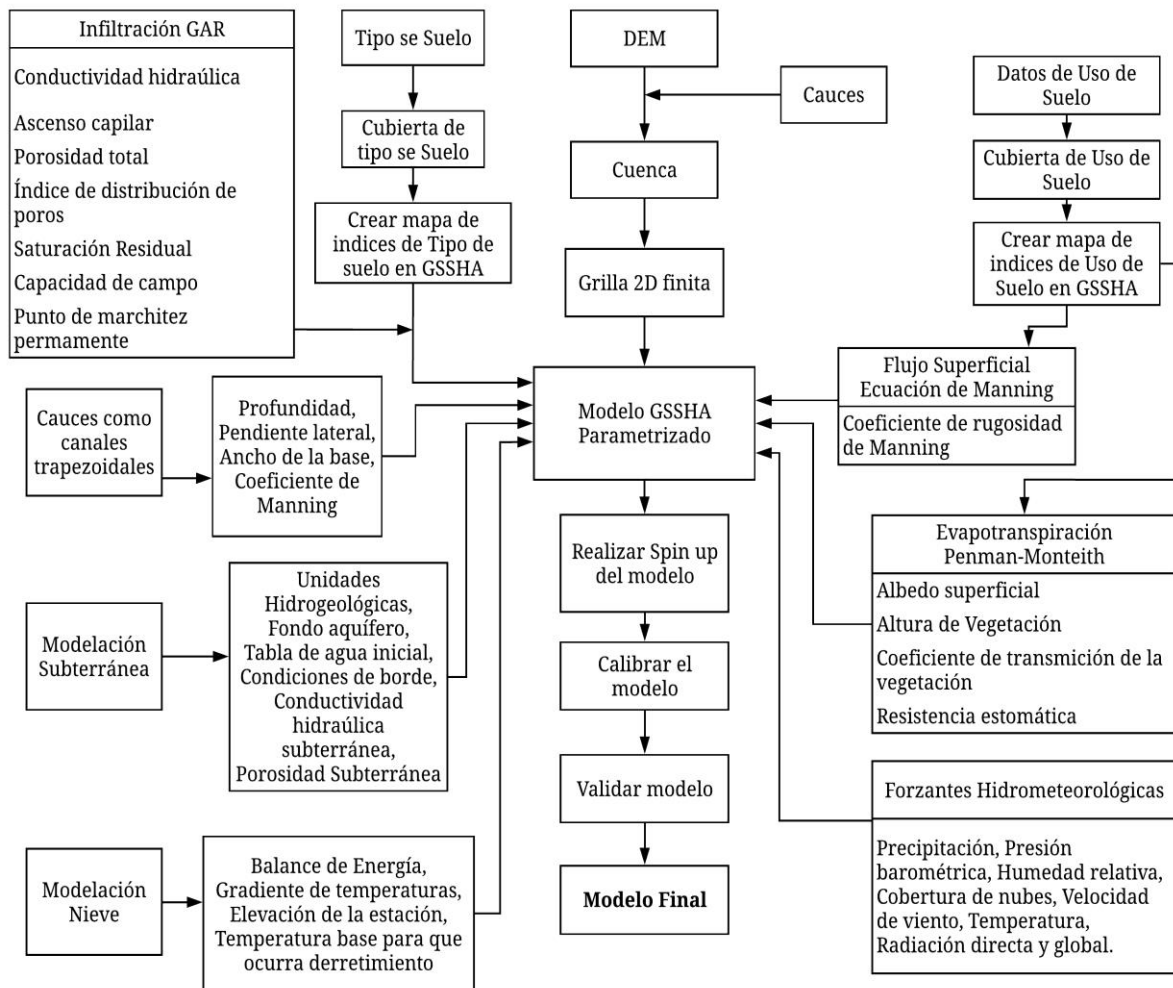


Figura 2.5: Diagrama de flujo de la implementación del modelo GSSHA. Fuente: Basado en Wijayarathne, 2015.

Entre las principales ventajas de este modelo se pueden destacar la conexión entre la modelación superficial y subterránea que ofrece y que es de importancia para este estudio. Por otro lado, la base física del modelo entrega un respaldo teórico que permite representar correctamente los procesos físicos involucrados y así simular robustamente la hidrología de alguna zona en estudio.

La principal desventaja radica en la complejidad que conlleva la distribución espacial de los parámetros de los diferentes procesos y su posterior calibración y la gran capacidad computacional que se requiere, puesto que el modelo trabaja de manera horaria a intrahoraria, lo cual genera largos tiempos de cómputo dependiendo del tamaño de la grilla, los pasos de tiempo, entre otros.

La utilización de este modelo posee muy pocos antecedentes a nivel nacional, entre los cuales destacan:

- Pérez (2007): Determinación de hidrogramas unitarios utilizando el modelo GSSHA, concluyendo que los resultados del modelo no permiten ajustar las formas y magnitudes de hidrogramas unitarios reales y simulados y además el análisis de sensibilidad de parámetros físicos introducidos por el usuario indica que los resultados generales del modelo no varían significativamente, por lo que se concluye que los hidrogramas dependen fundamentalmente de la información geomorfológica proporcionada por los modelos de elevación digital.
- Sanzana (2008): Análisis de la incertidumbre en la modelación hidrológica mediante el uso de SIG y GSSHA, concluyendo que el proceso de calibración del modelo resultó satisfactorio para las tormentas que analizó en su estudio, logrando coeficientes de Nash Sutcliffe sobre 0,915. Además, concluye que es necesario recurrir a la calibración de más tormentas o en su defecto a ocupar el modelo para simulaciones largas (Long term simulations) para validar y obtener un mayor grado de precisión. Por último, indica que los parámetros del proceso de infiltración, tanto en sus rangos como en su distribución espacial, generan una incertidumbre que es importante estudiar, haciendo alusión principalmente a la rugosidad, conductividad hidráulica y a la porosidad del suelo.

Es importante destacar que el presente estudio utiliza el modelo GSSHA para realizar simulaciones largas, por lo cual se ocupan todos los módulos hidrológicos que ofrece este modelo para su simulación, es decir, desde la infiltración, la evapotranspiración y la acumulación de nieve hasta el flujo subterráneo, lo cual hace de este trabajo el primero a nivel nacional.

2.5.3 Criterios de eficiencia de modelación

El objetivo de la modelación, en primera instancia, es simular de buena manera series observadas de alguna variable de interés. En este marco la calibración del modelo se reduce a un problema de optimización en el que se debe maximizar una función objetivo variando los parámetros, respetando las ecuaciones internas del modelo y la factibilidad física de la parametrización.

Cabe destacar que, debido a la complejidad de los procesos simulados y la cantidad elevada de parámetros por calibrar, la función objetivo debe satisfacer multipropósitos y es debido a esto que se presentan a continuación las métricas de comparación para verificar el desempeño de la modelación frente a datos observados. Los que se ocuparan en el presente trabajo incluyen los siguientes: Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), Kling-Gupta Efficiency (KGE) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009) y derivados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim} - X_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (2.1)$$

$$NSElog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(X_{sim}) - \log(X_{obs}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(X_{obs}) - \log(\bar{X}_{obs}))^2} \quad (2.2)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (2.3)$$

$$KGElog = 1 - \sqrt{(r_{log} - 1)^2 + (\beta_{log} - 1)^2 + (\gamma_{log} - 1)^2} \quad (2.4)$$

Donde,

- n : Numero de observaciones.
- X_{sim} : Variable simulada en el tiempo i .
- X_{obs} : Variable observada en el tiempo i .
- \bar{X}_{obs} : Promedio de las observaciones.
- r : Coeficiente de correlación lineal entre observaciones y simulaciones.
- β : Razón entre el promedio simulado y observado.
- γ : Razón entre la desviación estándar simulada y observada.
- r_{log} : Coeficiente de correlación lineal entre el logaritmo natural de las observaciones y simulaciones.
- β_{log} : Razón entre el promedio del logaritmo natural de los datos simulados y observados.
- γ_{log} : Razón entre la desviación estándar del logaritmo natural de los datos simulados y observados.

Las métricas anteriores varían entre $-\infty$ y 1, con lo cual indican un pésimo y un óptimo ajuste, respectivamente. Cabe destacar que cada métrica refleja un ajuste en particular. El NSE representa un buen ajuste a los valores medios y altos y el NSElog a los valores bajos, puesto que al aplicar el logaritmo natural a los datos disminuye la dispersión entre los valores. El KGE es una métrica multiobjetivo, la cual garantiza que el espacio generado por sus componentes se refleje en este indicador y así para obtener un mayor índice cada uno de éstos debe ser óptimos en conjunto. A su vez, el KGElog representa de mejor manera este indicador para evaluar el ajuste de los valores bajos.

La Tabla 2.2 muestra rangos de valores de la métrica NSE y su clasificación del desempeño de la modelación (Moriassi et al. 2007).

Tabla 2.2: Calificación del desempeño de indicadores de eficiencia para modelación a nivel mensual.

Desempeño	NSE
Muy bueno	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Bueno	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfactorio	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0,50$

Capítulo 3: Caracterización del Área de Estudio

Para llevar a cabo la modelación hidrológica de la cuenca a estudiar se debe en primer lugar caracterizarla en función de sus propiedades físicas y naturales, además de la información hidrometeorológica disponible en la zona. De este modo, en el presente capítulo se caracteriza la zona de estudio, desde una perspectiva general además de una local.

3.1 Cuenca de La Quebrada de Tarapacá

3.1.1 Contexto General de la cuenca

La cuenca Quebrada de Tarapacá forma parte de una estructura hidrogeológica e hidrográfica mayor pues pertenece a la cuenca endorreica de la Pampa del Tamarugal. El termino endorreico significa que ningún flujo superficial de agua fluye fuera de la cuenca. Esta cuenca se localiza en la Precordillera y la Depresión central de la I Región de Tarapacá, la cual posee una extensión de 17.353,15 (km²) (CIDERH, 2012). En la Figura 3.1 se aprecia la Región de Tarapacá diferenciada en cinco zonas hidrográficas y en color amarillo la de la Pampa del Tamarugal.

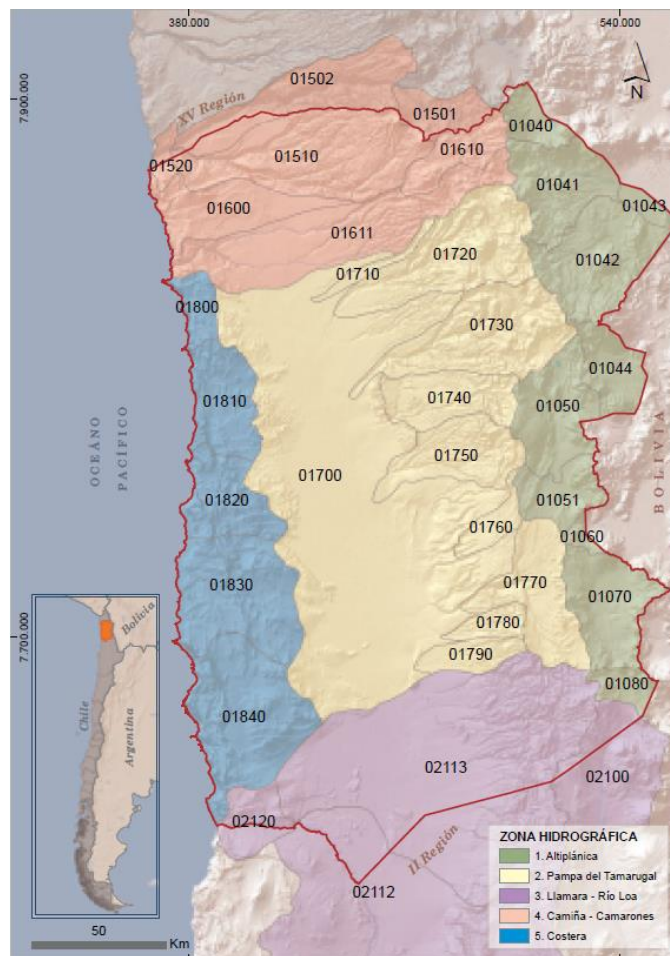


Figura 3.1: Mapa cuenca Pampa del Tamarugal. Fuente: CIDERH, 2012.

Los tributarios de esta cuenca se encuentran en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, y sus cursos superficiales son más bien efímeros. Estos provienen de las quebradas que descienden de las cumbres andinas, alimentadas por las lluvias de verano que se producen en el Altiplano. De la cordillera de la costa prácticamente no reciben alimentación debido a la inexistencia de precipitación en ella (DICTUC, 2006).

3.1.2 Caracterización del Área de estudio.

La Quebrada de Tarapacá (número 01730 en la Figura 3.1) define una cuenca que nace en la zona alta de la cordillera de los Andes, por sobre los 4500 m.s.n.m., y que corresponde al mayor curso de agua superficial de la Pampa del Tamarugal. A lo largo de su trayectoria, recibe tributarios habitualmente secos o efímeros (Casanova, 2012). Por la ribera derecha recibe el aporte de la Quebrada de Chusmiza, donde se ubican los baños termales de Chusmiza, mientras que por la ribera izquierda, el afluente principal es la Quebrada de Coscaya, que posee cabeceras enraizadas en la alta cordillera y drena hacia la pampa Lirima (DGA, 2004). En la Figura 3.2 se puede observar la cuenca a estudiar.

Cuenca Quebrada de Tarapacá

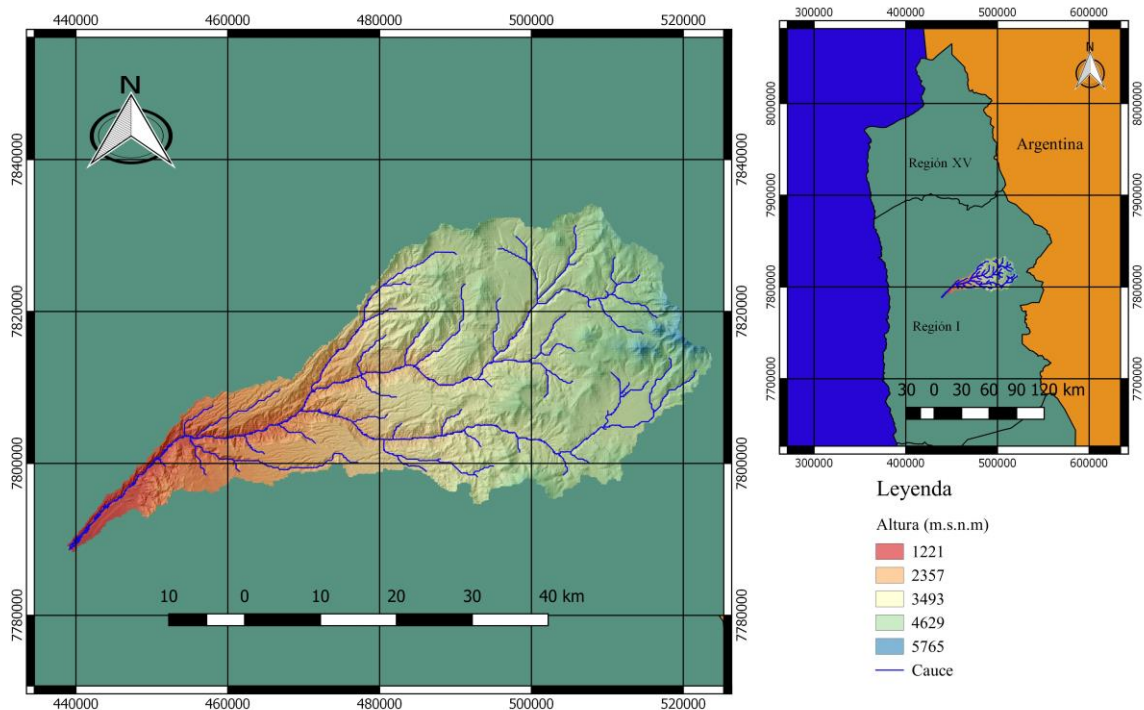


Figura 3.2: Mapa de la Cuenca Quebrada de Tarapacá.

Los parámetros morfométricos de la cuenca Quebrada de Tarapacá se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros Morfométricos Cuenca Quebrada de Tarapacá.

Parámetro Morfométrico	Valor
Longitud del eje del rio principal (km)	105,62
Área de la cuenca (km ²)	1724,73
Altura máxima (msnm)	5765
Altura mínima (msnm)	1221

3.1.3 Sistema Físico natural

La climatología de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá presenta tres tipos de climas, los cuales son (DGA, 2004):

- **Clima Desértico Interior:** se localiza en la Pampa sobre los 1000 m de altura y está caracterizado por su extrema aridez, precipitaciones anuales de 0 mm y temperaturas medias de 18°C. Además, presenta una humedad relativa promedio de 50%.
- **Clima Desértico Marginal de Altura:** se localiza por sobre los 2000 de altura con una temperatura media anual de 10°C y precipitaciones que fluctúan entre 50 mm y 100 mm, las cuales se desarrollan en los meses de primavera y verano producto del invierno Altiplánico.
- **Clima de Estepa de Altura:** presente principalmente sobre los 3000 m de altura, las precipitaciones aumentan considerablemente a 300 mm en el año.

En la Figura 3.3 se muestra el climograma de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá para el período 2004-2015 según los datos de la DGA (2017):

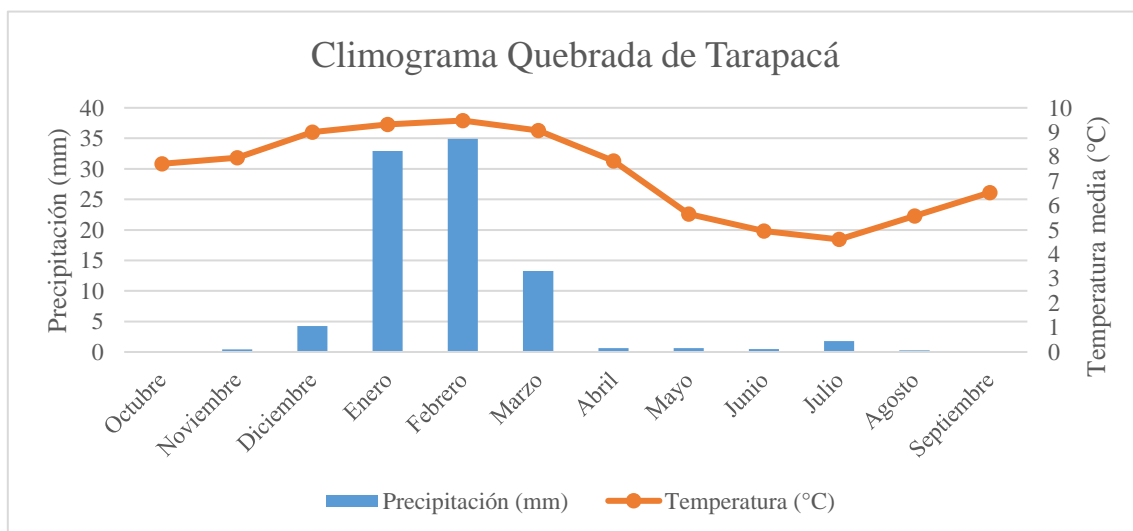


Figura 3.3: Climograma Cuenca Quebrada de Tarapacá, periodo 2004-2015.

Por otro lado, la hidrología de la cuenca Quebrada de Tarapacá presenta un régimen pluvial, como se mencionó anteriormente, pues las precipitaciones en los meses estivales se deben al fenómeno del Invierno Altiplánico. Esto se puede observar notoriamente en la Figura 3.3 y además en la curva de variación estacional realizada por la DGA (2004), que ocupó el periodo de registro 1984-2001, en la Figura 3.4.

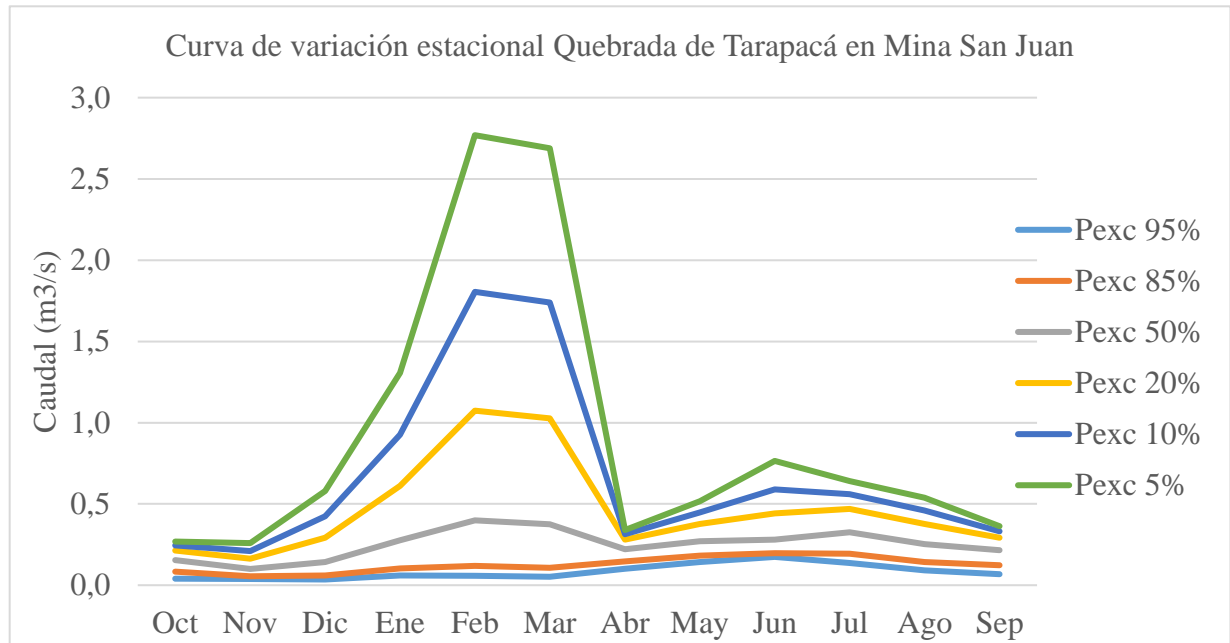


Figura 3.4: Curva de Variación Estacional Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan, periodo 1984-2001. Fuente: DGA, 2004.

3.1.4 Información fluviométrica

En la cuenca a estudiar no se cuenta con una estación fluviométrica a la salida como generalmente ocurre y además de esto tampoco se cuenta con un control fluviométrico de calidad debido a grandes vacíos en la información disponible debido a las condiciones extremas que ocurren durante el invierno altiplánico. La Tabla 3.2 presenta la descripción de cada una de las estaciones presentadas en la Figura 3.5.

Tabla 3.2: Descripción de las estaciones en la zona de estudio.

Estación	Cota (msnm)	Estado	Periodo
Quebrada de Tarapacá en Laonsana	1811	Vigente	2002-presente
Quebrada de Tarapacá en Sibaya	2830	Vigente	1928-presente
Quebrada de Tarapacá en Mocha	Sin información	Suspendida	1928-1931
Quebrada de Tarapacá en Pachica	Sin información	Suspendida	1928-1930
Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan	Sin información	Suspendida	1984-2010
Coscaya en Pampa Lirima	3540	Suspendida	1977-1989
Coscaya en Saitoco	3970	Vigente	1985-presente

Cuenca Quebrada de Tarapacá y estaciones DGA

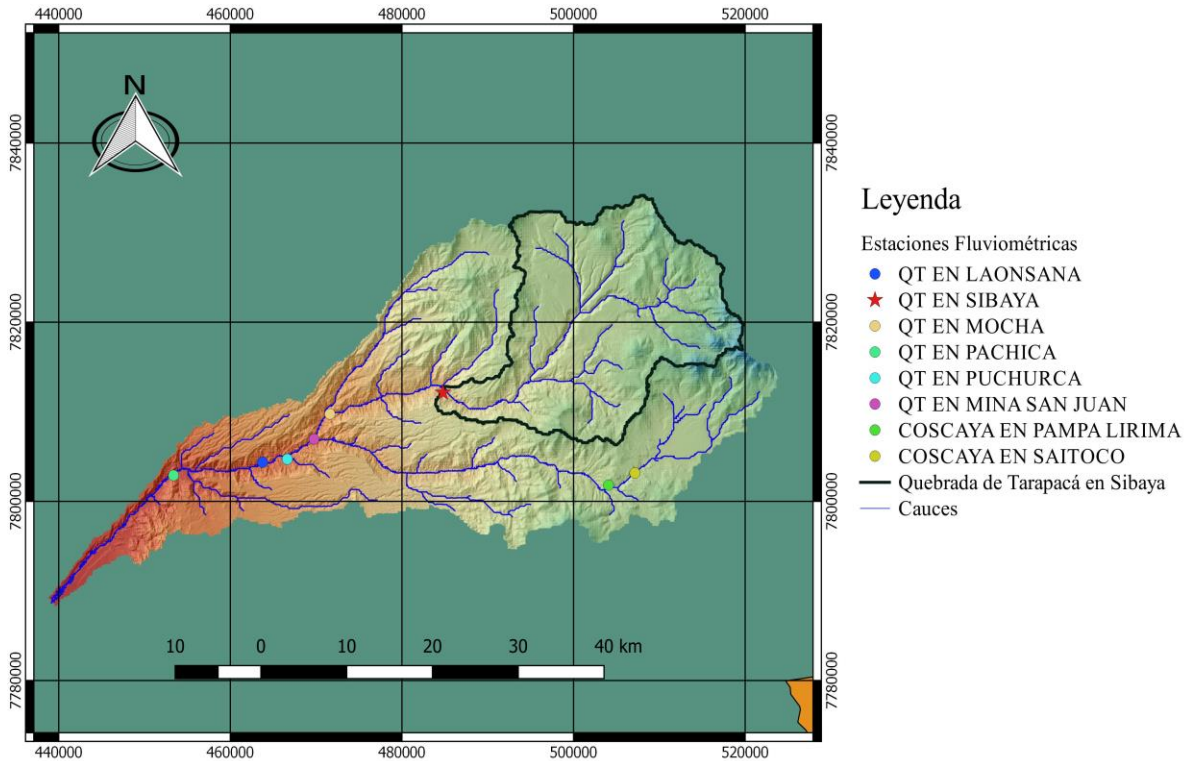


Figura 3.5: Estaciones fluviométricas en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

Debido a que en el presente estudio se realizó una modelación hidrológica para el periodo 2004-2015 se decidió trabajar con la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya (QTS) la cual se aprecia en la Figura 3.5. Esta estación se seleccionó principalmente por sus características ya que según DGA (2011) esta estación no presenta problemas de medición, tanto en crecidas como con flujo normal a diferencia de la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana, la cual no puede realizar mediciones correctas durante crecidas y durante el 90% del año presenta problemas debido al poco caudal que el río tiene en estas zonas. La otra estación factible es la de Coscaya en Saitoco, pero esta presenta los mismos problemas de medición ya que al costado de esta estación existen otras quebradas con lo cual se imposibilita la correcta medición del flujo y además posee problemas por congelamiento de la cámara limnigráfica y por exceso de vegetación.

Otra razón más por la cual se ocupó la estación de Sibaya, fue porque posee conexión satelital y un registro horario de caudales, lo cual resulta ser bastante útil para la modelación debido a que GSSHA trabaja de manera horaria.

La Figura 3.6 presenta la estadística fluviométrica a nivel diario de la estación para el periodo de estudio 2004-2015, tanto lo observado como también en régimen natural tras restituir los derechos de agua correspondientes que se explican en el subcapítulo 3.1.5.

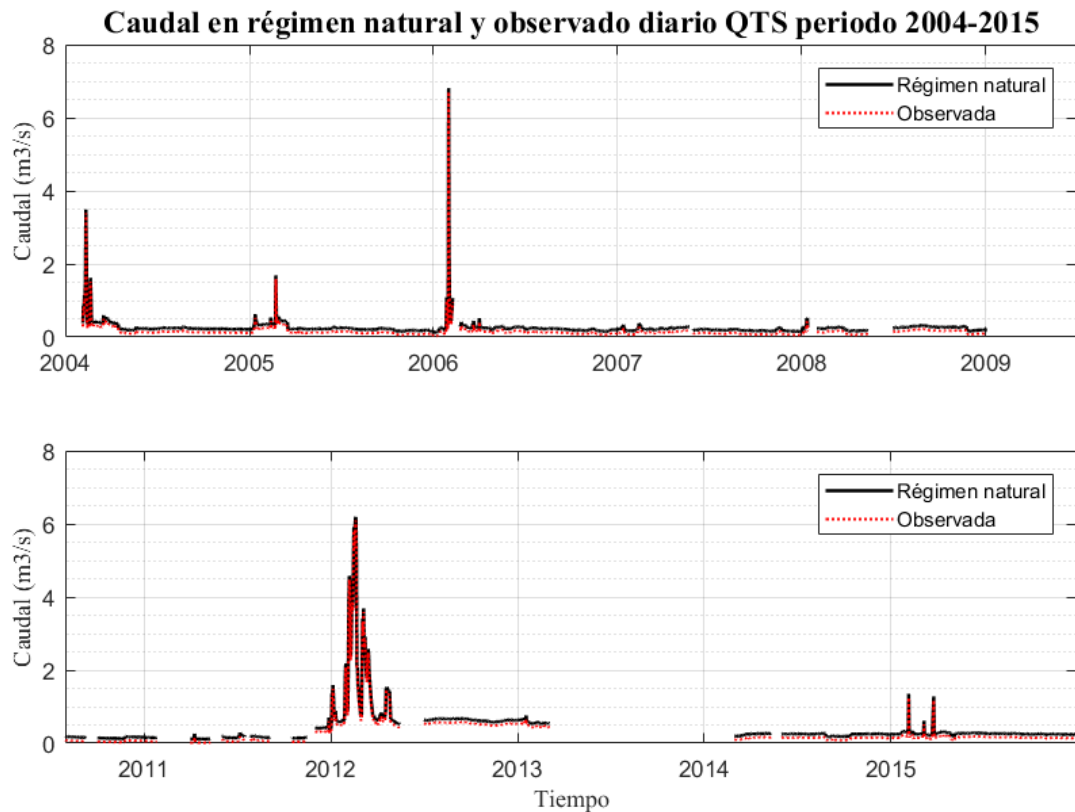
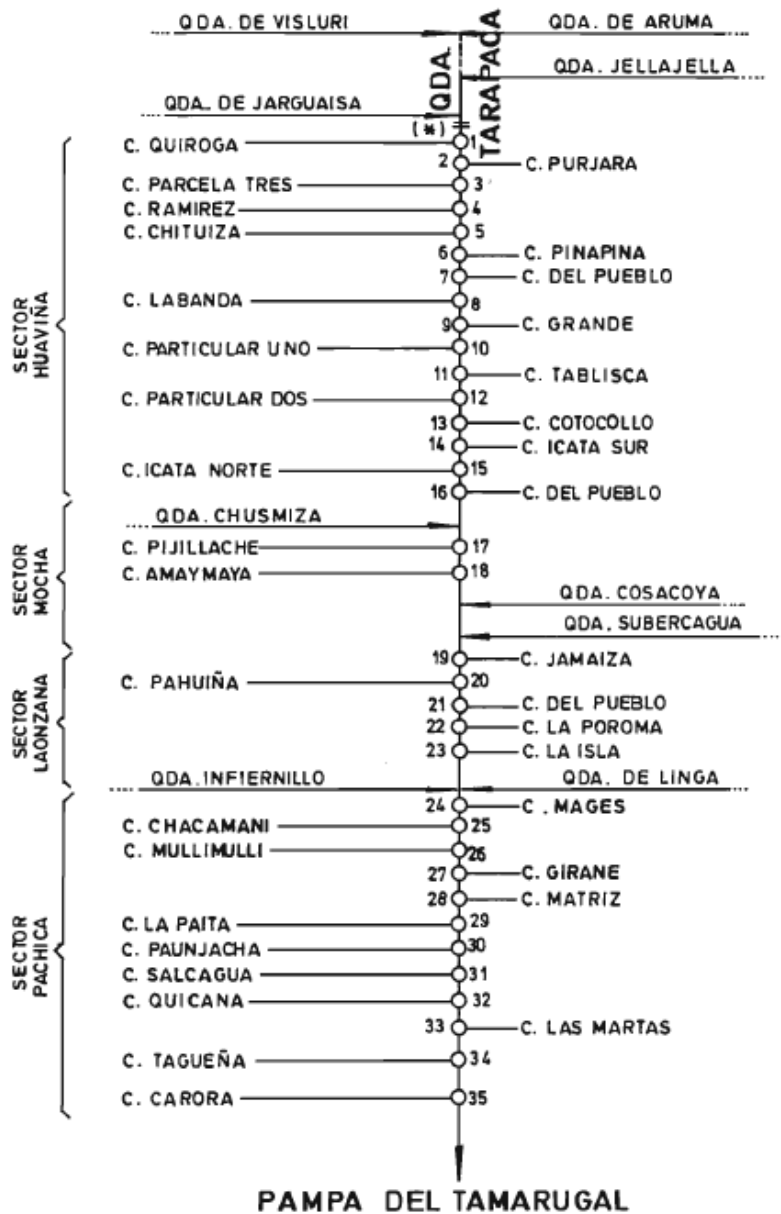


Figura 3.6: Caudal observado medio diario en Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

3.1.5 Derechos de agua

Para realizar la modelación hidrológica es necesario que la cuenca se encuentre en régimen natural y es por esto que es necesario restituir los derechos de agua según corresponda considerando que dichos derechos son de carácter superficial. El estudio realizado por DGA (1991) presenta el diagrama unifilar de los canales presentes en la cuenca Quebrada de Tarapacá y se muestran en la Figura 3.7.



(*) SECTOR SIBAYA : EXISTEN DOS CANALES, PAMPA Y ANCOAQUE , NO CATASTRADOS.

Figura 3.7: Diagrama unifilar general de la subcuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: DGA, 1991.

Ahora bien, en cuanto a la cuantificación de estos derechos el estudio de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2017) presenta un catastro de Usuarios de Aguas de la Quebrada de Tarapacá, que consideró los sectores de Huaviña, Mocha, Laonzana, Pachica, Sibaya, Tarapacá, Quillahuasa, señalando la existencia de 28 canales, los cuales se presentan en su mayoría en el diagrama unifilar mostrado anteriormente. En la Tabla 3.3 se muestran los canales catastrados. Estos derechos son de carácter permanente y alternado.

Tabla 3.3: Canales Quebrada de Tarapacá. Fuente: CNR, 2017.

N°	Nombre Comunidad de Aguas	CBR POZO ALMONTE		Registro DGA		Usuarios	Acciones	l/s
		N°	Año	N° Res.	Año			
1	Canal Tarapacá	11	1985	1393	1985	32	-	40,46
2	Canal Caigua Quillahuasa	13	1985	1393	1985	57	-	48,47
3	Canal Mages	12	1985	s/d	s/d	69	-	71,96
4	Canal Tablisca	27	1991	2145	1991	8	94,5	30
5	Canal del pueblo de Mocha	38	1991	2145	1991	127	756,9	70
6	Canal Amaymaya	42	1991	2145	1991	89	621,3	70
7	Canal Pijillache	43	1991	2145	1991	19	127,5	40
8	Canal Chituiza	40	1991	2145	1991	18	228	40
9	Canal La Banda	41	1991	2145	1991	19	235,5	30
10	Canal particular dos o La Poroma	45	1991	2145	1991	2	24	30
11	Canal particular uno o Camasa	49	1991	2143	1991	5	45	30
12	Canal Icata Sur	50	1991	2143	1991	5	45	-
13	Canal Cotocollo	51	1991	2143	1991	4	46	30
14	Canal Purjara	52	1991	2143	1991	12	114	30
15	Canal Grande	53	1991	2143	1991	112	1.634,00	80
16	Canal del pueblo de Huaviña	56	1991	2143	1991	41	573	70
17	Canal Pinapina	46	1991	2145	1991	2	31,5	30
18	Canal Pampa	54	1991	2143	1991	243	2.506,40	60
19	Canal Jamaisa	44	1991	2145	1991	11	1.008,00	4
20	Canal del pueblo de Laonzana	58	1991	2143	1991	52	1.008,00	22
21	Canal Pahuíña	55	1991	2143	1991	7	1.008,00	3
22	Canal Puchurca	37	1991	2145	1991	52	1.008,00	32
23	Canal La Isla	48	1991	2143	1991	9	849	11
24	Canal La Poroma	47	1991	2143	1991	4	159	11
25	Canal Ancoaque	2	1992	2270	1991	115	2.230,50	40
26	Canal Caijlligua o Chijlligua	2	1993	77	1993	15	693	6
27	Canal Sausipta	14	1995	831	1995	6	303	2
28	Canal Pachica	136	1995	1393	1985	62	-	0,5
Total						1.197	15.349,10	932,39

Cabe destacar que para el presente trabajo solo se utilizaron los canales que se referencian en la tabla anterior debido a la inexistencia de catastros más actualizados. Ahora bien, para efectuar la restitución se utilizó como guía el diagrama unifilar mostrado con anterioridad identificando los canales en los puntos fluviométricos de interés. Dicha restitución consistió en sumar los derechos otorgados a los caudales registrados por la estación los cuales serían los del canal Ancoaque y el canal Pampa y corresponderían a un monto de 100 (l/s) el cual se aprecia en la Figura 3.6.

3.1.6 Usos de suelo

Los usos de suelo en la cuenca Quebrada de Tarapacá se muestran en la Figura 3.8 y se resumen en la Tabla 3.4 los cuales fueron obtenidos en la página web de la IDE (2018):

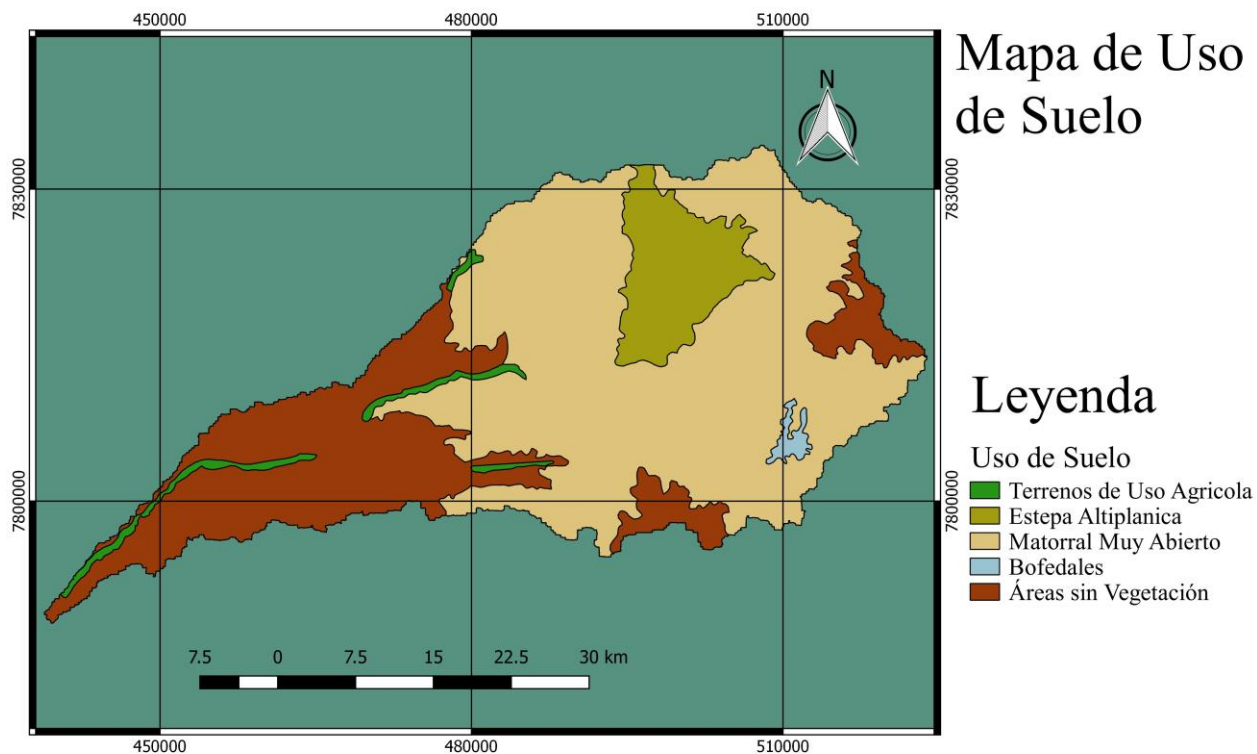


Figura 3.8: Usos de suelos en la cuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: IDE (2018).

Tabla 3.4: Porcentajes respecto al área total de los respectivos usos de suelo.

Uso de Suelo	Porcentaje sobre el área total [%]
Terrenos de Uso Agrícola	2,1
Estepa Altiplánica	9
Matorral Muy Abierto	59,1
Bofedales	0,7
Áreas sin Vegetación	29,1

Cabe destacar que la zona agrícola correspondiente a Poroma se agregó manualmente ya que en la base de datos no se contabilizaba esta.

3.1.7 Geología Regional

La geología de la cuenca de la cuenca de la Quebrada de Tarapacá se caracteriza por poseer diversas formaciones rocosas, las cuales se muestran a continuación y se visualizan en la Figura 3.9 (Casanova, 2012; DGA, 2004):

I. Rocas Estratificadas

a) Secuencias Mesozoicas

JK1 Jurásico Superior-Cretácico Inferior: Secuencias sedimentarias transicionales: lutitas, calizas, areniscas, conglomerados.

Ks1c Cretácico Superior: Secuencias sedimentarias continentales aluviales y lacustres: brechas, areniscas, conglomerados y limolitas rojas con intercalación de tobas riolíticas y lavas andesíticas.

Ks2c Cretácico Superior: Secuencias volcanosedimentarias continentales: lavas andesíticas y traquíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas.

Ks3i Cretácico Superior: Secuencias volcánicas continentales, domos, lavas y brechas basálticas a dacíticas con interacciones piroclásticas y epiclásticas.

b) Secuencias Cenozoicas

Om3 Oligoceno-Mioceno: Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos: brechas, domos, lavas y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos.

Om3t Oligoceno-Mioceno: Secuencias Piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.

M1c Mioceno Inferior-Medio: Secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, piedemontes o fluviales; gravas, arenas y limos con ignimbritas intercaladas.

M3t Mioceno Inferior-Medio: Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso.

M3i Mioceno Inferior-Medio: Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: brechas, domos, lavas y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.

Ms3i Mioceno Superior: Centros y secuencias volcánicas: domos, lavas y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag.

P3t Plioceno: Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados que afloran en los sectores topográficamente altos de las cabeceras de la quebrada de Tarapacá.

P3i Plioceno: Centros volcánicos: domos, lavas y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico-basálticas.

Qa Pleistoceno-Holoceno: Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: arenas, gravas y limos. Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.

Q3i Cuaternario: Estratovolcanes y complejos volcánicos: domos, lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos; adakíticos al sur de los 47°S.

II. Rocas Intrusivas

Las rocas presentes se componen de dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos de grano grueso que intruyen a la secuencia paleozoica y mesozoica, así como también a rocas intrusivas hipabisales que afloran en las quebradas de Choja, Munujna y Tarapacá. Además, estos cuerpos plutónicos poseen geometría tabular y se desarrollan principalmente en la zona sur de la quebrada de Tarapacá.

KTg Cretácico Superior-Terciario Inferior: Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos.

Pag Paleoceno: Monzodioritas de piroxeno y biotitas, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos, asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimeneas de brechas.

Osg Ordovícico-Silúrico: Granitos leucocráticos y monzogranitos de muscovita y biotita, granodiorita, nigetititas y ortoneises.

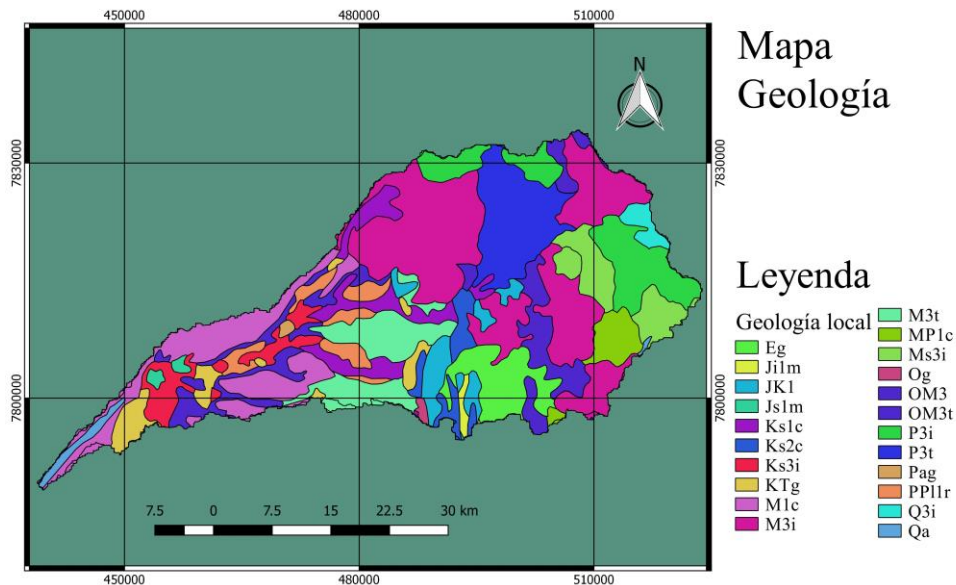


Figura 3.9: Geología cuenca Quebrada de Tarapacá. Fuente: SERNAGEOMIN (2003).

3.1.8 Hidrogeología

Las unidades hidrogeológicas expuestas en este apartado se realizaron en base al trabajo realizado por Toro (2015). Estas unidades se describen a continuación y se muestran en la Figura 3.10.

3.1.8.1 Unidad de Alta a Moderada Importancia Hidrogeológica

Esta unidad se subdivide en los siguientes tipos de depósitos explicados a continuación:

- **Depósitos Fluviales**

Correspondiente a sedimentos transportados por los ríos de las cuencas y, además, componen el relleno de los cauces de la quebrada de Tarapacá. Estos sedimentos originan producto de las variaciones del caudal superficial, cambios en las escorrentías y la ocurrencia de crecidas.

- **Depósitos Aluviales**

Depósitos correspondientes a una unidad sedimentaria no consolidada generada por acumulaciones por acción del agua y/o gravedad. Principalmente se encuentran gravas, guijarros y bloques.

3.1.8.2 Unidad de Moderada a Baja Importancia Hidrogeológica

Esta unidad se subdivide en los siguientes tipos de depósitos explicados a continuación:

- **Depósitos Coluviales**

Correspondiente a depósitos gravitacionales no consolidados. Se originan de rocas que, producto de la erosión, se desprenden de ellas macizos rocosos generalmente en zonas con pendientes elevadas. Principalmente compuestos de gravas gruesas y bloques con escasa matriz de arena media a fina con limos y arcillas.

- **Depósitos Piroclásticos**

Corresponden principalmente a unidades Maricunga, Vega Helada e Ignimbritas Huasco. Principalmente compuestas por tobas riolíticas a dacíticas.

3.1.8.3 Unidad de Baja a Nula importancia Hidrogeológica

- **Depósitos Piroclásticos Parcialmente Soldados**

Correspondientes a la unidad P3t definida en la sección 3.1.7, con lo cual están compuestos por potentes ignimbritas riolítica que se observan en los sectores altos del de las cabeceras de la quebrada de Tarapacá.

3.1.8.4 Unidad de Nula Importancia Hidrogeológica

- **Basamento Rocoso**

Compuesto por unidades que van desde el jurásico Superior al Cuaternario y principalmente formadas por rocas estratificadas e intrusivas. Respecto a las rocas estratificadas, se encuentran secuencias sedimentarias continentales a sedimentarias formadas principalmente brechas, areniscas, limolitas, lutitas, calizas y conglomerados. También se evidencia presencia de secuencias volcánicas y volcanosedimentarias tales como lavas, brechas volcánicas, rocas piroclásticas y epiclásticas, entre otras.

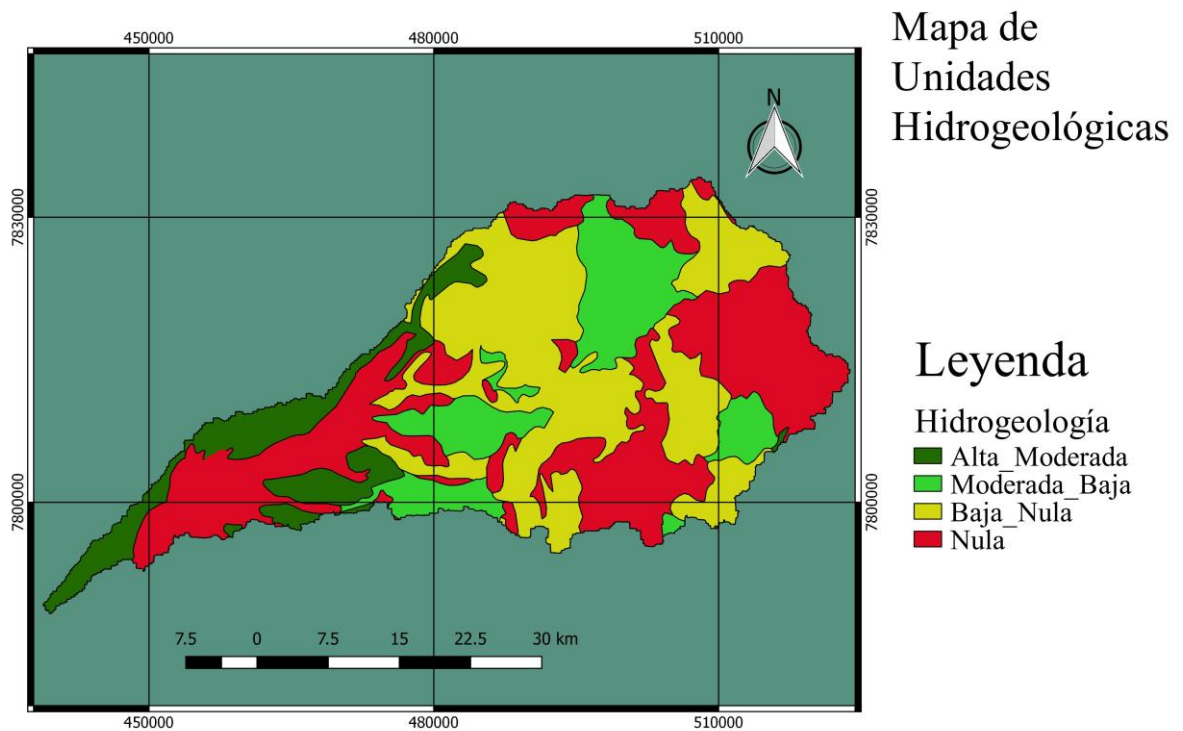


Figura 3.10: Unidades Hidrogeológicas cuenca quebrada de Tarapacá. Fuente: Adaptado de Toro (2015).

Capítulo 4: Recopilación y preparación de datos

Para llevar a cabo la modelación hidrológica usando GSSHA se requiere definir las características morfométricas de la cuenca a estudiar, así como también las forzantes meteorológicas. Para la modelación como tal, se utilizó el software WMS 10.1 de Aquaveo y al final de este capítulo se describe brevemente los principales procedimientos realizados.

4.1 Forzantes Meteorológicas

Las forzantes meteorológicas, a nivel horario, que se requieren ocupar para la utilización del modelo GSSHA son las siguientes: precipitación, temperatura, velocidad de viento, humedad relativa, presión, cobertura de nubes, radiación directa y global, las cuales se describen a continuación.

Debido al carácter distribuido del modelo, se utilizaron algunas forzantes que se obtuvieron en el estudio de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017), el cual consta de una grilla de $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$ de resolución espacial para todo Chile y una resolución temporal de 3 horas, tiempo en el cual entrega la precipitación acumulada. En la Figura 4.1 se puede observar cómo se refleja dicha grilla en la zona de estudio.

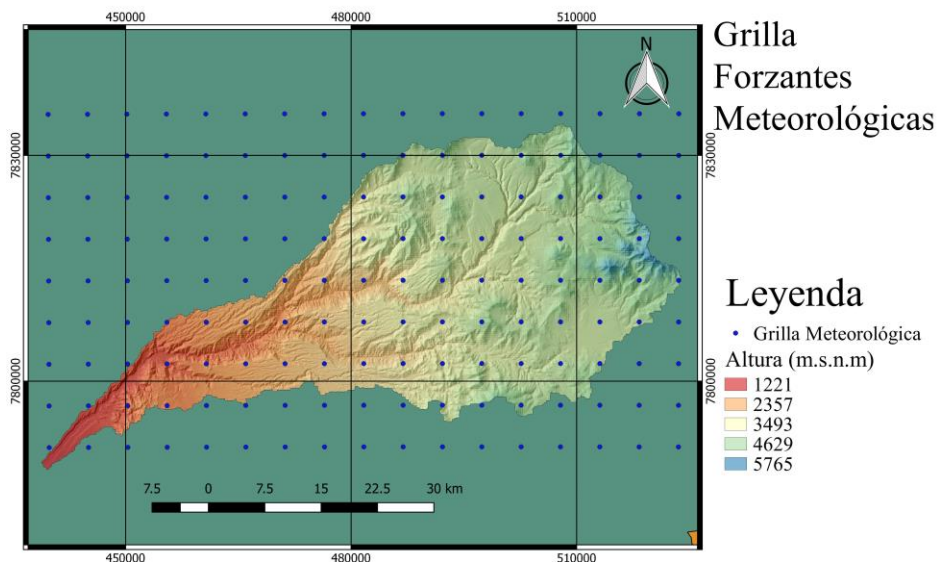


Figura 4.1: Mapa de la grilla de forzantes en la zona de estudio.

Para seleccionar los puntos espaciales de la grilla que tendrán efecto sobre la cuenca se aplica un buffer de 5 (km) alrededor de ésta, es decir, se agranda el contorno de la zona de estudio 5 (km) alrededor de su borde tras lo cual mediante QGIS se recortan los puntos de la grilla que están

contenidos en esta región y finalmente así poder filtrar datos necesarios e innecesarios. Al final de este procedimiento se obtiene lo que se muestra en la Figura 4.2.

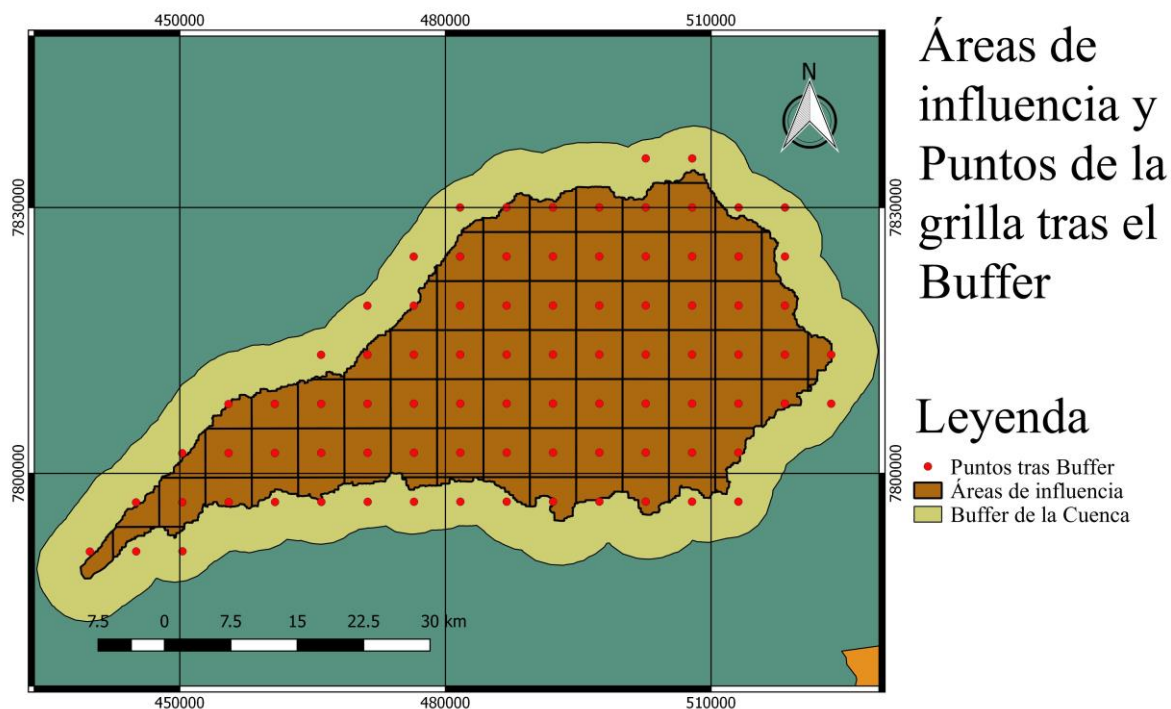


Figura 4.2: Mapa de las áreas de influencia y de los puntos de la grilla meteorológica seleccionados tras aplicar el Buffer, Cuenca Quebrada de Tarapacá

4.1.1 Precipitación

Debido a que la resolución temporal que requiere el modelo para un correcto funcionamiento es de 1 hora, se supone que durante el intervalo de tiempo de 3 horas ocurre una precipitación con intensidad de lluvia constante lo que conlleva a que aquello que precipitó en esas 3 horas se reparte equitativamente en cantidad para cada hora. A modo de ejemplo se puede apreciar el procedimiento anteriormente mencionado de manera gráfica en la Figura 4.3, en la cual las barras de color azul representan la precipitación acumulada cada 3 horas y las naranjas representan la precipitación acumulada cada 1 hora siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado.

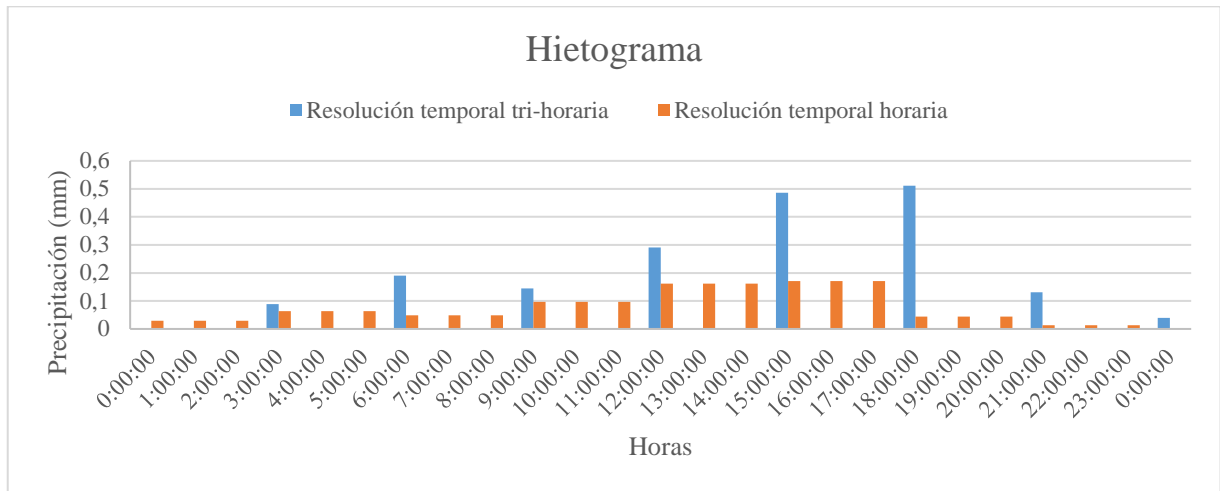


Figura 4.3: Gráfico comparativo del mejoramiento de resolución temporal.

Cabe destacar que este procedimiento se aplica por cada punto espacial de la grilla y su respectiva serie de datos.

Ahora bien, en la Figura 4.4 se muestra la serie de precipitación horaria para el periodo 2004-2015 integrada en la cuenca Quebrada de Tarapacá (ecuación B.1 del Anexo B).

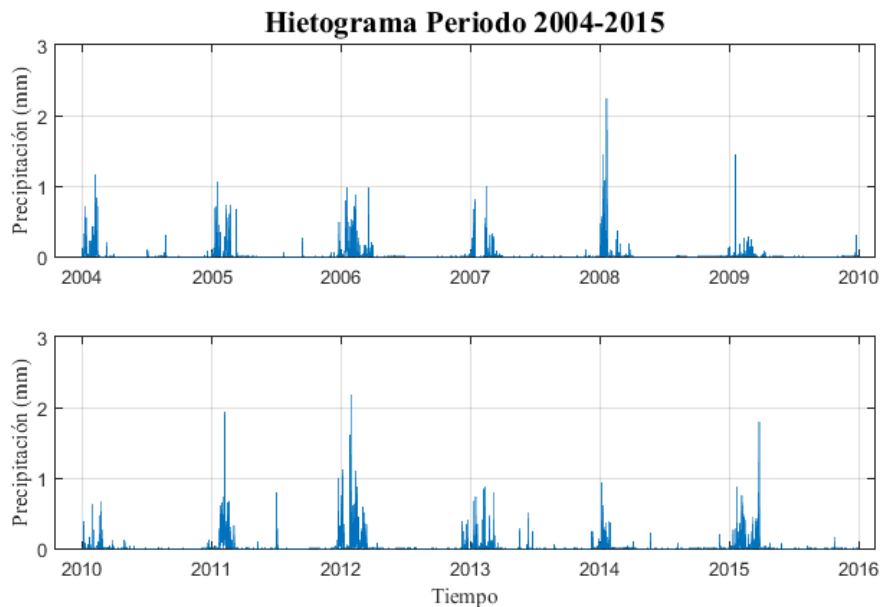


Figura 4.4: Hietograma cuenca Quebrada de Tarapacá periodo 2004-2015.

Cabe destacar que en el modelo hidrológico se ingresan los datos de precipitación espacialmente distribuidos tal y como se muestra en la Figura 4.2 y temporalmente espaciados por eventos de precipitación para los cuales se utilizó un criterio de 8 horas sin precipitación para diferenciarlos. En la Figura 4.5 se puede apreciar la precipitación anual media grillada para la zona de estudio; además, se muestra claramente que en la zona baja de la cuenca las precipitaciones comienzan a

hacerse prácticamente nulas por lo cual la necesidad de realizar la modelación hidrológica distribuida para la cuenca completa aumenta ya que de esta forma se podrán explicar mejor los procesos físicos asociados a la escorrentía a la salida de la cuenca.

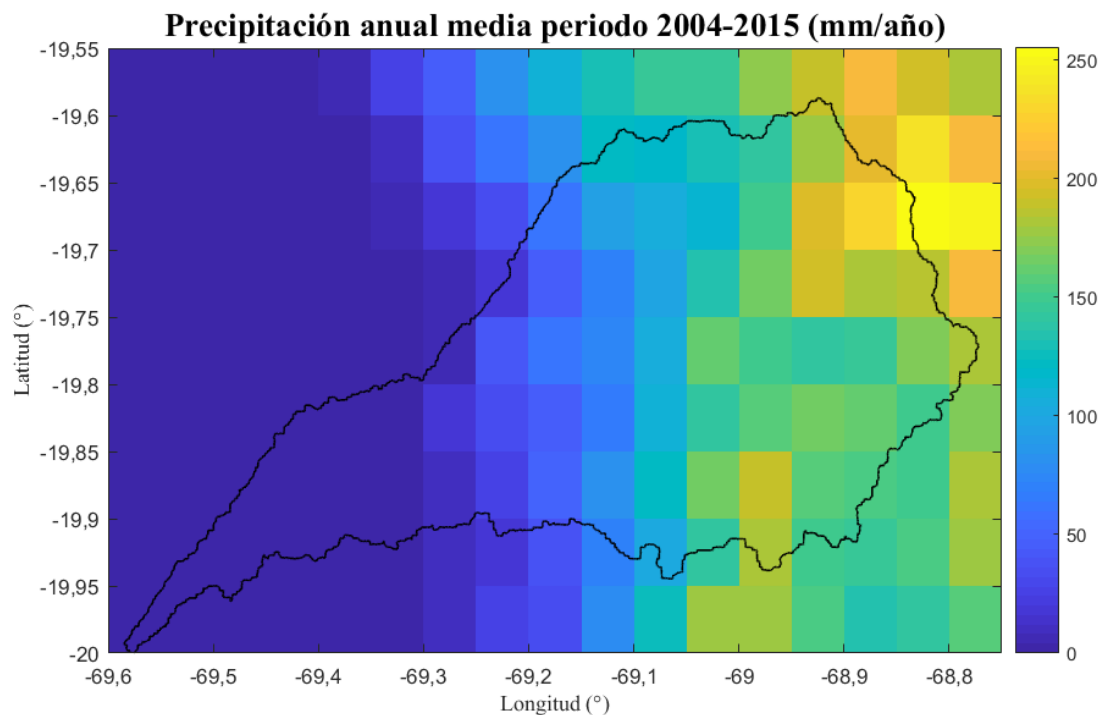


Figura 4.5: Precipitación anual media grilla en el periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.

4.1.2 Temperatura

La estadística de temperaturas medias con 3 horas de resolución temporal y con resolución espacial de $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$ para el periodo 1980-2015 en todo Chile generadas en el estudio DGA (2017) fueron utilizadas como base para este estudio.

De manera análoga a lo realizado con la precipitación, se consideran los puntos con estadística mostrados en la Figura 4.2 y se realizó un ajuste temporal para adaptar la resolución temporal y pasar de 3 horas a 1 hora.

Para lograr este cometido se interpolaron las temperaturas medias bajo una hora de resolución temporal, es decir, entre cada dato con resolución temporal de 3 horas se construye una ecuación de la recta y se recalcula esta ecuación considerando 1 hora, con el fin de poder construir la serie espacial ajustada a la escala que solicita el modelo. De modo gráfico se puede apreciar en la Figura 4.6 donde se muestra en círculos de color rojo el set de datos de temperatura con resolución temporal de 3 horas y en cuadrados de color negro el set de datos interpolados para generar un set de datos con resolución temporal de 1 hora, la cual es la indicada para trabajar con el modelo.

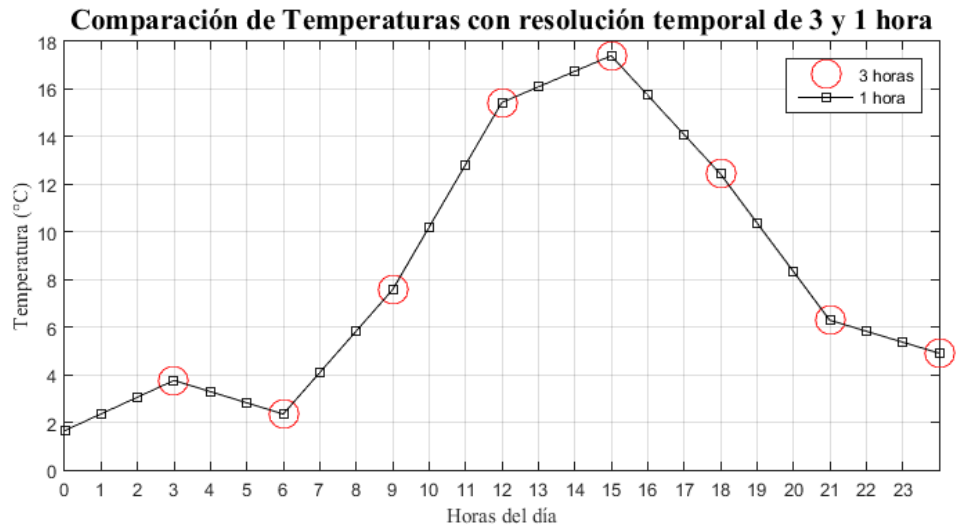


Figura 4.6: Comparación de resolución temporal de temperaturas.

Explicado esto, en la Figura 4.7 se muestra la serie de temperaturas a nivel horario en el periodo 2004-2015 integrada en la cuenca Quebrada de Tarapacá (ecuación B.1).

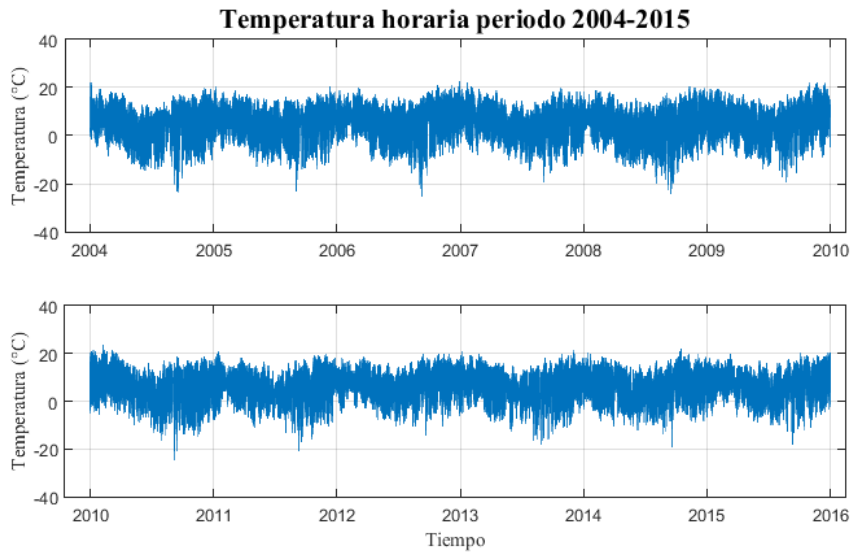


Figura 4.7: Temperatura a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.

Cabe destacar que, para ingresar espacialmente la temperatura al modelo, esta se ingresa como un punto determinado en el espacio (en este caso el centroide de la cuenca) y además se ingresa un gradiente de temperaturas, el cual fue obtenido tras graficar la temperatura anual media de cada punto de la grilla de la Figura 4.2 con respecto a la elevación de dicho punto. Esto se puede observar en la Figura 4.8, donde se aprecia un gradiente de $-5,2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{km}}$ y en la Figura 4.9 se puede apreciar la distribución espacial de la temperatura media anual promedio en el periodo 2004-2015 grillada para la zona de estudio.

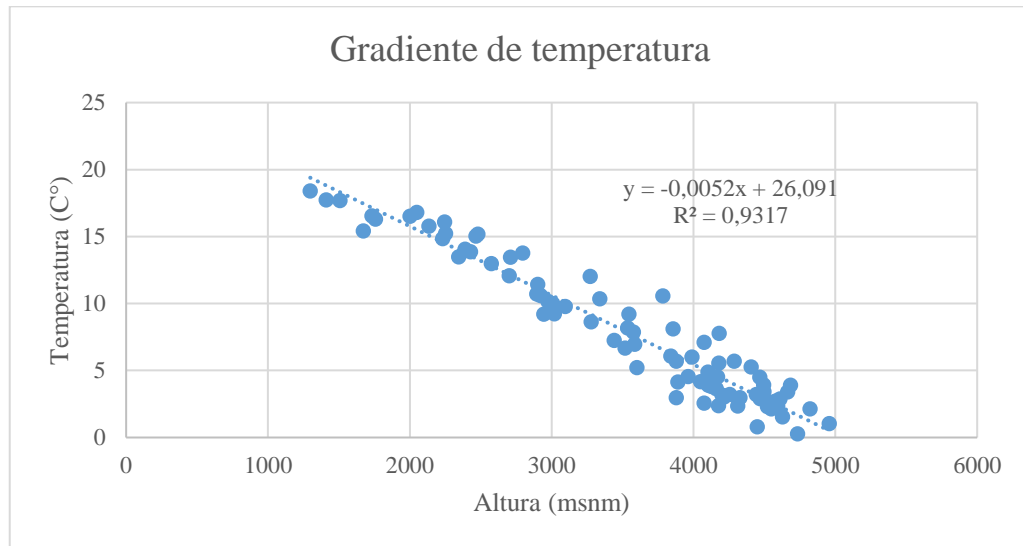


Figura 4.8: Gradiente de temperatura.

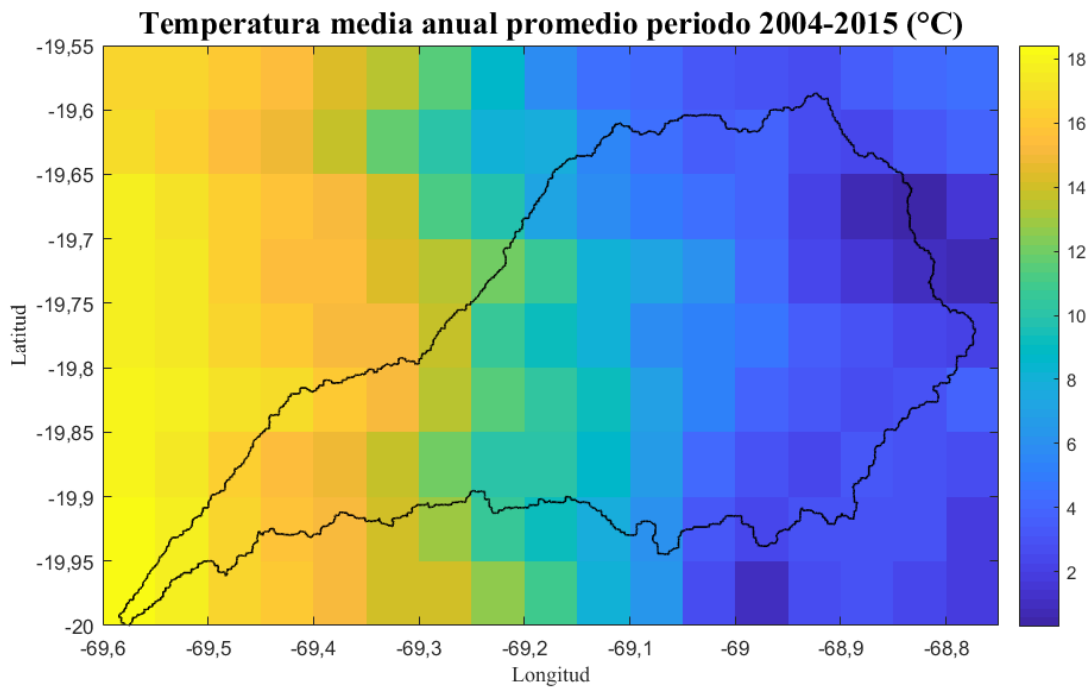


Figura 4.9: Temperatura anual media anual promedio grillada periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.

4.1.3 Velocidad del viento

El estudio de Actualización del Balance Hídrico Nacional mencionado anteriormente generó una serie de datos de velocidad de viento a 10 metros sobre el nivel de superficie con 3 horas de resolución temporal y con resolución espacial de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ para el periodo 1980-2015 y para todo Chile. Esta serie viene en unidades del sistema internacional, es decir, (m/s).

Ahora bien, debido a que el modelo hidrológico requiere que la velocidad de viento se encuentre a 2 metros sobre el nivel de superficie se realiza un ajuste según el perfil logarítmico de velocidad de viento dado por el Manual FAO (2006) y explicado en la ecuación (B.2) del anexo B.

Como la resolución temporal en la que viene los datos es de 3 horas se aplicó el mismo procedimiento aplicado a las temperaturas con lo cual se obtuvieron las series con una resolución temporal de 1 hora. En la Figura 4.10 se muestra la serie final de velocidad de viento integrada en la cuenca Quebrada de Tarapacá y en la Figura 4.11 se puede apreciar la velocidad del viento anual media promedio grillada y en el periodo 2004-2015 para la zona de estudio.

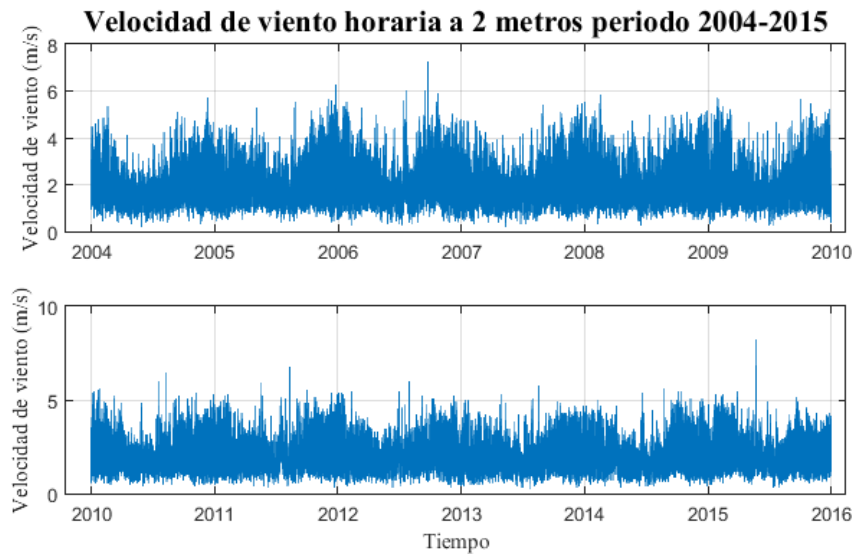


Figura 4.10: Velocidad de viento a nivel horario en periodo 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.

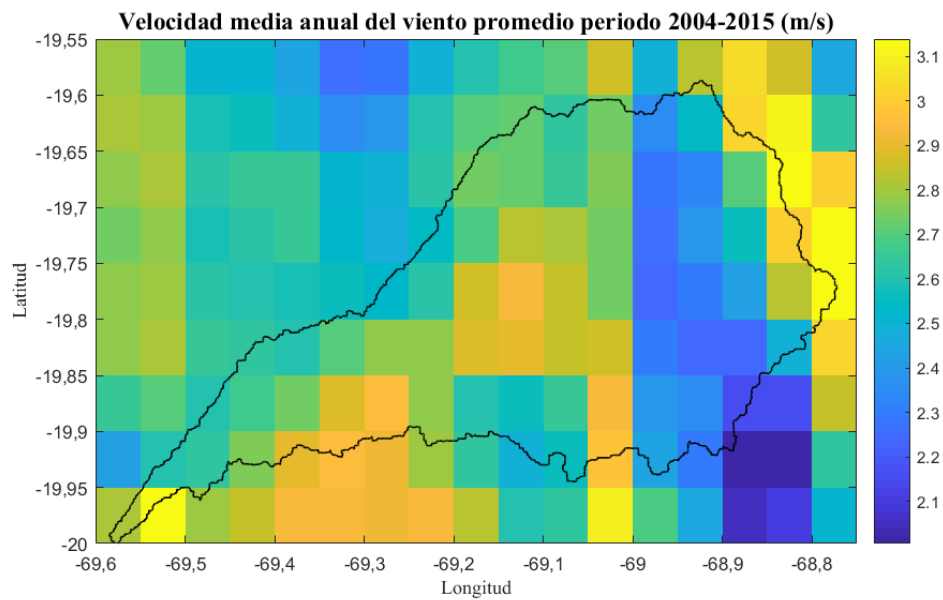


Figura 4.11: Velocidad media anual del viento promedio grillada en el periodo 2004-2015, Cuenca Quebrada de Tarapacá.

4.1.4 Humedad relativa

Debido a la inexistencia de datos de humedad relativa en la zona de estudio se realizó una metodología similar a la propuesta por Hamlet et al. (2010) la cual hace referencia a un proceso de escalamiento estadístico de datos de temperatura y precipitación que vienen dados por los modelos de cambio climático (GCM, por sus siglas en inglés), para poder aplicarlos a su zona de estudio. Este proceso se conoce como método Bias de corrección y se aplicó en este caso en particular para obtener la humedad relativa.

Para realizar esto se ocuparon los datos de humedad relativa del reanálisis atmosférico ERA-Interim. Este producto contiene un set de datos de humedad relativa que es entregado por niveles de presión. Estos niveles se adecuan además a la altitud a la cual se requieren los datos. En este caso en particular se utilizaron los niveles desde el 600 hasta el 700 que hacen referencia a altitudes que van de aproximadamente desde los 4000 hasta los 3000 (msnm). En la Figura 4.12 se puede apreciar la grilla en la cual se entregan los datos de este producto.

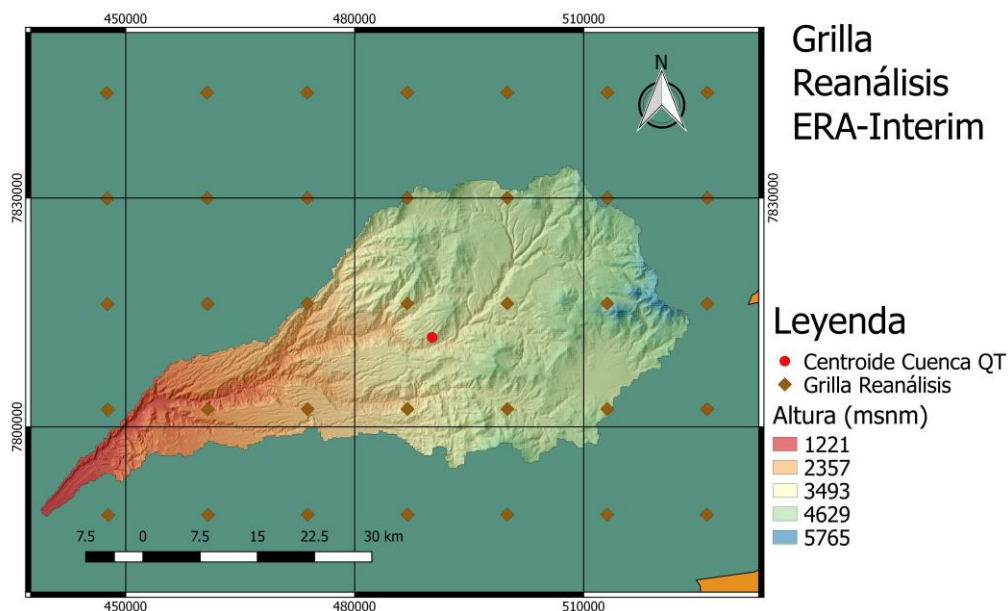


Figura 4.12: Grilla de los datos espaciales del reanálisis atmosférico ERA-Interim.

Ahora bien, para efectuar el proceso de corrección Bias primero se seleccionó una estación cercana a la zona de estudio que tuviera una cantidad de datos continuos durante un periodo razonable de tiempo. Las estaciones meteorológicas DGA que miden humedad relativa diaria son las de Huara-Baquedano, Cerro Colorado y Coyacagua y se pueden visualizar en la Figura 4.13 y cuyas coordenadas se pueden ver en la Tabla 4.1. En el estudio de Casanova (2012) se ocupan los datos de humedad relativa promedio mensual de la estación Coyacagua. Ahora bien, del registro que poseen las estaciones anteriormente mencionadas, esta última es la que posee más años con

datos, en este caso 17 años con datos diarios durante el periodo de 1986-2002 por lo cual se selecciona esta estación para realizar el proceso.

Tabla 4.1: Ubicación y Cota estaciones Meteorológicas: Huara-Baquedano, Cerro Colorado y Coyacagua.
Fuente: DGA.

	Cota (msnm)	Coord N UTM	Coord E UTM
Huara-Baquedano	1062	7773836	421635
Cerro Colorado	2525	7791275	431737
Coyacagua	4025	7782608	520130

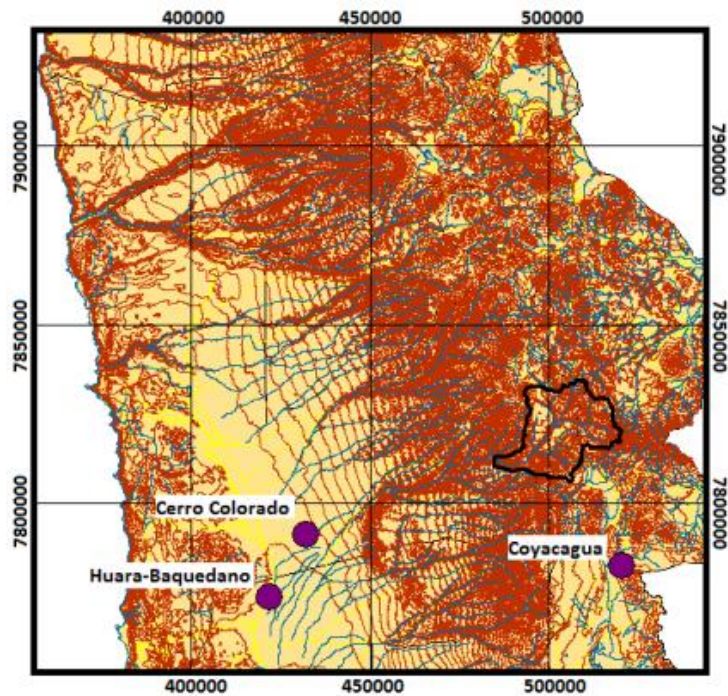


Figura 4.13: Ubicación estaciones meteorológicas Cerro Colorado, Huara-Baquedano y Coyacagua. En negro se observa la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya. Fuente: Casanova, 2012.

Una vez seleccionada la estación para aplicar este método se realiza un escalamiento espacial, ya que se requiere llevar la información del reanálisis hacia ésta y para ello se ocupó el método del inverso a la distancia cuadrática (ecuación B.3). Terminado el proceso de escalamiento espacial se procedió a realizar la corrección Bias ajustando mensualmente las probabilidades de excedencia mediante funciones de transferencia que se obtuvieron para valores de igual probabilidad de excedencia entre los datos del reanálisis y los de la estación. A modo de ejemplo en la Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestran los ajustes realizados para los meses de enero y febrero, respectivamente. El resto de los ajustes mensuales se puede observar en el Anexo D.

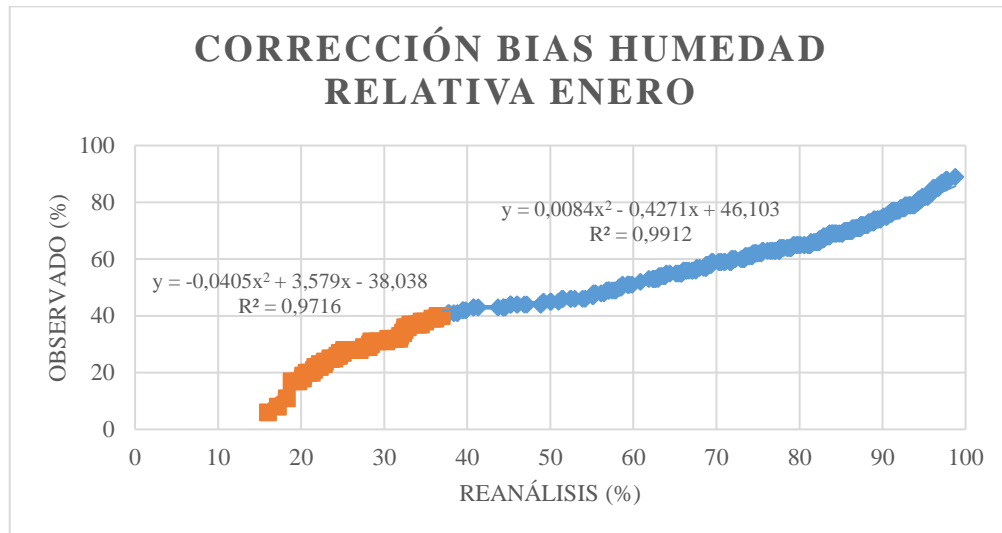


Figura 4.14: Corrección Bias de la humedad relativa durante el mes de enero, estación Coyacagua.

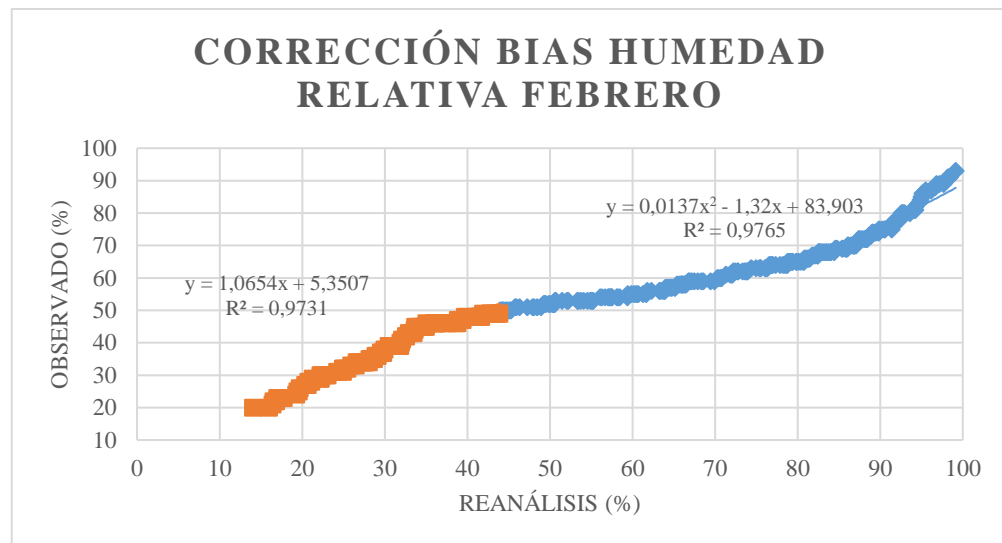


Figura 4.15: Corrección Bias de la humedad relativa durante el mes de febrero, estación Coyacagua.

Cabe destacar que para los rangos de humedad relativa que no se encuentran dentro de los gráficos se utilizaron las funciones correspondientes a los extremos extrapolando las curvas siempre y cuando los resultados de éstas no mostraran humedades relativas sin sentido físico; si esto ocurría simplemente se aplicó en los extremos una ecuación de la recta que forzara el ajuste para obtener valores con sentido. Esto se aplicó para todos los meses. Los resultados de los ajustes realizados se muestran en la Figura 4.16 y Figura 4.17 mostrando la comparación entre el promedio y la desviación estándar de lo medido en la estación Coyacagua y lo predicho por el reanálisis en todos los meses, respectivamente.

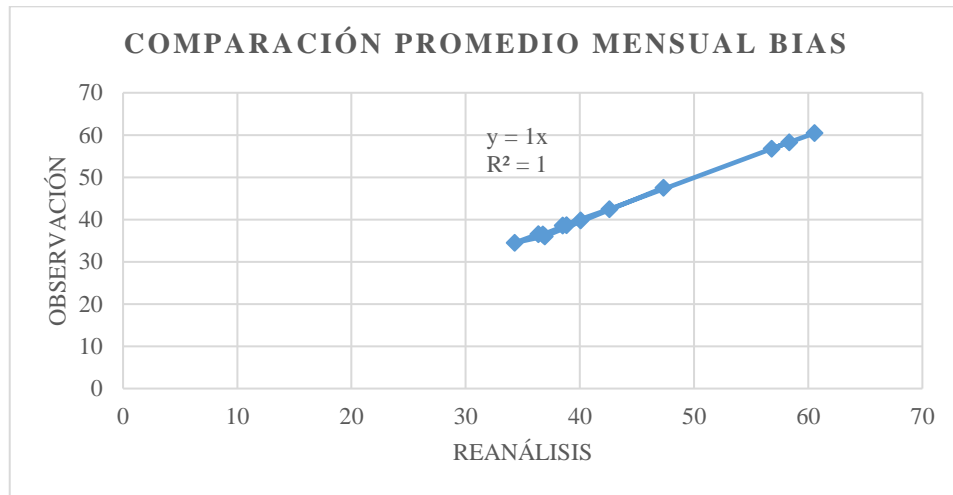


Figura 4.16: Comparación del promedio mensual entre lo observado en estación Coyacagua y lo ajustado del reanálisis en periodo 1986-2002.

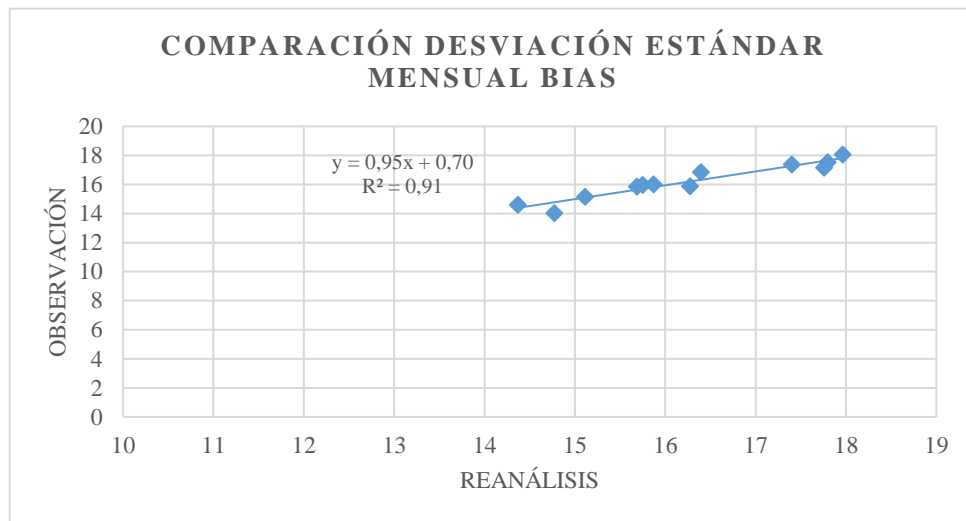


Figura 4.17: Comparación de la desviación estándar mensual entre lo observado en estación Coyacagua y lo ajustado del reanálisis en periodo 1986-2002.

Bajo el supuesto de que la humedad relativa en la cuenca de la Quebrada de Tarapacá se comporta de manera similar a lo medido en la estación Coyacagua debido a que ésta se encuentra geográficamente cerca y por ende presenta una similitud climática, se procedió a aplicar las funciones de transferencia obtenidas con un nuevo escalamiento espacial y para el periodo de estudio (2004-2015), pero esta vez utilizando el centroide de la cuenca Quebrada de Tarapacá para ocupar el inverso a la distancia cuadrada. Es importante mencionar que los ajustes realizados se hicieron con valores diarios de humedad relativa por lo cual para obtener los valores horarios requeridos se supuso que el comportamiento de esta forzante dentro de un día sigue el mismo que el del reanálisis, por lo cual las funciones de transferencia fueron ocupadas para los valores cada 6 horas que posee éste. Una vez efectuado este ajuste basta con replicar horariamente la humedad relativa obtenida cada 6 horas para poder completar el set de datos necesario. Tras esto la serie horaria generada en el centroide de la cuenca Quebrada de Tarapacá se muestra en la Figura 4.18.

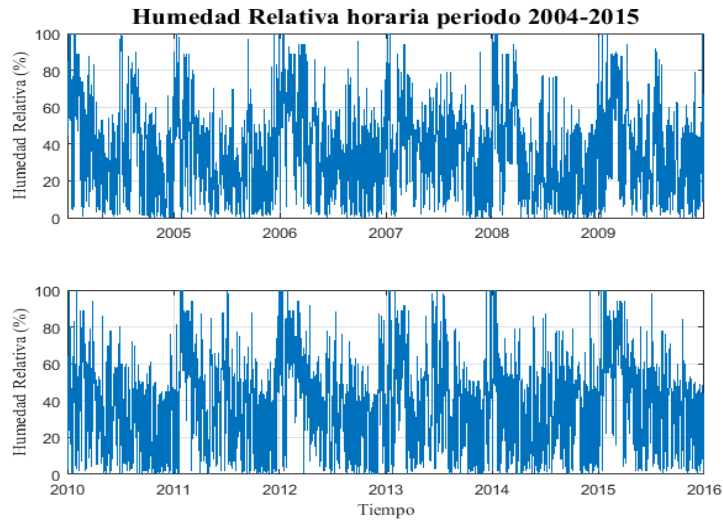


Figura 4.18: Humedad relativa horaria en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.

4.1.5 Presión

En el caso de la presión, tampoco se cuenta con registros dentro de la cuenca por lo cual dado que se dispone de información temperatura y de altura de la cuenca se ocupa la fórmula barométrica según Castellan, 1987 (ecuación B.3 del Anexo B). En este caso se ocupó la serie de temperaturas promedio local obtenida anteriormente y la altura media de la cuenca obtenida a partir de la curva hipsométrica (en anexo C) para poder crear la serie horaria de presiones requeridas. En la Figura 4.19 se aprecia la serie de presiones integrada en la cuenca Quebrada de Tarapacá. Es importante mencionar que esta variable se ingresa como una serie temporal única en el modelo y que se sitúa espacialmente en el centroide de la cuenca al igual que la humedad relativa.

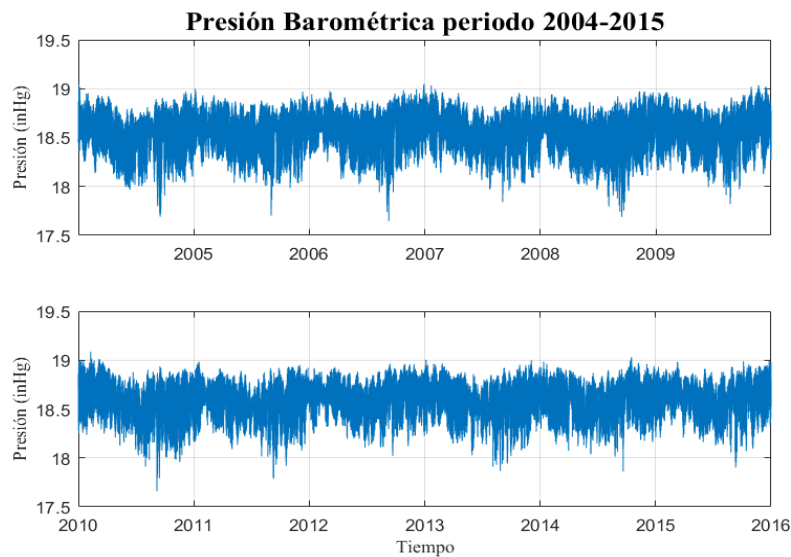


Figura 4.19: Presión barométrica a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015, cuenca Quebrada de Tarapacá.

4.1.6 Cobertura de nubes

En el caso de la cobertura de nubes se utilizó la información del Explorador Solar (2017) el cual contiene información de nubosidad para el periodo 2004-2015 a escala horaria entregando un valor de 0 en caso de no haber nubosidad y 1 en caso de que si haya. Ahora bien, para poder generar la cobertura de nubes se descargaron los datos puntuales correspondientes con la misma grilla de la Figura 4.2 y se procedió a ocupar la ecuación (B.1) del Anexo B para finalmente obtener el porcentaje de cobertura de nubes sobre la cuenca ocupando los valores binarios entregados por esta herramienta de exploración. En la Figura 4.20 se muestra la variación de esta variable durante el periodo de estudio y cabe mencionar que los valores presentados representan la cobertura durante las horas del día puesto que en las horas de la noche no se cuentan con registros de nubosidad pero que en efecto no son relevantes para el estudio puesto que la evapotranspiración ocurre durante las horas donde hay sol.

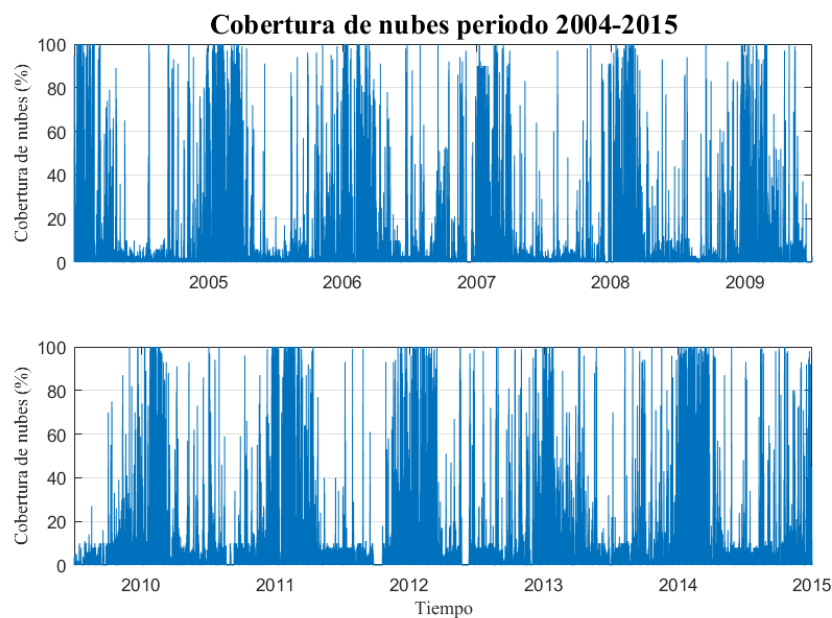


Figura 4.20: Cobertura de nubes a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.

4.1.7 Radiación

El Explorador Solar también cuenta con información de radiación global y directa horaria durante el periodo 2004-2015 que las entrega en unidades de irradiancia, es decir, en unidades de potencia por área ($\frac{W}{m^2}$) por lo cual para ingresarlo al modelo hay que proceder a realizar un ajuste matemático para poder obtener esta radiación en unidades de energía ($\frac{W \cdot h}{m^2}$) como se requiere.

En primer lugar y realizando de manera análoga el procedimiento anterior para obtener la cobertura de nubes se obtiene la radiación global y directa media sobre la cuenca y para transformarla en unidades de energía se realizó el cálculo según el método ocupado por Guevara (2003) y que se muestra en la ecuación (B.4) del anexo B. Finalmente, la radiación directa obtenida

se muestra en la Figura 4.21 y la global en la Figura 4.22, las cuales están integradas en la cuenca Quebrada de Tarapacá para el periodo 2004-2015.

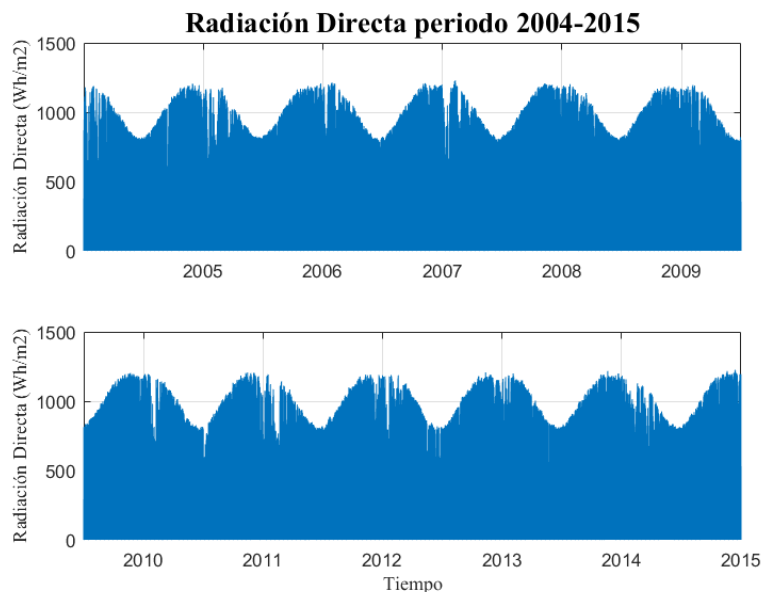


Figura 4.21: Radiación directa a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.

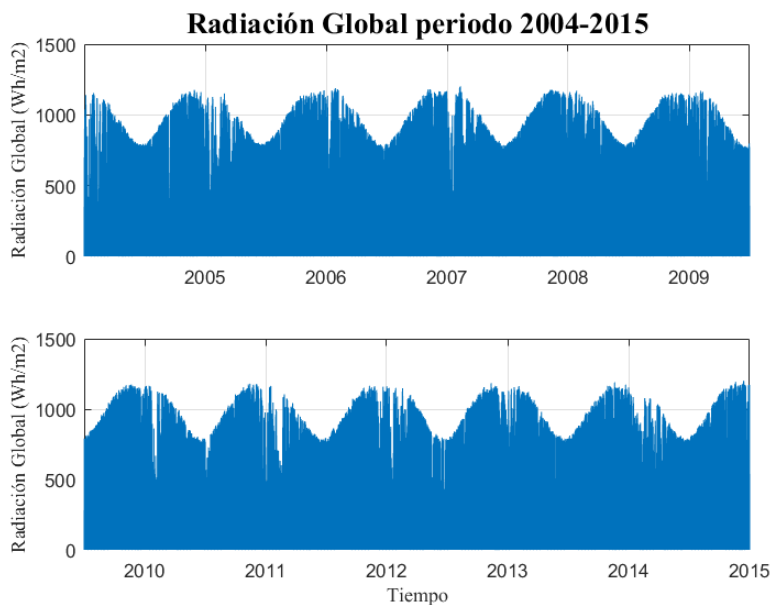


Figura 4.22: Radiación global a nivel horario en el periodo de estudio 2004-2015.

4.2 Creación de modelo GSSHA

Para utilizar el modelo GSSHA en primer lugar se tiene que delimitar la cuenca en estudio por lo cual se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) de la NASA conocido como SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución espacial de 30x30 metros. Luego se procede a la delimitación de la cuenca a estudiar y la selección de la grilla 2D a usar. Este paso es importante pues hay que considerar los tiempos de cómputo y la capacidad computacional disponible para poder llevar a cabo una modelación exitosa. A modo de ejemplo, utilizando una grilla de 200x200 metros para la zona de estudio, el tiempo de ejecución del modelo resulta ser de 1 día para 1 año de simulación, mientras que ocupando una grilla del 2x2 kilómetros el tiempo de ejecución resulta ser de 2 horas para 10 años de simulación, ambos ocupando un computador con procesador de 4 GHz y 32 MB de RAM.

La selección del tamaño de la grilla se vuelve entonces una limitante a la hora de tomar la decisión de dimensionarla y considerar los procesos calibración y validación del modelo. Es por esta razón que para el presente trabajo se ocupó una grilla de 2x2 kilómetros. En la Figura 4.23 se presenta la grilla con la cual se realizó la modelación.

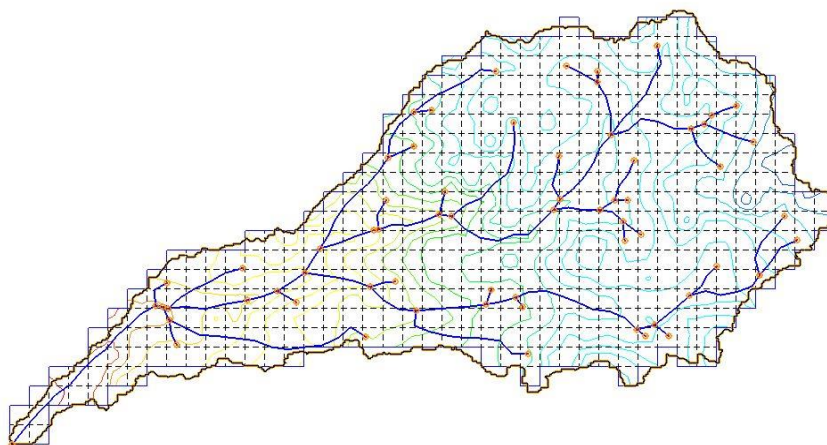


Figura 4.23: Esquema de la grilla de modelación de la cuenca Quebrada de Tarapacá en WMS 10.1.

Luego se procede a la creación de los mapas a utilizar, en este caso los de uso de suelo (ver Figura 4.24) y los de hidrogeología (ver Figura 4.25); los cuales mediante WMS se acoplan al modelo GSSHA para su utilización en la definición de los parámetros. En este caso en particular y dada la inexistente información del tipo de suelo referente a la zona de estudio, se utilizó el mapa de uso de suelo para la parametrización de los procesos a nivel superficial y de suelo, es decir, la rugosidad superficial, la evapotranspiración y la infiltración mientras que para el caso del flujo subterráneo se ocupó el mapa de las unidades hidrogeológicas. La parametrización de referencia se basó en la que se expone en Rawls et al. (1982). Las parametrizaciones finales calibradas se pueden consultar en el Anexo A.

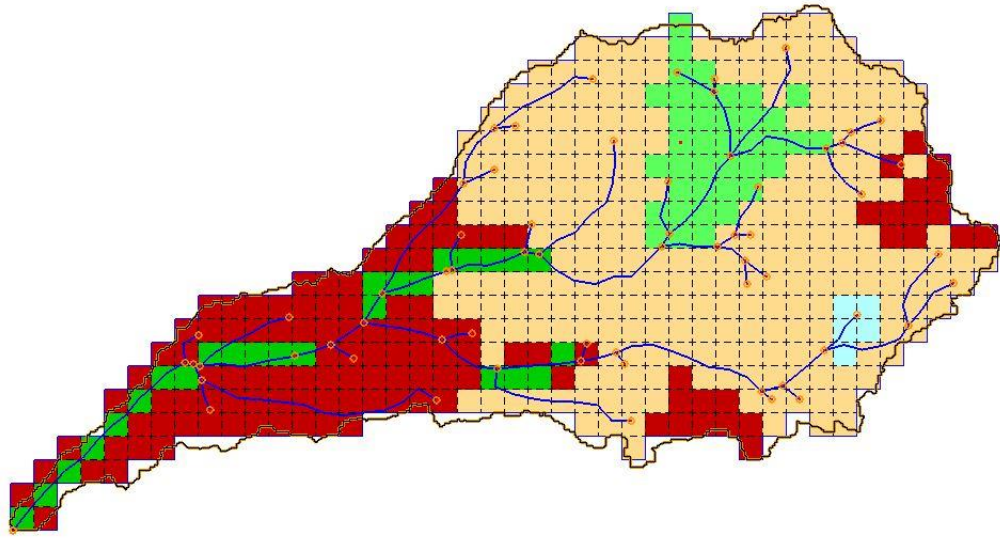


Figura 4.24: Uso de suelo grillado en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

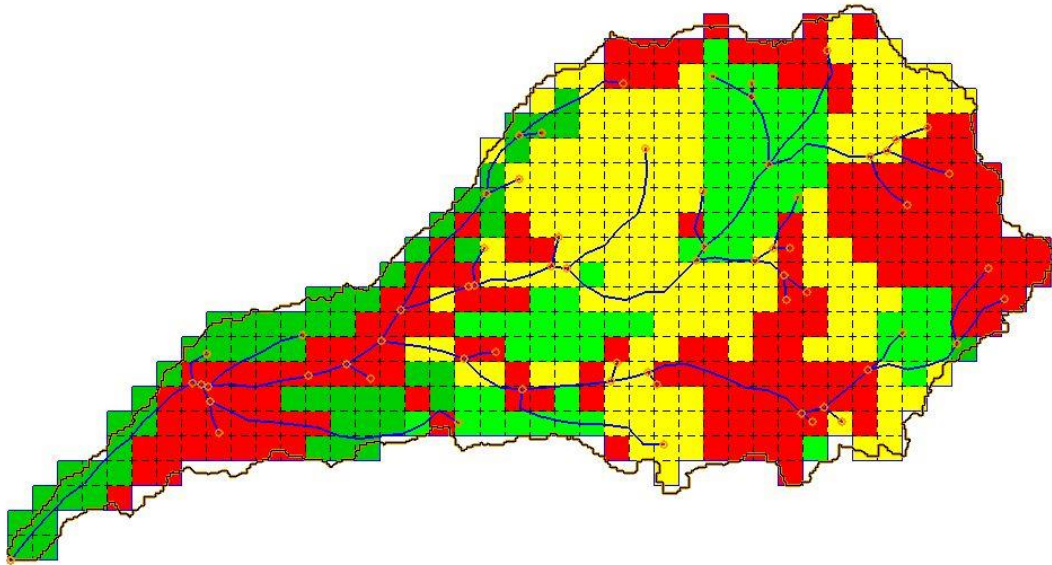


Figura 4.25: Hidrogeología grillada en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

Posteriormente, las precipitaciones se ingresan de manera distribuida y en base a lo expuesto en la Figura 4.2, de esta forma en la Figura 4.26 se muestra la distribución de precipitaciones.

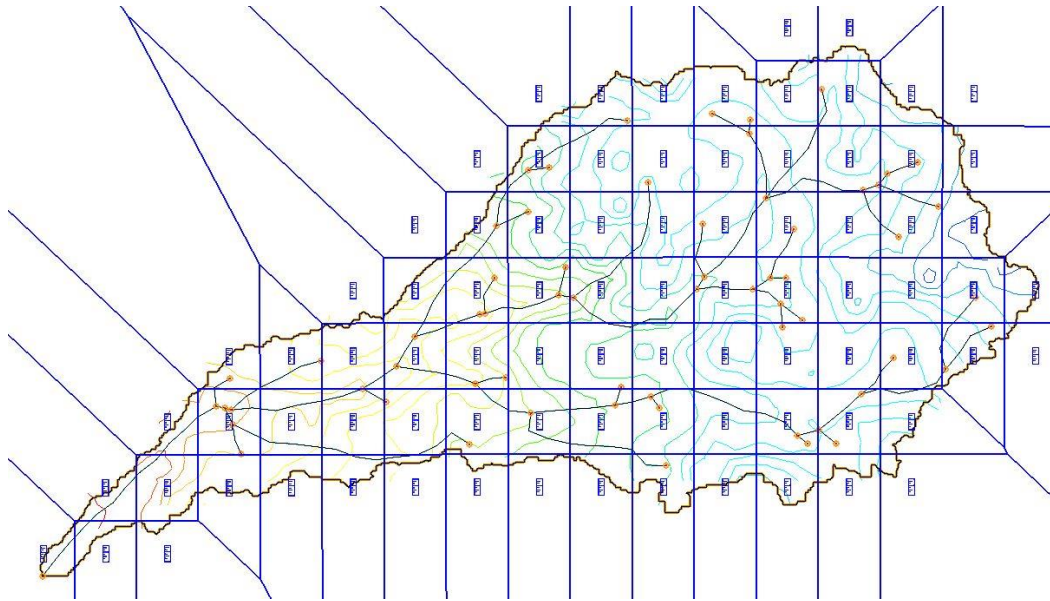


Figura 4.26: Grilla de precipitaciones en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

Para la representación de los cauces se utilizaron perfiles trapezoidales uniformes a los cuales se debía ingresar la profundidad, el ancho de fondo y la pendiente; ya que no existen estudios anteriores donde se representen la topografía de estos.

Para ocupar el módulo subterráneo de GSSHA es necesario generar un fondo de acuífero y un nivel de agua inicial, por lo cual para crear el fondo y dado que no existen estudios anteriores que muestren una representación de éste se supuso un fondo que se basaba en la altura superficial y un desnivel de 300 metros homogéneo para toda la grilla, valor que se ajustó para que en ninguna parte de la grilla hubiera problemas como por ejemplo, que el fondo acuífero se encontrara en un nivel mayor a que algún cauce o que el fondo se encontrara muy debajo de los mismos, lo cual conllevaría a representaciones más irreales. Del mismo modo, el nivel de agua se inició a 10 metros bajo el nivel de la superficie de la grilla y tras sucesivas corridas del modelo este nivel se iba actualizando con cada una de éstas hasta que se estabilizara el modelo (“Spin up”) con el fin de que la modelación no se viese influenciada por las condiciones iniciales impuestas.

Además, al ocupar este módulo se seleccionaron las siguientes condiciones de borde para el modelo:

- No Flujo (No Flow boundary) para el límite de la cuenca hidrográfica.
- Flujo de río (River Flux) para la interacción entre el cauce y la napa acuífera.

La primera condición viene dada por default en GSSHA al delimitar la cuenca y la segunda condición es la que mejor representa la interacción subterránea cauce-napa debido a que bajo esta condición se representa el flujo base que fluye por estos cauces.

Capítulo 5: Resultados de la modelación hidrológica

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos, desde un análisis de sensibilidad hasta la simulación y con ello el análisis de los aportes hídricos de la cuenca en estudio.

5.1 Análisis de sensibilidad

Para calibrar el modelo es necesario saber qué parámetros son los más sensibles ante una variación en su magnitud. El objetivo de este análisis es estudiar el comportamiento de las métricas que se utilizaran para evaluar la eficiencia de las simulaciones en base a la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya. En particular se realizó un análisis de sensibilidad a los parámetros del suelo y de la hidrogeología, los cuales además de presentar una alta sensibilidad son también inciertos debido a que no existen antecedentes de mediciones de estos. En la Tabla 5.1 se presentan los valores utilizados para el análisis a nivel mensual.

Tabla 5.1: Parámetros y valores o ponderadores considerados en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Valores	Descripción
st (cm)	20; 30; 40; 50; 60; 70; 100	Espesor de los sedimentos del cauce
sk (cm/hr)	0,01; 0,05; 0,08; 0,12; 15; 0,2; 0,5; 1; 1,5	Conductividad hidráulica de los sedimentos
re (mm)	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000	Retención superficial
hc (-)	0,01; 0,1; 1; 10	Conductividad hidráulica del suelo
ps (-)	0,8; 0,9; 1; 1,1	Porosidad del suelo
ghc (-)	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10	Conductividad hidráulica subterránea

Es necesario mencionar que en el caso de hc, ps y ghc estos valores son ponderadores a los valores ocupados en la Tabla 5.2, esto con el fin de exponer como responde la simulación al variar la parametrización de la distribución de parámetros en conjunto y facilitar el análisis.

Tabla 5.2: Parámetros usados para el análisis de hc, ps y ghc.

Uso de suelo	hc (cm/hr)	ps (cm ³ /cm ³)	Hidrogeología	ghc (cm/hr)
Terrenos de uso agrícola	3	0,33	Alta_Moderada	1
Estepa altiplánica	3	0,33	Moderada_Baja	0,1
Matorral muy abierto	3	0,38	Baja_Nula	0,05
Bofedales	3	0,38	Nula	0,01
Áreas sin vegetación	0,01	0,41		

En la Figura 5.1 se presentan los gráficos del comportamiento de las métricas generados a partir de la variación unidimensional de cada uno de los parámetros expuestos anteriormente, es decir, variando de uno en uno para todos los casos y manteniendo constante el resto de los parámetros sin considerar el variable.

Análisis de sensibilidad calibración

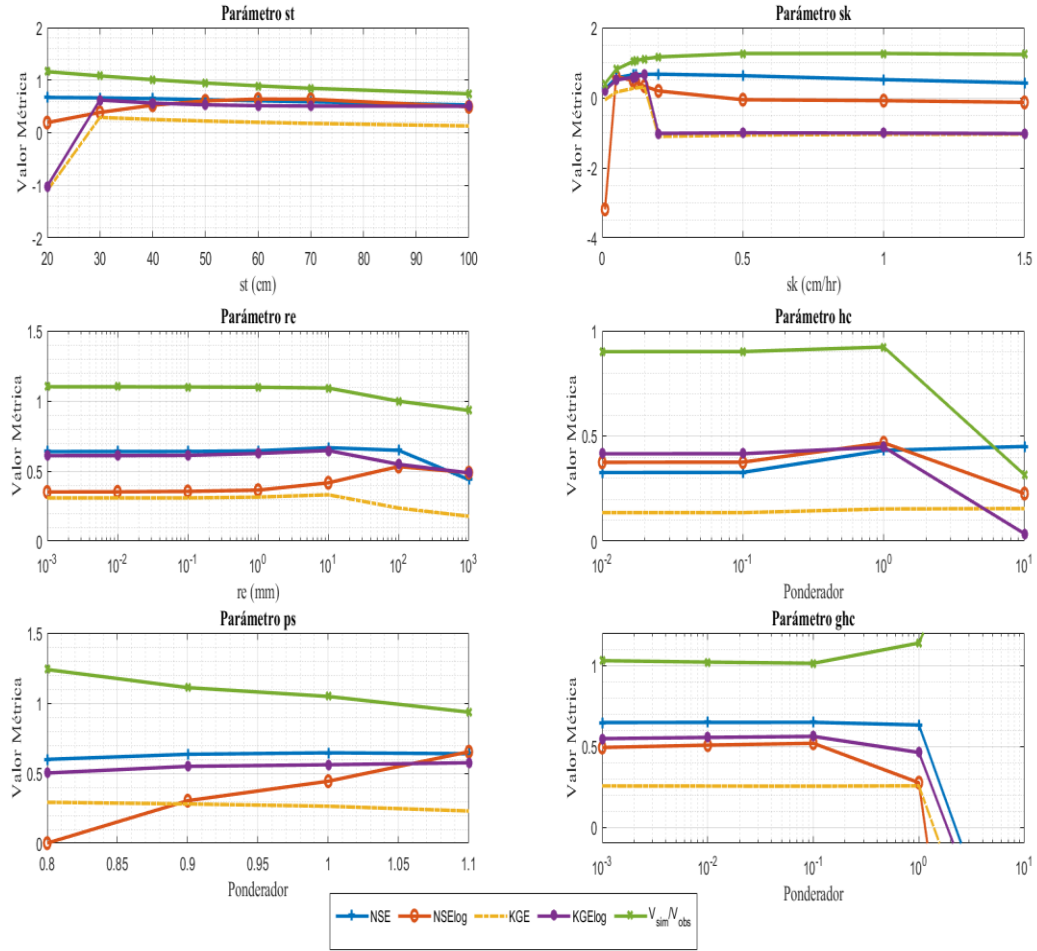


Figura 5.1: Variación de las métricas de calibración obtenidos para el análisis de sensibilidad.

Analizando la Figura 5.1 se puede apreciar que los parámetros referentes a los sedimentos presentan una sensibilidad bastante alta ya que gráficamente se puede apreciar tanto st como sk poseen unos umbrales tras los cuales las métricas bajan considerablemente teniendo un óptimo en 40 (cm) y 0,08 (cm/hr), respectivamente. Respecto al parámetro re, se puede apreciar que se genera un óptimo tras usar 10 (mm).

Ahora bien, en cuanto al parámetro hc se puede apreciar que los ponderadores expuestos anteriormente hay una tendencia a empeorar los indicadores de eficiencia mostrando claramente que los valores predichos son los óptimos a diferencia de lo que ocurre con ps el cual muestra una clara mejora al aumentar los valores en un 10%. Respecto a ghc se puede observar una tendencia al mejoramiento de las métricas al aplicar un ponderador de 0,1 o bien reducir en un 90% el valor predicho de estos parámetros. Además, se puede observar que al aumentar los valores de ghc los indicadores tienden a mostrar un empeoramiento sustancial. Cabe mencionar que los parámetros de porosidad de la hidrogeología no se exponen acá debido a que presentaron mayor sensibilidad para el análisis a nivel diario, el cual no se va a exponer debido a que según el enfoque del trabajo se debe priorizar el análisis mensual.

5.2 Calibración y validación del modelo

El procedimiento de calibración y validación se realizó con la estadística de Quebrada en Tarapacá en Sibaya (ver Figura C.10 en el Anexo C) y dado que el periodo de estudio comprende del 2004 al 2015 se definieron los siguientes subperiodos para realizar el análisis:

- Calentamiento o “Warm Up”: Se generó el año 2003 adicionalmente para que el modelo tuviera un espacio temporal para desligarse de las condiciones iniciales impuestas y además se realizó un procedimiento de “Spin Up” el cual consistía en correr el modelo varias veces ocupando las condiciones de la corrida anterior con el fin de estabilizarlo.
- Calibración: Desde el año enero del 2004 hasta abril del 2012.
- Validación: Desde mayo del 2012 hasta fines del 2015.

Cabe destacar que, para calibrar el modelo, el módulo de nieve de GSSHA no se modificó de los valores que venían por defecto debido al régimen pluvial imperante en la zona de estudio. Otro criterio que se consideró en la calibración fue que los indicadores de eficiencia obtenidos a nivel diario y mensual fueran positivos y el óptimo posible.

Ahora bien, tanto la calibración como la validación muestra resultados coherentes en cuanto a los caudales observados y tanto a nivel diario como mensual como se puede observar en la Figura 5.2 y en la Figura 5.3, respectivamente. Además, en la Figura 5.4 se muestran las curvas de duración y de variación estacional obtenidas.

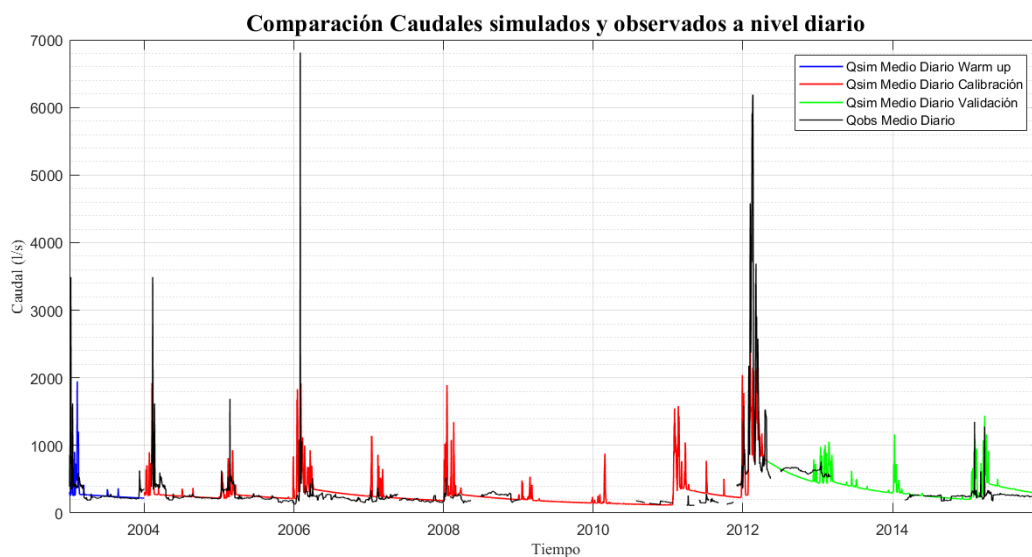


Figura 5.2: Serie de caudales medios diarios observados y simulados, periodo 2003-2015.

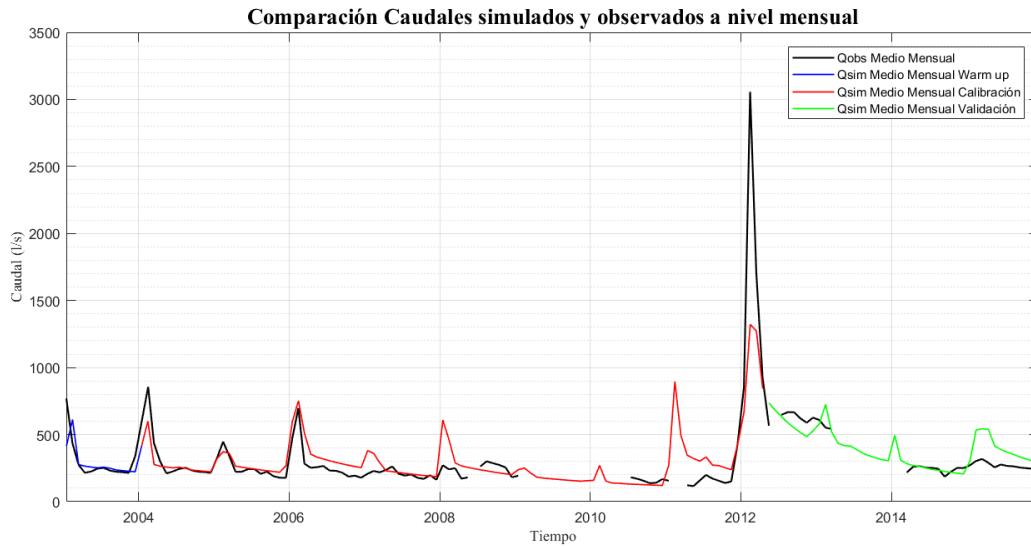


Figura 5.3: Serie de caudales medios mensuales observados y simulados, periodo 2003-2015.

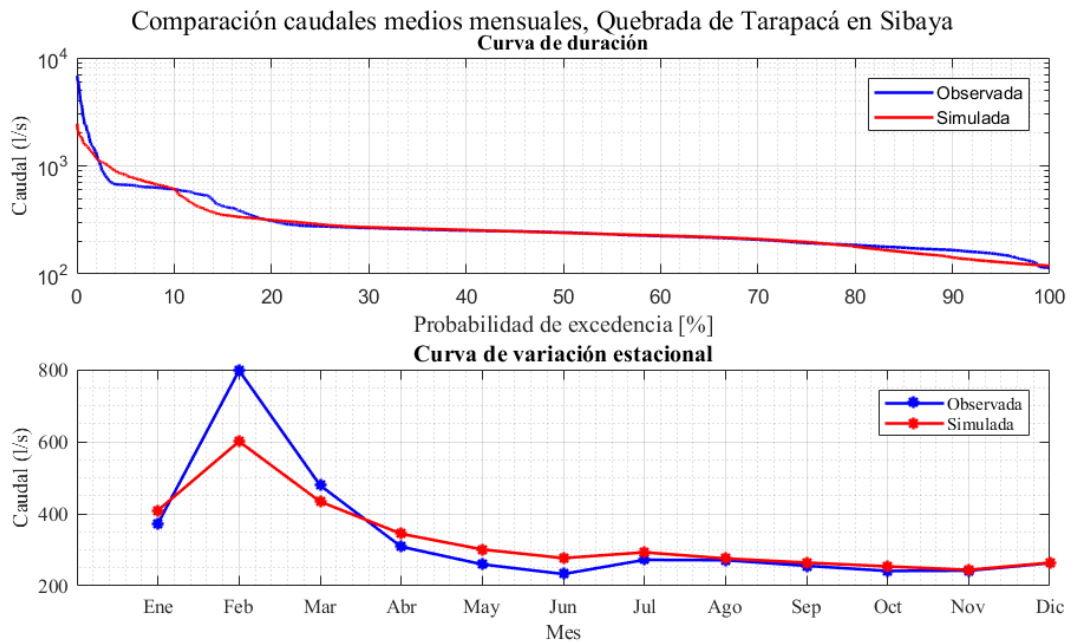


Figura 5.4: Curva de duración y variación estacional, periodo 2004-2015.

En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de las métricas obtenidas, donde se observa un buen desempeño a nivel mensual para la calibración según el criterio de Moriasi et al. (2007). Además, se puede apreciar que para la validación los indicadores mantienen un buen desempeño por lo cual la modelación quedaría validada.

Tabla 5.3: Métricas tras modelación.

Métricas	Diario					Mensual				
	NSE	NSElog	KGE	KGElog	Vsim/Vobs	NSE	NSElog	KGE	KGElog	Vsim/Vobs
Calibración	0,472	0,420	0,446	0,690	0,980	0,660	0,625	0,527	0,722	1,009
Validación	0,344	0,365	0,647	0,731	1,056	0,621	0,611	0,749	0,779	1,075

Ahora bien, en base a la calibración, se puede observar que representa de manera correcta los procesos hidrológicos asociados a la escorrentía especialmente el flujo base como se puede observar en la curva de variación estacional salvo los meses de abril a junio donde se tiende a sobreestimar los caudales, lo cual puede atribuirse a sesgos en la precipitación durante periodos de lluvias invernales.

Respecto al mes de febrero se puede observar una subestimación de los caudales observando la curva de variación estacional, el cual puede deberse a que los eventos de precipitación del año 2012 reflejan un aumento sustancial en los caudales observados los cuales pueden generar el aumento de la estadística para dicho mes. Cabe destacar que, si se compara la precipitación observada en la estación meteorológica Chusmiza ubicada en la cuenca Quebrada de Tarapacá con la utilizada se puede observar una subestimación por parte de ésta, ya que en la estación se registró para el período enero-marzo del 2012 un monto de 462 (mm) de agua mientras que el utilizado registro un valor de 151 (mm); esto podría explicar por qué no se logró replicar con más exactitud los caudales peak de ese año. Es importante mencionar que la versión de precipitación con la que se trabajó en esta memoria (versión v1.3) corresponde a una versión estable que en el estudio de Actualización del Balance Hídrico Nacional se intenta validar a través de la modelación de los hidrogramas la distribución de las forzantes en la zona norte especialmente.

Finalmente, tras haber calibrado y validado el modelo para la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya se ocupó la misma distribución de parámetros de esta modelación a la cuenca completa de la Quebrada de Tarapacá, ya que al tratarse de una subcuenca dentro de la misma cuenca se esperaría que la parametrización fuese la misma. Esto con el fin de poder analizar los aportes hídricos de la cuenca general.

5.3 Análisis de los aportes hídricos de la Quebrada de Tarapacá

Dado que los principales mecanismos que aportan recurso hídrico desde la cuenca Quebrada de Tarapacá (ver Figura 3.2) a la Pampa vienen dados por el flujo superficial de la quebrada en sí y un flujo subterráneo permanente conducido por un sistema de fallas geológico (ver Figura 2.3), se analizaran ambos componentes por separado.

5.3.1 Aporte superficial

El flujo superficial que finalmente escurre a la salida de la cuenca se aprecia en la Figura 5.5, en la cual se visualizan los caudales medios mensuales a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá tanto en régimen natural como descontando las extracciones por los derechos de agua existentes.

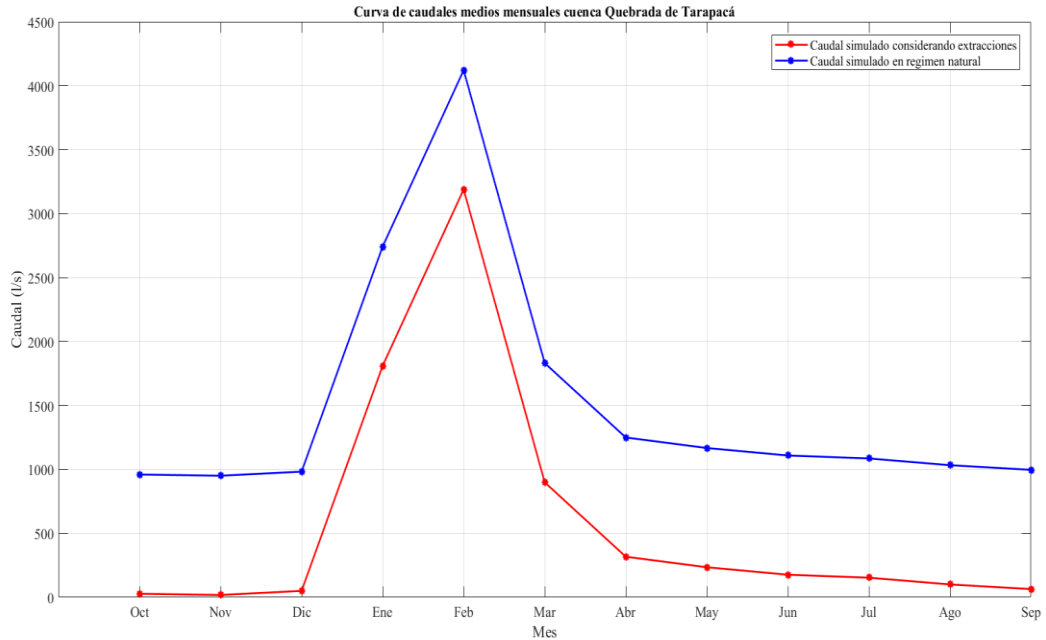


Figura 5.5: Curva de caudales medios mensuales a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá.

Como se puede observar en la Figura 5.5 el mayor aporte hídrico superficial que genera la cuenca se presenta durante los meses de enero a marzo, meses en los cuales las lluvias proceden del invierno Altiplánico y el resto de los meses ese aporte decrece sustancialmente notándose que en la mayor parte del año la escorrentía superficial que sale de la cuenca es mínima y está siendo usada en su mayoría aguas arriba por los usuarios del agua.

En promedio el aporte superficial ascendería a 586,8 (l/s) considerando todos los meses, 1966,1 (l/s) considerando el periodo entre enero y marzo y de 127,1 (l/s) si se considera el periodo entre abril y diciembre. Este aporte superficial que sale de la cuenca pasará a la unidad geológica conocida como el cono aluvial, en donde los cauces se ensanchan sustancialmente y debido a la heterogeneidad de las estructuras cuaternarias se inducen dos procesos (Viguié, 2013):

- Disminución en la evaporación debido a la presencia de sedimentos finos el cual bloquea la recuperación evaporativa del agua ya infiltrada.
- La lámina de agua se infiltrará (parcialmente) en la zona no saturada el cual irá descendiendo más o menos rápido a la zona saturada dependiendo del sedimento.

Ahora bien, debido a los alcances del presente trabajo se analizaron los aportes superficiales que salen de la cuenca en estudio y para una evaluación directa de como estos aportes llegan al acuífero de la Pampa en la zona del cono aluvial se deja abierta la investigación.

En cuanto a un análisis de estos resultados, el promedio de los aportes superficiales se podría comparar con los estudios de Grilli et al. (1986) y la JICA et al. (1995) en cuanto a que estos estudios también hablan del aporte netamente superficial entregando valores de 385 (l/s) y 318 (l/s), respectivamente. Haciendo una comparación los resultados obtenidos se parecen más a los

obtenidos por GRILLI et al., 1986 y la diferencia entre ambas cantidades puede deberse a que la modelación realizada comprende toda la cuenca de la Quebrada de Tarapacá a diferencia de los estudios mencionados anteriormente donde se disponía de información fluviométrica únicamente hasta la estación Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan, la cual representaría una hoya hidrográfica menor a la representada en este estudio y además no se contaba con un estudio de las precipitaciones tan avanzado como el actual.

Ahora bien, dado que la modelación realizada conecta los procesos superficiales y subterráneos, existe una zona que no tienen considerado esos estudios (zona entre la estación Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan y la cuenca Quebrada de Tarapacá definida en este trabajo) en la cual, si bien no se presenta precipitación (ver Figura 4.5), persiste la conexión con las unidades subterráneas las cuales se expresan en el flujo base y entonces puede radicar aquí la diferencia sustancial entre las cantidades obtenidas en este trabajo y los estudios anteriormente mencionados.

Otra manera de apreciar esto es observando la Figura 5.6, donde se presentan los caudales simulados mensuales en la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya (azul) y en la cuenca Quebrada de Tarapacá (rojo) ambos en régimen natural; aquí se muestra que el escurrimiento a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá tanto durante las crecidas como el flujo base es mayor que lo simulado en la estación de Sibaya por lo que dado las precipitaciones tienden a extinguirse mediante se acercan a la desembocadura de la Quebrada de Tarapacá los flujos superficiales aumentan debido a flujos subterráneos que se expresan como flujo base. Además, la cuenca en estudio recibe los aportes superficiales del brazo hidrográfico de la zona de Coscaya además de la de Sibaya en la desembocadura.

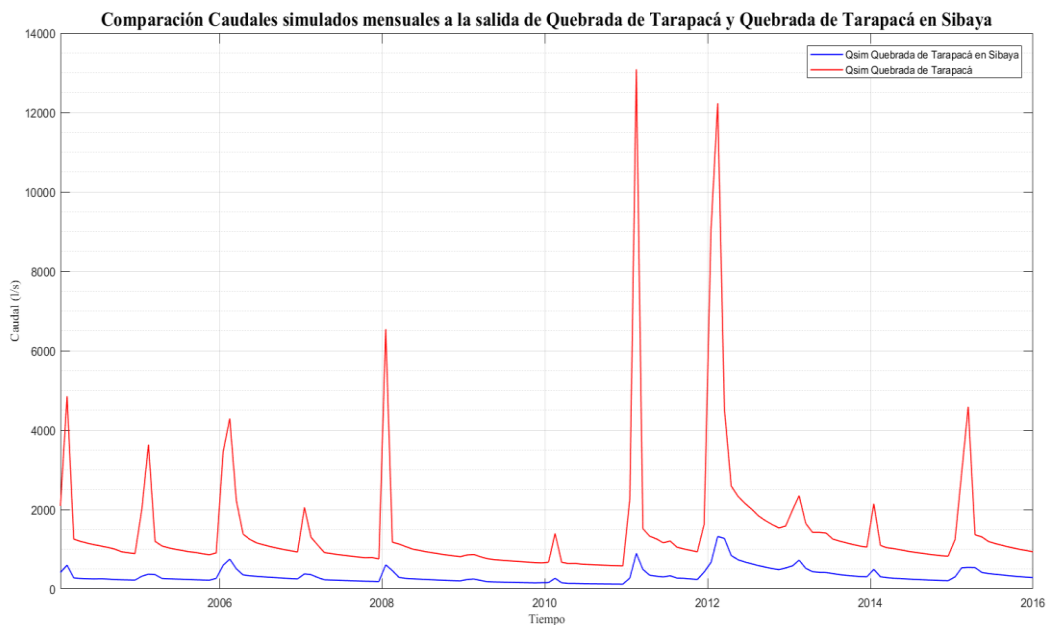


Figura 5.6: Comparación caudales simulados mensuales en la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya y en la cuenca Quebrada de Tarapacá.

5.3.2 Aporte subterráneo

El flujo subterráneo permanente que aporta la cuenca en estudio hacia la Pampa o también conocido como la circulación profunda como se mencionó en el capítulo de la revisión bibliográfica se obtuvo considerando esta circulación como una transferencia de agua o “leakage” por su nombre en inglés el cual se calibró para obtener un óptimo bajo el criterio de que optimizara simultáneamente las métricas NSE, KGE y NSElog.

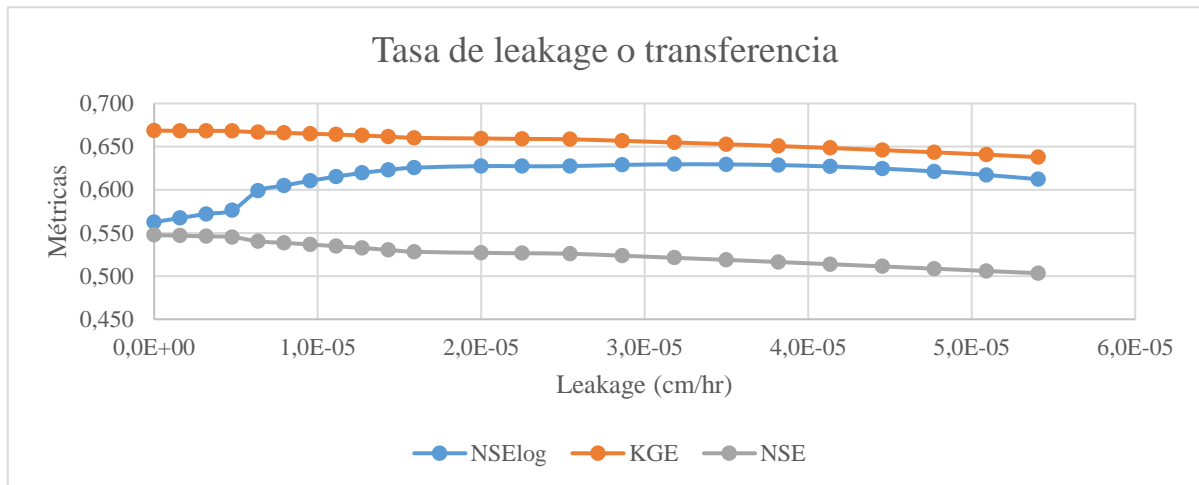


Figura 5.7: Comportamiento del NSElog ante la variación de la tasa de transferencia de agua.

En la Figura 5.7 se aprecia claramente que la tasa de fuga presenta una tendencia a empeorar las métricas NSE y KGE a medida que aumenta y en el caso del NSElog presenta una tendencia a aumentar que luego disminuye, por lo cual el valor que optimiza las tres métricas en evaluación correspondería a una tasa de $0,00002$ (cm/hr). A modo de aclaración, la calibración y validación presentada anteriormente ya incluye esta tasa de fuga en la simulación.

Considerando dicha tasa y pasándola a unidades volumétricas ocupando el área de la zona de estudio, la circulación profunda permanente tendría un valor de $99,65$ (l/s). Este valor considerando los antecedentes se parece más al obtenido por DGA (2014) el cual obtuvo un valor de 90 (l/s), a diferencia del obtenido por DICTUC (2006) que entrega un valor de 295 (l/s).

En primer lugar, hay que dejar en claro que el estudio realizado por DICTUC (2006) obtiene resultados similares a los obtenidos por Grilli et al. (1986) y por la JICA et al. (1995) aun tratándose de modelos conceptuales diferentes, pues los últimos consideraban el flujo superficial netamente como sistema de recarga y el estudio de la DICTUC consideraba el flujo subterráneo o circulación profunda como la recarga, lo cual incita a pensar que quizás existan errores en la modelación por una falla en el modelo conceptual. Por esta razón no se puede comparar lo obtenido en este trabajo con ese estudio. En cambio el estudio realizado por la DGA es con el cual se puede establecer ciertas comparaciones debido a que se estudia el flujo subterráneo permanente y en cuanto a los valores obtenidos se encuentran relativamente dentro del mismo margen, notando que el valor obtenido es levemente mayor lo cual puede atribuirse a que el trabajo realizado fue netamente de modelación sin realizar observaciones en terreno y la incertidumbre inherente que conlleva el realizar un modelo que explique la física de un sistema.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

Tras finalizar el presente trabajo y en base a los objetivos planteados y los resultados obtenidos se formulan las principales conclusiones y recomendaciones:

6.1 Conclusiones principales

Al realizar una modelación hidrológica es sumamente importante realizar una buena gestión en la construcción de las forzantes que el modelo necesite, ya que los resultados que éste entregue y con ello su calidad dependerán de la calidad de las forzantes consideradas. Ahora bien, dado que no se contaban con una estadística hidrometeorológica completa y que incluyera todas las forzantes de interés, se utilizaron algunas metodologías para suplir ese déficit.

En este marco, se logró compensar esa carencia en la estadística hidrometeorológica y se construyó un set de forzantes ocupando herramientas actuales tales como reanálisis atmosférico, datos grillados, entre otros y con ello se plantearon metodologías que pueden ocuparse en otras cuencas donde ocurra esta carencia con los datos, especialmente como ocurre en la zona norte del país.

El contar con un producto grillado para la precipitación proporcionó una ventaja en la modelación con GSSHA, ya que este modelo permitía ocupar cada set de datos espacialmente distribuidos de esta forzante, la cual era crucial en la cuenca del estudio y con ello realizar una simulación más real aun que a su vez mas demandante computacionalmente, el cual también era un factor limitante.

En base a los resultados numéricos y gráficos obtenidos tras la calibración del modelo GSSHA, se concluye que se ha logrado representar de manera satisfactoria los procesos hidrológicos imperantes en la cuenca, lo cual se representa también en el desempeño satisfactorio de las métricas obtenidas en la simulación, especialmente con las métricas logarítmicas las cuales evalúan mejor el ajuste a los caudales bajos, los cuales se muestran la mayor parte del año en la zona de estudio. Además, se presenta un buen ajuste gráfico en la curva de duración.

Cabe destacar que, durante los meses de lluvia, gráficamente se puede observar una subestimación de los caudales simulados lo cual puede atribuirse a que la forzante de precipitación subestima la precipitación real tal y como se mostró anteriormente en el capítulo 5 haciendo la comparación con la estación Chusmiza.

Dada la falta de información fluviométrica a la salida de la cuenca en estudio se realizó una transferencia de los parámetros calibrados en una estación aguas arriba, proceso que puede conllevar un cierto grado incertidumbre mayor al que ya se tiene, pero dada las circunstancias y ocupando un criterio de cercanía se supuso esta homologación de las cuencas.

En síntesis, se estima que se tiene una buena calibración y validación de la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya y con ello una modelación que representa de buena forma la física del sistema, la cual podría mejorarse al tener más datos en terreno sobre los suelos, por ejemplo, ya que en el

análisis de sensibilidad parámetros como las conductividades hidráulicas o el espesor de los sedimentos se mostraron más sensibles.

Ahora bien, respecto a los resultados obtenidos se puede establecer que hay consistencia con respecto a estudios anteriores (Grilli et al., 1986, JICA et al., 1995, DICTUC, 2006, DGA, 2014) pero hay que tener cuidado al tratar de hacer comparaciones puesto que en los primeros dos antecedentes se habla de un aporte de recarga netamente superficial, mientras que en los dos últimos se habla de un aporte netamente de flujo subterráneo o de circulación profunda. Aquí radica la mayor diferencia y es por esto por lo que en el presente trabajo se incluye un análisis de ambos mecanismos que son los que gobiernan la forma de recarga de la Pampa.

Los resultados obtenidos evidencian que el mayor aporte hídrico se generaría durante las crecidas provocadas por el invierno altiplánico. Además, existe un aporte proveniente la circulación profunda que es de carácter permanente y alimenta a la Pampa.

Cabe mencionar que la modelación se realizó para régimen natural, ya que se restituyeron los derechos de agua a la salida de la cuenca, por lo cual los procesos hidrológicos que entrega la simulación también lo están y con ello hay considerar que los flujos obtenidos podrían variar al considerar las extracciones en los lugares correspondientes.

6.2 Recomendaciones

Para mantener esta línea de investigación y similares se presentan las siguientes recomendaciones generales:

En primer lugar, se sugiere que en estudios posteriores se ocupe una versión más actualizada del producto grillado de precipitaciones ya que los caudales altos no se representaron tan correctamente.

En segundo lugar, se recomienda realizar una modelación u otro estudio del proceso de infiltración que gobierna en la zona del cono aluvial a la salida de la cuenca con el fin de comprender mejor como funciona.

En tercer lugar, se deben instalar más estaciones fluviométricas e hidrometeorológicas para mejorar la estadística que se posee ya que la que se tiene es insuficiente, en particular una estación a la salida de la cuenca Quebrada de Tarapacá sería de gran utilidad para comparar los resultados de una modelación como la que se realizó en el presente trabajo.

En cuarto lugar, en caso de que se quiera ver el efecto de las extracciones superficiales locales se recomendaría la utilización de otro modelo ya que el utilizado no permitía realizar esto.

Finalmente, en relación con la gestión del recurso hídrico en la zona de estudio surge una reflexión interna acerca del buen uso de éste, ya que es un bien escaso en esta zona por lo que los proyectos de ingeniería futuros deben considerar no solo una buena gestión, sino también un equilibrio entre el uso del recurso y la sustentabilidad del medio ambiente.

Bibliografía

- Aceituno, P., & Montecino, A. (1997). Meteorological field experiments in the South American Altiplano. *Amer. Met. Soc, Fifth*, 330–331.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje*. <https://doi.org/M-56>
- Casanova, I. (2012). *Modelación hidrológica para la estimación de la recarga en la cuenca Quebrada de Tarapacá (sector de cabeceras) I Región, Chile*. Retrieved from <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/111888>
- Castellan, G. W. (1987). *Fisicoquímica*. (M. E. Costas & C. Amador, Eds.) (Segunda). México D.F: Addison Wesley Longman de México S.A.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- CIDERH. (2012). Recursos Hidricos. Región de Tarapacá. Diagnóstico y Sistematización de la Información.
- CNR. (2017). *Estudio básico “Diagnóstico para desarrollar plan de riego en región de tarapacá” informe final febrero de 2017*.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- DGA. (1991). Estudio de síntesis de catastros de agua e infraestructuras de aprovechamiento.
- DGA. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad-Cuenca Quebrada de Tarapacá.
- DGA. (2011). Mejoramiento de la red fluviométrica para el control de crecidas. Retrieved from <http://documentos.dga.cl/FLU5305.pdf>
- DGA. (2012). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, Región de Atacama.
- DGA. (2014). Investigación y análisis de los mecanismos de recarga de la Pampa del Tamarugal.
- DGA. (2017). Actualización del balance hídrico nacional.
- DICTUC. (2006). Estudio de impacto ambiental Pampa Hermosa. Informe Técnico.
- Downer, C. W. (2007). Development of a Simple Soil Moisture Model in the Hydrologic Simulator GSSHA. *US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center*, (October).

- Downer, C. W., & Ogden, F. L. (2004). GSSHA: Model To Simulate Diverse Stream Flow Producing Processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 161–174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:3\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:3(161))
- Downer, C. W., & Ogden, F. L. (2006). Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User ' s Manual Coastal and Hydraulics Laboratory Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User ' s Manual, (September).
- Flügel, W. -A. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 423–436. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090313>
- Garreaud, R. D. (2000). Pronóstico de la convección en el Altiplano Sud Americano empleo el modelo regional Eta / CPTEC, 1–15.
- Grilli, A., Vidal, F., & Garin, C. (1986). Balance Hidrológico Nacional, I Región. Dirección General de Aguas, Chile.
- Guevara, S. (2003). Estimación De La Radiación Solar. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hamlet, A. F., Salathé, E. P., & Carrasco, P. (2010). Statistical Downscaling Techniques for Global Climate Model Simulations of Temperature and Precipitation with Application to Water Resources Planning Studies. *Final Report for the Columbia Basin Climate Change Scenarios Project*, 28. Retrieved from <http://warm.atmos.washington.edu/2860/report/>
- Houston, J. (2002). Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: Mechanisms, magnitudes and causes. *Hydrological Processes*, 16(15), 3019–3035. <https://doi.org/10.1002/hyp.1086>
- Jayne, R. S., Pollyea, R. M., Dodd, J. P., Olson, E. J., & Swanson, S. K. (2016). Spatial and temporal constraints on regional-scale groundwater flow in the Pampa del Tamarugal Basin, Atacama Desert, Chile. *Hydrogeology Journal*, 24(8), 1921–1937. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1454-3>
- JICA, DGA, & Pacific Consultants Internacional. (1995). The study on the development of water resources in northern Chile.
- Lin, Y., Chuang, Y., Shyu, J. B. H., González, G., Shen, C., Lo, C., & Liou, Y. (2016). Tectonophysics Structural characteristics of an active fold-and-thrust system in the southeastern Atacama Basin , northern Chile, 685, 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.015>

- Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O., & Grilli, A. (1990). Source of Ground Water in the Deserts of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Ground Water from the Andes. *Groundwater*, 28(4), 513–517. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01706.x>
- Ministerio de Bienes Nacionales. (2018). Infraestructura de Datos Geoespaciales IDE. Retrieved from <http://www.ide.cl/>
- Ministerio de Energía y Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. (2017). Explorador Solar. Retrieved from <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/exploracion>
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I—a Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ogden, F. L., & Saghafian, B. (1997). Green and Ampt Infiltration with Redistribution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), 386–393. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:5\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:5(386))
- Pérez, O. A. (2007). *Determinación de hidrogramas unitarios utilizando el modelo hidrológico distribuido GSSHA*. Universidad De Chile. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104478>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Sanzana Cuevas, P. P. (2008). Análisis de la Incertidumbre en la Modelación Hidrológica Mediante el Uso de SIG y GSSHA. *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/30756159_Analisis_de_la_Incertidumbre_en_la_Modelacion_Hidrologica_Mediante_el_Uso_de_SIG_y_GSSHA
- Singh, V. P. (1988). *Hydrologic systems. Volume I: Rainfall-runoff modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey. 1988. 480.
- Toro Piñeiro, D. A. (2015). Procesos Hidrogeológicos En La Cuenca De La Quebrada De Tarapacá: Análisis De Las Relaciones Sedimentológicas Con El Abanico Aluvial. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137682/Procesos-hidrogeologicos-en-la-cuenca-de-la-Quebrada-de-Tarapaca.pdf?sequence=1>
- Viguié, B. (2013). Caractérisation et compétition des processus de recharge allochtone et autochtone en climat semi-aride à aride. Exemple de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal et de la quebrada Tarapacá (Chili).
- Wijayarathne, D. B. (2015). *Shallow groundwater modelling of the historical Irwin Wet Prairie in the Oak Openings Region of Northwest Ohio*.

Anexos

Anexo A: Modelo GSSHA

Los módulos considerados en este trabajo se presentan en la Tabla A.1 y A.2 y describen brevemente a continuación:

1. Flujo superficial

Este flujo se mueve por los cauces considerando secciones trapezoidales y se calcula mediante la ecuación de Manning. Para el caso de flujo superficial sobre cada celda se ocupa una solución explícita en volúmenes finitos a la ecuación de la onda difusa.

2. Infiltración

Este proceso se calculó utilizando el método GAR (Green y Ampt con redistribución) creado por (Ogden & Saghafian, 1997) en el cual se adecua el método GA para poder ocupar este método en simulaciones largas y con hiatos de precipitación y además no deja de ser robusta.

3. Evapotranspiración

Esta se calcula considerando el método de Penman-Monteith.

4. Flujo Subterráneo

Este flujo se calcula ocupando la solución de diferencias finitas del flujo subterráneo y se incluye además la condición de flux river con la cual se calcula la ganancia o pérdida de flujo subterráneo y superficial debido a que los cauces tienen una estrecha relación con el acuífero.

Además, en la Figura A.8 se presenta un breve esquema que representa la conceptualización de los flujos en las celdas de la grilla de GSSHA.

Tabla A.4: Parámetros de GSSHA asociados a cada módulo 1.

Modulo	Parámetro	Unidad	Terrenos de uso agrícola	Estepa altiplánica	Matorral muy abierto	Bofedales	Áreas sin vegetación
Infiltración	Conductividad hidráulica	(cm/hr)	3	3	3	3	0,001
	Presión capilar	(cm)	21	21	21	21	29
	Porosidad	(cm ³ /cm ³)	0,36	0,36	0,4	0,4	0,45
	Índice de la distribución de poros	(cm/cm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Saturación residual	(cm ³ /cm ³)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	Capacidad de campo	(cm ³ /cm ³)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
	Humedad inicial	(cm ³ /cm ³)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabla A.5: Parámetros de GSSHA asociados a cada módulo 2.

Modulo	Parámetro	Unidad	Terrenos de uso agrícola	Estepa altiplánica	Matorral muy abierto	Bofedales	Áreas sin vegetación
Evapotranspiración	Albedo	(-)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Altura de vegetación	(m)	1	0,7	0,7	0,7	0,001
	Coefficiente de radiación de la vegetación	(-)	0,7	0,7	0,7	0,7	1
Flujo superficial Módulo	Manning de la superficie	(-)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Parámetro		Alta_Moderada	Moderada_Baja	Baja_Nula	Nula	
Flujo subterráneo	Conductividad hidráulica	(cm/hr)	0,1	0,01	0,005	0,001	
	Porosidad	(cm3/cm3)	0,33	0,33	0,43	0,48	
Módulo	Parámetro		General de los cauces				
Cauces	Espesor de sedimentos	(cm)	40				
	Conductividad hidráulica de sedimentos	(cm/hr)	0,08				
	Manning del canal	(-)	0,025				

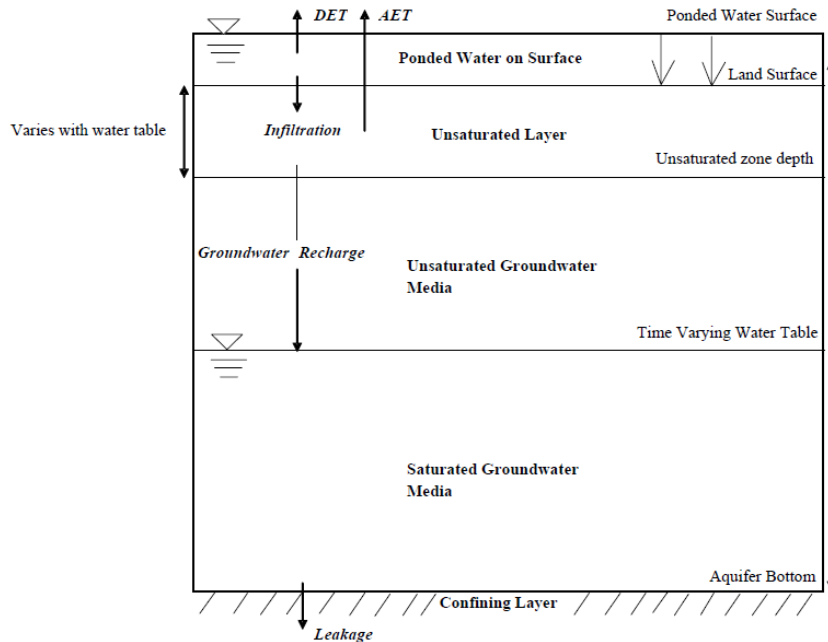


Figura A.8: Conceptualización del modelo de humedad de suelo ocupado en GSSHA. Fuente: Downer (2007).

Anexo B: Ecuaciones útiles

A continuación, se muestran algunas ecuaciones que se utilizaron en diferentes procesos durante el presente trabajo.

Ecuación de ponderación geométrica

En la ecuación (B.1) se expone un procedimiento geométrico que se ocupó con algunas forzantes y que son descritos en el documento.

$$X_{cuenca} = \frac{\sum_1^n X_i * A_i}{\sum_1^n A_i} \quad (B.1)$$

Donde,

- X_{cuenca} : Forzante sobre la cuenca [*unidad correspondiente*].
 X_i : Forzante sobre el área de influencia [*unidad correspondiente*].
 A_i : Área del polígono de Thiessen [km^2].

Perfil logarítmico de velocidad de viento

En la ecuación (B.2) se expone el ajuste por altura de la velocidad de viento descrito en el Manual FAO, 2006.

$$u_z = u_2 * \left(\frac{4,87}{\ln(67,8 * z - 5,42)} \right) \quad (B.2)$$

Donde,

- u_2 : Velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie [$\frac{m}{s}$].
 u_z : Velocidad del viento a z metros sobre la superficie [$\frac{m}{s}$].
z: Altura de medición sobre la superficie [m].

Formula barométrica

En la ecuación (B.3) se expone la formula barométrica según Castellan, 1987:

$$P(z, T) = P_o * e^{-\frac{Mgz}{RT}} \quad (B.3)$$

Donde,

- $P(z, T)$: Presión en función de la altura y la temperatura [*inHg*].
 P_o : Presión de referencia [*inHg*]. $P_o = 29,92$ [*inHg*].
 M : Masa molecular del aire [$\frac{kg}{mol}$]. $M = 0,0289644$ [$\frac{kg}{mol}$]
 g : Aceleración de gravedad [$\frac{m}{s^2}$]. $g = 9,8$ [$\frac{m}{s^2}$].
 R : Constante universal de los gases [$\frac{J}{K \cdot mol}$]. $R = 8.31432$ [$\frac{J}{K \cdot mol}$]
 z : Altura [*m*].
 T : Temperatura [$^{\circ}K$].

Método de integración de la radiación solar

En la ecuación (B.4) se muestra un método para para transformar la radiación en unidades de ($\frac{W}{m^2}$) en unidades de energía ($\frac{W \cdot h}{m^2}$ según Guevara (2003).

$$H_d = \sum_1^{n-1} \left[\frac{(R_n + R_{n+1}) * (t_{n+1} - t_n)}{2} \right] \quad (B.4)$$

Donde,

- H_d : Radiación solar [$\frac{W \cdot h}{m^2}$].
 R_n : Radiación solar como irradiancia [$\frac{W}{m^2}$].
 t_n : Tiempo en horas para la medición n [*h*].
 n : Numero de medidas de radiación obtenidas.

Inverso a la distancia cuadrático

En la ecuación (B.5) se muestra el método del inverso a la distancia cuadrático aplicado a la humedad relativa. Gráficamente se puede apreciar en la Figura B.3.

$$HR_{Escalada} = \frac{\sum_{i=1}^4 HR_i * \frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2}} \quad (B.5)$$

Donde,

- $HR_{Escalada}$: Humedad relativa escalada espacialmente [%].
 d_i : Distancia entre el punto de la grilla y la estación [*m*].

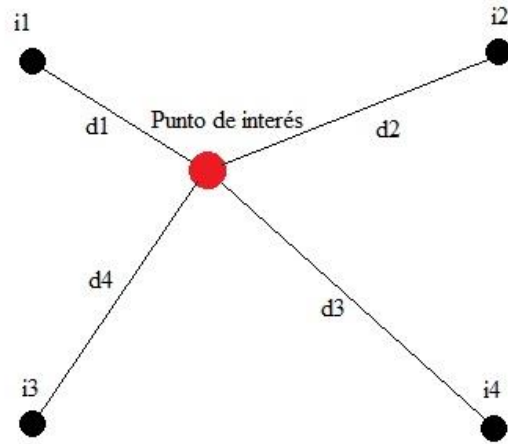


Figura B.9: Método de inverso a la distancia para escalar espacialmente la variable de interés.

Anexo C: Mapas y figuras adicionales

A continuación, se muestran algunos mapas y figuras adicionales que se utilizaron en el presente trabajo.

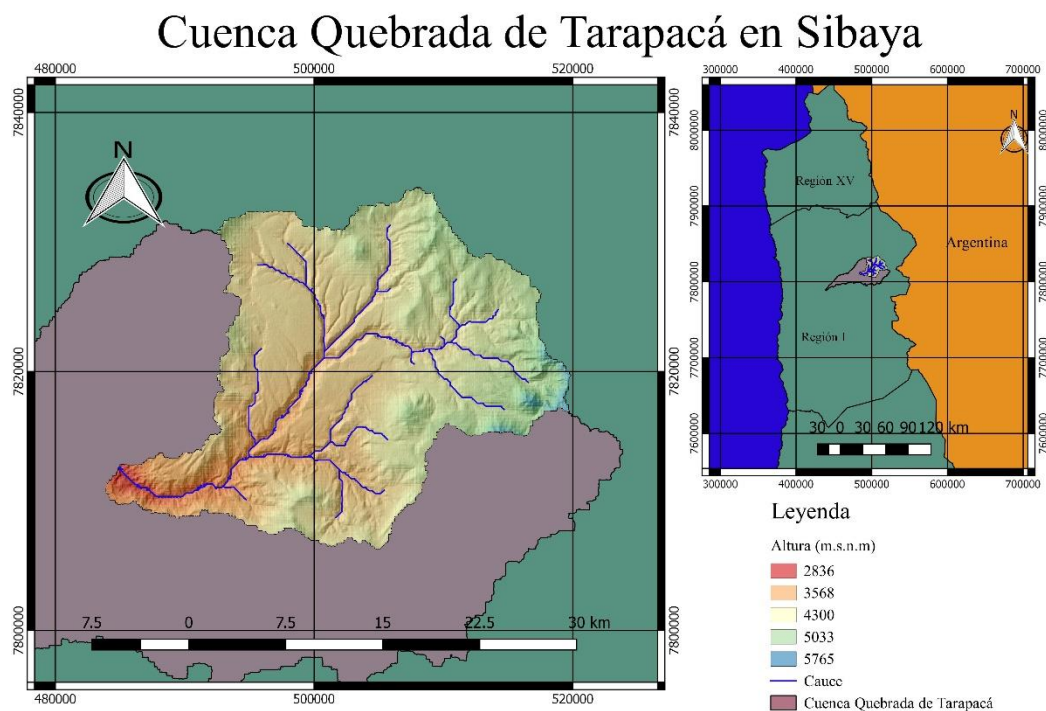


Figura C.10: Mapa de la cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

Tabla C.6: Parámetros morfométrico cuenca Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

Parámetro Morfométrico	Valor
Longitud del eje del rio principal (km)	19,49
Área de la cuenca (km ²)	548,78
Altura máxima (msnm)	5765
Altura mínima (msnm)	2836

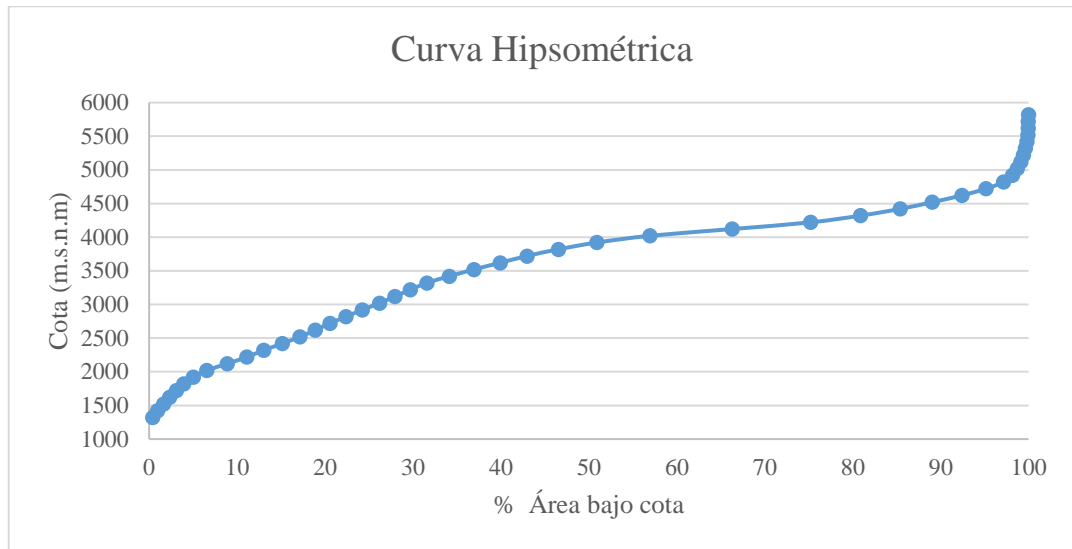


Figura C.11: Curva hipsométrica Quebrada de Tarapacá.

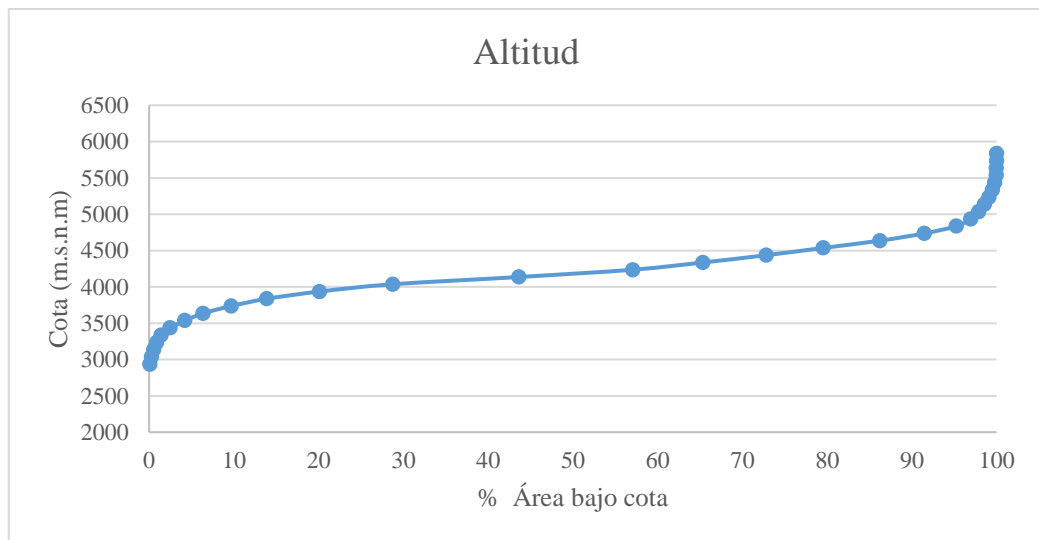


Figura C.12: Curva hipsométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

Anexo D: Funciones de transferencia humedad relativa

A continuación, se presentan todas las funciones de transferencia ocupadas para la metodología de la humedad relativa restantes.

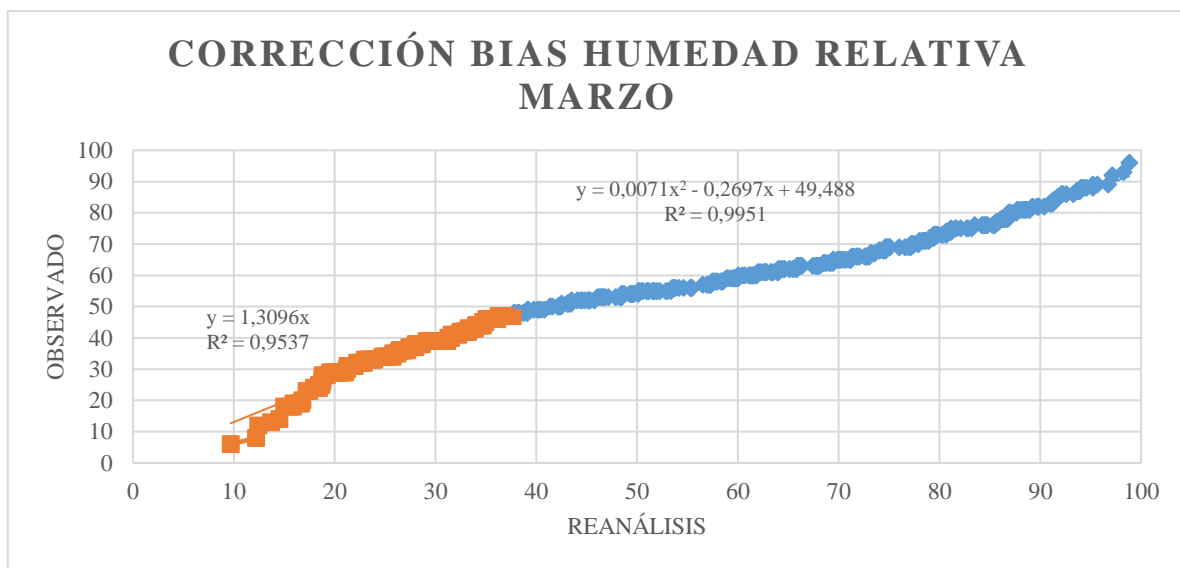


Figura D.13: Función de transferencia para el mes de marzo.

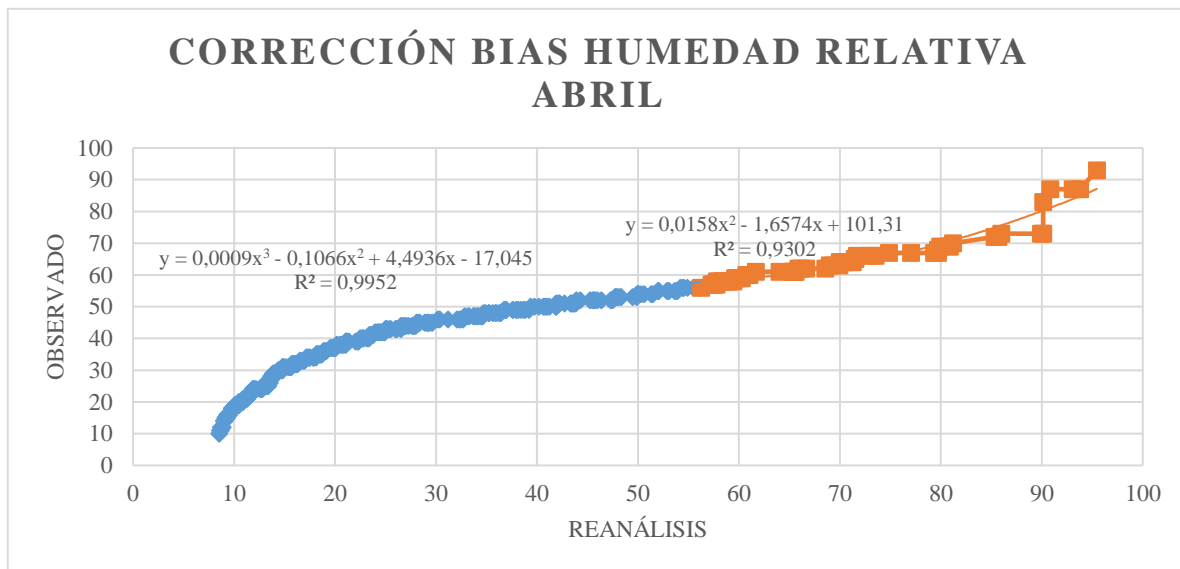


Figura D.14: Función de transferencia para el mes de abril.

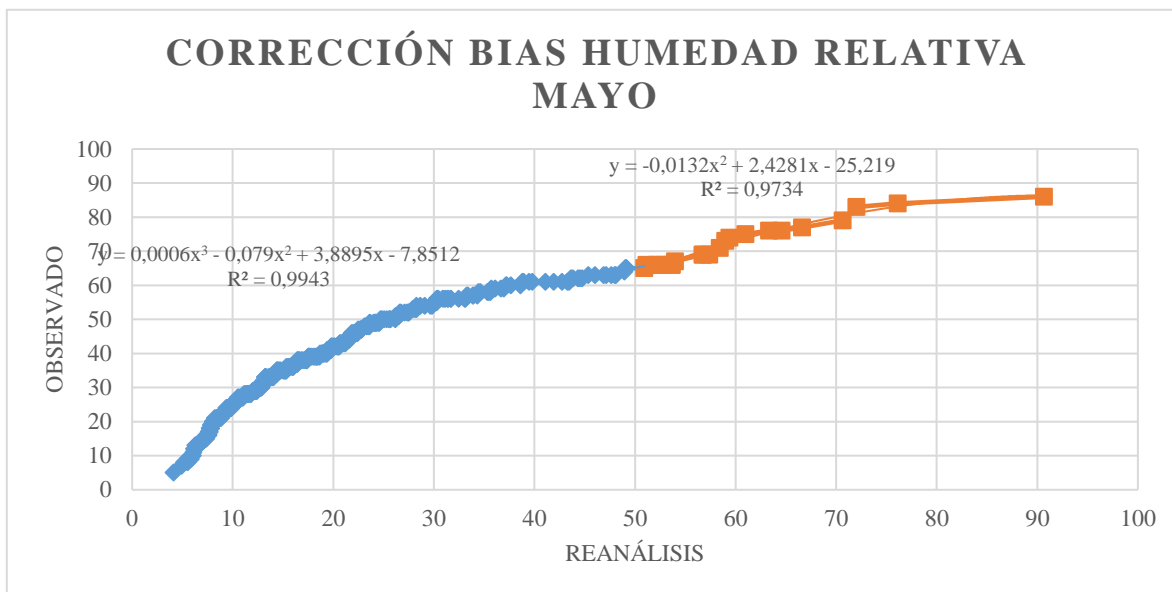


Figura D.15: Función de transferencia para el mes de mayo.

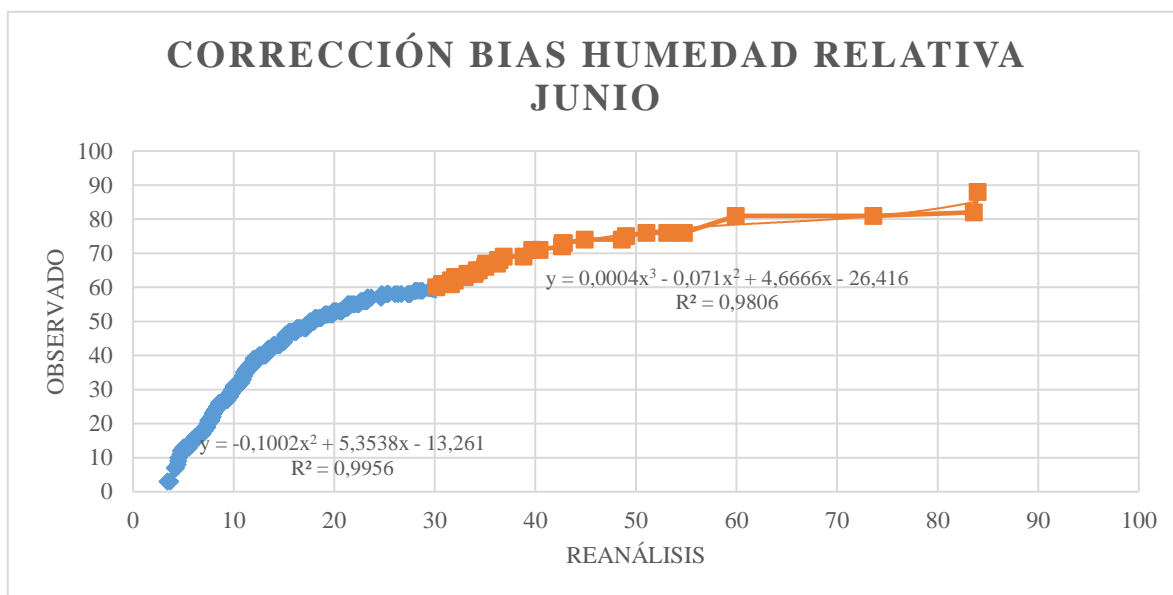


Figura D.16: Función de transferencia para el mes de junio.

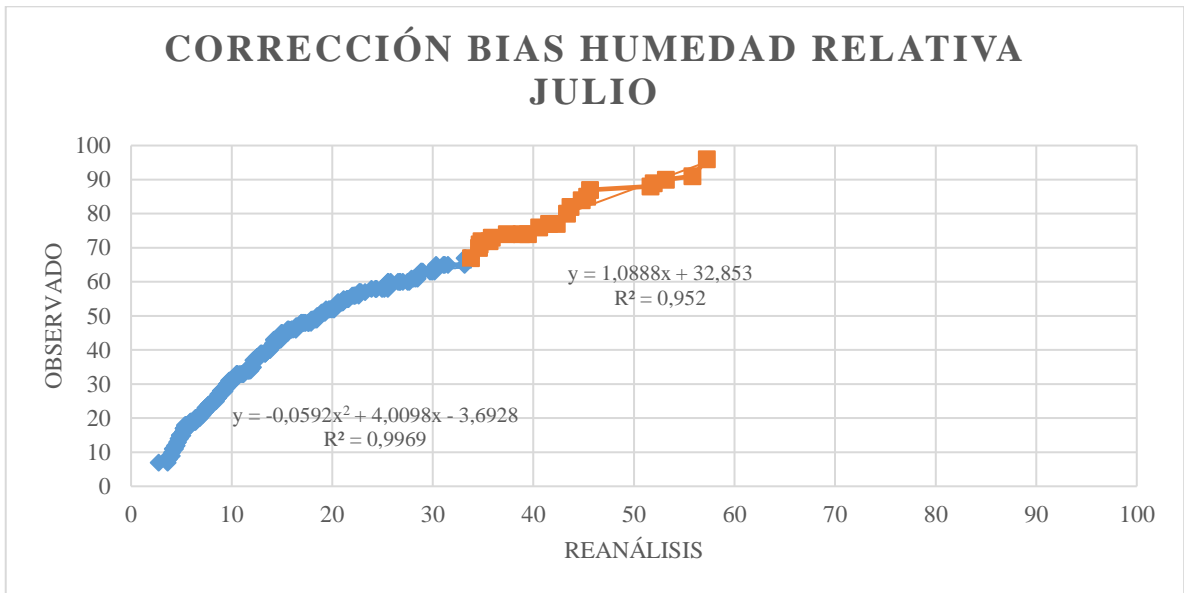


Figura D.17: Función de transferencia para el mes de julio.

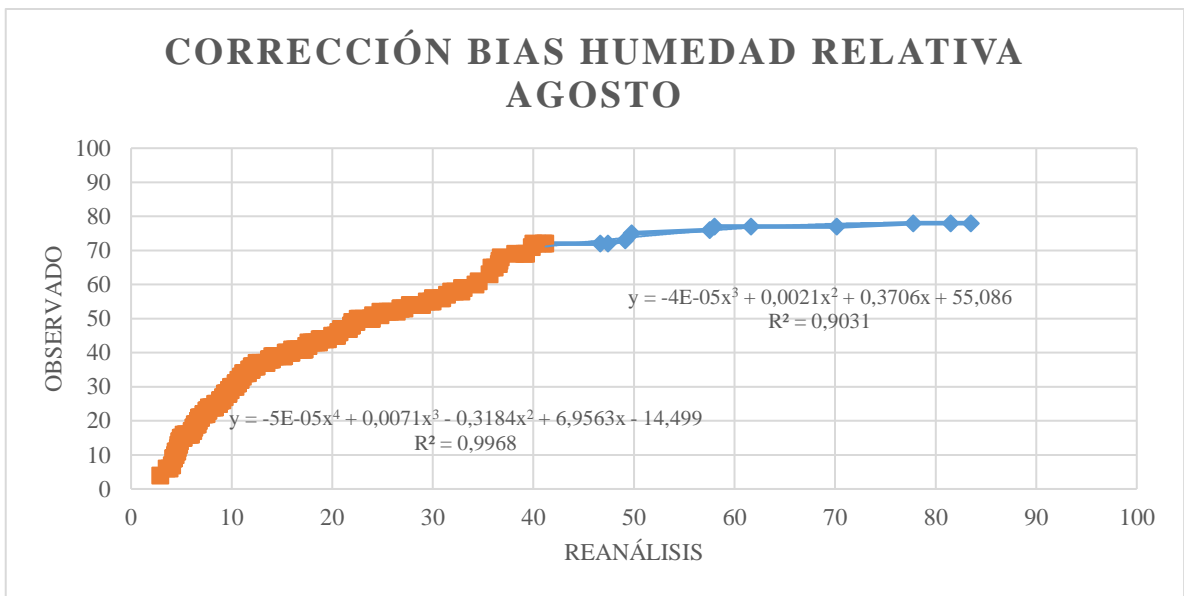


Figura D.18: Función de transferencia para el mes de agosto.

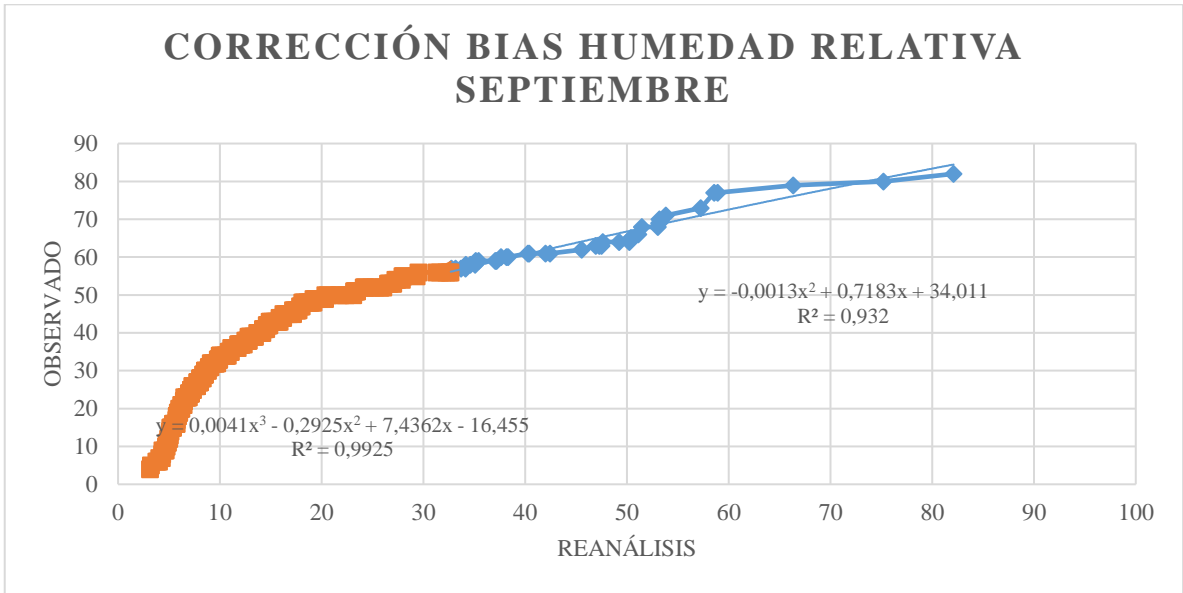


Figura D.19: Función de transferencia para el mes de septiembre.

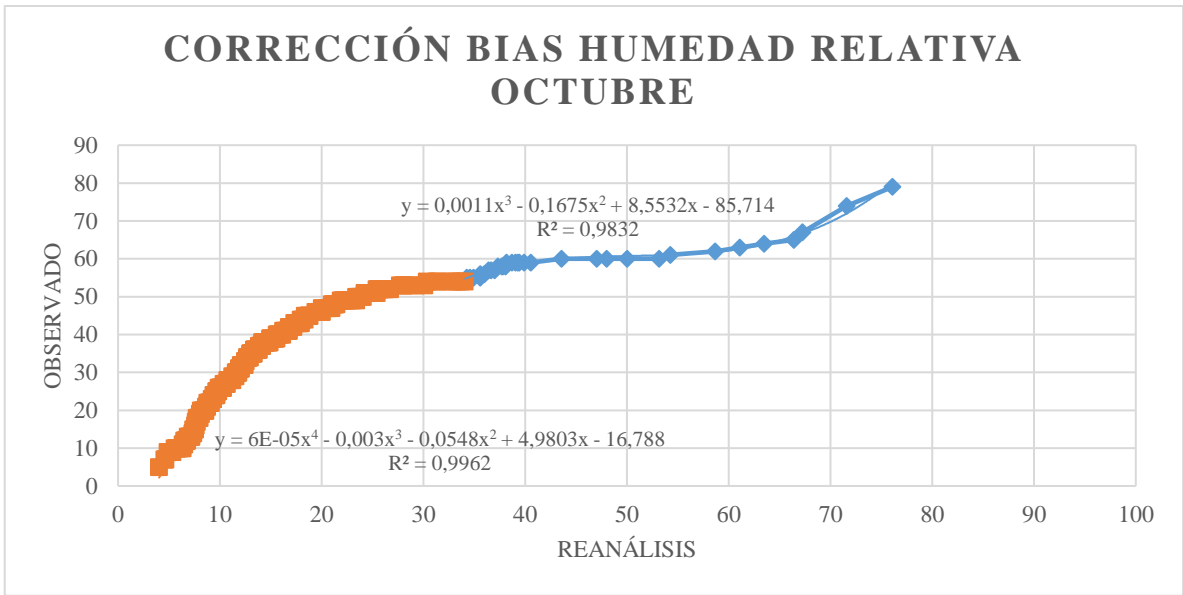


Figura D.20: Función de transferencia para el mes de octubre.

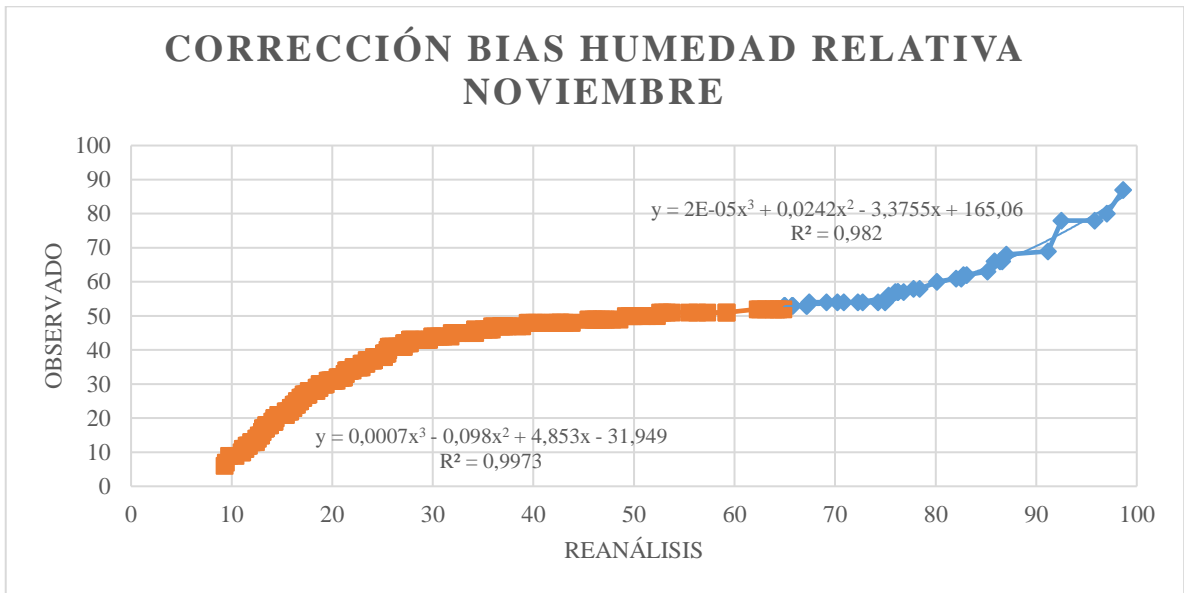


Figura D.21: Función de transferencia para el mes de noviembre.

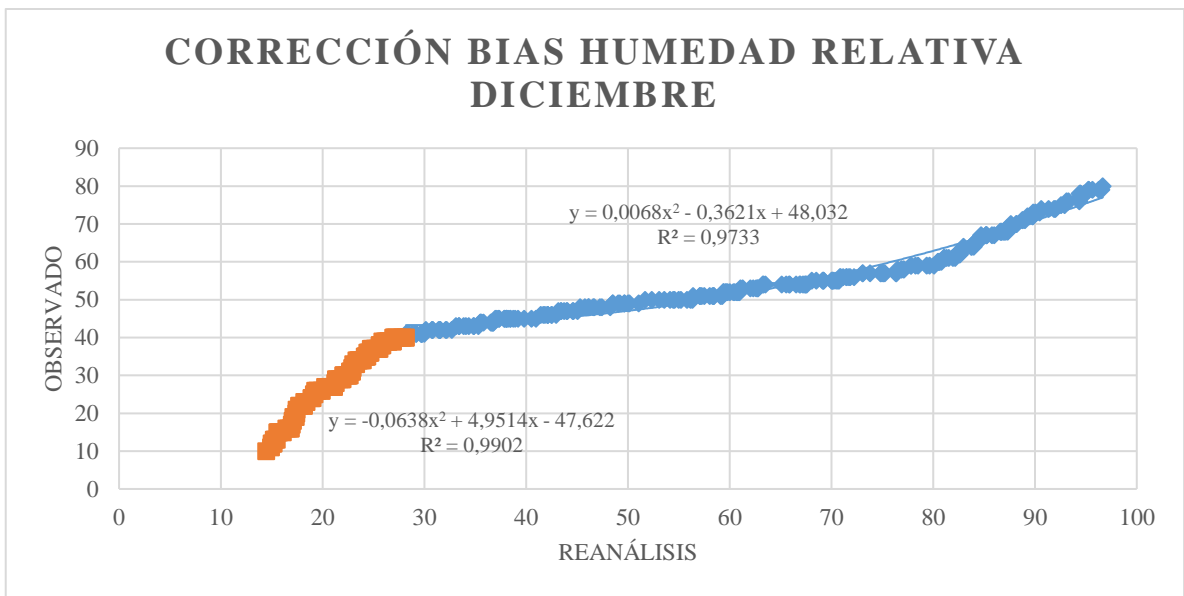


Figura D.22: Función de transferencia para el mes de diciembre.