

Fortaleciendo la capacidad y desarrollando estrategias de adaptación a los fenómenos de Cambio Climático en comunidades de montaña de la Cordillera Real de Los Andes Centrales de Bolivia



**INSTITUTO DE HIDRÁULICA
E HIDROLOGÍA**

PROYECTO ILLIMANI

“OFERTA DE AGUA HISTÓRICA EN LA CUENCA DEL RÍO SAJHUAYA”

INFORME FINAL

**Daniel R. Espinoza Romero
Pablo Fuchs**

IDRC
International Development
Research Centre



CRDI

Centre de recherches
développement interne

**LA PAZ – BOLIVIA
Octubre 2011**





INDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Contenido y alcance	1
1.4	Área de estudio	1
1.4.1	Descripción regional general	1
1.4.2	Descripción local	3
2	METODOLOGÍA	5
2.1	Enfoque de la investigación	5
2.2	Generación de la base de datos hidro-meteorológica	6
2.2.1	Recopilación de información	6
2.2.1.1	Termometría	6
2.2.1.2	Pluviometría	6
2.2.1.3	Otra información	6
2.2.2	Procesamiento y tratamiento de la información	6
2.2.2.1	Base de datos empleada	6
2.3	Determinación del régimen hídrico en la cuenca de estudio	7
3	INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	8
3.1	Limitaciones de información cuenca de estudio	8
3.2	Ubicación de las estaciones	9
3.3	Periodo de registro en estaciones hidrometeorológicas	12
3.4	Análisis de calidad y consistencia	14
3.4.1	Precipitación	14
3.4.2	Temperaturas	24
3.5	Tratamiento de la información meteorológica para el periodo 1975 – 2009	34
3.5.1	Pluviometría	34
3.5.1.1	Perfil Pluvio-altimétrico	34
3.5.2	Termometría	36
3.5.2.1	Perfil Termo-altimétrico	38
3.5.3	Humedad Relativa	40
3.5.4	Velocidad del viento	43



3.5.5	Insolación (horas de sol)	47
3.5.6	Evaporación en tanque	49
3.5.7	Evapotranspiración potencial	52
3.5.7.1	Método de Penman	52
3.6	Información Hidrométrica	58
4	MODELACIÓN GLACIOHIDROLÓGICA EN LA CUENCA DE ESTUDIO	62
4.1	Marco teórico - conceptual	62
4.1.1	Introducción	62
4.1.2	Base física de los modelos de índice de temperatura	63
4.1.3	Factor grado – día	63
4.2	Estructura matemática del modelo	64
4.3	Parámetros de entrada	65
4.3.1	Morfometría de cuencas glaciares	65
4.3.1.1	Delimitación de subcuencas y las zonas de elevación	65
4.3.1.2	Curva hipsométrica	66
4.3.2	Datos meteorológicos de entrada	68
4.3.2.1	Temperatura	68
4.3.2.2	Precipitación	73
4.3.2.3	Cobertura de nieve	79
4.3.3	Parámetros de calibración	83
4.3.3.1	Coeficiente de escurrimiento C_S y C_R	83
4.3.3.2	Factor grado – día (a)	83
4.3.3.1	Temperatura crítica	84
4.3.3.4	Coeficiente de recesión	84
4.3.3.5	Radiación Solar y albedo	91
4.4	Parametrización y simulación glacio-hidrológica	95
4.4.1	Calibración indirecta	95
4.4.2	Simulación glacio-hidrológica	100
5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE RECURSOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO	105
5.1	Descripción del modelo	105
5.2	Estructura matemática del modelo	105
5.3	Datos de entrada	107
5.4	Parámetros de entrada	112
5.5	Relación del número de curva (CN) y el potencial máximo de retención (S)	113



5.6	Parametrización y simulación hidrológica	118
5.6.1	Calibración indirecta	118
5.6.2	Simulación hidrológica	122
6	SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN DE LA OFERTA DE AGUA PARA EL PERIODO 1975-2009	125
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
7.1	Hidrometeorología	131
7.2	Hidrología del glacial	131
7.3	Hidrología	132
7.4	Oferta de agua	133
7.5	Recomendaciones	134
BIBLIOGRAFÍA		134
ANEXOS		137
Descripción de la base de datos meteorológica (Hydraccess)		137
Series intermensuales 1975-2009 de temperatura media [°C] por zonas altitudinales		140
Series intermensuales 1975-2009 de precipitación [mm] por zonas altitudinales		141
Series intermensuales 1975-2009 de precipitación [mm] por subcuencas		142
Series intermensuales 1975-2009 de ETP [mm] por subcuencas		143



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características generales de la cuenca del río Sajhuaya (Nevado Illimani)	4
Tabla 2: Características morfométricas de las subcuencas	5
Tabla 3: Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Sajhuaya y de apoyo	11
Tabla 4: Puntos de medición foronómica o de aforo en la cuenca del río Sajhuaya	11
Tabla 6: Diagrama de barras de datos meteorológicos observados en estaciones de de apoyo	13
Tabla 5: Datos de las estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio y periodo de registro de las variables meteorológicas (2009-2010)	14
Tabla 7: Estadísticos de la pluviometría mensual observada en estaciones regionales	19
Tabla 7: Estadísticos de la pluviometría mensual observada en estaciones regionales (Cont.)	20
Tabla 8: Estadísticos de la temperatura media mensual en estaciones regionales	31
Tabla 9: Coeficientes de determinación de la regresión múltiple de temperatura máxima y mínima diaria (2010)	32
Tabla 10: Precipitación total media anual en estaciones pluviométricas regionales (1997-2007)	35
Tabla 11: Resumen de la regresión lineal múltiple para la generación de temperaturas máximas y mínimas diarias en estaciones de la cuenca del rio Sajhuaya	37
Tabla 12: Estaciones termométricas, altitud y temperatura media corregida completada para la elaboración del perfil térmico	38
Tabla 13: Estadísticos de la humedad relativa media mensual en estaciones regionales	42
Tabla 14: Estadísticos de la velocidad media mensual del viento en estaciones regionales	46
Tabla 15: Estadísticos de horas sol/día media mensual en estaciones regionales	47
Tabla 16: Estadísticos de evaporación en tanque en [mm] en estaciones regionales	49
Tabla 17: Radiación solar R_o en el límite superior de la atmósfera (cal/cm ² -día)	54
Tabla 18: Medias mensuales de la duración astronómica del día N (horas)	54
Tabla 19: Albedo α en función al tipo de suelo	55
Tabla 20: Evaporación y Evapotranspiración potencial media mensual en estaciones regionales	55
Tabla 21: Caudales medidos en Los puntos de aforo (2010)	60
Tabla 21: Caudales medidos en los puntos de aforo (2010) (continuación)	61
Tabla 22: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009	68
Tabla 22: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (cont.)	69
Tabla 23: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009	74



Tabla 23: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (cont.)	75
Tabla 24: Evolución temporal de áreas de cobertura glaciaria en el Illimani [km^2] por zonas de elevación	80
Tabla 25: Evolución temporal Porcentual de cobertura glaciaria en el Illimani por zona de elevación	80
Tabla 26: Comparación de áreas y caudales medios anuales (2009) observados de las subcuencas cabeceras de la cuenca del río Sajhuaya y la cuenca de apoyo	86
Tabla 27: Comparación de áreas y caudales medios anuales (2009) observados de las subcuencas intermedias de la parte baja de la cuenca del río Sajhuaya y la cuenca de apoyo	88
Tabla 28: Cálculo del coeficiente de recesión en la cuenca de Nevado Huayna Potosí y de la cuenca del río Palca	88
Tabla 29: Coeficientes “x” & “y” para las cuencas de apoyo del Nevado Huayna Potosí y Palca	88
Tabla 30: Caudales medios anuales (1992-2010) observados en la cuenca de apoyo Zongo	90
Tabla 31: Parámetros de calibración del modelo glacio-hidrológico para la simulación de las subcuencas Jalancha y Khapi	96
Tabla 32: Relación Precipitación – escurrimiento de las subcuencas cabeceras con glaciares	99
Tabla 33: Estadísticos de precipitación mensual y anual areal por subcuencas (serie 1975-2009)	107
Tabla 34: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual y anual areal por subcuencas (serie 1975-2009)	110
Tabla 35: Parámetros de simulación hidrológica por subcuencas (serie 1975-2009)	119
Tabla 36: Relación Precipitación – escurrimiento de las subcuencas intermedias de estudio	122
Tabla 37: Caudales medios mensuales simulados [m^3/s] (1975-2009) (subcuencas de estudio)	125
Tabla 38: Caudales medios mensuales simulados [l/s] (1975-2009) (subcuencas de estudio)	125
Tabla 39: Caudales medios mensuales y anuales adimensionales simulados (1975-2009) (subcuencas de estudio)	127
Tabla 40: Caudales medios mensuales laminares simulados (1975-2009) (subcuencas de estudio)	128
Tabla 41: Caudales específicos medios mensuales simulados [l/s-km^2] (1975-2009) (subcuencas de estudio)	128
Tabla 42: Coeficientes de escurrimiento medios mensuales simulados (1975-2009) (subcuencas de estudio)	129
Tabla 43: Potencial hídrico medio mensual y anual simulados [hm^3] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio)	129
Tabla 44: Resumen de oferta de agua anual en las subcuencas del Río Sajhuaya (1975-2009)	134



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Sajhuaya (Illimani) _____	3
Figura 2: Ubicación de estaciones HOBO y puntos de control de aforo desde el 2009 _____	10
Figura 3: Ubicación de estaciones meteorológicas regionales de apoyo _____	12
Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales _____	16
Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación) _____	17
Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación) _____	18
Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación) _____	19
Figura 5: Precipitación media mensual en estaciones regionales (1975-2010) _____	21
Figura 6: Índices anuales del vector regional y de las estaciones regionales, serie de datos originales de precipitación (1960-2009) y serie corregida completada (1946-2009) _____	23
Figura 7: Series temporales de temperatura máxima diaria (2009-2010) _____	25
Figura 7: Series temporales de temperatura máxima diaria (2009-2010) (cont.) _____	26
Figura 8: Series temporales de temperatura mínima diaria (2009-2010) _____	27
Figura 8: Series temporales de temperatura mínima diaria (2009-2010) (Cont.) _____	28
Figura 9: Estadísticas temperatura media mensual observada estaciones regionales _____	29
Figura 9: Estadísticas temperatura media ambiente observada estaciones regionales (Cont.) _____	30
Figura 10: Temperatura media mensual en estaciones regionales (1975-2010) _____	32
Figura 11: Índices anuales del vector regional y de las estaciones regionales, datos originales y datos corregidos completados de temperatura media _____	33
Figura 12: Perfil pluvio-altimétrico anual (Enero de 1997 – Diciembre de 2007) _____	35
Figura 13: Correlación de datos de temperatura diaria de las estaciones La Paz – El Alto _____	36
Figura 14: Perfil térmico - altitudinal (2009 – 2010) _____	39
Figura 15: Mapa de temperaturas medias anual en la cuenca del río Sajhuaya en función del perfil térmico y el modelo digital de terreno _____	40
Figura 16: Estadísticas humedad relativa media mensual observada estaciones regionales _____	41
Figura 16: Estadísticas humedad relativa media mensual observada estaciones regionales (Cont.) _____	42
Figura 17: Humedad relativa media mensual en estaciones regionales (1975-2010) _____	43
Figura 18: Estadísticas Velocidad media del viento mensual observada estaciones regionales _____	44
Figura 18: Estadísticas Velocidad media del viento mensual observada estaciones regionales (cont.) _____	45
Figura 19: Velocidad media del viento mensual en estaciones regionales (1975-2010) _____	47
Figura 20: Estadísticas horas sol/día media mensual observada estaciones regionales _____	48
Figura 21: Horas sol/día media mensual en estaciones regionales (1975-2010) _____	48



Figura 22: Estadísticas Evaporación en tanque mensual observada estaciones regionales	50
Figura 22: Estadísticas Evaporación en tanque mensual observada estaciones regionales (Cont.)	51
Figura 23: Evaporación en tanque mensual en estaciones regionales (1975-2010)	51
Figura 24: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales	56
Figura 24: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales (Cont.)	57
Figura 25: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales	58
Figura 26: Límite de subcuencas, red de drenaje y estaciones de aforo	59
Figura 27: Mapa topográfico (curvas cada 20 metros), delimitación de subcuencas de estudio y puntos de aforo	66
Figura 28: Rangos altitudinales o zonas de elevación en la cuenca del Río Sajhuaya	67
Figura 29: Curva hipsométrica de la cuenca del río Sajhuaya	67
Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009	70
Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)	71
Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)	72
Figura 30: Temperatura media sintética mensual por zonas altitudinales para 1975-2009	73
Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009	76
Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)	77
Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)	78
Figura 33: Precipitación sintética mensual por zonas altitudinales para 1975-2009	79
Figura 34: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1963	81
Figura 35: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1975	81
Figura 36: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1983	82
Figura 37: Cobertura del glaciar Illimani para el año 2009	82
Figura 38: Curva de decaimiento del glaciar Illimani por zonas de elevación	83
Figura 39: Ubicación geográfica del glaciar de estudio y de los glaciares de apoyo	85
Figura 40: Ubicación geográfica del nevado Huayna Potosí	86
Figura 41: Ubicación geográfica de la cuenca del río Palca	87
Figura 42: Ajuste del coeficiente de recesión para las cuencas de apoyo del Nevado Huayna Potosí y del río Palca	89
Figura 43: Ubicación geográfica del glaciar Zongo (Ortofoto)	90



Figura 44: Radiación incidente y reflejadas de onda corta y onda larga y radiación neta diaria. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo	92
Figura 45: Albedo y radiación neta diaria. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo sobre la morrena	93
Figura 46: Radiación neta y albedo medio mensual. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo sobre la morrena	94
Figura 47: Radiación neta y albedo medio mensual (1993-2003 y 2007-2009). Estación SAMA a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo	95
Figura 48: Caudales medios mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales medios mensuales medidos en Huayna Potosí (Apoyo) (2000-2002)	96
Figura 49: Caudales específicos mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales específicos medidos en Huayna Potosí (Apoyo) (2000-2002)	96
Figura 50: Caudales medios mensuales medidos en el glaciar de Zongo (Apoyo) (1992-2002)	97
Figura 51: Caudales medios mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales medios mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)	98
Figura 52: Caudales específicos mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales específicos mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)	98
Figura 53: Caudal simulado en las Zona E (4750 m.s.n.m) en las subcuencas Jalancha y Khapi	101
Figura 54: Caudal simulado en las Zona F (5250 m.s.n.m) en las subcuencas Jalancha y Khapi	101
Figura 55: Coeficiente de recesión (subcuencas Jalancha y Khapi) (1975-2009)	102
Figura 56: Caudales medios mensuales simulados (subcuencas Jalancha y Khapi) (1975-2009)	102
Figura 57: Evaluación del comportamiento de cuencas glaciares simuladas, precipitación vs. caudales (1975-2009)	104
Figura 58: Estadísticos de precipitación mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009)	108
Figura 58: Estadísticos de precipitación mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009) (Cont.)	109
Figura 59: Precipitación sintética areal mensual por subcuencas intermedias para 1975-2009	109
Figura 60: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009)	111
Figura 60: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009) (Cont.)	112
Figura 61: Evapotranspiración potencial sintética areal mensual por subcuencas intermedias para 1975-2009	112
Figura 62: Mapa de fisiografía general de las subcuencas del río Sajhuaya	114
Figura 63: Mapa de altitudes en base al modelo digital de terreno por subcuencas	115
Figura 64: Mapa de pendientes en base al modelo digital de terreno por subcuencas	115
Figura 65: Mapa de uso de suelos de terreno por subcuencas del Río Sajhuaya	116
Figura 66: Mapa de cobertura vegetal por subcuencas del río Sajhuaya	116



Figura 67: Mapa de zonificación agroecológica por subcuencas del río Sajhuaya	117
Figura 68: Mapa de Número de curva por subcuencas del río Sajhuaya	117
Figura 69: Mapa de Potencial de retención máxima de humedad en el suelo pendientes por subcuencas del río Sajhuaya	118
Figura 70: Caudales medios mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales medios mensuales medidos en Palca (Apoyo) (2000-2002)	120
Figura 71: Caudales específicos mensuales simulados en las subcuencas de estudio vs. los caudales específicos medidos en Palca (Apoyo) (2000-2002)	120
Figura 72: Caudales medios mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales medios mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)	121
Figura 73: Caudales específicos mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales específicos mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)	121
Figura 74: Hidrograma y hietogramas mensuales por subcuencas intermedias del río Sajhuaya (1975-2009)	123
Figura 75: Hidrograma anuales por subcuencas intermedias del río Sajhuaya (1975-2009)	124
Figura 76: Hidrograma medio mensual simulado (1975-2009) [l/s] (subcuencas de estudio)	126
Figura 77: Hidrograma medio mensual simulado (1975-2009) [l/s] (subcuencas de estudio) (cont.)	126
Figura 78: Hidrograma medio mensual adimensional simulado (1975-2009) (subcuencas de estudio)	127
Figura 79: Potencial hídrico medio mensual simulado [hm ³] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio)	130
Figura 79: Potencial hídrico medio mensual simulado [hm ³] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio) (cont.)	130



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En los últimos años se ha evidenciado en el país y en el mundo un aumento significativo de la temperatura así como otros efectos atribuidos al cambio climático que afectan a los sectores productivos, económicos y sociales.

En consecuencia se han elaborado proyectos que proponen estrategias de adaptación y mitigación a los efectos de cambio climático, gestión del agua y manejo del sistema de cultivos, entre otros.

En este contexto las instituciones Agua Sustentable (ONG), la Facultad de Agronomía y el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, vienen impulsando el “Proyecto Illimani”, el cual enmarca el estudio de la cuenca del río Sajhuaya, donde las comunidades de Khapi, Challasirca, Cohoni, Chañurani, La Granja, Cebollullo, Tahuapalca y Jlancha del municipio de Palca son los beneficiarios.

1.2 Objetivo

El objetivo principal del estudio es la evaluación de los recursos hídricos a nivel mensual, que implica cuantificar la oferta de agua histórica, el balance hídrico histórico para su evaluación futura bajo escenarios de cambio climático. Los resultados de este análisis servirán para elaborar de estrategias de gestión para riego y dotación de agua para consumo humano.

1.3 Contenido y alcance

En el presente documento se presentan las investigaciones hidroglaciológicas elaboradas por el Instituto de Hidráulica e Hidrología y los resultados del componente de escorrentía. El informe está dividido en tres partes: la primera parte incluye la descripción de información hidrometeorológicos, el procesamiento, la crítica y la generación de una base de datos, la segunda parte aborda el modelo de simulación glacio-hidrológica (SRM) y la tercera parte el modelo hidrológico precipitación escurrimiento (CHAC-SIMULA), con el cual se determinó la oferta de agua actual en las cuencas estudiadas.

1.4 Área de estudio

1.4.1 Descripción regional general

La Cordillera Oriental, con una longitud aproximada de 1100 km y un ancho que varía entre 150 y 400 km, atraviesa los departamentos de La Paz, Oruro y Cochabamba. Este ramal andino es,



tanto por su longitud como por su altura media, el más importante de Bolivia y constituye la divisoria de aguas de las tres cuencas hidrográficas que drenan el territorio: la amazónica, la platense y la interior o endorreica.

La formación de la Cordillera Real u Oriental es producto de la presión de Escudo Brasileño sobre la placa del Pacífico que provocó el plegamiento de la corteza terrestre y el levantamiento del lecho marino, dando forma a la cordillera de los andes y a su ramificación más importante: la cordillera Real u Oriental. La presión provocó que las diferentes capas de la corteza terrestre se plegasen durante las eras Secundaria y Terciaria formando diferentes elevaciones donde pueden encontrarse lutitas y areniscas además de intrusiones graníticas provenientes del enfriamiento del magma procedente del interior de la Tierra. La acción de la erosión ha sido tan intensa en esta zona que en la actualidad han aflorado esos materiales a la superficie y se ha rebajado casi a la mitad la altura original de esas elevaciones.

La Cordillera Oriental es una formación joven en la que predominan los suelos áridos producto de la acción de los vientos en su zona meridional. Este gran macizo rocoso constituye una barrera orográfica para los vientos húmedos procedentes de la cuenca amazónica (noreste del nevado Illimani), que al llegar a la cordillera descargan su humedad y ascienden por esta vertiente hasta llegar totalmente desecados al otro lado de la cordillera (suroeste del nevado Illimani), dando origen a paisajes predominantemente áridos.

Desde el macizo del Illampu hasta el Illimani sus altas cimas nevadas superan los 6000 metros de altitud y presenta, entre sus quebradas, glaciares importantes, que con la fusión o el deshielo forman numerosas lagunas en las faldas de las montañas. Sus cimas presentan nieves perpetuas por encima de los 5300 m.s.n.m.

Las cumbres más importantes de la Cordillera de La Paz en el macizo de Sorata (al noroeste), con la altitud de su pico en m.s.n.m. son:

Illampu Sorata	Ancohumá	Illimani	Casiri	Chiaraco	Huayna Potosí	Chachacomani	Condoriri	Taquesi	Mururata
6421	6380	6322	5910	6240	6088	6150	5850	5550	5869

Esta zona tiene un clima muy frío. Debido a los vientos y masas húmedas de aire que vienen del Pacífico, las precipitaciones son mayores en el frente occidental de la cordillera oriental respecto a las lluvias que se dan en el altiplano, lo que influye directamente en la existencia de importantes extensiones de vegetación en los valles interandinos. En la parte oriental (amazónica), las lluvias son torrenciales a causa de los vientos del Atlántico, que influyen en la vegetación de los valles interandinos (Yungas) y llanos orientales. De acuerdo a la clasificación de Köppen, el clima característico de esta zona es el clima de alta montaña (EB) que corresponde a las altas cumbres de las cordilleras que están cubiertas de nieve o hielo la mayor parte del año.

1.4.2 Descripción local

El proyecto estudia la cuenca del río Sajhuaya, que está ubicada al suroeste del Nevado Illimani, ubicada en la Cordillera Oriental. La cuenca de estudio ha sido discretizada en cuatro subcuencas sin cobertura glacial ni nival permanente, las mismas que se han nombrado como las comunidades a las que benefician: Jalancha, Khapi, Cebollullo y Tahuapalca, en orden altitudinal descendente, es decir que Jalancha es la que se encuentra a mayor altitud y Tahuapalca a más baja altura (*ver figura 1*). Además se tienen dos subcuencas con cobertura glacial que son la de Jalancha y Khapi.

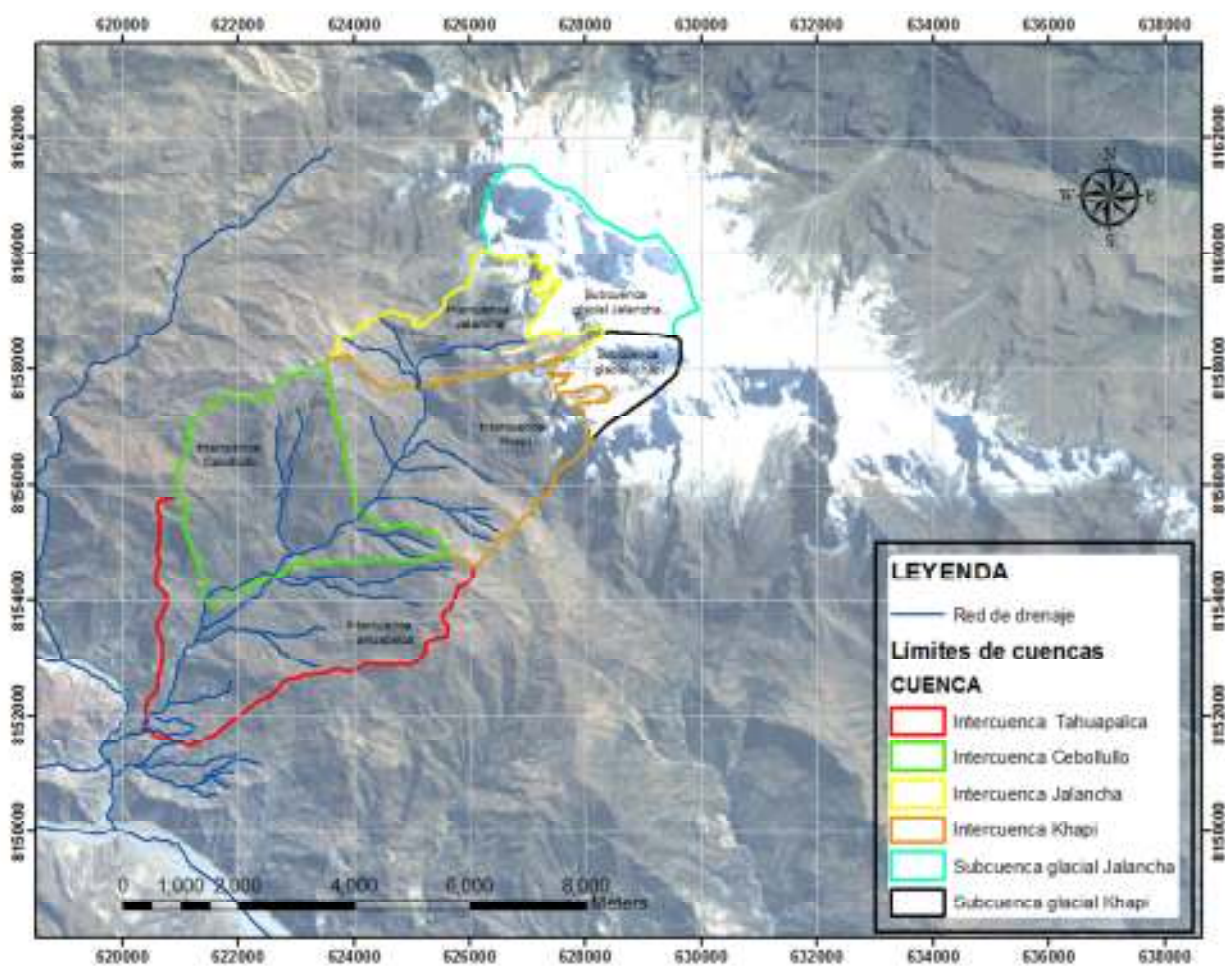


Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Sajhuaya (Illimani)

Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19 Sur

(Fuente: Elaboración propia)

Las zonas de cordillera que superan los 4500 ms.n.m. presentan condiciones alpinas, subalpinas y nivales con pendientes predominantes entre 70 a 35% aproximadamente. Las condiciones climáticas en la zona no se superan los 6 °C de temperatura media y las



precipitaciones son sólidas (generalmente en forma de nieve). Estas condiciones limitan el crecimiento de la vegetación, que mayormente presenta características singulares, al adaptarse al rigor del clima, por ejemplo, su crecimiento es más lento. La vegetación predominante en esta zona son: el huari coca, pupusa, zapatilla, cuncuna, ihurpa y paita. En esta región geográfica existe mayor vegetación a similares altitudes que en la cordillera Occidental, especialmente en la zona septentrional, debido a su mayor humedad. Las cimas más altas presentan bofedales con plantas higrófitas, pastos húmedos o chijis¹.

Las zonas bajo los 4500 m.s.n.m. presentan nieves temporales en caso de precipitación sólida, la cual se fusiona y escurre de manera instantánea o presenta un retardo menor al de una cuenca glacial. En general las condiciones de escurrimiento en esta zona responden directamente a la precipitación (cuenca hidrológica), existe además la presencia de bofedales especialmente en la subcuenca Jalancha. Las pendientes predominantes en esta zona están entre 35 y 5% aproximadamente (disección moderada). Los suelos presentan depósitos aluviales y en las partes bajas los suelos son aptos para cultivos, por esa razón la existencia de pequeños sistemas de riego.

La tabla 1 presenta algunas características de la cuenca total con zona glacial y no glacial.

Características de la cuenca del río Sajhuaya (Nevado Illimani)	
Coordenadas de la cuenca (WGS84)	16°40'S / 67°50'E
Rango altitudinal [m]	6300 - 2500
Superficie [km ²]	46.23
Exposición general	Sur y Oeste
Pendiente media [%]	35%
Longitud del curso principal [km]	11.19
Precipitación media anual [mm]	621.2
Temperatura media anual [°C]	19.7
Temperatura mínima media [°C]	Varía altitudinalmente
Temperatura máxima media [°C]	Varía altitudinalmente

Tabla 1: Características generales de la cuenca del río Sajhuaya (Nevado Illimani)

(Fuente: Elaboración propia)

Se ha definido discretizar la cuenca del Río Sajhuaya en 6 subcuencas, 4 de ellas son cuencas intermedias (ver figura 1). La tabla 2 muestra algunas de las propiedades morfométricas de las subcuencas.

¹ Enciclopedia de Bolivia, AA.VV



Nombre Subcuenca	Tipo Subcuenca	Área [km ²]	Perímetro [km]	Cordenadas Centro Gravedad UTM WGS84 Z19 sur		Altura media [m.s.n.m.]
				X _{cg}	Y _{cg}	
Glaciar Jalancha	Subcuenca	6,32	13,78	627.968	8'159.871	5600
Glaciar Khapi	Subcuenca	2,24	8,46	628.569	8'157.927	5480
Jalancha	Intercuenca	5.62	15,62	625.833	8'158.647	4480
Khapi	Intercuenca	10.83	17,98	625.834	8'156.639	4440
Cebollullo	Intercuenca	9.84	15,80	622.632	8'155.859	3610
Tahuapalca	Intercuenca	11.38	15,86	622.933	8'153.422	3360

Subcuenca	TIPO	AREA	PERIM.	PDTE. MEDIA CUENCA	ELEV. MÍN.	ELEV. MÁX.	ALT. MEDIA CUENCA	DES- NIVEL	LONG. MAX. DRENAJE	LONG. RECT. EQUIV. [Km]		INDICE COMP.	DIAM. CIRCULO EQUIV. [Km]	TIEMPO CONC. Tc KIRPICH [Hr]	TIEMPO CONC. Tc TEMEZ [Hr]
		[Km2]	[Km]	[m/m]	[msnm]	[msnm]	[msnm]	[m]	[Km]	L 1	L 2				
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	13.78	0.39	4930	6360	5645	1430	3.70	5.86	1.08	1.55	2.84	1.54	2.33
Glacial Khapi	SC-C	2.24	8.46	0.50	5110	6370	5740	1260	2.50	3.65	0.61	1.59	1.69	1.03	1.64
Jalancha	IC	5.62	15.62	0.44	4010	5730	4870	1720	3.90	7.03	0.83	1.82	2.73	1.52	2.37
	SC	11.94	17.65	0.37	4010	6360	5185	2350	6.40	7.20	1.69	1.43	3.94	2.40	3.57
Khapi	IC	10.83	17.98	0.35	3740	5620	4680	1880	5.30	7.77	1.29	1.60	3.57	2.10	3.11
	SC	25.01	21.77	0.29	3740	6370	5055	2630	9.10	7.85	3.12	1.24	5.58	3.44	4.88
Cebollullo	IC	9.84	15.80	0.30	2955	4570	3763	1615	5.40	6.30	1.66	1.38	3.65	2.27	3.26
	SC	34.85	28.04	0.27	2955	6370	4663	3415	12.50	10.93	3.19	1.34	6.67	4.49	6.28
Tahuapalca	IC	11.38	15.86	0.28	2500	4515	3508	2015	7.20	6.43	1.56	1.41	3.58	2.91	4.11
	SC	46.23	33.25	0.25	2500	6370	4435	3870	15.50	13.39	3.36	1.40	7.57	5.49	7.52

Nota: SC-C = Subcuenca Cabecera, IC= Cuenca intermedia o intercuenca y SC= Subcuenca total

Tabla 2: Características morfométricas de las subcuencas
(Fuente: Elaboración propia)

2 METODOLOGÍA

2.1 Enfoque de la investigación

La investigación está dividida en las siguientes fases:

- Recopilación de información hidrometeorológica, imágenes de satélite, mapas cartográficos temáticos, etc.
- Análisis temporal y espacial de las variables meteorológicas de precipitación y temperatura basado en datos históricos puntuales en estaciones meteorológicas de la región. Se determinan los hidrogramas actuales en base a simulación glacio-hidrológica e hidrológica, en el que el modelo debe ser calibrado y validado directa (en cuencas instrumentadas) ó indirectamente (en base a otras cuencas auxiliares o de apoyo instrumentadas).



2.2 Generación de la base de datos hidro-meteorológica

2.2.1 Recopilación de información

La primera tarea en un estudio de hidrología implica la recopilación de la información registrada o observada en estaciones meteorológicas y de aforo ubicadas dentro de la cuenca de estudio o en zonas cercanas o con influencia sobre esta, de manera que la red de observación posibilite realizar la evaluación y distribución espacial y temporal de los recursos hídricos.

2.2.1.1 Termometría

Se tienen instaladas en la zona de estudio seis estaciones HOBO con mecanismos y sensores que permiten el registro continuo automático digital de temperatura máxima y mínima desde el año 2009. Existe además una red de estaciones meteorológicas administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) con series largas de registros, que permitirán evaluar la calidad de información de las estaciones automáticas así como ampliar sus registros.

2.2.1.2 Pluviometría

El conocimiento del régimen pluviométrico es fundamental para el análisis de las características hidroclimáticas de la zona de estudio. No obstante, existe en la cuenca solamente una estación pluviométrica (Pinaya) cuyos registros de lluvia no son consistentes respecto a los de las otras estaciones regionales. Por lo tanto, se debe recurrir a estaciones cercanas a la cuenca que cuenten con series históricas debidamente criticadas con las que se pueda reconstruir y regionalizar la precipitación media sobre la cuenca.

2.2.1.3 Otra información

El estudio requiere de información complementaria meteorológica, y como la cartográfica temática y fotogramétrica, fundamental para determinar las características fisiográficas, geomorfológicas, de cobertura vegetal o superficial y de uso de suelo de la cuenca.

2.2.2 Procesamiento y tratamiento de la información

2.2.2.1 Base de datos empleada

El software utilizado para la generación de la base de datos hidro-meteorológica es el Hydraccess. Es un paquete completo y homogéneo que permite importar y guardar varios tipos de datos hidrológicos en una base de datos en formato Access 2000 (de office de Microsoft) y realizar los procesamientos básicos que un hidrólogo pueda requerir.



Hydraccess puede manejar los siguientes datos a nivel instantáneo, horario, diario y mensual y algunos procesamientos de la información:

- Series cronológicas: cotas, caudales, datos de calidad de aguas, lluvias y datos meteorológicos.
- Aforos.
- Calibraciones de curvas de gasto
- Información histórica de las estaciones y descripción de esta.
- Cotas de los cerros de escalas en nivelación general (en metros sobre el nivel del mar).

Los datos cronológicos tales como cotas, caudales, calidad de aguas, lluvias o datos meteorológicos son organizados por campos, y son vinculados al código de la **estación** (punto de medición) y a un **captor** (nombre de la serie observada), misma que posee propiedades que definen su tipo, unidad, número de dígitos significativos y de decimales, etc. Existen tres tipos de captosres:

- Captosres instantáneos “I”: los datos son ingresados con fecha y hora libres sin imponer un intervalo de tiempo fijo.
- Captosres diarios “D”: se ingresa un solo valor por día.
- Captosres mensuales “M”: se ingresa un solo valor por mes.

Entre los procesamientos que son posible son: generación de gráficas simples o comparativos a partir de los datos importados; realizar calibraciones cotas – caudales y visualización gráfica de los aforos sobre las curvas de calibración; calcular automáticamente los caudales líquidos y sólidos a partir de las calibraciones; agregar datos con varios intervalos de tiempo fijo, desde el minuto hasta el año, pasando por el día, 5 días, 10 días, 15 días y el mes; elaborar tablas de anuario a nivel diario o mensual y realizar un inventario de los datos presentes en la base.

2.3 Determinación del régimen hídrico en la cuenca de estudio

El régimen hídrico de la cuenca de estudio es determinado a partir de la aplicación de un modelo glacio-hidrológico convencional en las zonas con presencia de glaciares. El modelo utilizado es el SRM (Snowmelt Runoff Model), su fundamento matemático permite simular los procesos y calcular los escurrimientos y caudales a la salida de la cuenca glacial o nival, donde la fusión de nieve y el hielo son componentes primordiales de procesos de escurrimiento en cuencas de este tipo y como componente secundario el proceso precipitación-escurrimiento (hidrología). Este modelo fue desarrollado por Martinec en 1975 y ha sido aplicado en más de 100 cuencas situadas en más de 20 países. Puede ser utilizado en cuencas de montaña de cualquier tamaño (de acuerdo a estudios realizados desde 0,76 a 917.444 km²) y cualquier rango altitudinal. La simulación requiere de un valor inicial conocido o estimado de escurrimiento y posteriormente calcula los caudales para una serie temporal ilimitada de días, mientras se dispongan de los datos de entrada continuos de: precipitación, temperatura y cobertura de nieve.



Para determinar los caudales medios mensuales de aporte en las subcuencas sin cobertura glacial o nival, se aplica el método de simulación hidrológica por medio de un modelo hidrológico precipitación – escurrimiento (CHAC-SIMULA) de paso mensual (*ver más en el punto 7*). Este modelo es de tipo determinístico y agregado o de parámetros concentrados que simula los principales procesos de transferencia del ciclo hidrológico aplicando el principio de continuidad a partir de pocos parámetros.

3 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

La investigación hidrológica en una cuenca requiere del conocimiento inicial de las condiciones físico-geográficas, datos puntales medidos - observados, procesamiento, tratamiento y análisis de variables hidrometeorológicas como:

- Precipitación (líquida y sólida).
- Pérdidas (evaporación, evapotranspiración y sublimación).
- Escorrentía (superficial, sub-superficial y subterránea).
- Almacenamiento o regulación (en ríos, lagos, embalses, pantanos, campos de nieve, glaciares, acuíferos).
- Infiltración
- Uso o aprovechamiento de agua por el hombre para sus actividades.

Precipitación es el agua que proviene de la humedad atmosférica y que cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (lluvia) o sólido (granizo y nieve). La precipitación constituye la principal fuente de agua para escurrimiento, almacenamiento, infiltración en una cuenca por lo que su evaluación espacial y temporal es fundamental para estudios de hidrología.

Adicionalmente, otras variables meteorológicas son necesarias para estimar los anteriores, por ejemplo:

- | | | |
|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 1. Temperatura | 3. Insolación | 5. Velocidad del viento |
| 2. Humedad relativa | 4. Radiación solar | |

La elaboración de estudios de balance hídrico superficial sólo podrá ser efectuada cuando se tenga una base de datos consistente y completa de las variables hidrometeorológicas de interés para el balance, como son: precipitación, evapotranspiración y escurrimiento.

3.1 Limitaciones de información cuenca de estudio

El estudio se desarrolla sobre una cuenca compleja que incluye elementos como: glaciares, nieve, bofedales, sistemas de riego, obras hidráulicas y comunidades por lo que su evaluación debe efectuarse de manera integral.



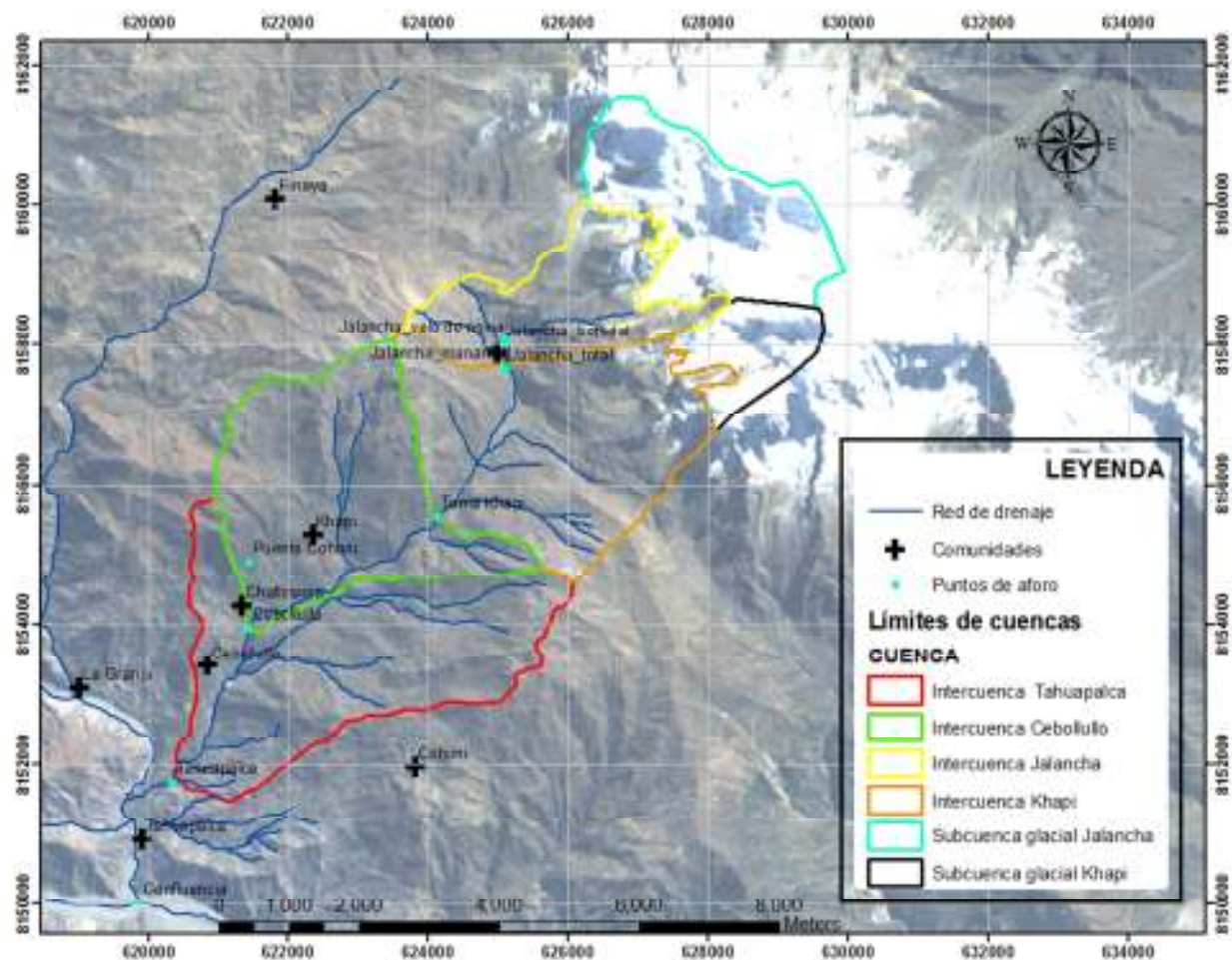
La baja densidad de la red hidrometeorológica, la baja disponibilidad de datos históricos continuos, de precipitación, temperatura y caudal en la cuenca del río Sajhuaya, limitan la evaluación de la distribución espacial de lluvias y temperaturas, limitan además la calibración directa de modelos que simulan los procesos glacio-hidrológicos e hidrológicos que se dan en la cuenca. De esta manera se recurre a la hipótesis de cálculo indirecta e información proveniente de cuencas similares que sirven de apoyo para la determinación de parámetros requeridos por el modelo glacio-hidrológico y el modelo hidrológico.

3.2 Ubicación de las estaciones

Las estaciones meteorológicas instaladas el 2009 se encuentran dispuestas a diferentes elevaciones dentro de la cuenca en estudio del río Sajhuaya (*ver figura 2*).

La tabla 4 muestra la descripción de los puntos de aforo en la cuenca. La tabla 3 muestra los datos de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, tanto las de apoyo como las instaladas para el proyecto (*figura 3*).

Por otro lado, el control foronómico o de aforos en la cuenca se realiza a través de cuatro puntos de aforo sobre el curso principal para el año 2009. Estos puntos de aforo registran los caudales de respuesta a la precipitación y los provenientes del deshielo del glaciar (*ver figura 2 y tabla 4*). Según personal de Agua Sustentable (*Salazar D.*) las mediciones realizadas se realizaron 1 vez al mes, cada hora durante 8 horas.



Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19 Sur

Figura 2: Ubicación de estaciones HOBO y puntos de control de aforo desde el 2009
(Fuente: Elaboración propia)



	Estación	Tipo de estación	Provincia	Administrador	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [m.s.n.m.]	Inicio Actividad	Cierre	Años registro	Temp.	Precip.	Evap.	%HR	V.V.	Insol.	ETP
En la Cuenca	Cebollullo	T (DAVIS)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.694	-67.860	2771	2009		1	TODO						
	Jalancha	T (HOBO)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.660	-67.827	4015	2009		1	•						
	Khapi	T (HOBO)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.680	-67.850	3326	2009		1	•						
	Khapi	T (DAVIS)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.685	---	3548	2009		1	TODO						
	Pinaya	TP	Murillo	AS-IHH	---	---	3800	2009		1	•	•					
	Plaza	TP (HOBO)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.709	-67.870	2631	2009		1	•	•					
	Tahuapalca	T (HOBO)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.700	---	2419	2009		1	•						
	Tahuapalca	T (DAVIS)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.719	-67.870	2410	2009		1	TODO						
	La Granja	T (HOBO)	Murillo	AS	---	---	---	2010		1	•	•	•	•	•	•	•
	Uyupata	T (HOBO)	Murillo	IIAREN-UMSA	-16.698	-67.870	2924	2009		1	•	•					
APOYO	Achumani	P	Murillo	SENAMHI	-16.533	-68.067	3339	1991		18		•	•			•	•
	Bolsa Negra (Mina)	P	Sud Yungas	SENAMHI	-16.550	-67.800	4800	1975	2002	28		•					
	Chacaltaya	TP	Murillo	SENAMHI	-16.350	-68.133	5220	1943		17	•	•					
	El Alto (Aasana)	Syn	Murillo	SENAMHI	-16.517	-68.167	4058	1943		66	•	•	•	•	•	•	•
	La Paz (central)	Ord	Murillo	SENAMHI	-16.533	-68.133	3632	1945		64	•	•	•	•	•	•	•
	Lambate	P	Sud Yungas	SENAMHI	-16.603	-67.700	3400	1967	2003	36		•					
	Mecapaca	CO	Murillo	SENAMHI	-16.667	-68.017	2850	1973		36	•	•	•			•	•
	Palca	TP	Murillo	SENAMHI	-16.557	-67.953	3540	1968		41	•	•		•	•	•	•
	Viacha	CO	Ingavi	SENAMHI	-16.650	-68.300	3844	1959		50	•	•	•	•	•	•	•
	Pinaya	TP	Murillo	SENAMHI	-16.642	-67.867	3800	2009		1		•				•	

Nota: Temp= Temperatura media ambiente, Precip= Precipitación, Evap.= Evaporación en tanque, %HR= Humedad relativa, V.V.= Velocidad del viento, Insol.= Horas de sol, ETP= Evapotranspiración potencial

Tabla 3: Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Sajhuaya y de apoyo
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI y Agua Sustentable)

	Estación	Tipo de estación	Provincia	Administrador	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [m.s.n.m.]	Inicio Actividad	Cierre	Años registro
Cuenca	Jalancha	aforo	Murillo	Agronomía	-16.6603	-67.8267	4015	2009		1
	Khapi	aforo	Murillo	Agronomía	-16.6796	-67.8358	3741	2009		1
	Cebollullo	aforo	Murillo	Agronomía	-16.6940	-67.8610	2956	2009		1
	Tahuapalca	aforo	Murillo	Agronomía	-16.7139	-67.8711	2490	2009		1

Tabla 4: Puntos de medición foronómica o de aforo en la cuenca del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de Agua Sustentable)

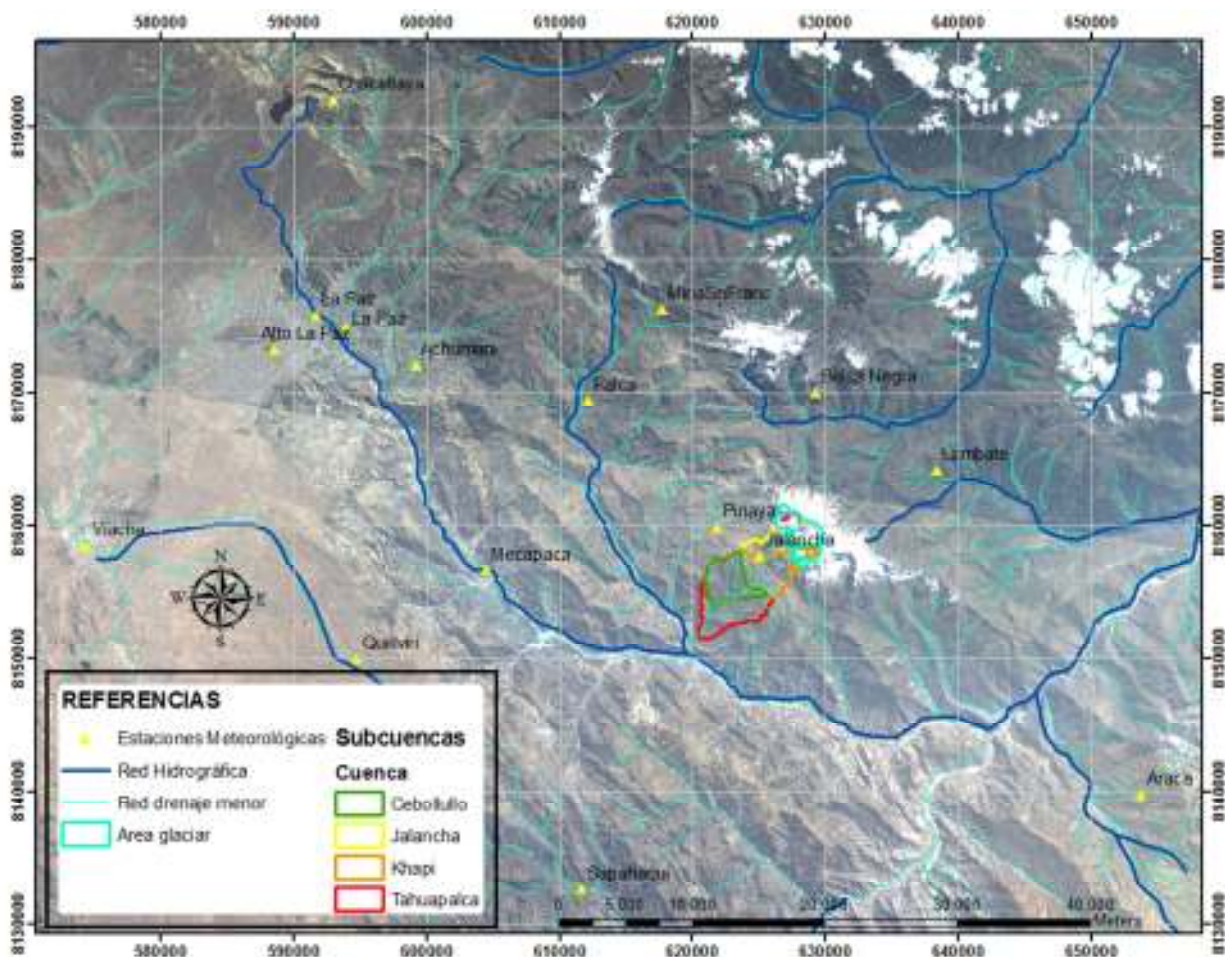


Figura 3: Ubicación de estaciones meteorológicas regionales de apoyo

Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19 Sur

(Fuente: Elaboración propia)

3.3 Periodo de registro en estaciones hidrometeorológicas

Como se menciona en el punto 3.1, una de las limitaciones del estudio es la poca disponibilidad de registros de temperatura y precipitación en la misma cuenca de estudio. Sin embargo el proyecto Illimani ha instalado recientemente (2009) equipos de medición. En la tablas 5 se muestran los periodos de registro de estas estaciones para variables meteorológicas.

Algunos de los registros de la tabla 5 son contrastados y ampliados con las series históricas de temperatura de las estaciones de apoyo situadas alrededor de la zona: La Paz, El Alto, Viacha, Palca, Mecapaca y Achumani (*ver figura 3 y tabla 3*). El periodo de registro o periodo de observación de las estaciones de apoyo, se lo adjunta en forma de diagrama de barras (*ver tabla 6*).



Tabla 6: Diagrama de barras de datos meteorológicos observados en estaciones de de apoyo
(Fuente: *Elaboración propia*)



Estaciones en la cuenca de estudio								
Id Estación	Tipo de estación	Parámetro medido	Administrador	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha Inicio	Fecha Final
KHAPI	HOBO	T,P	IIAREN-UMSA	16.670	67.85	3326	21/09/2009	funcionando
KHAPI	DAVIS	Todo	IIAREN-UMSA	16.685	-	3548	25/05/2010	funcionando
JALANCHÁ	HOBO	TP	IIAREN-UMSA	-	-	-	01/09/2010	24/11/2010
PLAZA	HOBO	T,P	IIAREN-UMSA	16.709	67.87	2631	10/03/2010	funcionando
UYUPATA	HOBO	T,P	IIAREN-UMSA	16.698	67.87	2924	23/09/2009	23/08/2010
CEBOLLULLO	DAVIS	Todo	IIAREN-UMSA	16.704	67.87	2771	12/04/2010	funcionando
TAHUAPALCA	HOBO	T,P	IIAREN-UMSA	16.718	67.8	2410	23/11/2009	funcionando
TAHUAPALCA	DAVIS	Todo	IIAREN-UMSA	16.7	-	2419	12/04/2010	funcionando
PINAYA	HOBO	T,P	AS	-	-	3800	30/12/2009	funcionando
LA GRANJA	HOBO	T,P,Rs,HR,Dew,Wvel,Wdir	AS				09/07/2010	

Tabla 5: Datos de las estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio y periodo de registro de las variables meteorológicas (2009-2010)

(Fuente: Elaboración propia en base a información de Agua sustentable)

3.4 Análisis de calidad y consistencia

3.4.1 Precipitación

Para el presente estudio se han considerado 8 estaciones de apoyo que se encuentran fuera de la cuenca de estudio, debido a la inexistencia de estaciones pluviométricas con registros históricos extensos en la cuenca del río Sajhuaya (ver figura 3 y tabla 4).

Según UNESCO (1982), los errores en la medición de la precipitación se pueden agrupar en dos tipos básicos:

- error en la medida puntual
- error en la evaluación espacial

Una gran parte de los posibles errores son intrínsecos a la medición y por tanto inevitables. Los errores en la medición puntual son debidos al instrumento de medición y a la perturbación aerodinámica (velocidad del viento) en las trayectorias de las partículas de agua causada por el pluviómetro, o debidos a la mala operación y ubicación del instrumento. A fin de estimar el error en la medida puntual de la precipitación, se debe tener en cuenta que:

- Hay muy pocos sitios donde la condición de representatividad sea satisfecha.
- La medida de la lluvia no se puede repetir si se tiene duda acerca de su precisión.
- La muestra tomada en el pluviómetro es extremadamente pequeña en relación al conjunto de las precipitaciones que pretende representar.

Se puede decir que: $P = P_m + \Delta P$

Donde: P : Precipitación verdadera
P_m: Precipitación medida en el pluviómetro
ΔP : Corrección total que debe efectuarse a la precipitación media



Donde ΔP puede descomponerse en errores de operación, instrumento, efecto aerodinámico en las trayectorias de las partículas causados por el instrumento, ubicación del instrumento, etc. La base para estimar la distribución espacial de la precipitación (por ejemplo en una cuenca), es la medida puntual registrada en los distintos puntos de la red pluviométrica. La precisión de la evaluación depende de la densidad de la red, la calidad de los instrumentos, instalaciones y observadores. El error en la estimación espacial de la precipitación se puede descomponer en:

$$\Delta PC = \Delta P + \Delta PG + \Delta PF$$

Siendo:

- ΔPC : Error en la evaluación de la precipitación espacial
- ΔP : Error en la medida de la precipitación puntual
- ΔPG : Error por no ser suficientemente representativa la precipitación puntual de la zona que representa, que puede ser muy grande si la densidad de la red es muy pequeña
- ΔPF : Error en la precipitación de las zonas altas de montaña donde no hay instrumentos y es necesario estimarla a partir de extrapolaciones de lo que ocurre en las zonas más bajas (perfil pluviométrico)

Para obtener una calidad y confiabilidad aceptable de los datos puntuales temporales de la precipitación, para su posterior análisis, manejo, y utilización, se siguieron tres etapas:

- Análisis de consistencia, homogenización y regionalización de la precipitación
- Relleno de series mensuales mediante correlación múltiple
- Estimación de la precipitación espacial (en subcuencas) aplicando técnicas geoestadísticas.

A continuación se describen las etapas, que comprende a su vez varios subprocesos. Paralelamente se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en cada etapa.

La regionalización es la etapa que define la calidad de los datos y su consistencia. Los resultados que se obtienen al concluirla son la identificación de las estaciones con datos consistentes y confiables, y la validación de estos datos para su uso y aplicación en posteriores análisis. Se definen grupos regionales de estaciones pluviométricas, cuyos registros presentan un comportamiento temporal homogéneo a nivel mensual y anual. La principal herramienta utilizada para esta etapa es el vector regional.

Para el presente estudio se ha tomado las series mensuales de precipitación 1975-2009 de las estaciones regionales de apoyo consideradas.

Tanto para las precipitaciones como para las temperaturas se decidió realizar el análisis de regionalización a nivel mensual y de año hidrológico (septiembre-agosto, mismo adoptado que para el balance hídrico de Bolivia) sobre las estaciones de la tabla 4, conformando así un solo grupo regional, con el fin de evaluar la consistencia para el periodo más extenso posible.

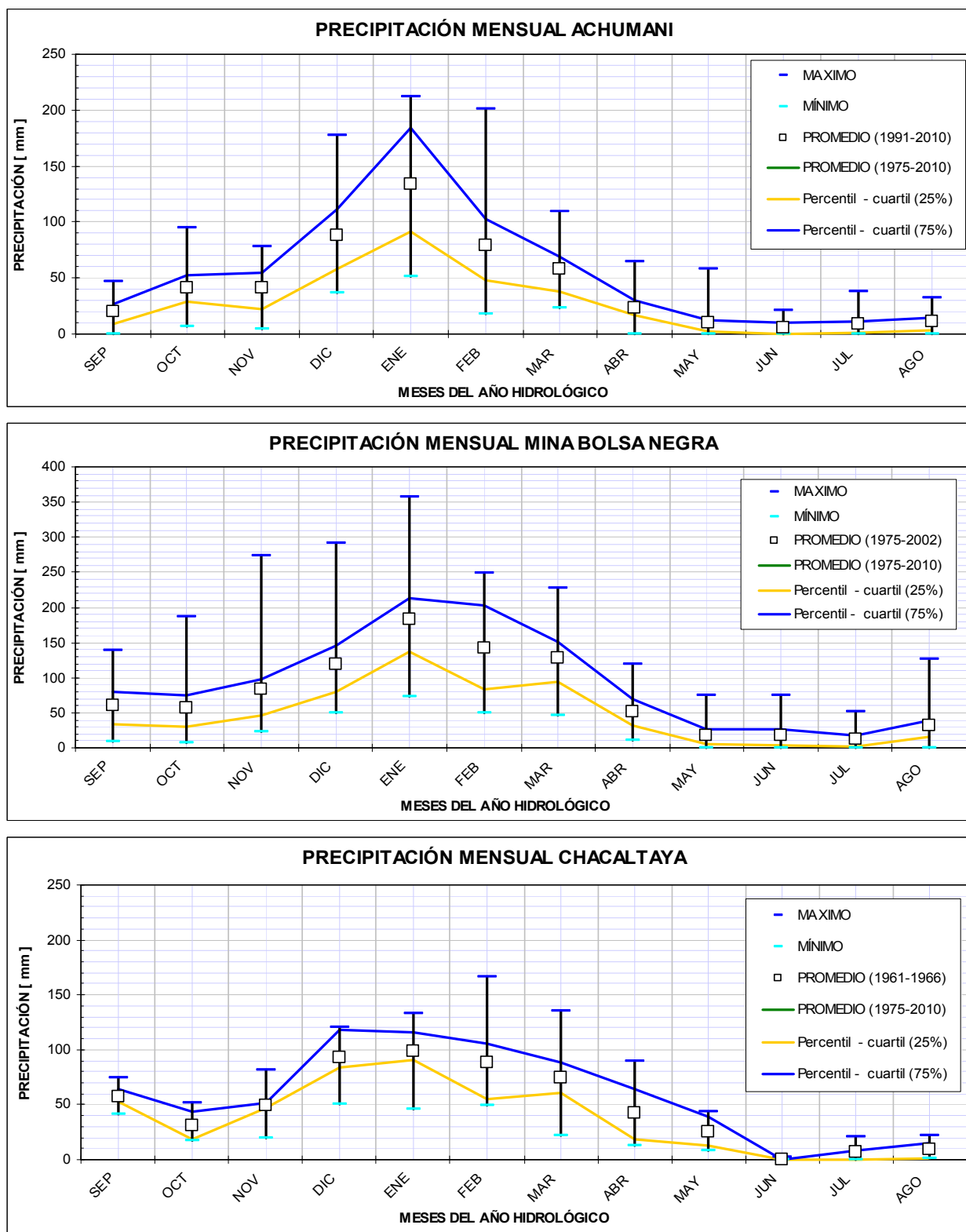


Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

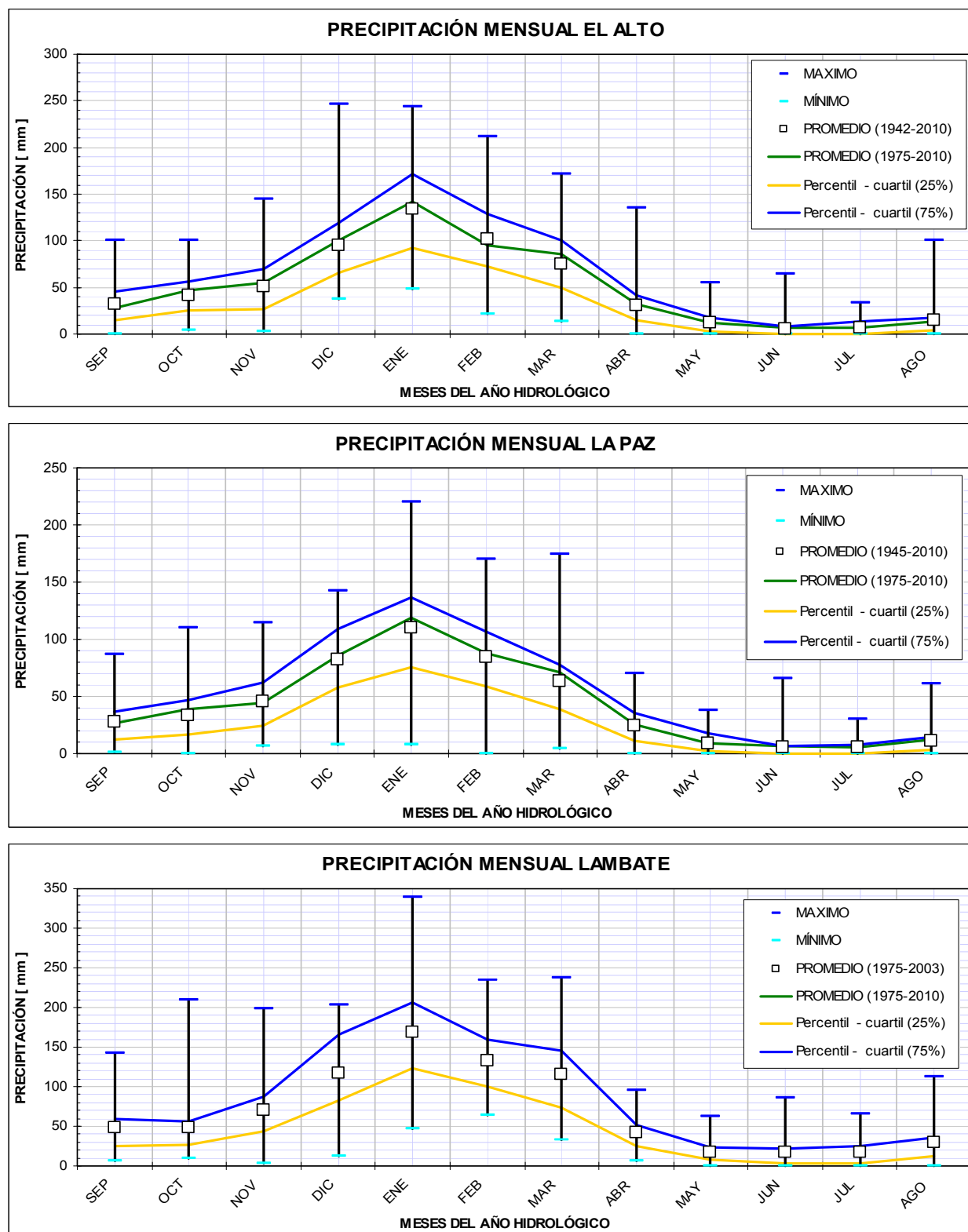


Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación)
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

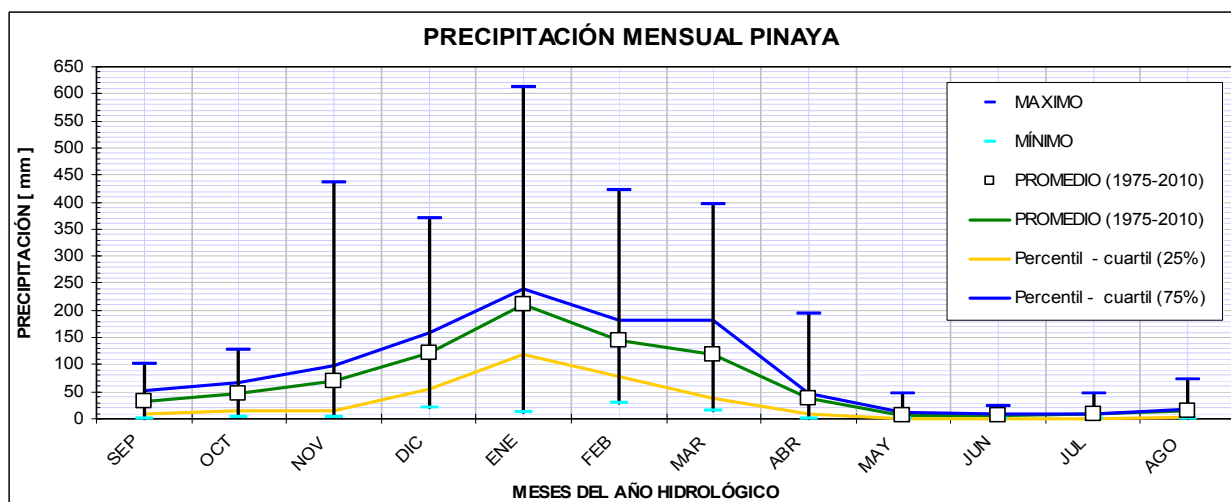
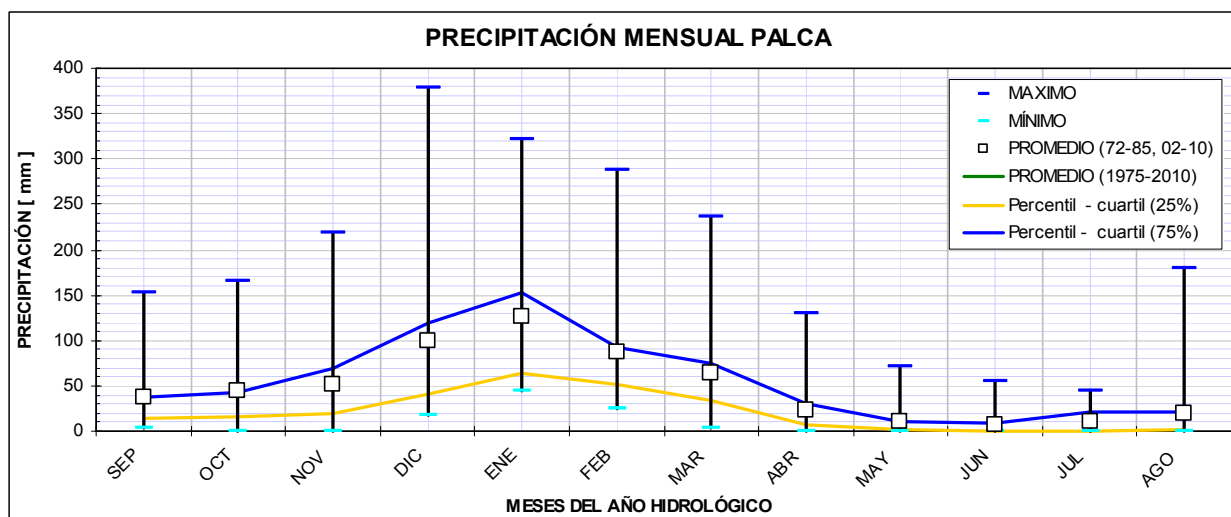
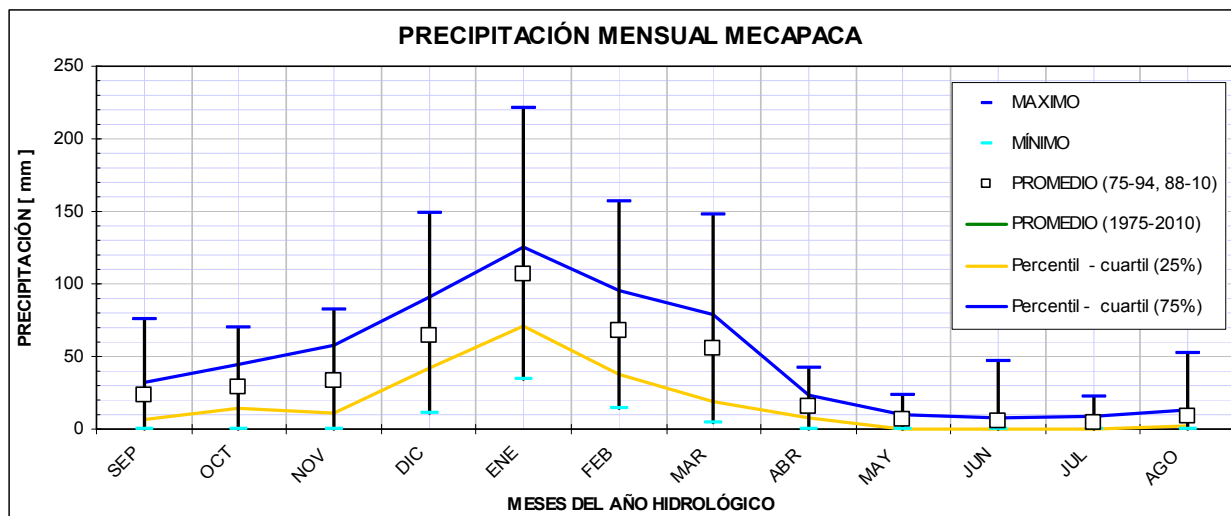


Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación)
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

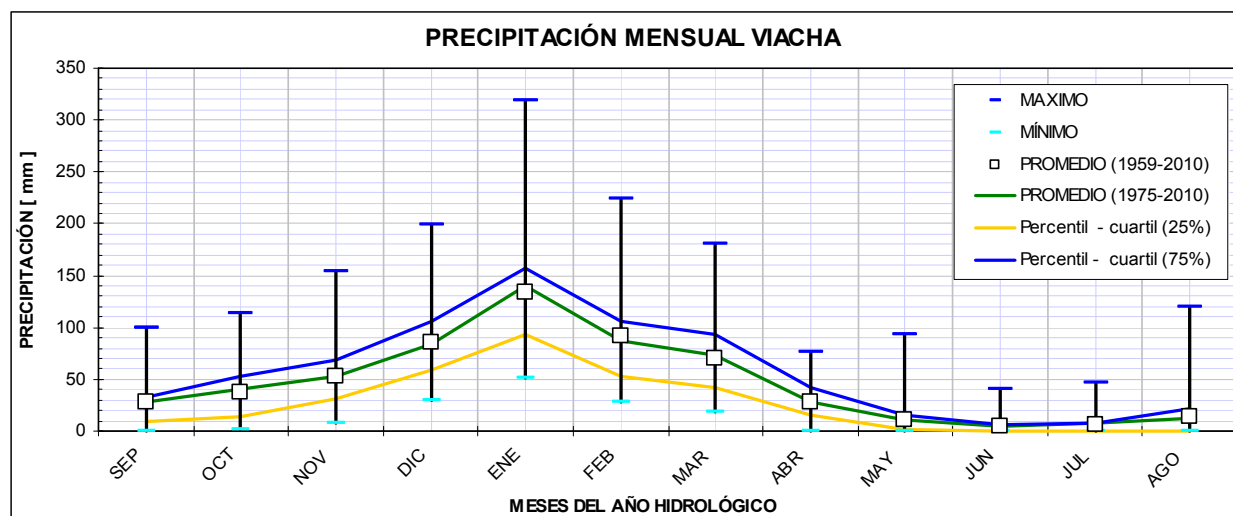


Figura 4: Estadísticas pluviometría mensual observada estaciones regionales (continuación)
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

ESTACION ACHUMANI													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	212	201	109	65	58	22	38	32	47	95	78	177	811
MÍNIMO Histórico	51	18	23	0	0	0	0	0	0	7	4	37	414
PROMEDIO (1991-2010)	134	80	58	24	10	6	9	11	20	41	42	89	576
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	91	48	38	16	2	0	1	4	9	29	23	58	487
Percentil - cuartil (75%)	185	103	70	30	13	10	11	15	27	52	54	112	622

ESTACION MINA BOLSA NEGRA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	358	249	228	119	76	75	52	127	139	187	273	292	1377
MÍNIMO Histórico	72	50	47	11	0	0	0	0	8	7	23	51	646
PROMEDIO (1975-2002)	183	142	128	51	17	18	12	32	61	57	84	119	925
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	137	84	95	31	5	3	2	16	34	31	47	80	823
Percentil - cuartil (75%)	213	203	151	70	26	26	17	39	80	76	98	146	1032

ESTACION CHACALTAYA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	133	166	135	90	43	3	21	22	75	51	81	120	573
MÍNIMO Histórico	46	49	22	13	8	0	0	1	41	17	20	51	456
PROMEDIO (1961-1966)	99	88	75	42	26	0	6	10	57	31	50	93	538
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	91	55	61	18	12	0	0	2	52	19	47	84	531
Percentil - cuartil (75%)	116	106	88	64	39	0	8	14	64	43	51	118	570

ESTACION EL ALTO													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	244	211	171	135	55	65	34	100	100	101	145	247	862
MÍNIMO Histórico	48	21	14	0	0	0	0	0	0	4	3	37	388
PROMEDIO (1942-2010)	133	102	75	31	12	6	7	15	33	41	50	96	606
PROMEDIO (1975-2010)	142	95	86	33	12	7	7	14	28	47	54	100	623
Percentil - cuartil (25%)	93	73	49	15	3	0	0	3	14	25	27	65	550
Percentil - cuartil (75%)	171	128	100	42	18	8	13	17	45	57	70	120	681

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 7: Estadísticos de la pluviometría mensual observada en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)



ESTACION LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	220	170	174	70	38	65	30	62	87	110	114	142	787
MÍNIMO Histórico	8	0	5	0	0	0	0	0	1	0	7	8	355
PROMEDIO (1945-2010)	110	85	64	24	9	5	6	11	28	33	45	82	518
PROMEDIO (1975-2010)	119	87	72	26	9	7	6	12	27	39	45	85	533
Percentil - cuartil (25%)	76	59	39	11	2	0	0	3	13	17	24	57	448
Percentil - cuartil (75%)	137	107	78	36	17	7	8	14	36	46	62	109	572

ESTACION LAMBATE													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	339	234	238	95	62	86	65	113	142	209	199	203	1159
MÍNIMO Histórico	47	64	33	7	0	0	0	0	7	9	3	12	467
PROMEDIO (1975-2003)	169	133	115	42	18	17	17	29	48	48	71	118	823
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	124	100	73	25	8	3	3	13	25	26	44	83	723
Percentil - cuartil (75%)	206	160	146	52	23	22	25	36	60	56	88	165	929

ESTACION MECAPACA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	221	157	148	42	24	47	22	52	76	70	82	149	598
MÍNIMO Histórico	35	14	5	0	0	0	0	0	0	0	0	12	256
PROMEDIO (75-94, 88-10)	106	68	56	16	6	6	5	9	24	29	33	64	421
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	71	38	19	8	0	0	0	2	7	15	12	43	370
Percentil - cuartil (75%)	126	96	79	23	10	8	9	13	32	44	57	91	468

ESTACION PALCA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	322	288	236	129	71	55	44	180	153	166	219	378	918
MÍNIMO Histórico	45	25	4	0	0	0	0	0	3	0	0	17	157
PROMEDIO (72-85, 02-10)	125	87	65	23	10	8	11	20	37	44	52	99	469
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	64	52	33	7	1	0	0	2	15	17	20	41	386
Percentil - cuartil (75%)	153	93	76	29	11	9	21	21	37	42	69	119	558

ESTACION PINAYA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	612	423	395	195	45	24	45	72	100	127	435	371	1342
MÍNIMO Histórico	11	29	13	0	0	0	0	0	0	2	2	20	402
PROMEDIO (1975-2010)	212	145	117	37	7	6	7	15	33	45	69	121	797
PROMEDIO (1975-2010)	212	145	117	37	7	6	7	15	33	45	69	121	797
Percentil - cuartil (25%)	117	77	37	10	0	0	0	4	10	14	16	54	561
Percentil - cuartil (75%)	240	183	181	45	11	8	7	17	52	67	98	160	951

ESTACION VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	319	224	180	76	93	41	47	120	100	114	154	199	1117
MÍNIMO Histórico	52	28	19	0	0	0	0	0	0	1	8	29	292
PROMEDIO (1959-2010)	133	91	70	29	11	4	6	13	27	37	52	86	558
PROMEDIO (1975-2010)	140	87	73	27	11	5	7	12	28	40	54	83	563
Percentil - cuartil (25%)	93	54	43	15	2	0	0	0	10	15	30	60	459
Percentil - cuartil (75%)	157	107	93	42	16	6	8	21	33	53	69	106	601

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 7: Estadísticos de la pluviometría mensual observada en estaciones regionales (Cont.)

(Fuente: Elaboración propi en base a datos de SENAMHI)



La figuras 4 y la tabla 7 muestran los estadísticos de los datos de precipitación mensual observada de las estaciones regionales de apoyo (las series originales pueden presentar lagunas, y el valor anual calculado es para el año hidrológico septiembre- agosto, por lo que puede que la sumatoria de valores mensuales no correspondan en la tabla presentada al valor anual). Y la figura 5 muestra los valores medios mensuales de precipitación de las series de las estaciones regionales consideradas.

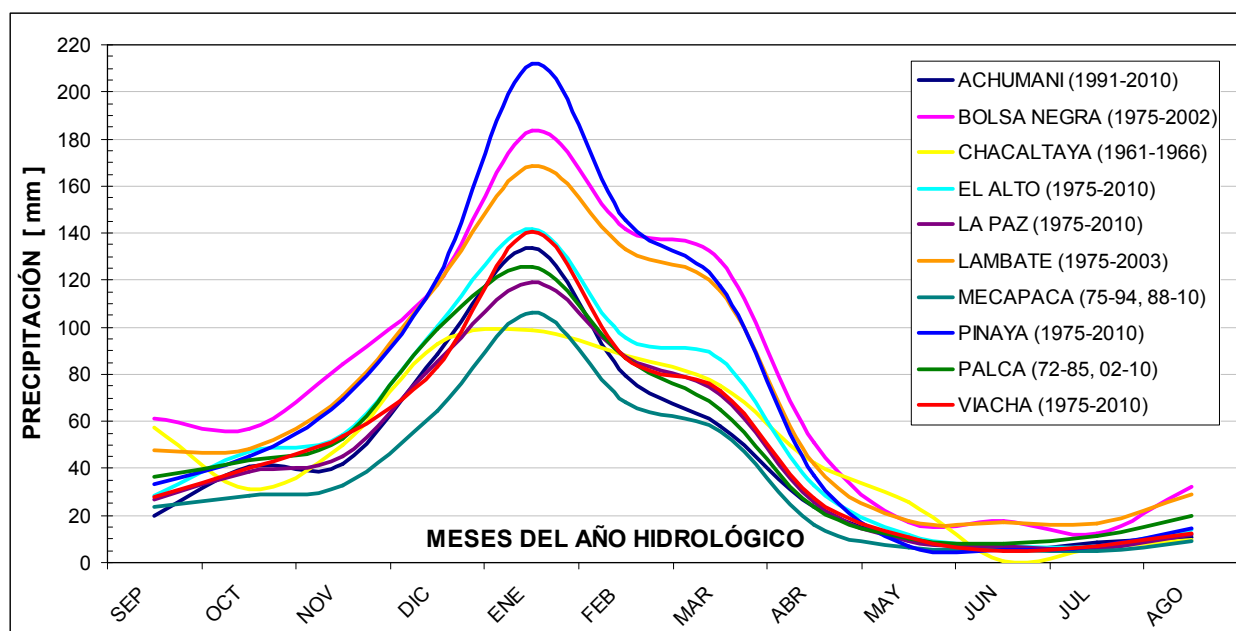


Figura 5: Precipitación media mensual en estaciones regionales (1975-2010)
(Fuente: Elaboración propia)

Vector regional (VR)

El Vector Regional crea un vector de índices anuales o mensuales (individualmente) de precipitación y de temperaturas en base a una serie cronológica de datos temporales ficticios, correspondientes a una estación igualmente ficticia. El VR de índices toma en cuenta los efectos de la tendencia de las series, y los pseudo-ciclos de la zona o región climática que afectan a cada una de las estaciones, verificando de esta manera la homogeneidad temporal de las series. El VR de índices anuales y mensuales verifica igualmente la homogeneidad espacial de series observadas en las estaciones pertenecientes a la misma zona climática.

El cálculo de los índices del VR se basa en una matriz de observaciones compuesta de los registros anuales o mensuales de la variable meteorológica de μ estaciones con n años de registros con observaciones faltantes a ciertas estaciones en ciertos años. Para cada estación se calcula una media que cubre el juego de datos del período de estudio, y para todos los años, se calcula un índice que será superior a 1 cuando el año presente valores altos (año húmedo ó con altas temperaturas) e inferior a 1 cuando el año tenga valores bajos (año con déficit de



lluvias o con bajas temperaturas). El VR toma en cuenta la información de una región que supuestamente es homogénea climáticamente (comportamiento temporal similar).

Calculado el VR del grupo regional de estaciones, la crítica de los datos se facilita grandemente, porque se puede entonces:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación y su pertenencia al grupo regional, mediante diversos parámetros estadísticos (i.e. coeficiente de correlación, error relativo, desviación Standard) proporcionados por el programa del VR.
- Comparar y evaluar gráficamente el comportamiento de las estaciones dentro de un grupo y entre grupos, trazando, entre otras cosas, el vector regional del grupo, de las estaciones que lo componen, así como las curvas doble acumuladas. Esto permite identificar rápidamente quiebres y datos anómalos.

La calidad del VR depende de la calidad de los datos de la entrada, aunque los algoritmos usados intentan minimizar la influencia de los datos erróneos. El vector calcula a la salida "la contaminación" por los errores que existen en los datos origen. Si se eliminan o corrigen gradualmente los datos incoherentes más evidentes en los datos de entrada, se llegará a un VR de buena calidad. Cuando el VR es de calidad buena, se lo podría usar para reconstituir datos faltantes (lagunas), multiplicando el índice regional de un año por el valor medio de la precipitación en esa estación durante el período de estudio.

Antes de aplicar el programa se requiere del análisis crítico inicial de la información existente, entendiéndose por esto a la detección y exclusión de la matriz de aquellos datos incoherentes o no posibles, es decir que contengan errores groseros. Posteriormente con carácter preliminar, se forman "grupos regionales" grandes de estaciones, tomando en cuenta su cercanía, características físicas y topográficas, etc.

La salida del programa contiene varios parámetros que evalúan la calidad de los resultados. Se consideran principalmente los siguientes parámetros:

- El coeficiente de correlación "r" del índice con las estaciones (>0.70)
- El valor de las desviaciones (que se deben mantener dentro de un margen de tolerancia)
- Los límites de confianza (inferior y superior) dentro de los que se deben mantener las series interanuales del índice del vector

En nuestro caso estos parámetros serán tolerables o admitidos, en cuanto a que el grupo regional está conformado por estaciones bastante lejanas, y sobre contexto físico geográfico diferente (altiplano, valles cerrados interandinos). En algún caso, el análisis de resultados lleva a disminuir el tamaño del grupo regional, a identificar estaciones cuyos datos son inconsistentes y en caso extremo, a eliminar aquellas estaciones con bajo coeficiente de correlación y alta desviación.

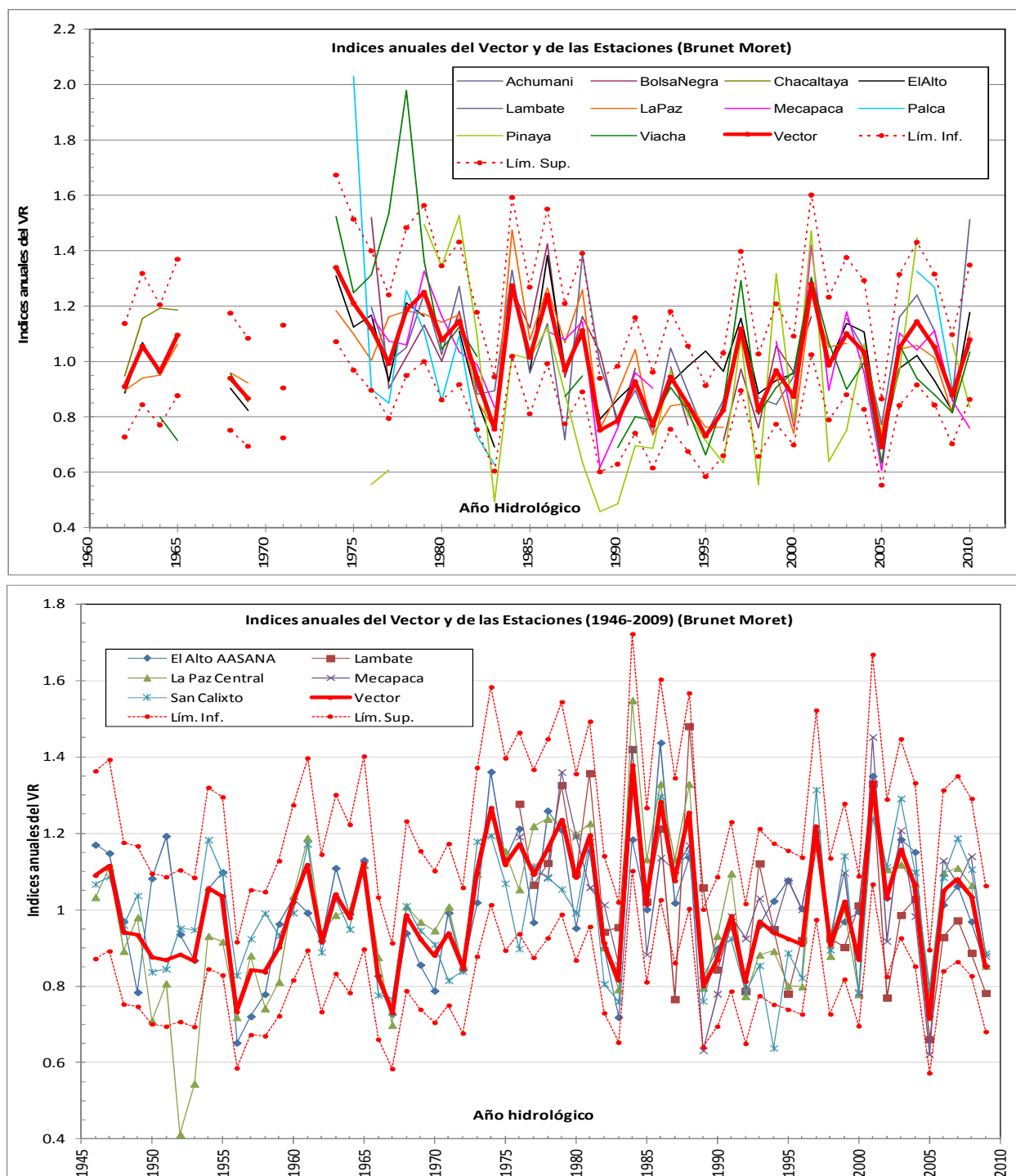


Figura 6: Índices anuales del vector regional y de las estaciones regionales, serie de datos originales de precipitación (1960-2009) y serie corregida completada (1946-2009)
(Fuente: Elaboración propia)



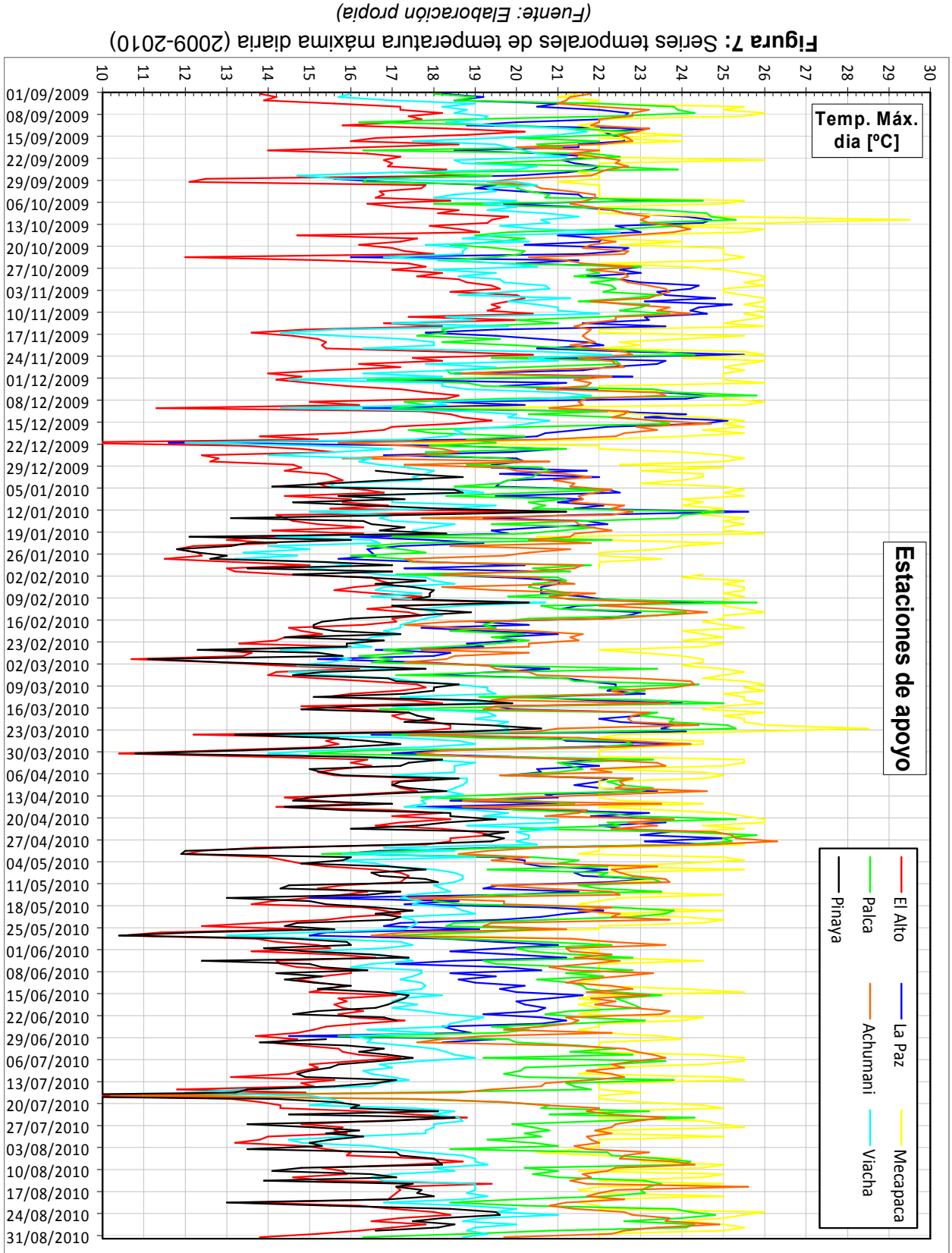
Los resultados del VR de índices anuales para la precipitación, se muestran en la figura 6, en forma de índices obtenidos sobre los valores anuales de periodos históricos comunes de al menos 3 estaciones, calculados respecto al año hidrológico adoptado: septiembre-agosto. En general se observa que el comportamiento climático es relativamente homogéneo, salvo en algunos años. Esto implica que los valores de los índices de las estaciones están dentro del intervalo de confianza, por lo que da una idea de calidad e homogeneidad para trabajar con los datos de lluvia de las estaciones.

3.4.2 Temperaturas

La calidad de la información está condicionada por varios factores sujetos en mayor o menor proporción a errores difíciles de detectar. En general, la calidad dependerá de las consideraciones asumidas para definir las estaciones hidrometeorológicas en función a su localización, así como a los periodos de registro observados disponibles y las condiciones en las estaciones respecto a su operación, mantenimiento y procesamiento de la información.

El análisis de consistencia de la información termométrica se efectúa a través del análisis de correlación, basado en la suposición de que las temperaturas medidas en las estaciones regionales, se relacionan entre sí de manera lineal.

La **figura 7 y 8** muestra las series temporales de temperatura máxima y mínima a nivel diario de las estaciones de apoyo, consideradas para el estudio de la cuenca del río Sajhuaya sobre el periodo 2010 (las series originales pueden presentar lagunas, y el valor anual calculado es para el año hidrológico septiembre- agosto, por lo que puede que el valor medio de los valores mensuales no corresponden en la tabla presentada al valor anual). La **figura 9 y la tabla 8** muestran los estadísticos de los datos de temperatura mensual observada de las estaciones regionales de apoyo.



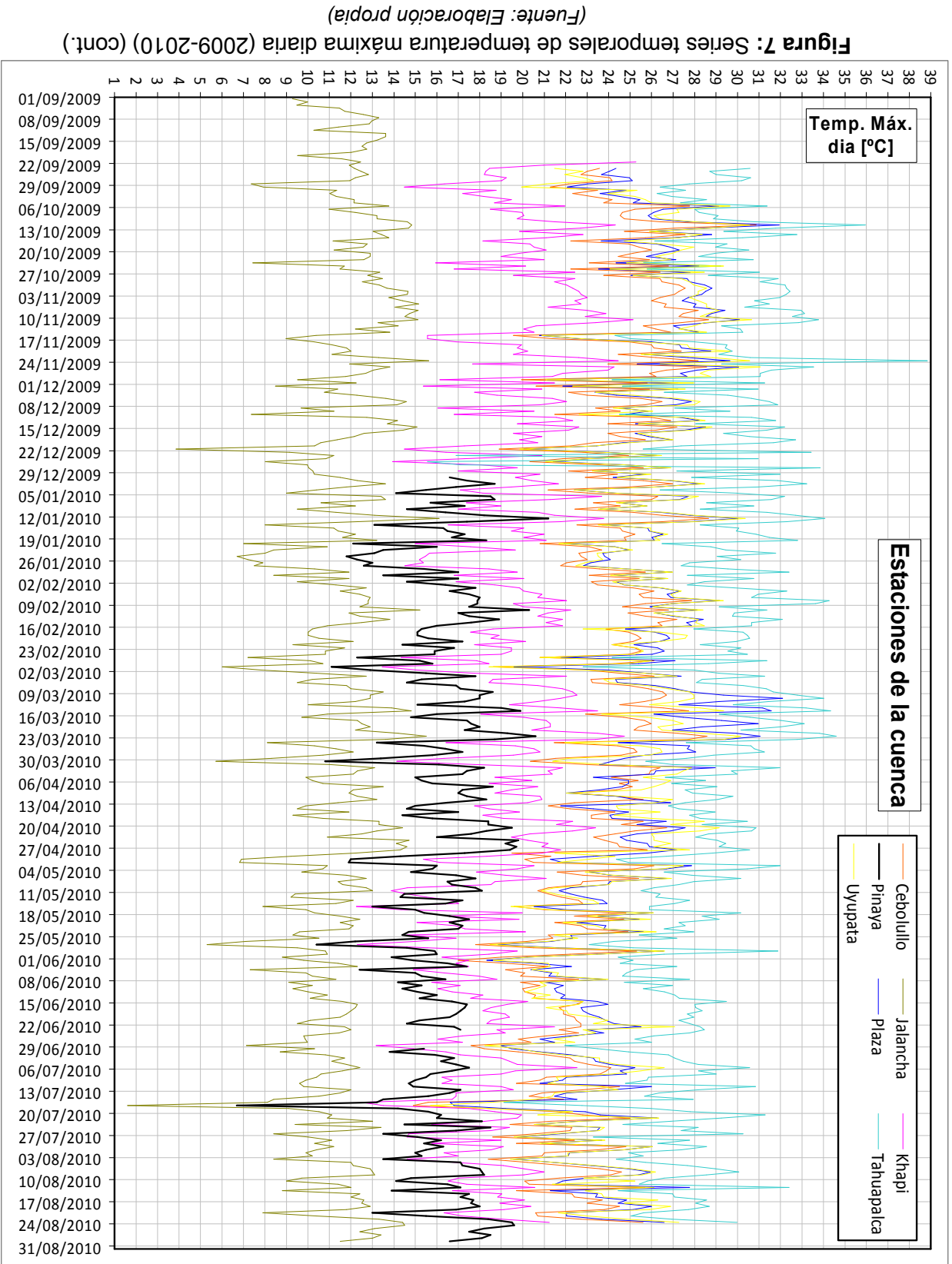


Figura 8: Series temporales de temperatura mínima diaria (2009-2010)
(Fuente: Elaboración propia)

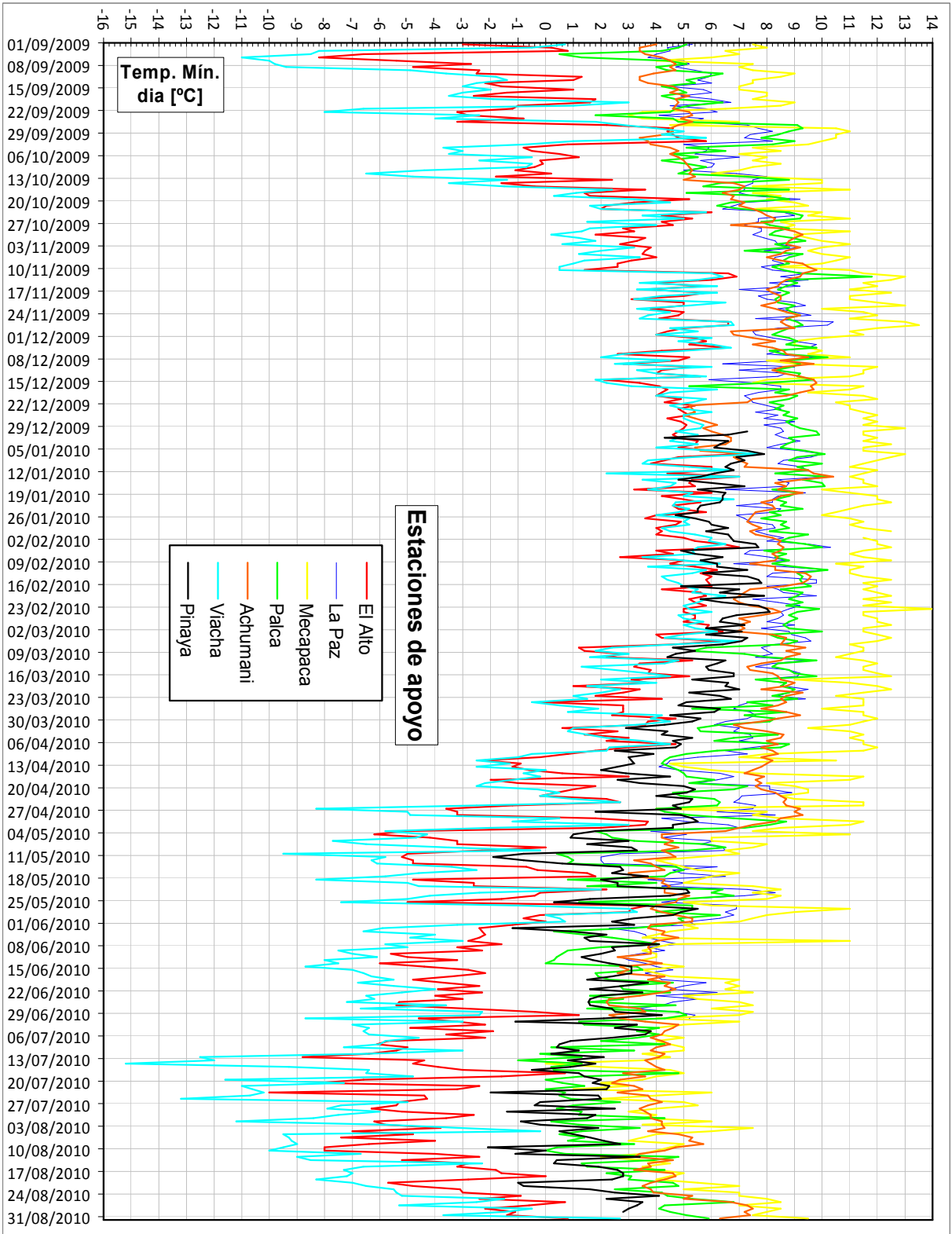
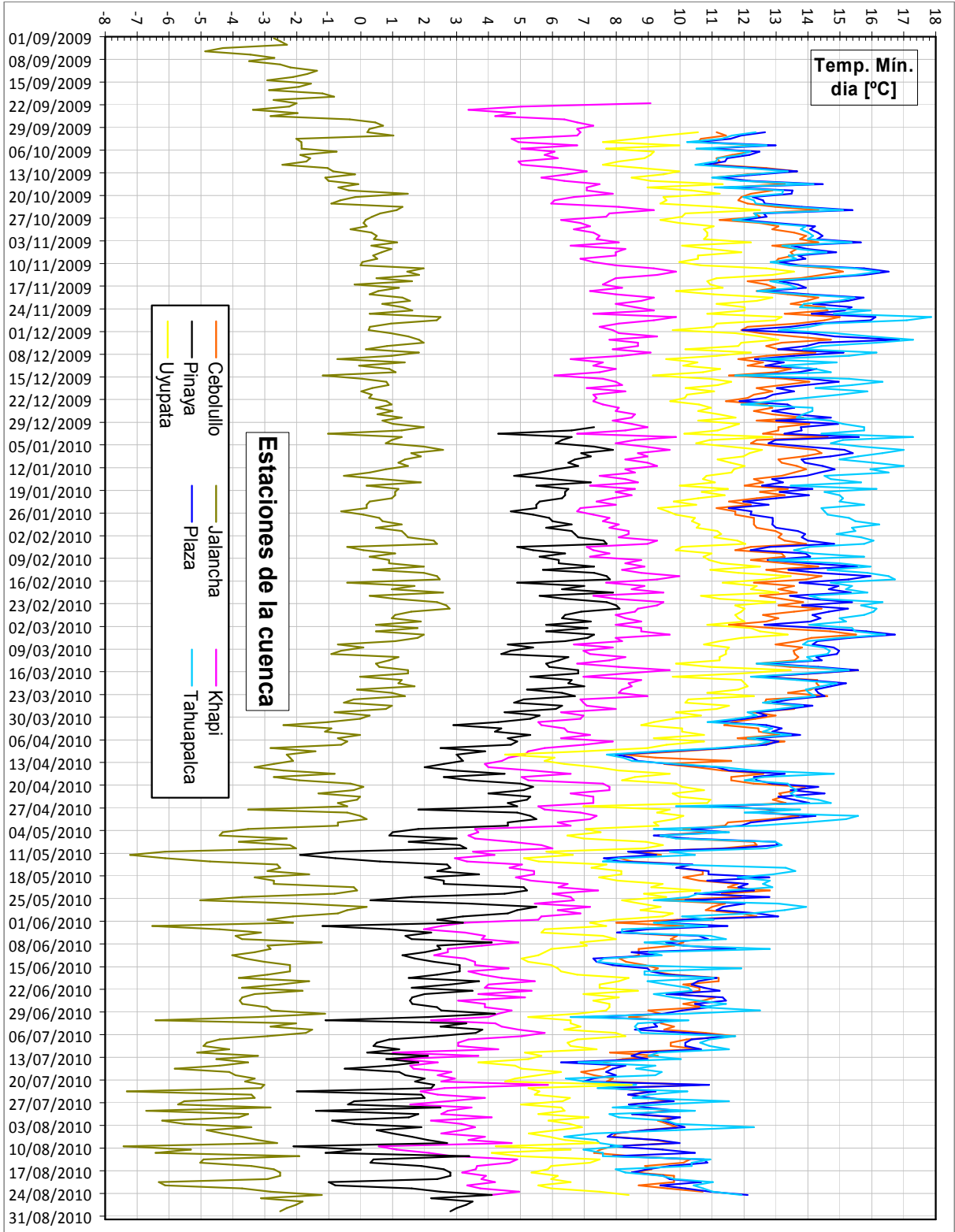


Figura 8: Series temporales de temperatura mínima diaria (2009-2010) (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)



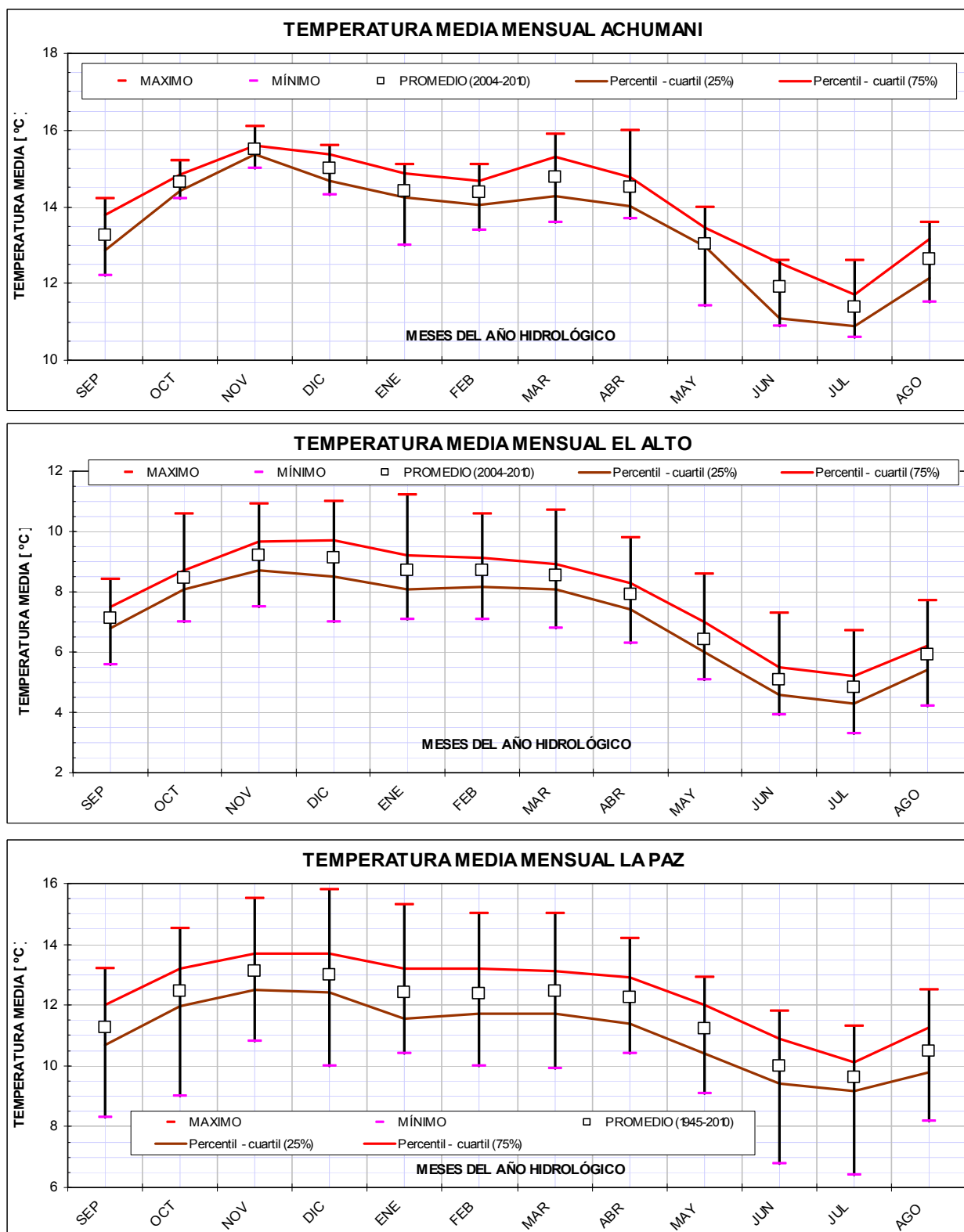


Figura 9: Estadísticas temperatura media mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

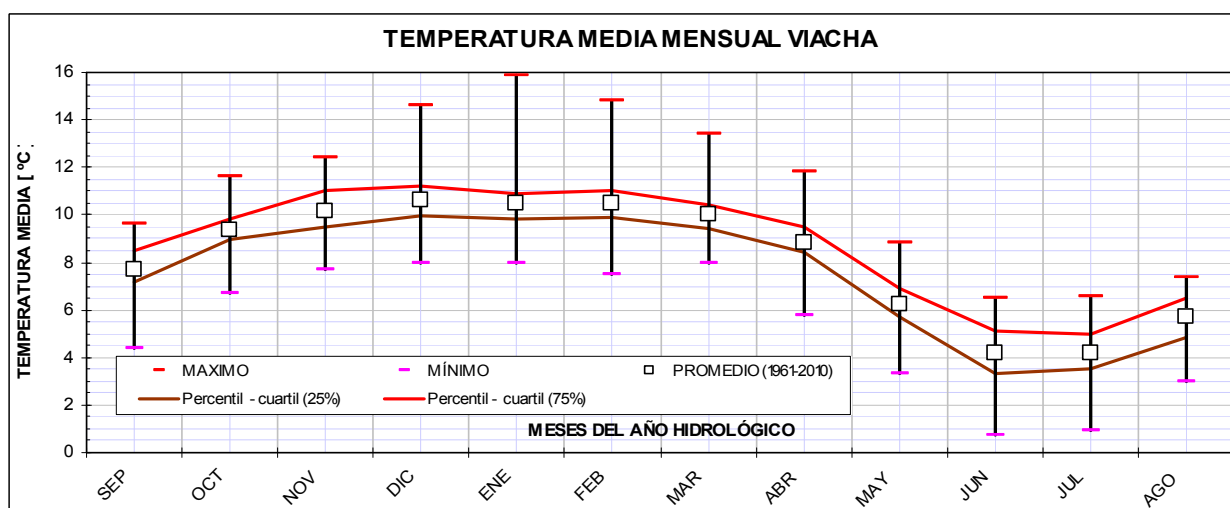
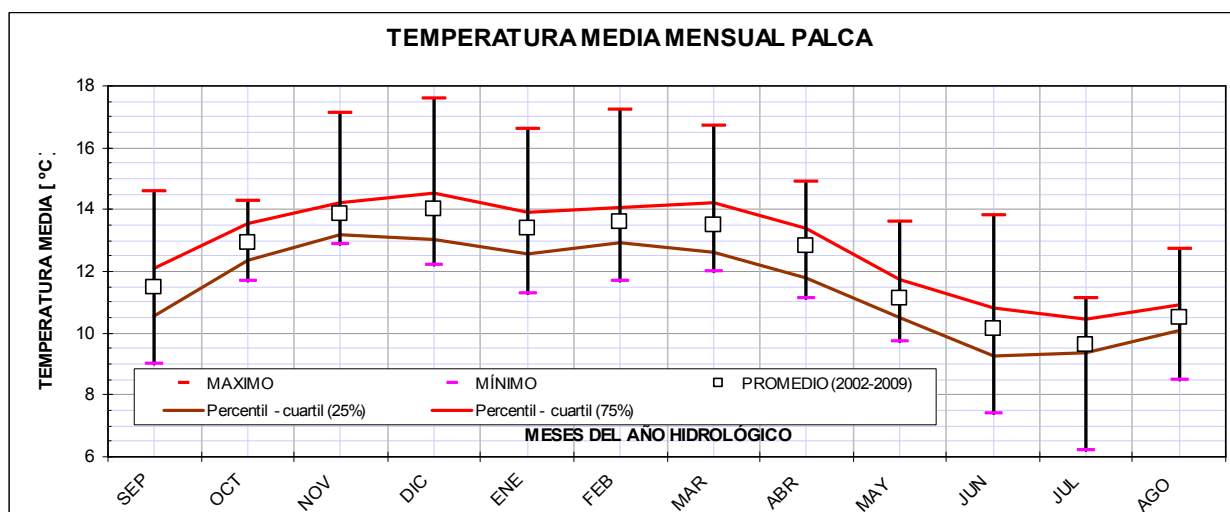
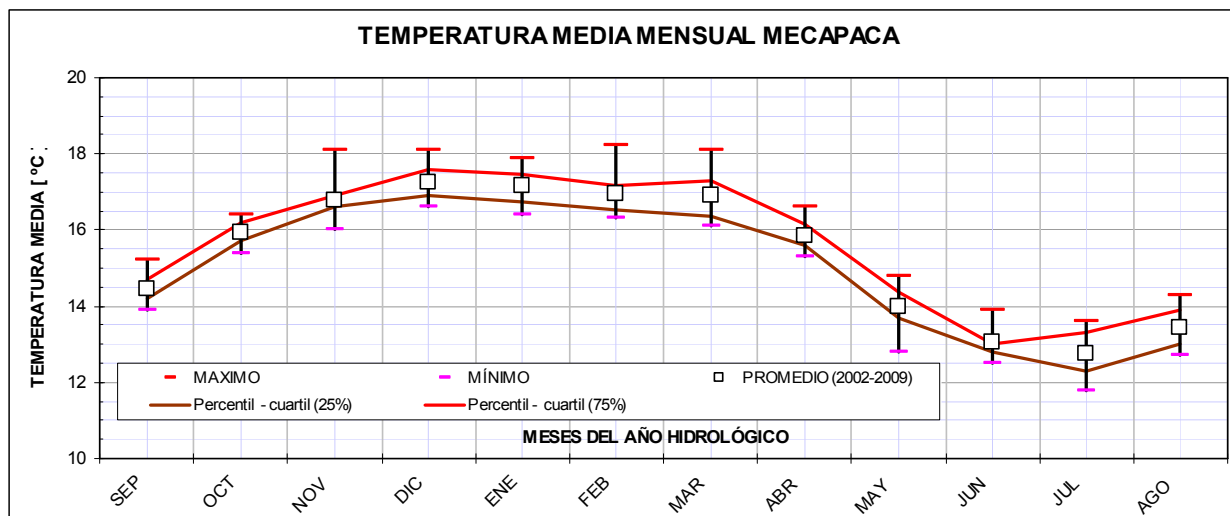


Figura 9: Estadísticas temperatura media ambiente observada estaciones regionales (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)



ESTACIÓN ACHUMANI													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	15.1	15.1	15.9	16.0	14.0	12.6	12.6	13.6	14.2	15.2	16.1	15.6	14.2
MÍNIMO Histórico	13.0	13.4	13.6	13.7	11.4	10.9	10.6	11.5	12.2	14.2	15.0	14.3	13.4
PROMEDIO (2004-2010)	14.4	14.4	14.8	14.5	13.0	11.9	11.4	12.6	13.3	14.6	15.5	15.0	13.8
Percentil - cuartil (25%)	14.2	14.1	14.3	14.0	13.0	11.1	10.9	12.2	12.8	14.4	15.3	14.7	13.5
Percentil - cuartil (75%)	14.9	14.7	15.3	14.8	13.4	12.5	11.7	13.2	13.8	14.9	15.6	15.4	14.0
ESTACIÓN EL ALTO													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	11.2	10.6	10.7	9.8	8.6	7.3	6.7	7.7	8.4	10.6	10.9	11.0	8.5
MÍNIMO Histórico	7.1	7.1	6.8	6.3	5.1	3.9	3.3	4.2	5.6	7.0	7.5	7.0	6.9
PROMEDIO (1962-2010)	8.7	8.7	8.5	7.9	6.4	5.1	4.8	5.9	7.1	8.4	9.2	9.1	7.5
Percentil - cuartil (25%)	8.1	8.2	8.1	7.4	6.0	4.6	4.3	5.4	6.8	8.1	8.7	8.5	7.2
Percentil - cuartil (75%)	9.2	9.1	8.9	8.3	7.0	5.5	5.2	6.2	7.5	8.7	9.7	9.7	7.7
ESTACIÓN LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	15.3	15.0	15.0	14.2	12.9	11.8	11.3	12.5	13.2	14.5	15.5	15.8	13.6
MÍNIMO Histórico	10.4	10.0	9.9	10.4	9.1	6.8	6.4	8.2	8.3	9.0	10.8	10.0	10.4
PROMEDIO (1945-2009)	12.4	12.4	12.5	12.2	11.2	10.0	9.6	10.5	11.3	12.5	13.1	13.0	11.9
Percentil - cuartil (25%)	11.6	11.7	11.7	11.4	10.4	9.4	9.2	9.8	10.7	12.0	12.5	12.4	11.3
Percentil - cuartil (75%)	13.2	13.2	13.1	12.9	12.0	10.9	10.1	11.3	12.0	13.2	13.7	13.7	12.5
ESTACIÓN MECAPACA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	17.9	18.2	18.1	16.6	14.8	13.9	13.6	14.3	15.2	16.4	18.1	18.1	16.0
MÍNIMO Histórico	16.4	16.3	16.1	15.3	12.8	12.5	11.8	12.7	13.9	15.4	16.0	16.6	14.9
PROMEDIO (2002-2010)	17.1	16.9	16.9	15.9	14.0	13.0	12.7	13.4	14.5	15.9	16.8	17.3	15.3
Percentil - cuartil (25%)	16.8	16.5	16.4	15.6	13.7	12.8	12.3	13.0	14.2	15.7	16.6	16.9	15.2
Percentil - cuartil (75%)	17.4	17.2	17.3	16.2	14.3	13.0	13.3	13.9	14.7	16.2	16.9	17.6	15.4
ESTACIÓN PALCA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	16.6	17.2	16.7	14.9	13.6	13.8	11.1	12.7	14.6	14.3	17.1	17.6	13.9
MÍNIMO Histórico	11.3	11.7	12.0	11.1	9.7	7.4	6.2	8.5	9.0	11.7	12.9	12.2	11.0
PROMEDIO (72-85, 02-10)	13.4	13.6	13.5	12.8	11.1	10.1	9.6	10.5	11.5	12.9	13.9	14.0	12.2
Percentil - cuartil (25%)	12.5	12.9	12.6	11.8	10.5	9.3	9.3	10.1	10.6	12.3	13.2	13.0	11.6
Percentil - cuartil (75%)	13.9	14.1	14.3	13.4	11.7	10.8	10.4	10.9	12.1	13.6	14.2	14.6	12.7
ESTACIÓN VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	15.9	14.8	13.4	11.8	8.8	6.5	6.6	7.4	9.6	11.6	12.4	14.6	10.0
MÍNIMO Histórico	8.0	7.5	8.0	5.8	3.3	0.7	0.9	3.0	4.4	6.7	7.7	8.0	5.5
PROMEDIO (1961-2009)	10.5	10.5	10.0	8.8	6.2	4.2	4.2	5.7	7.7	9.3	10.2	10.6	8.3
Percentil - cuartil (25%)	9.8	9.9	9.4	8.4	5.7	3.3	3.5	4.9	7.1	8.9	9.5	10.0	8.0
Percentil - cuartil (75%)	10.9	11.0	10.4	9.5	6.9	5.1	5.0	6.5	8.5	9.8	11.0	11.2	8.9

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 8: Estadísticos de la temperatura media mensual en estaciones regionales

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

La figura 10 muestra los valores medios mensuales de temperatura media de las series de las estaciones regionales consideradas sobre el periodo (1975-2010)

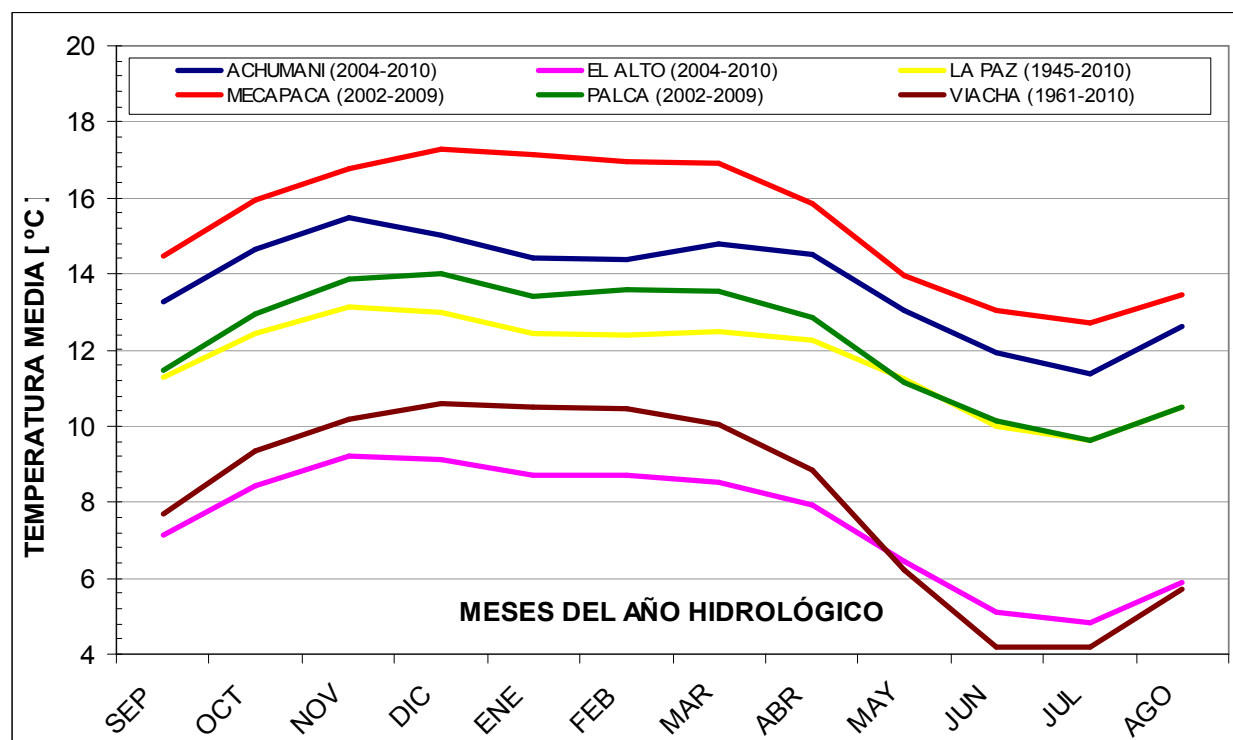


Figura 10: Temperatura media mensual en estaciones regionales (1975-2010)
(Fuente: Elaboración propia)

Del análisis de consistencia, se puede observar que existe correspondencia entre las temperaturas registradas en las diferentes estaciones regionales durante el periodo 2010. El análisis de consistencia de la información y el relleno de datos faltantes de la estación Pinaya (HOBO) se realiza a través de un modelo de regresión lineal múltiple partir de las estaciones de apoyo. Los coeficientes de determinación que comparan los valores calculados y reales en el análisis de regresión múltiple para los diferentes juegos de estaciones se muestran en las tablas siguientes:

Resumen Tmax			Resumen Tmin		
Estaciones	r ²	r	Estaciones	r ²	r
Pinaya HOBO vs Todas las estaciones	0,823	0,907	Pinaya HOBO vs Todas las estaciones	0,861	0,928
Pinaya HOBO vs Viacha - La Paz - El Alto	0,793	0,890	Pinaya HOBO vs Viacha - La Paz - El Alto	0,860	0,927
Pinaya HOBO vs La Paz - El Alto	0,791	0,889	Pinaya HOBO vs La Paz - El Alto	0,860	0,927
Pinaya HOBO vs Viacha - La Paz	0,770	0,877	Pinaya HOBO vs Viacha - La Paz	0,844	0,919
Pinaya HOBO vs Viacha - El Alto	0,687	0,829	Pinaya HOBO vs Viacha - El Alto	0,799	0,894

Tabla 9: Coeficientes de determinación de la regresión múltiple de temperatura máxima y mínima diaria (2010)
(Fuente: Elaboración propia)

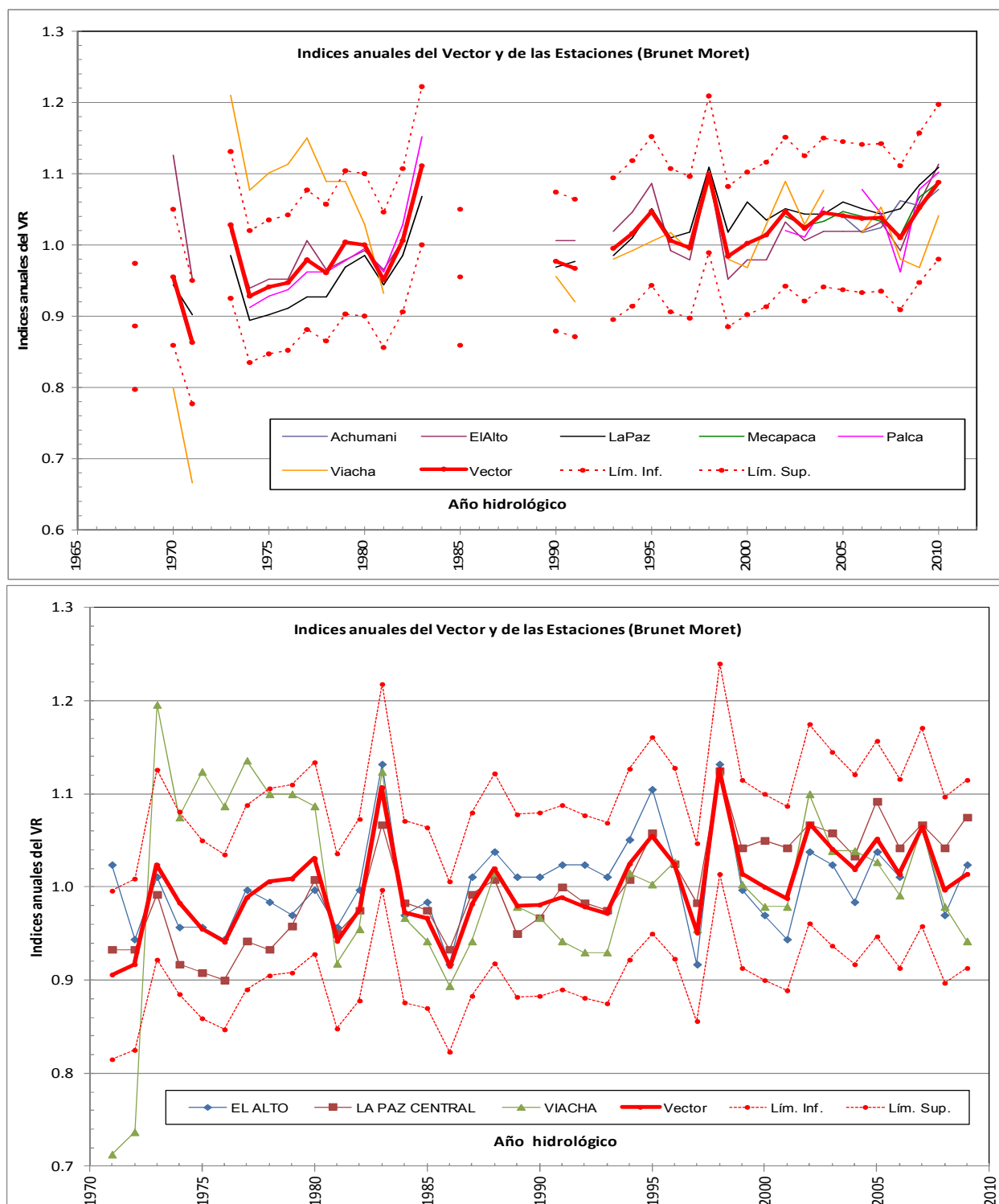


Figura 11: Índices anuales del vector regional y de las estaciones regionales, datos originales y datos corregidos completados de temperatura media

(Fuente: Elaboración propia)



Podemos observar que los datos de temperatura la estación analizada Pinaya son consistentes y que existe una buena correlación entre ésta y las estaciones de apoyo. Se ha considerado la estación Pinaya por ser la que se encuentra más cerca a la cuenca de estudio. Elegimos las estaciones de La Paz y el Alto para rellenar vacíos y lagunas de datos en estaciones de la región, por ser las estaciones con el record más largo de información.

La figura 11 de índices anuales para temperatura media, muestra un comportamiento regional homogéneo, que implica que los índices de las estaciones están dentro del límite de confianza, por lo que da a entender la buena calidad de datos y validar que existe un comportamiento similar. Si bien muestran un comportamiento regional homogéneo, en algunas estaciones se presentan años en que el índice queda fuera del límite de confianza del grupo regional, que es el caso de Viacha, que se la tomo en cuenta por tener una serie continua y larga para ser comparada con las otras estaciones regionales adoptadas para el análisis.

3.5 Tratamiento de la información meteorológica para el periodo 1975 – 2009

3.5.1 Pluviometría

Las series temporales de precipitación para la región son generadas utilizando los registros de las estaciones de Palca y Mecapaca que tienen mayor influencia en la cuenca de estudio, para una estación “sintética” situada en la elevación media de ambas estaciones (*ver figura 3*). La precipitación media en esta estación será:

$$P_{xi} = \frac{(P_{pi} + P_{mi})}{2}$$

Donde:

P_{xi} = precipitación media generada para la estación sintética en el mes “i”

P_{pi} = precipitación media de la estación Palca en el mes “i”

P_{mi} = precipitación media de la estación Mecapaca en el mes “i”

Para evaluar la distribución espacial de la precipitación se construye un perfil pluviométrico-altimétrico con las estaciones regionales de apoyo.

3.5.1.1 Perfil Pluvio-altimétrico

La extrapolación de la precipitación de la estación base (Tahuapalca, Cebollullo, Khapi, Jalancha) a las alturas medias de cada zona de elevación se realiza a través de un gradiente altitudinal de precipitaciones. Este gradiente se determina mediante el ajuste y cálculo de un perfil pluvio-altimétrico de las estaciones regionales de apoyo sobre un periodo común entre cada una de estas (*ver tabla 10 y figura 12*). En términos de lluvia es relevante considerar todo análisis partiendo del periodo o año hidrológico regional septiembre-agosto en nuestro caso debido a los ciclos climáticos que se dan.



Estación	Altura [msnm]	AÑO CALENDARIO	AÑO HIDROLÓGICO	OBSERVACIÓN
		Pmed [mm]	Pmed [mm]	
Estación base	3007	437.1	437.1	fuera del análisis
Lambate	3400	807.9	834.6	fuera del análisis
Mina Bolsa Negra	4800	887.5	889.9	fuera del análisis
Mecapaca	2850	428.1	423.6	
Palca	3540	446.0	434.8	
El Alto	4071	630.4	631.8	
La Paz Central	3632	538.4	517.6	
Chacaltaya	5231	785.0	785.0	

Tabla 10: Precipitación total media anual en estaciones pluviométricas regionales (1997-2007)
(Fuente: Elaboración propia)

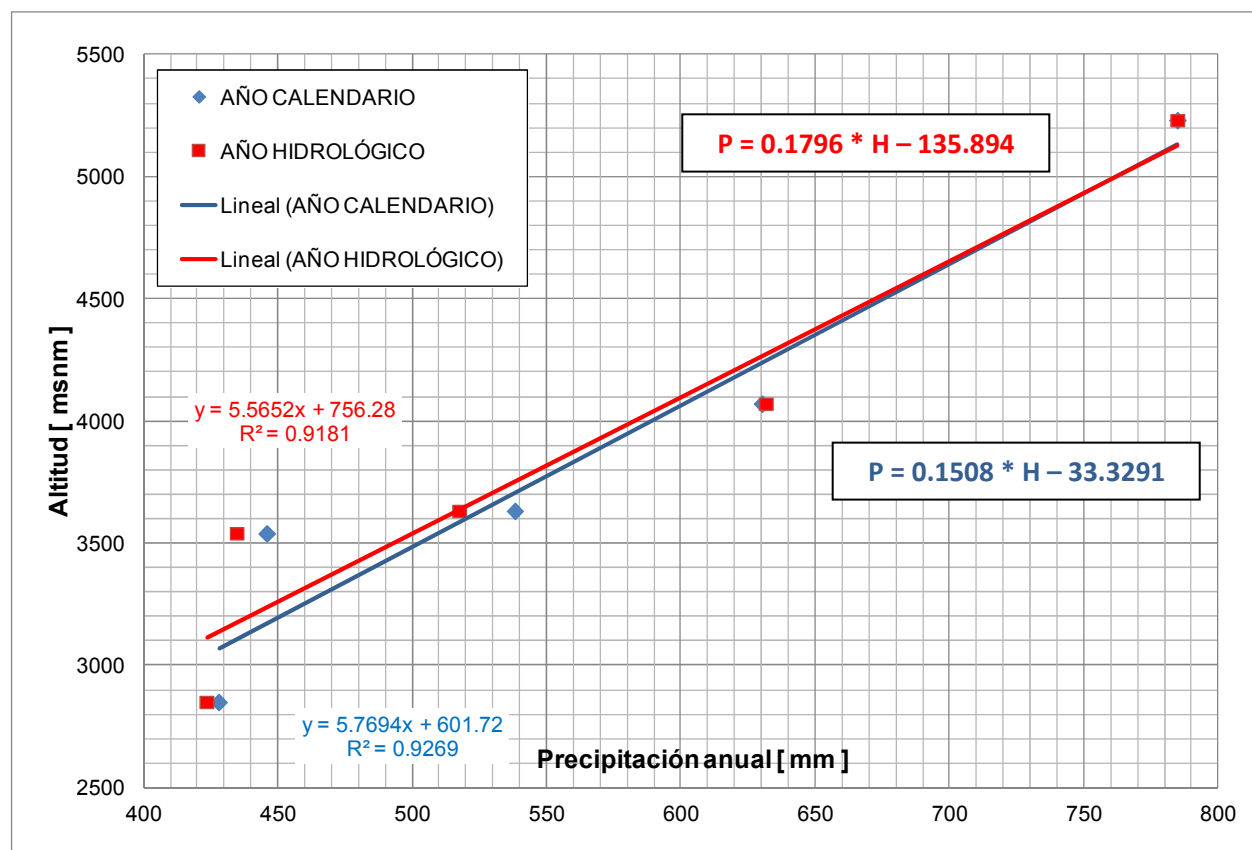


Figura 12: Perfil pluvio-altimétrico anual (Enero de 1997 – Diciembre de 2007)
(Fuente: Elaboración propia)

Para el análisis de regresión lineal para la determinación de la ecuación del gradiente pluvial respecto a la altitud se descartaron las estaciones Lambate, Bolsa Negra y la estación base (ficticia o sintética), debido a que estas se encuentran en el frente opuesto (noreste del Illimani) al de la cuenca del río Sajhuaya y están dentro del contexto físico-geográfico y climático de los Yungas (más húmedo), cuyo régimen de lluvias no reflejan lo que ocurre en la zona de estudio.



Se ha realizado el ajuste de las lluvias totales anuales medias para el periodo homogéneo de 10 años (1997-2007) tanto para el año calendario (enero-diciembre), como para el hidrológico (septiembre-agosto).

El gradiente pluvio-altitudinal corresponde a la diferencia de precipitación por cada 100 metros de desnivel, que en el presente caso se fija en [18mm / 100m].

Las series generadas de precipitación se presentan en la base de datos.

3.5.2 Termometría

Existen registros de temperatura máxima y mínima a nivel diario y mensual en las estaciones de La Paz y El Alto desde el año 1945 hasta el 2009. Sin embargo, en este periodo, algunos meses presentan vacíos de información o lagunas en los años 40's, 50's y 60's. Entonces se ha definido considerar el periodo base de 1970 – 2009 para el estudio, sobre el que se dispone de mayor información continua en estas dos estaciones base.

Antes de generar los datos termométricos para las estaciones de la cuenca de estudio, se completan los registros de las estaciones de La Paz y El Alto mediante regresión lineal simple entre ambas.

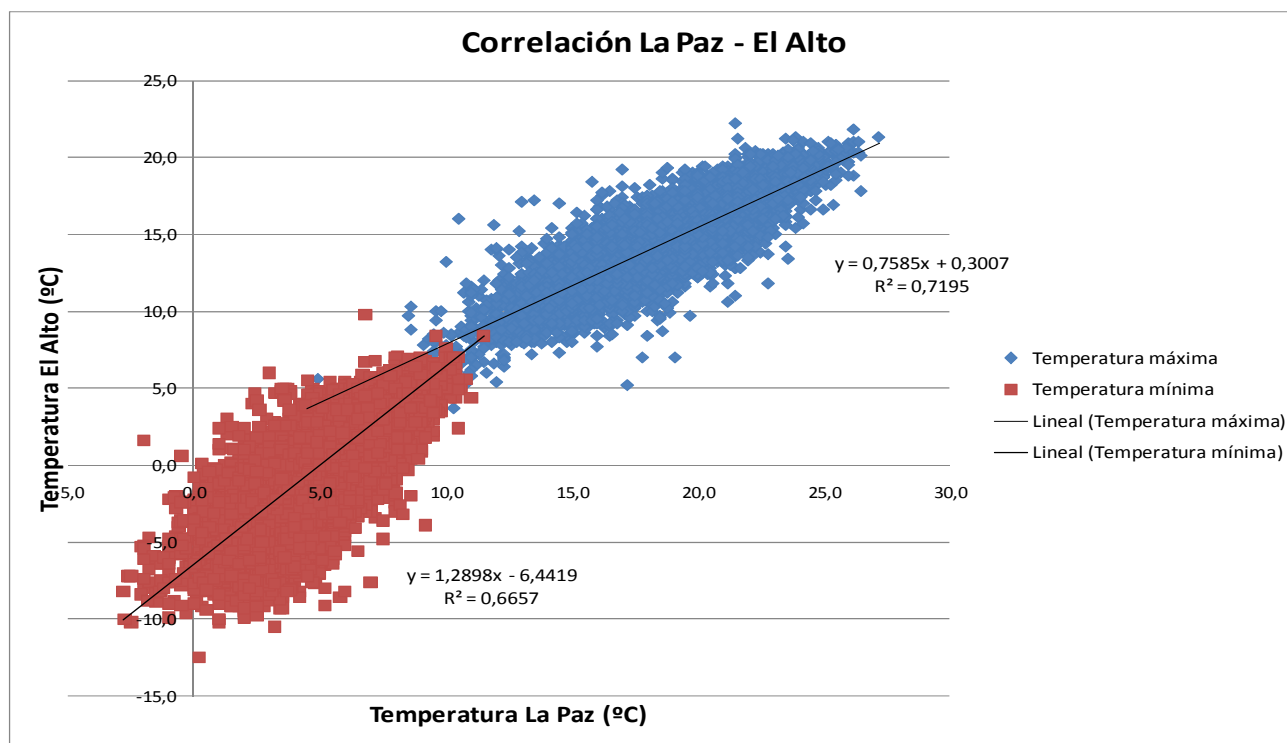


Figura 13: Correlación de datos de temperatura diaria de las estaciones La Paz – El Alto
(Fuente: Elaboración propia)



La figura 13 muestra la correlación entre datos de temperatura máxima y mínima diaria entre las estaciones de La Paz y El Alto.

La generación de datos termométricos (series temporales) para los puntos de Khapi, Uyupata, Cebollullo, Plaza y Tahuapalca, se realiza a través del modelo de regresión múltiple lineal, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Las temperaturas máximas y mínimas diarias de la estación Pinaya (HOBO) se generan en función de los datos de las estaciones de La Paz y El Alto.
- Las temperaturas máximas y mínimas diarias de las otras estaciones de apoyo y las de la cuenca de estudio se generan mediante regresión múltiple lineal con las estaciones de apoyo que están fuera de la cuenca de estudio.

El orden de cálculo para las temperaturas máximas y mínimas, los coeficientes de determinación de la regresión múltiple lineal y las ecuaciones empleadas se muestran en las tablas siguientes:

TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA																						
Estación base		ESTACIONES							r^2	r	TEMP MAX DIA Estación	Tmax _(x) = K + Σ [Tmax _(i) * K _(j)], i=estación, j=coef. (A,H), K=ctte									Tmax i	
		La Paz	El Alto	Pinaya	Khapi	Uyupaya	Cebollullo	Plaza				Tahuapalca	Constante	La Paz	El Alto	Pinaya	Khapi	Uyupaya	Cebollullo	Plaza		Tahuapalca
													K									
Pinaya	vs.	•	•						0.791	0.889	Pinaya	=	-0.579	0.572	0.329							
Khapi	vs.	•	•	•					0.689	0.830	Khapi	=	2.168	0.308	-0.344	0.975						
Uyupaya	vs.	•	•	•	•				0.779	0.883	Uyupaya	=	6.123	0.092	-0.109	0.028	0.955					
Cebollullo	vs.	•	•	•	•	•			0.923	0.961	Cebollullo	=	3.013	-0.185	-0.044	0.241	0.130	0.751				
Plaza	vs.	•	•	•	•	•	•		0.933	0.960	Plaza	=	0.905	0.102	-0.069	-0.115	0.133	0.101	0.842			
Tahuapalca	vs.	•	•	•	•	•	•	•	0.732	0.856	Tahuapalca	=	6.384	-0.096	0.100	-0.037	0.354	-0.519	0.666	0.553		

TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA																						
Estación base		ESTACIONES							r^2	r	TEMP MIN DIA Estación		Tmin _(x) = K + Σ [Tmin _(i) * K _(j)], i=estación, j=coef. (A,H), K=cte									
		La Paz	El Alto	Pinaya	Khapi	Uyupaya	Cebollullo	Plaza					Tahuapalca	Constante	La Paz	El Alto	Pinaya	Khapi	Uyupaya	Cebollullo	Plaza	Tahuapalca
Pinaya	vs.	•	•						0.860	0.927	Pinaya	=	0.182	0.586	0.232							
Khapi	vs.	•	•	•					0.875	0.935	Khapi	=	2.520	0.245	0.069	0.496						
Uyupaya	vs.	•	•	•	•				0.922	0.960	Uyupaya	=	3.172	0.111	0.036	-0.094	0.925					
Cebollullo	vs.	•	•	•	•	•			0.929	0.964	Cebollullo	=	3.373	0.138	-0.132	0.004	0.144	0.719				
Plaza	vs.	•	•	•	•	•	•		0.964	0.982	Plaza	=	0.194	0.013	0.031	-0.101	-0.311	0.758	0.671			
Tahuapalca	vs.	•	•	•	•	•	•	•	0.872	0.934	Tahuapalca	=	3.505	-0.101	0.226	-0.145	0.256	0.065	-0.230	0.862		

Tabla 11: Resumen de la regresión lineal múltiple para la generación de temperaturas máximas y mínimas diarias en estaciones de la cuenca del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia)



Las temperaturas máximas y mínimas diarias generadas para las distintas estaciones correspondientes a la cuenca de estudio para el periodo (1970-2010), se las adjunta en la base de datos Hydraccess.

3.5.2.1 Perfil Termo-altimétrico

Las temperaturas medidas en la estación base deben extrapolarse a la elevación media de cada zona a través del gradiente térmico (ΔT):

$$\Delta T = \gamma \cdot (h_{st} - \bar{h}) \cdot \frac{1}{100}$$

Donde: γ = gradiente térmico [°C / 100m]
 h_{st} = altura de la estación base [m]
 $\bar{h}$ = elevación media de la zona "i" [m]

Para determinar el gradiente térmico, se trazó un perfil térmico altitudinal con los datos de 6 estaciones ubicadas en la cuenca (registros 2009) y 6 estaciones ubicadas fuera de la cuenca (tabla 12 y figura 14). Se tomó como estación base a la estación Tahuapalca HOB0 (altura 2410 msnm) por encontrarse en el punto más bajo de la cuenca.

El gradiente térmico está dado por:

$$\Delta T = 0.69 \cdot (2410 - \bar{h}_i) \cdot \frac{1}{100}$$

Donde: $\bar{h}_i$ = altura media de la zona " i " [m]

ESTACIONES CUENCA			
Estación	Altitud [msnm]	Tmed [°C]	PERIODO DE OBSERVACIÓN
Pinaya HOB0	3800	10.4	(2009-2010)
Khapi HOB0	3326	12.7	(2009-2010)
Uyupata	2924	17.1	(2009-2010)
Cebollullo	2771	17.7	(2009-2010)
Plaza	2631	18.6	(2009-2010)
Tahuapalca HOB0	2410	20.7	(2009-2010)

ESTACIONES DE APOYO			
Estación	Altitud [msnm]	Tmed [°C]	PERIODO DE OBSERVACIÓN
Viacha	3850	8.9	(1975-2009)
La Paz	3632	13.6	(1975-2009)
El Alto	4071	8.5	(1975-2009)
Palca	3540	13.5	(2002-2009)
Mecapaca	2850	16.2	(2002-2009)
Achumani	3200	14.0	(2004-2009)

Tabla 12: Estaciones termométricas, altitud y temperatura media corregida completada para la elaboración del perfil térmico

(Fuente: Elaboración propia)

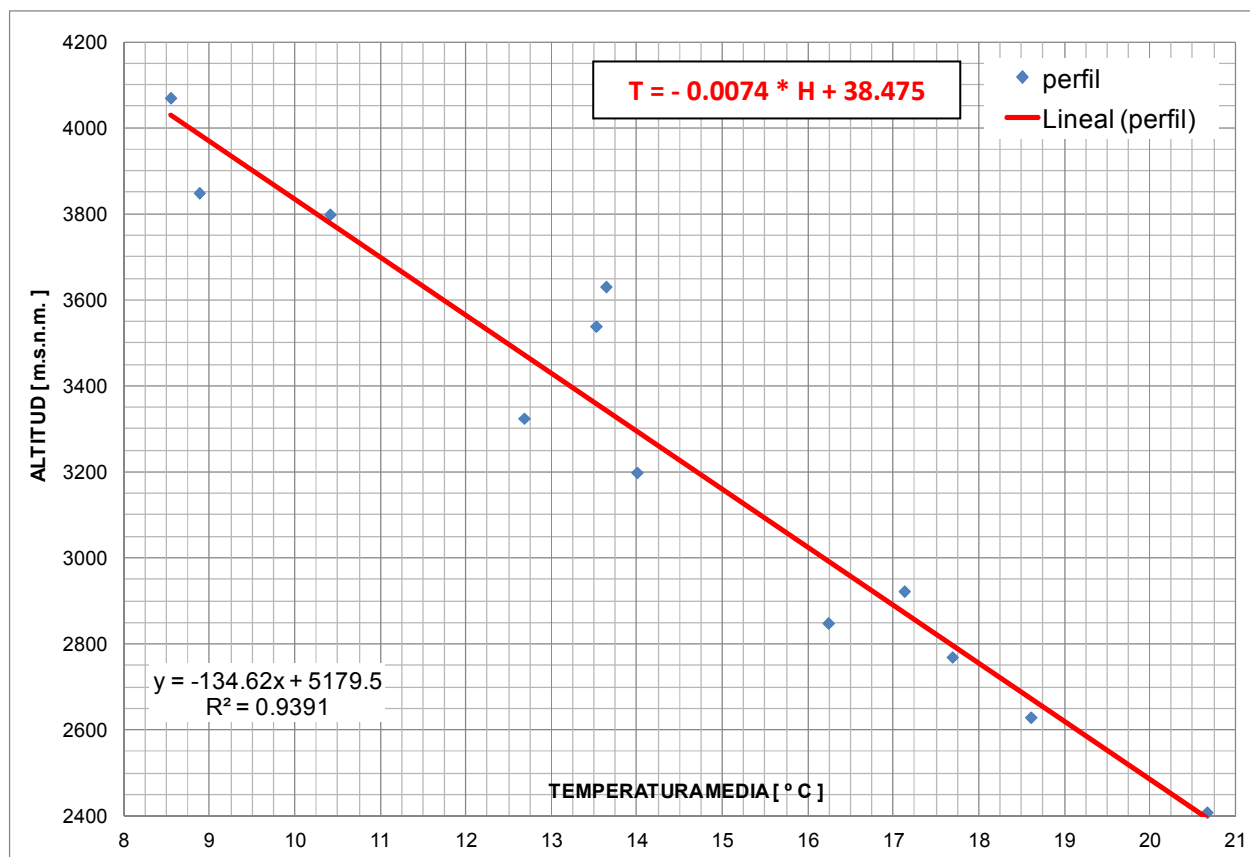


Figura 14: Perfil térmico - altitudinal (2009 – 2010)

(Fuente: Elaboración propia)

La figura 15 muestra el mapa de temperaturas medias anuales, sobre el límite de cuencas y subcuencas del río Sajhuaya, construido a partir del modelo digital de terreno (30x30m) y el perfil termo-altimétrico.

El gradiente térmico-altitudinal corresponde a la diferencia de temperatura por cada 100 metros de desnivel, que en el presente caso se fija en [0.74°C / 100m].

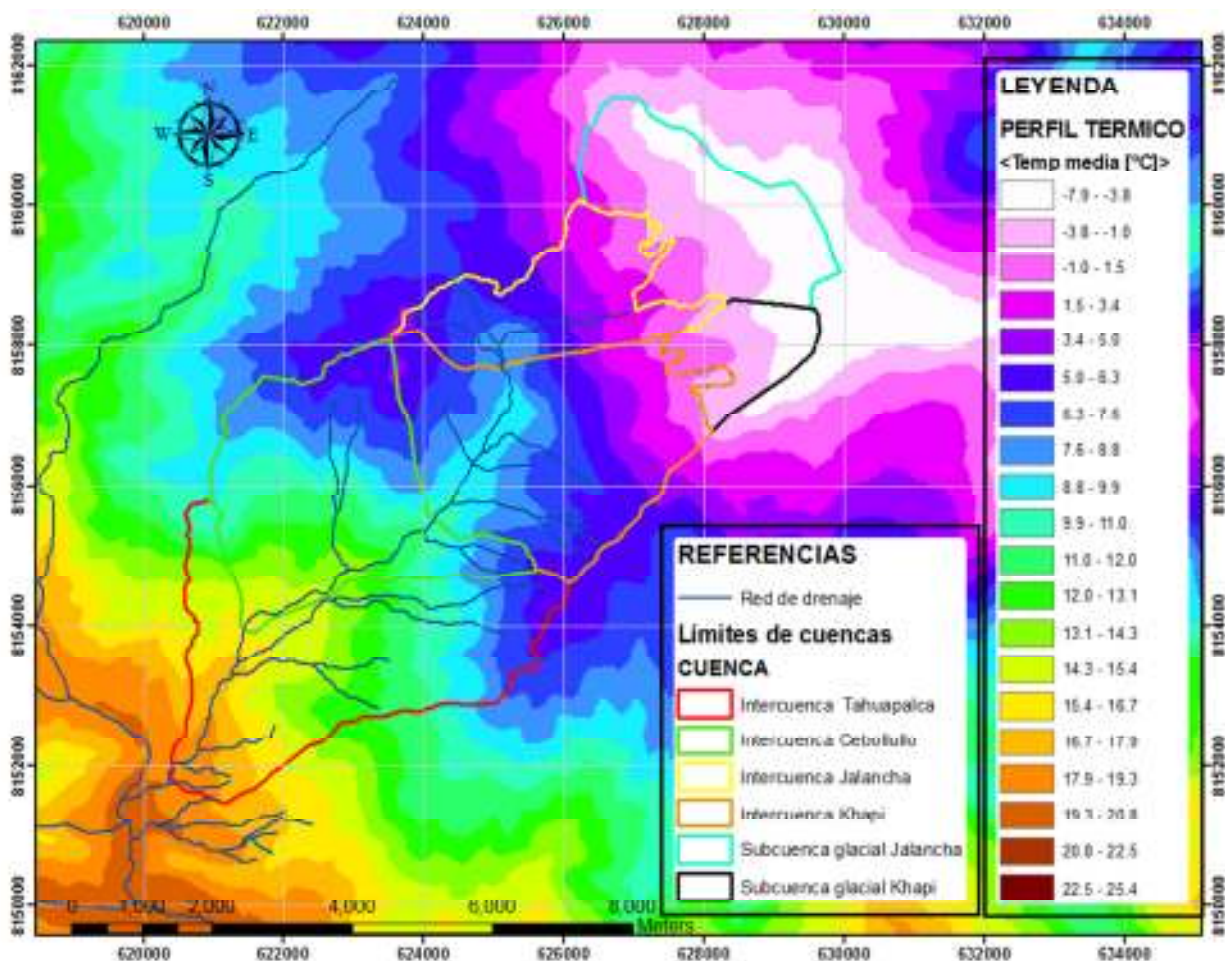


Figura 15: Mapa de temperaturas medias anual en la cuenca del río Sajhuaya en función del perfil térmico y el modelo digital de terreno

Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19 Sur

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.3 Humedad Relativa

La atmósfera contiene cantidades variables de agua en forma de vapor. El contenido de vapor de agua es expresado como porcentaje de la cantidad máxima que puede contener el aire saturado a una determinada temperatura, se conoce como humedad relativa. La tabla 13 y figuras 16 muestra los estadísticos de las series históricas de humedad relativa mensual y anual y los valores medios de las estaciones regionales respectivamente (las series originales pueden presentar lagunas, y el valor anual calculado es para el año hidrológico septiembre- agosto, por lo que puede que los promedios de valores mensuales no correspondan en la tabla presentada al valor anual). El comportamiento intermensual presenta valores más altos en diciembre, enero y febrero, mientras que los valore más bajos entre mayo y agosto.

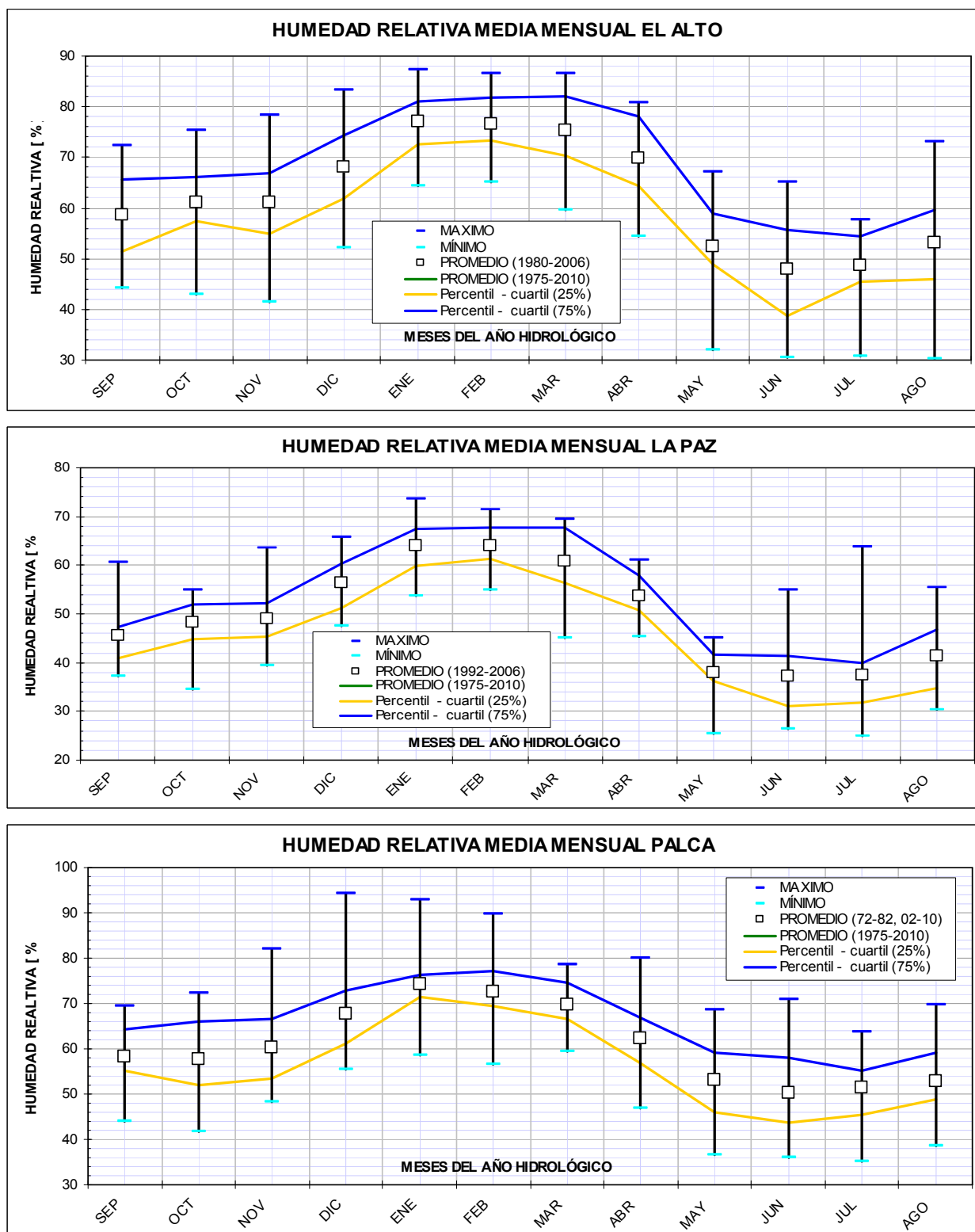


Figura 16: Estadísticas humedad relativa media mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

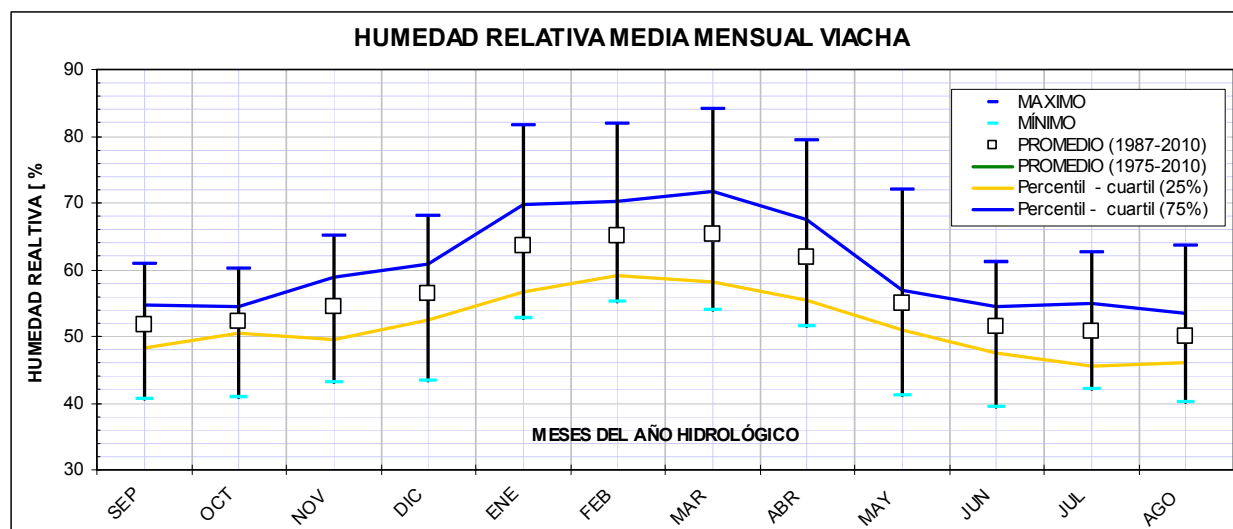


Figura 16: Estadísticas humedad relativa media mensual observada estaciones regionales
(Cont.)

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

ESTACION EL ALTO													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	87	86	87	81	67	65	58	73	72	75	78	83	72
MÍNIMO Histórico	64	65	60	55	32	30	31	30	44	43	42	52	51
PROMEDIO (1980-2006)	77	77	75	70	52	48	49	53	59	61	61	68	63
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	73	73	70	64	49	39	45	46	51	58	55	62	59
Percentil - cuartil (75%)	81	82	82	78	59	56	54	60	66	66	67	74	67

ESTACION LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	74	71	69	61	45	55	64	56	61	55	64	66	58
MÍNIMO Histórico	54	55	45	45	25	27	25	30	37	35	40	48	44
PROMEDIO (1992-2006)	64	64	61	54	38	37	37	41	46	48	49	56	50
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	60	61	56	51	36	31	32	35	41	45	45	51	47
Percentil - cuartil (75%)	67	68	68	58	42	41	40	47	47	52	52	60	52

ESTACION PALCA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	93	90	79	80	69	71	64	70	70	72	82	94	72
MÍNIMO Histórico	59	57	59	47	37	36	35	39	44	42	48	56	51
PROMEDIO (72-82, 02-10)	74	73	70	62	53	50	51	53	58	58	60	68	61
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	71	69	67	57	46	44	45	49	55	52	53	61	56
Percentil - cuartil (75%)	76	77	74	67	59	58	55	59	64	66	66	73	63

ESTACION VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO Histórico	82	82	84	80	72	61	63	64	61	60	65	68	59
MÍNIMO Histórico	53	55	54	51	41	39	42	40	41	41	43	43	52
PROMEDIO (1987-2010)	64	65	65	62	55	52	51	50	52	52	54	56	56
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	57	59	58	55	51	47	46	46	48	51	50	52	55
Percentil - cuartil (75%)	70	70	72	68	57	54	55	53	55	55	59	61	58

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 13: Estadísticos de la humedad relativa media mensual en estaciones regionales

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

La figura 17 muestra los valores medios mensuales de humedad relativa media de las series de las estaciones regionales consideradas sobre el periodo (1975-2010)

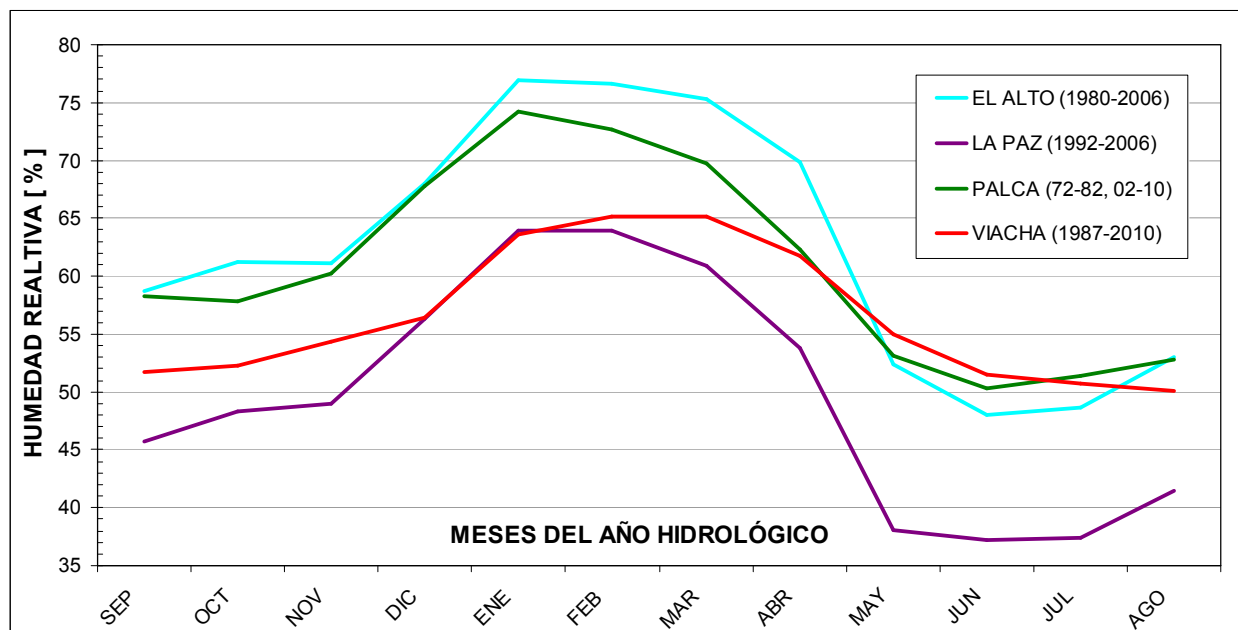


Figura 17: Humedad relativa media mensual en estaciones regionales (1975-2010)
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.4 Velocidad del viento

La tabla 14 y figura 18 muestra los valores de velocidad media del viento a nivel mensual y anual en estaciones regionales (las series originales pueden presentar lagunas, y el valor anual calculado es para el año hidrológico septiembre- agosto, por lo que puede que los promedios de valores mensuales no correspondan en la tabla presentada al valor anual).. Se observa que los vientos más intensos se presentan entre septiembre y octubre.

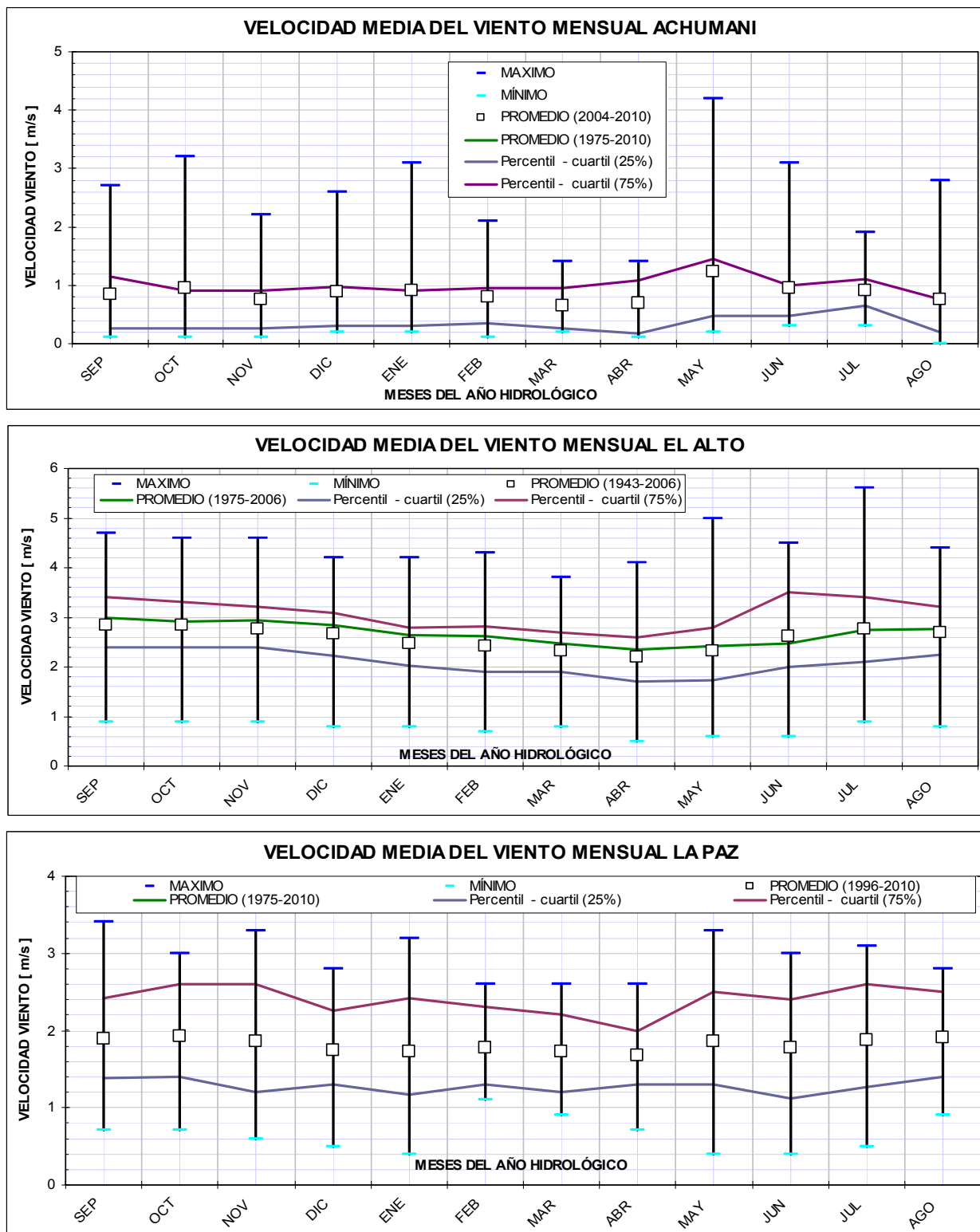


Figura 18: Estadísticas Velocidad media del viento mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

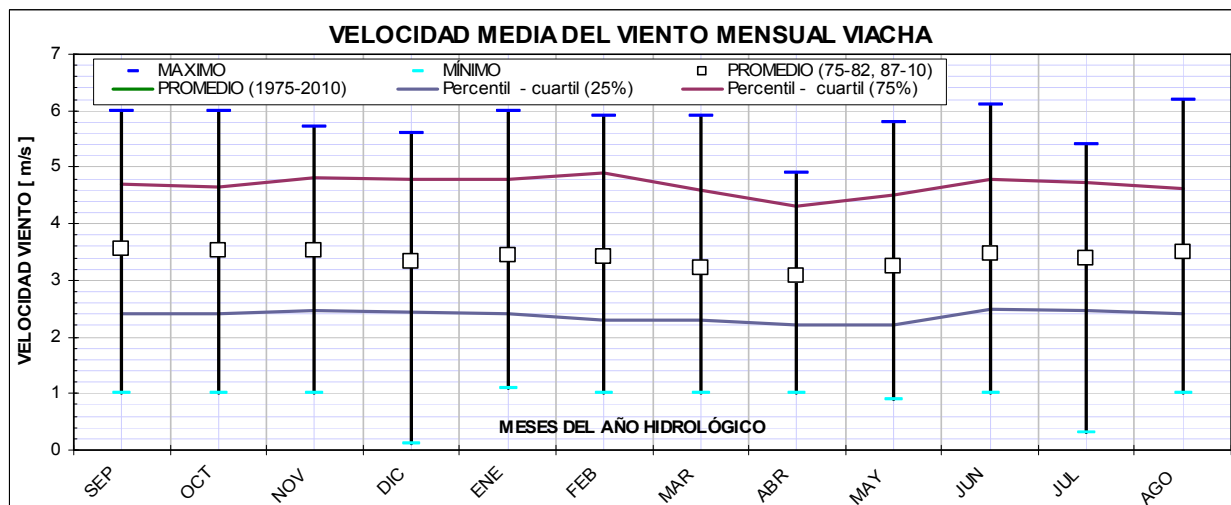
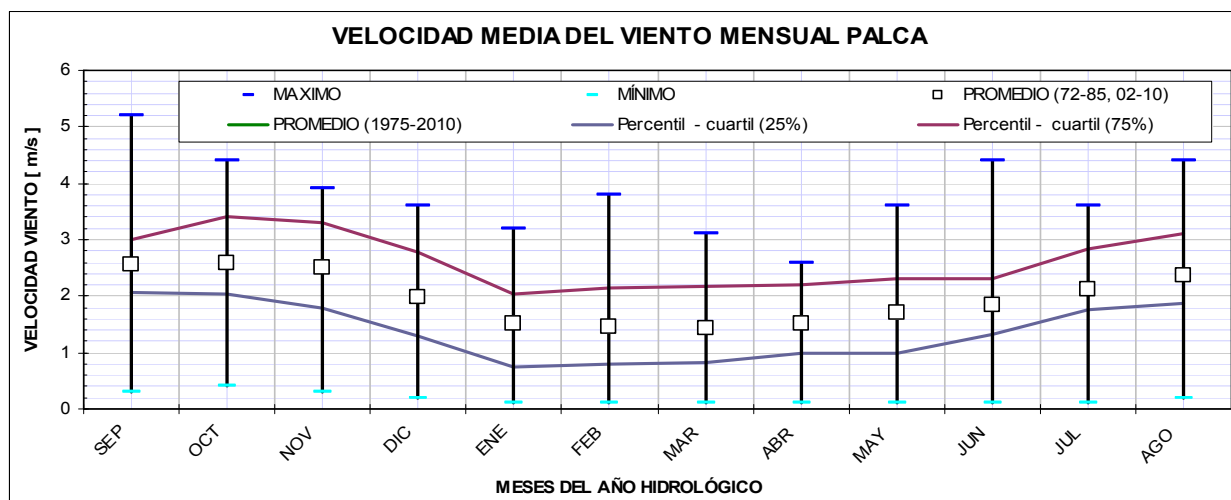
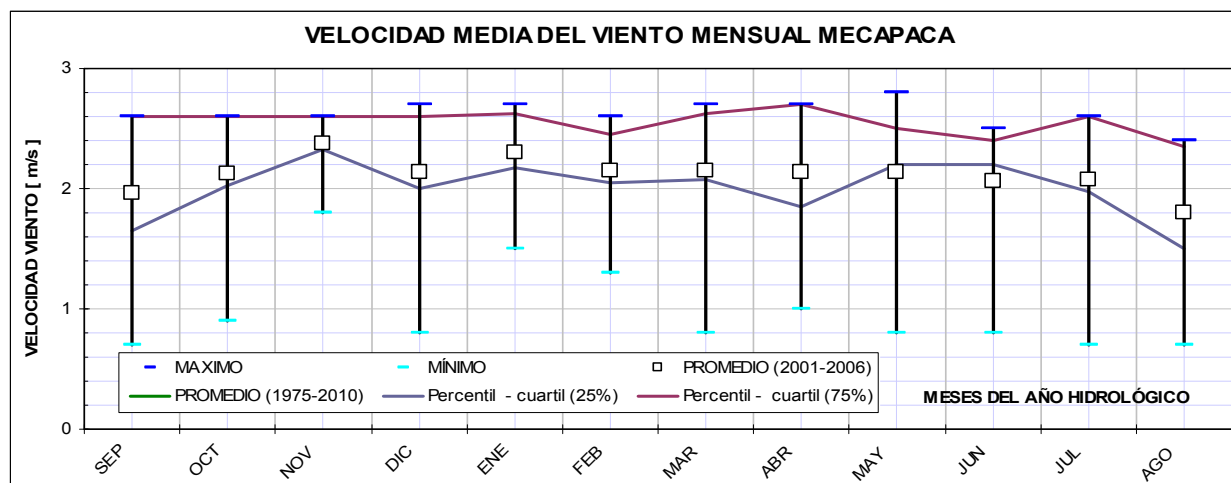


Figura 18: Estadísticas Velocidad media del viento mensual observada estaciones regionales (cont.)

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)



ESTACION ACHUMANI													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	3.1	2.1	1.4	1.4	4.2	3.1	1.9	2.8	2.7	3.2	2.2	2.6	2.2
MÍNIMO histórico	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
PROMEDIO (2004-2010)	0.9	0.8	0.6	0.7	1.2	0.9	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	0.9	0.9
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	0.3	0.4	0.3	0.2	0.5	0.5	0.7	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Percentil - cuartil (75%)	0.9	0.9	0.9	1.1	1.4	1.0	1.1	0.8	1.2	0.9	0.9	1.0	1.2
ESTACION EL ALTO													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	4.2	4.3	3.8	4.1	5.0	4.5	5.6	4.4	4.7	4.6	4.6	4.2	4.1
MÍNIMO histórico	0.8	0.7	0.8	0.5	0.6	0.6	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0
PROMEDIO (1943-2006)	2.5	2.4	2.3	2.2	2.3	2.6	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6
PROMEDIO (1975-2006)	2.6	2.6	2.5	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	2.9	2.9	2.8	2.6
Percentil - cuartil (25%)	2.0	1.9	1.9	1.7	1.7	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.4	2.2	2.2
Percentil - cuartil (75%)	2.8	2.8	2.7	2.6	2.8	3.5	3.4	3.2	3.4	3.3	3.2	3.1	3.1
ESTACION LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	3.2	2.6	2.6	2.6	3.3	3.0	3.1	2.8	3.4	3.0	3.3	2.8	2.8
MÍNIMO histórico	0.4	1.1	0.9	0.7	0.4	0.4	0.5	0.9	0.7	0.7	0.6	0.5	0.9
PROMEDIO (1996-2010)	1.7	1.8	1.7	1.7	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.7	1.9
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.1	1.3	1.4	1.4	1.4	1.2	1.3	1.3
Percentil - cuartil (75%)	2.4	2.3	2.2	2.0	2.5	2.4	2.6	2.5	2.4	2.6	2.6	2.3	2.5
ESTACION MECAPACA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	2.7	2.6	2.7	2.7	2.8	2.5	2.6	2.4	2.6	2.6	2.6	2.7	2.8
MÍNIMO histórico	1.5	1.3	0.8	1.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	1.8	0.8	0.7
PROMEDIO (2001-2006)	2.3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.8	2.0	2.1	2.4	2.1	2.1
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	2.2	2.0	2.1	1.9	2.2	2.2	2.0	1.5	1.6	2.0	2.3	2.0	1.1
Percentil - cuartil (75%)	2.6	2.5	2.6	2.7	2.5	2.4	2.6	2.4	2.6	2.6	2.6	2.6	1.1
ESTACION PALCA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	3.2	3.8	3.1	2.6	3.6	4.4	3.6	4.4	5.2	4.4	3.9	3.6	3.5
MÍNIMO histórico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2
PROMEDIO (72-85, 02-10)	1.5	1.5	1.4	1.5	1.7	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6	2.5	2.0	2.0
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.3	1.7	1.9	2.1	2.0	1.8	1.3	1.5
Percentil - cuartil (75%)	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.3	2.8	3.1	3.0	3.4	3.3	2.8	2.5
ESTACION VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	6.0	5.9	5.9	4.9	5.8	6.1	5.4	6.2	6.0	6.0	5.7	5.6	5.4
MÍNIMO histórico	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1	1.1
PROMEDIO (75-82, 87-10)	3.4	3.4	3.2	3.1	3.2	3.5	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.3	3.4
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.4	2.4
Percentil - cuartil (75%)	4.8	4.9	4.6	4.3	4.5	4.8	4.7	4.6	4.7	4.6	4.8	4.8	4.7

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 14: Estadísticos de la velocidad media mensual del viento en estaciones regionales

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

La figura 19 muestra los valores medios mensuales de temperatura media de las series de las estaciones regionales consideradas sobre el periodo (1975-2010)

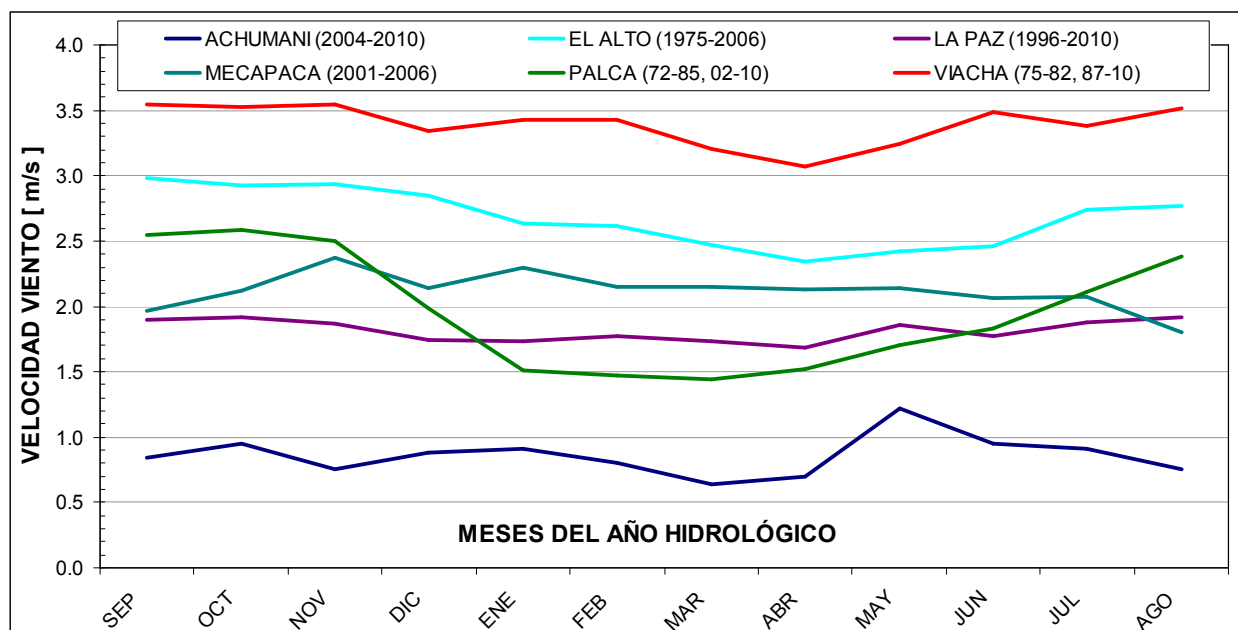


Figura 19: Velocidad media del viento mensual en estaciones regionales (1975-2010)
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.5 Insolación (horas de sol)

Ante la escasez de estaciones meteorológicas que midan la radiación solar incidente, se usa la insolación en horas sol/día para estimar la radiación neta. El número de horas en que irradia el sol sobre una estación meteorológica durante el día se mide con heliógrafo. La tabla 15 y las figura 20 y 21 muestran los estadísticos y los valores medios de insolación o horas de sol diarias a nivel mensual y anual en las estaciones de La Paz y Viacha sobre el periodo (1975-2010), que cuenta con registros de esta variable.

ESTACION LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	6.5	6.7	7.7	6.9	9.6	9.2	9.4	10.1	9.0	8.5	7.9	6.7	7.2
MÍNIMO histórico	3.2	2.5	3.7	5.1	7.6	6.1	5.7	5.3	6.6	5.5	4.6	5.1	5.9
PROMEDIO (1982-1991)	4.9	5.3	5.6	6.3	8.2	7.9	8.0	8.3	7.7	7.2	6.0	5.7	6.8
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	4.3	5.4	5.0	6.0	7.7	7.6	7.4	8.1	7.5	6.6	5.3	5.2	6.7
Percentil - cuartil (75%)	5.6	5.7	6.3	6.6	8.2	8.8	8.9	9.2	8.2	8.0	7.1	6.2	7.0

ESTACION VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	6.7	7.2	8.1	8.4	9.3	10.1	9.2	9.8	8.7	9.0	8.1	7.2	10.1
MÍNIMO histórico	3.3	4.2	3.7	5.9	8.0	6.2	8.0	7.4	5.8	5.2	5.5	5.7	6.7
PROMEDIO (87-92,04-09)	5.1	5.5	6.3	6.9	8.6	7.9	8.5	8.4	7.7	7.6	6.7	6.4	7.1
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	4.8	4.8	5.0	6.4	8.2	7.5	8.4	7.7	7.5	7.2	6.3	5.7	6.7
Percentil - cuartil (75%)	5.4	6.3	7.7	7.1	8.9	8.1	8.6	9.1	8.6	8.4	7.0	7.2	6.9

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 15: Estadísticos de horas sol/día media mensual en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

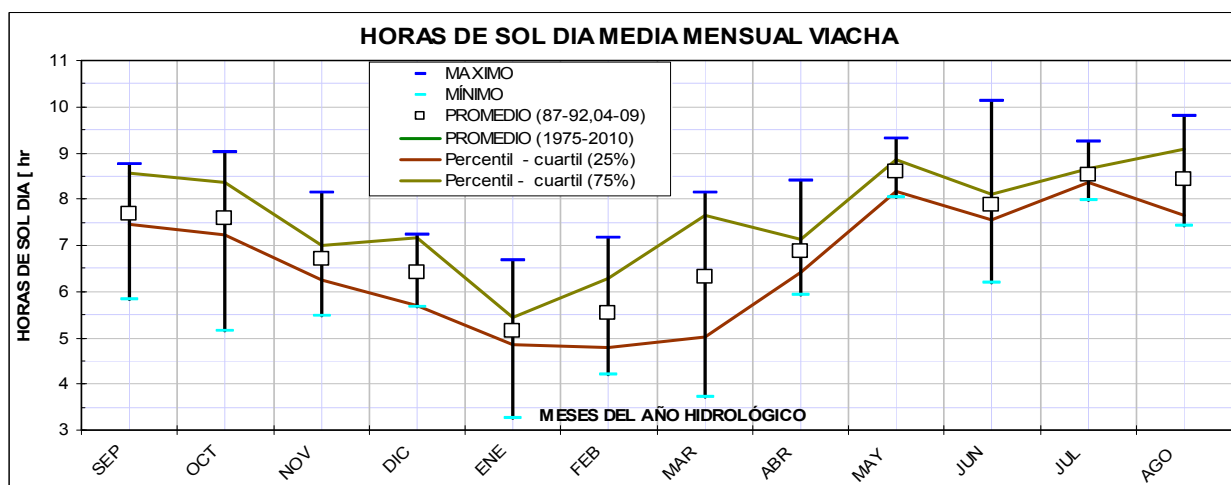
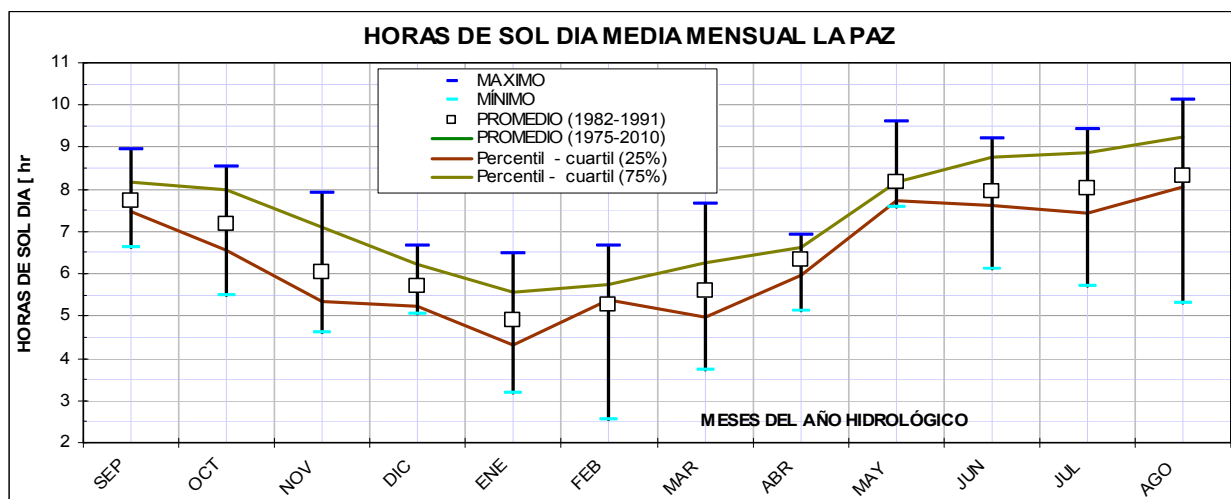


Figura 20: Estadísticas horas sol/día media mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

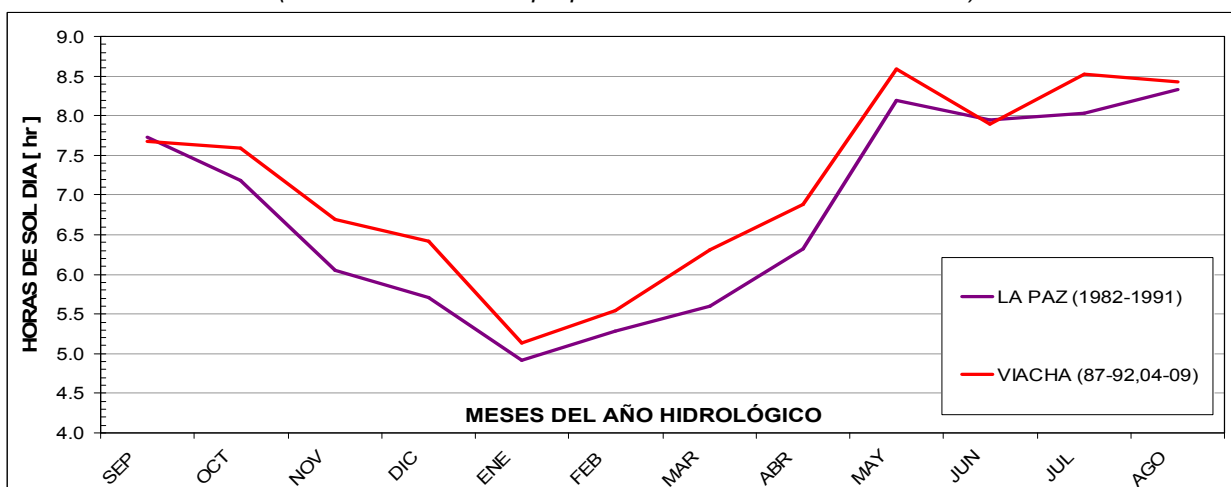


Figura 21: Horas sol/día media mensual en estaciones regionales (1975-2010)
(Fuente: Elaboración propia)



3.5.6 Evaporación en tanque

La evaporación medida en tanque evaporimétrico concentra la mayor parte de variables que intervienen en el fenómeno físico de evapotranspiración y aparenta ser una estimación confiable para la determinación de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, los efectos del instrumento de medición obligan a usar un coeficiente de ajuste (cuyo valor es generalmente menor a 1) para cada tanque en particular y un coeficiente para cada tipo de cultivo o vegetación.

La tabla 16 y la figura 22 muestran los valores de evaporación media mensual y anual medida en tanque Evaporimétrico, para las estaciones regionales (las series originales pueden presentar lagunas, y el valor anual calculado es para el año hidrológico septiembre- agosto, por lo que puede que la suma de valores mensuales no correspondan en la tabla presentada al valor anual). Con esta información es posible comparar y validar otros métodos para estimar el cálculo de la ETP.

ESTACION ACHUMANI													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	123	118	128	120	140	104	101	130	118	150	133	138	1335
MÍNIMO histórico	32	23	67	74	77	80	83	103	84	63	44	57	846
PROMEDIO (2005-2010)	70	75	93	96	98	88	89	117	109	111	95	90	1162
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	37	52	69	85	86	82	85	107	112	84	79	60	1094
Percentil - cuartil (75%)	105	100	112	105	99	88	89	124	117	143	112	133	1321

ESTACION LA PAZ													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	130	96	113	113	124	107	115	155	147	133	156	125	1382
MÍNIMO histórico	61	70	79	81	106	88	98	105	119	102	116	102	1253
PROMEDIO (1999-2005)	105	84	95	95	111	98	105	122	130	115	132	118	1309
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	98	77	81	84	106	91	99	115	119	108	125	118	1287
Percentil - cuartil (75%)	119	92	104	106	110	104	112	119	132	118	135	123	1331

ESTACION MECAPACA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	155	163	152	146	143	134	141	145	149	167	164	194	1667
MÍNIMO histórico	116	108	123	110	106	92	90	105	111	120	113	123	1333
PROMEDIO (2002-2010)	140	133	142	127	124	112	120	131	134	147	141	152	1585
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	138	119	138	119	118	95	114	127	128	135	129	134	1571
Percentil - cuartil (75%)	146	145	149	133	133	127	132	139	141	163	154	169	1663

ESTACION VIACHA													
ESTADÍSTICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAXIMO histórico	166	128	149	167	149	131	158	176	157	237	206	187	2519
MÍNIMO histórico	62	61	56	62	79	68	41	57	51	48	77	72	827
PROMEDIO (1976-2010)	115	103	110	115	119	111	115	124	122	133	125	120	1452
PROMEDIO (1975-2010)													
Percentil - cuartil (25%)	111	97	103	109	107	103	107	115	115	122	113	108	1388
Percentil - cuartil (75%)	131	114	124	123	127	120	125	136	135	145	136	131	1527

Nota: El valor ANUAL corresponde al AÑO HIDROLÓGICO de la serie observada, septiembre-agosto

Tabla 16: Estadísticos de evaporación en tanque en [mm] en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

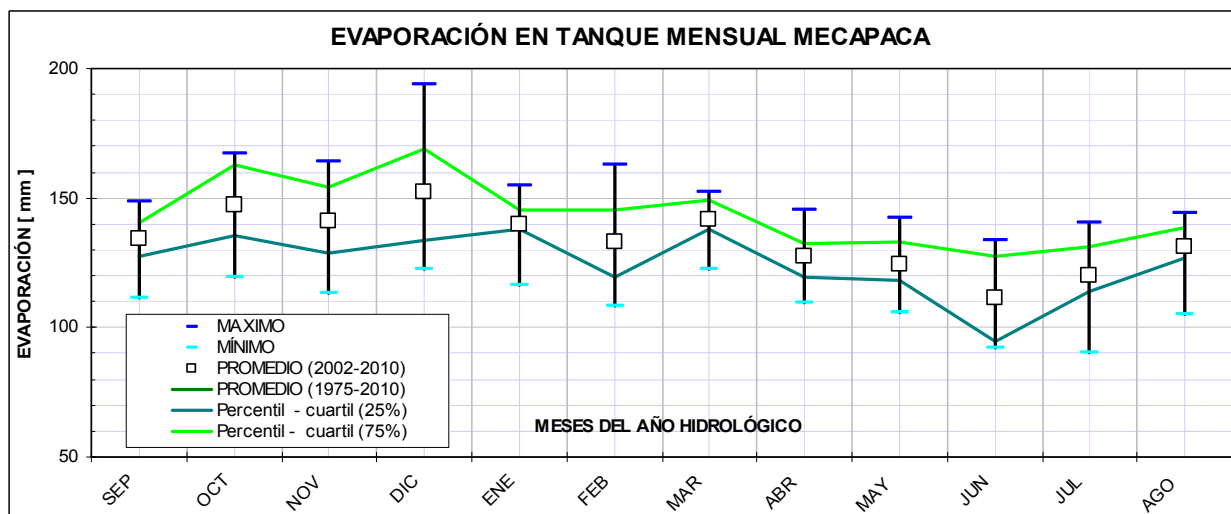
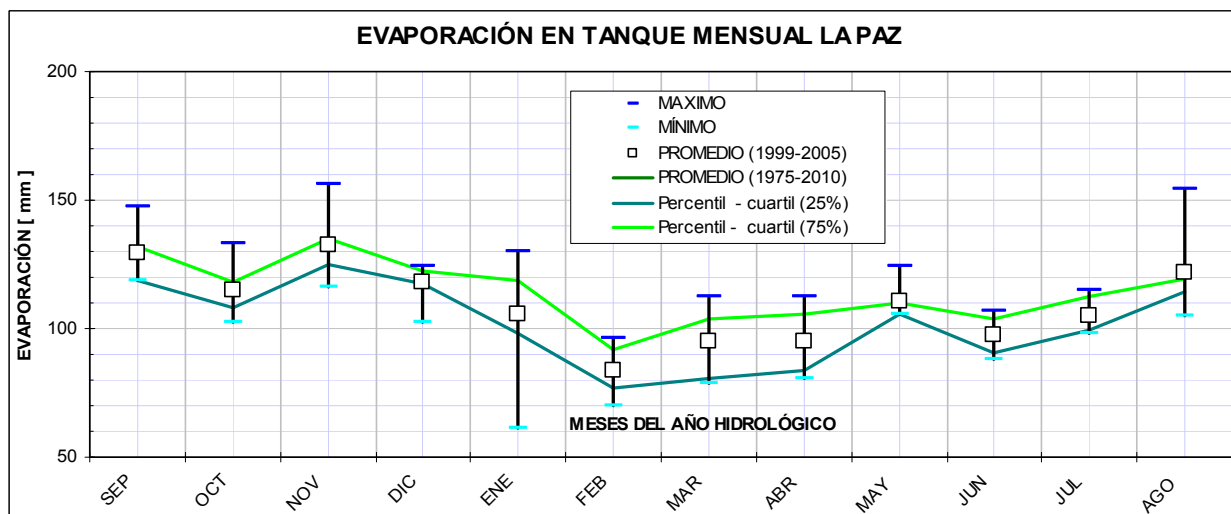
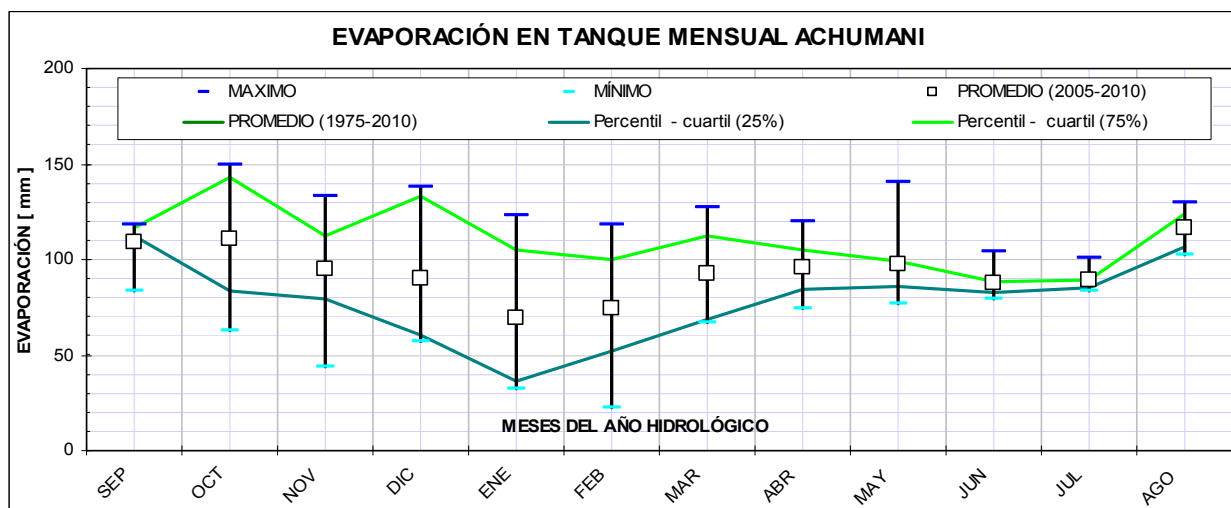


Figura 22: Estadísticas Evaporación en tanque mensual observada estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

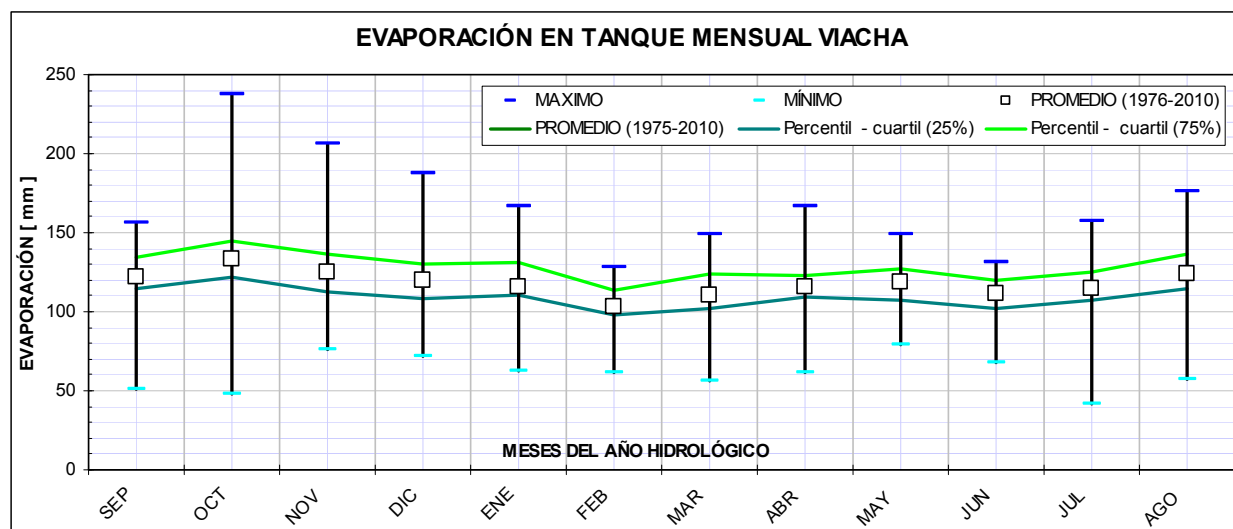


Figura 22: Estadísticas Evaporación en tanque mensual observada estaciones regionales (Cont.)

(Fuente: Elaboración propia en base a datos de SENAMHI)

La figura 23 muestra los valores medios mensuales de evaporación en tanque de las estaciones regionales consideradas sobre el periodo (1975-2010)

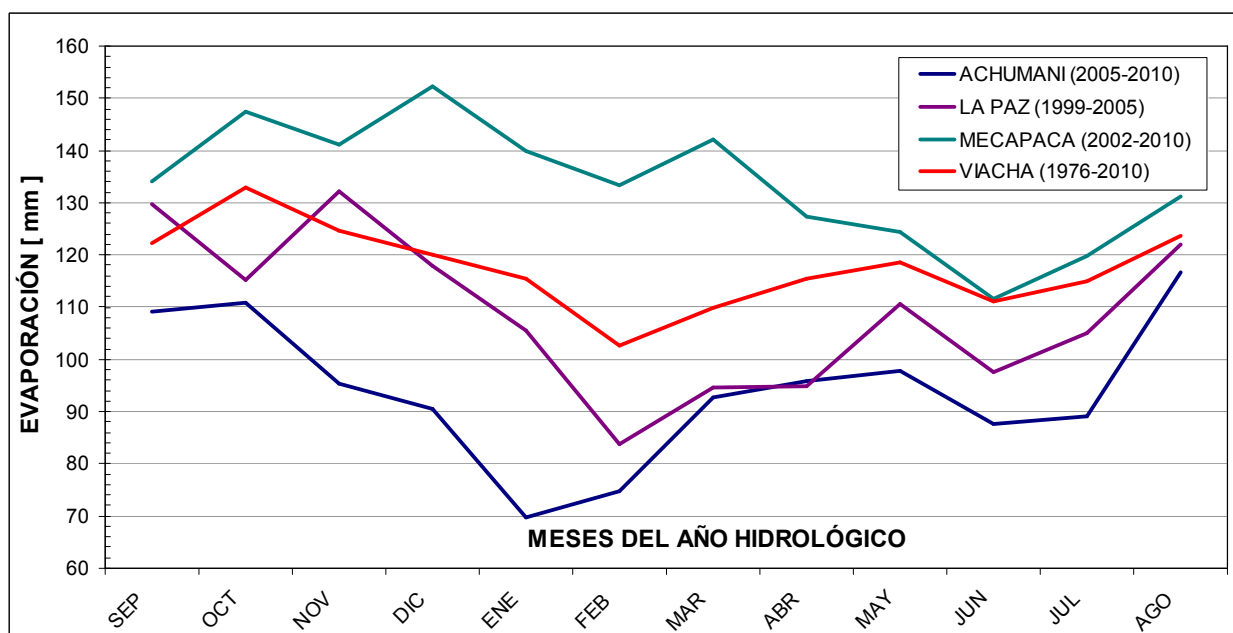


Figura 23: Evaporación en tanque mensual en estaciones regionales (1975-2010)

(Fuente: Elaboración propia)



3.5.7 Evapotranspiración potencial

En este punto se estudia la evaporación² y transpiración³. Estos fenómenos se estudian conjuntamente como evapotranspiración⁴ (ET), en la que intervienen diferentes variables meteorológicas. La ETP⁵ además permite estimar la demanda de agua para cultivos bajo riego.

Cuando no se poseen mediciones directas de la evaporación se recurre a métodos indirectos, generalmente fórmulas empíricas basadas en la ley de Dalton o en los factores meteorológicos que intervienen en el proceso, como temperatura del aire, humedad, radiación solar, horas del sol, velocidad del viento, presión atmosférica y otros.

La elección de un método es muy sensible respecto a la disponibilidad de Información meteorológica. Se definió aplicar el método de Penman para el estudio.

3.5.7.1 Método de Penman

El método de Penman, tiene una base físico-teórica y es recomendado por la OMM. La fórmula de Penman está basada en la combinación del balance de energía y la ecuación de transporte aerodinámico. Requiere de la medición de varios parámetros climáticos, lo que limita su uso hasta cierto punto, pero se ha encontrado que proporciona resultados consistentes y confiables para las diversas regiones del país.

Las principales suposiciones del método son que prevalezca un flujo de energía de estado permanente y que los cambios temporales en el almacenamiento del calor en el agua no sean significativos. Estas suposiciones limitan su aplicación a intervalos de tiempo diarios o mayores y a situaciones que no involucren gran almacenamiento de calor (ej. lagos grandes).

Tomando en cuenta lo anterior se adoptaron los siguientes criterios:

1. El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó inicialmente en las estaciones donde se miden los siguientes parámetros, expresados en forma de series de valores medios mensuales:

✓ Temperatura ambiente del aire [°C]

² La evaporación es el proceso físico por el cual el agua en estado líquido presente en el ambiente, se transforma a su estado gaseoso (vapor de agua), lo que requiere de aporte externo de energía.

³ La transpiración es el proceso físico por el que el agua que contiene las plantas exuda o se transforma a su estado gaseoso (vapor de agua).

⁴ La evapotranspiración (ET) es la cantidad de agua que se transfiere de la superficie terrestre (suelo y cuerpos de agua) a la atmósfera. Se compone de evaporación del agua líquida o sólida y de transpiración de las plantas.

⁵ La evapotranspiración potencial (ETP) es la cantidad de agua que, si estuviera disponible, sería evapotranspirada desde una superficie definida. La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que realmente pasa a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración. Su valor máximo sería la ETP.



- ✓ Humedad relativa del aire [%]
 - ✓ Velocidad del viento [m/s] (altura de 2 mts. sobre la superficie del terreno)
 - ✓ Número de horas de sol por día [hr]
2. En estaciones con registros no disponibles de no más de dos de los parámetros mencionados, se decidió usar los datos correspondientes a una estación cercana de la que se espera un comportamiento similar. Para la selección se evalúa las características físicas del entorno, en particular la topografía, ubicación geográfica y cobertura vegetal. El modelo digital de elevación ó de terreno fue especialmente útil. Los resultados de ETP se compararon con los registros de evaporación en tanque, en caso de que estos existiesen.
 3. No se realizó el cálculo de evapotranspiración potencial en estaciones que solamente cuenten con registros de temperatura.
 4. En caso de que los registros observados de estas variables no cubran el periodo de estudio definido, se tomaran en cuenta para esos años, los valores medios históricos.

$$E = \frac{\frac{\Delta \cdot H + E_a \cdot \gamma}{\Delta + \gamma}}{\frac{\Delta + \gamma}{\gamma}} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot H + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

La ecuación simplificada del balance de energía es:

Donde:

E: Evaporación del periodo en mm

$\Delta \gamma$: Se determina en función a la temperatura media diaria. Este cociente adimensional es una función de la temperatura y de la altitud que se debe multiplicar por el cociente P_o/P_z (P_o = presión al nivel del mar y P_z = presión a la altitud del lugar).

γ : Constante psicrométrica de valor 0.65

Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación “ee”, en función a la temperatura del aire, en el punto $\theta = \theta_{AIRE}$

$$\Delta = 1.3356 \cdot e_s \cdot \frac{17.27 \cdot 237.3}{(T + 237.3)^2}$$

H: Balance de energía diaria, calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$H = \frac{R_o}{59} \cdot \left(0.24 + 0.58 \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot (1 - \alpha) - \frac{\sigma \cdot \theta^4}{59} \cdot (0.56 - 0.0913 \cdot \sqrt{e}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \cdot \frac{n}{N} \right)$$

Donde:

R_o : Radiación solar diaria en el límite superior de la atmósfera, en (cal/cm²-día), estimada en función de la latitud y época del año



- n: Número de horas de brillo solar, aproximado hasta la décima, obtenido de los Heliógrafos
- N: Número máximo de horas de brillo solar aproximado hasta la décima, en función de la latitud del lugar
- α : Albedo de la superficie. Está en función al tipo de suelo, varia de 0 a 1
- θ : Temperatura media ambiente (aire) en ($^{\circ}\text{K}$), $\theta = (T[^{\circ}\text{C}] + 273)$
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann, igual a $1.18 \cdot 10^{-7}$ ($\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}$)
- e: Valor medio de la presión parcial del vapor de agua, en (mmHg), calculado con la

$$e = \frac{H_{RM}}{100} \cdot e_s$$

ecuación:

Siendo: HRM: Humedad relativa media en [%]

es: Presión de vapor de saturación (en función de la temperatura media ambiente)

Ea: Poder evaporante del aire en función del viento y del gradiente de la presión del vapor, ($\text{m}/\text{día}$), calculado a partir de la expresión:

$$E_a = 0.3473 \cdot \left(1 + 0.4 \cdot \left(\frac{10}{H_v} \right)^{\frac{1}{5.4}} \cdot V \right) \cdot (e_s - e)$$

Donde:

Hv: Altura a la que se mide la velocidad del viento en (m), (se consideró 2.0 m)

V: Velocidad media del viento en (m/s)

LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10 S	920	920	873	802	720	684	702	767	850	897	915	920
12 S	938	920	867	791	696	661	684	755	838	897	926	932
14 S	950	926	861	773	679	637	661	738	838	903	938	944
16 S	956	932	856	755	661	614	637	720	826	903	944	956
18 S	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
20 S	979	932	838	720	614	566	596	684	802	897	962	985
22 S	991	932	826	702	590	543	572	661	791	897	968	991
24 S	991	932	814	684	566	519	549	643	779	897	968	1003

Tabla 17: Radiación solar Ro en el límite superior de la atmósfera ($\text{cal}/\text{cm}^2\text{-día}$)

(Fuente: Unesco 1982)

LAT. SUD	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
10	12.60	12.40	12.10	11.90	11.70	11.50	11.60	11.80	12.00	12.30	12.60	12.70
12	12.70	12.50	12.20	11.80	11.60	11.40	11.50	11.70	12.00	12.40	12.70	12.80
14	12.73	12.44	12.06	11.67	11.35	11.19	11.26	11.54	11.91	12.30	12.64	12.81
16	12.84	12.50	12.06	11.62	11.25	11.06	11.15	11.47	11.89	12.34	12.73	12.93
18	12.95	12.57	12.07	11.57	11.15	10.94	11.04	11.40	11.88	12.39	12.83	13.06
20	13.06	12.64	12.08	11.51	11.04	10.81	10.92	11.33	11.87	12.43	12.93	13.19
22	13.18	12.71	12.09	11.46	10.94	10.68	10.80	11.25	11.85	12.48	13.03	13.32
24	13.30	12.78	12.10	11.40	10.83	10.54	10.68	11.18	11.84	12.53	13.14	13.45

Tabla 18: Medias mensuales de la duración astronómica del día N (horas)

(Fuente: Unesco 1982)



Tipo de suelo	α	Tipo de suelo	α	Tipo de suelo	α
Agua	0.02 - 0.06	Cereales	0.10 - 0.25	Nieve	0.40 - 0.90
Arcillas húmedas	0.02 - 0.08	Césped Verde	0.26	Pastos	0.26
Arcillas Secas	0.16	Césped seco	0.19	Pastos y cultivos	0.22
Arenas Claras	0.35 - 0.40	Cultivos	0.18	Rocas	0.13 - 0.15
Arenas Oscuras	0.35	Hielo	0.36 - 0.50	Tierras inundables	0.35
Bosques de pinos	0.10 - 0.14	Lechugas	0.22	Zonas urbanizadas	0.15 - 0.25
Bosques frondosos	0.18				

Tabla 19: Albedo α en función al tipo de suelo
(Fuente: Unesco 1982)

Los resultados del cálculo de ETP por el método de Penman son series mensuales de ETP para el periodo de estudio 1975-2010. Los valores medios mensuales de ETP calculados para las estaciones regionales se muestran en la tabla 20 y figura 24, además de los valores de evaporación medida en tanque y los valores de ETP calculados por el método de Hargraves.

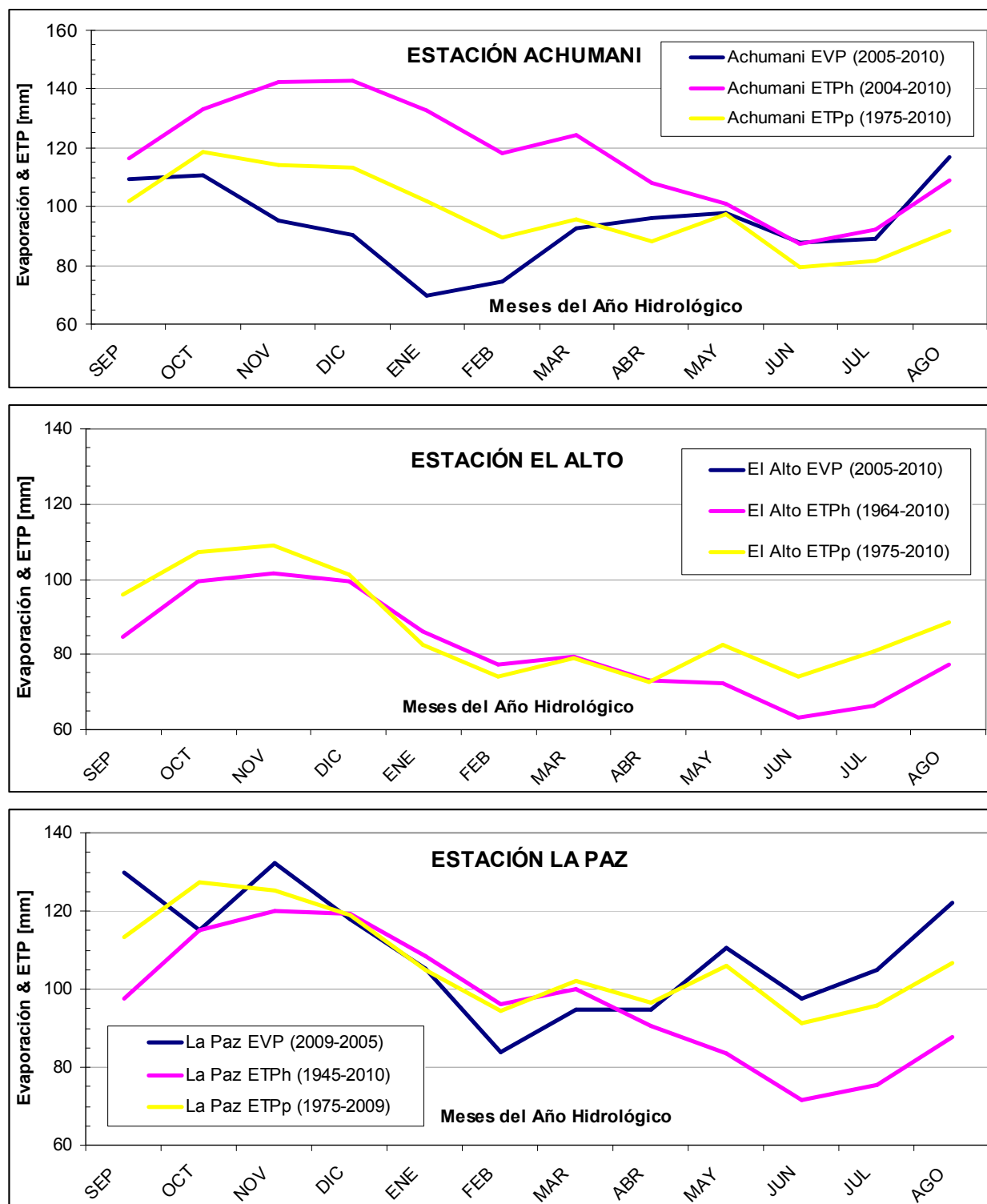
Estación	Periodo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Achumani EVP	2005-2010	70	75	93	96	98	88	89	117	109	111	95	90	1130
Achumani ETP _h	2004-2010	133	118	124	108	101	88	92	109	116	133	142	143	1408
Achumani ETP _p	1975-2010	102	90	96	88	97	79	82	92	102	119	114	113	1172
El Alto ETP _h	1964-2010	86	77	79	73	72	63	66	77	85	100	102	99	980
El Alto ETP _p	1975-2010	83	74	79	73	83	74	81	89	96	107	109	101	1049
La Paz EVP	2009-2005	105	84	95	95	111	98	105	122	130	115	132	118	1309
La Paz ETP _h	1945-2010	108	96	100	90	83	72	75	88	98	115	120	119	1165
La Paz ETP _p	1975-2009	105	94	102	96	106	91	96	107	113	127	125	119	1282
Mecapca EVP	2002-2010	140	133	142	127	124	112	120	131	134	147	141	152	1604
Mecapca ETP _h	2002-2010	137	120	123	107	101	90	95	108	118	139	142	146	1427
Mecapca ETP _p	1975-2010	115	103	111	104	102	90	94	103	112	133	133	126	1325
Palca ETP _h	72-85, 02-10	99	90	97	88	83	75	77	89	96	114	117	113	1138
Palca ETP _p	1970-2010	129	114	120	107	107	101	104	121	129	149	147	147	1475
Viacha EVP	1976-2010	115	103	110	115	119	111	115	124	122	133	125	120	1411
Viacha ETP _h	1965-2010	112	98	98	86	77	64	68	81	96	113	119	122	1134
Viacha ETP _p	1975-2010	118	103	107	94	90	81	85	102	114	133	131	131	1289

NOTA: EVP=Evaporación media en Tanque, ETP_h= Evapotranspiración potencial calculada por el método Hargraves, ETP_p= Evapotranspiración potencial calculada por el método Penman

Tabla 20: Evaporación y Evapotranspiración potencial media mensual en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia)

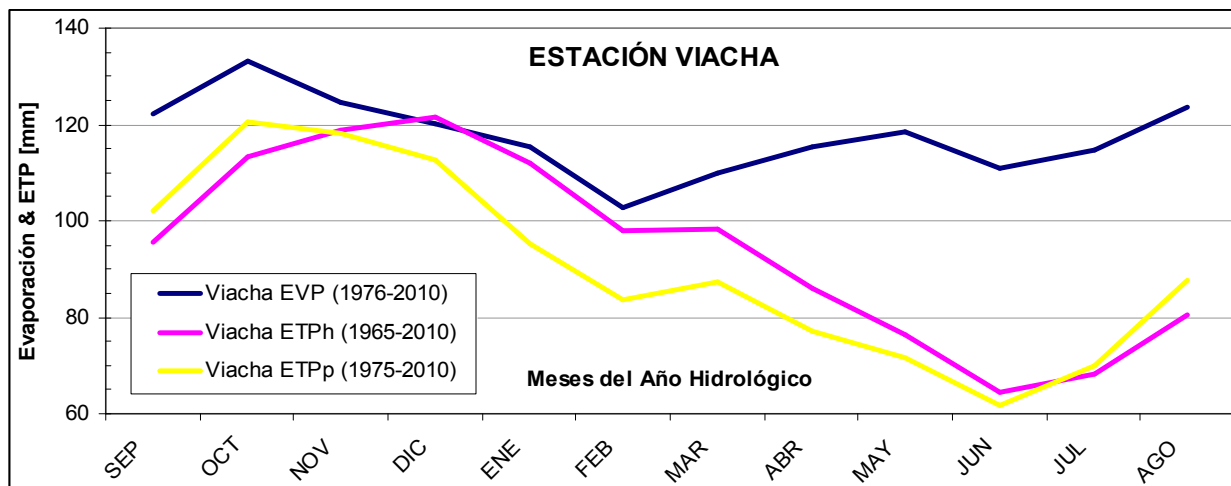
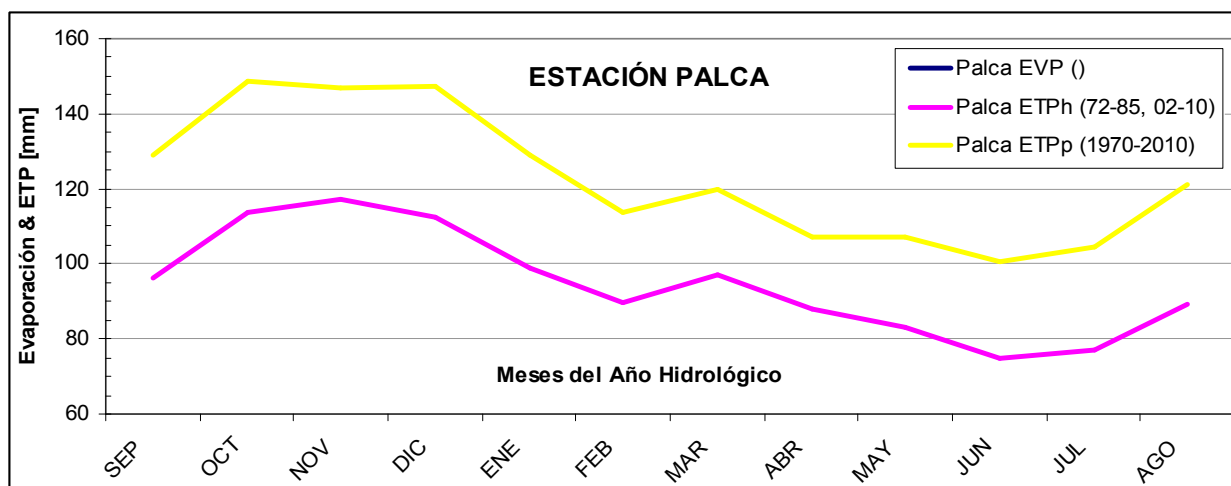
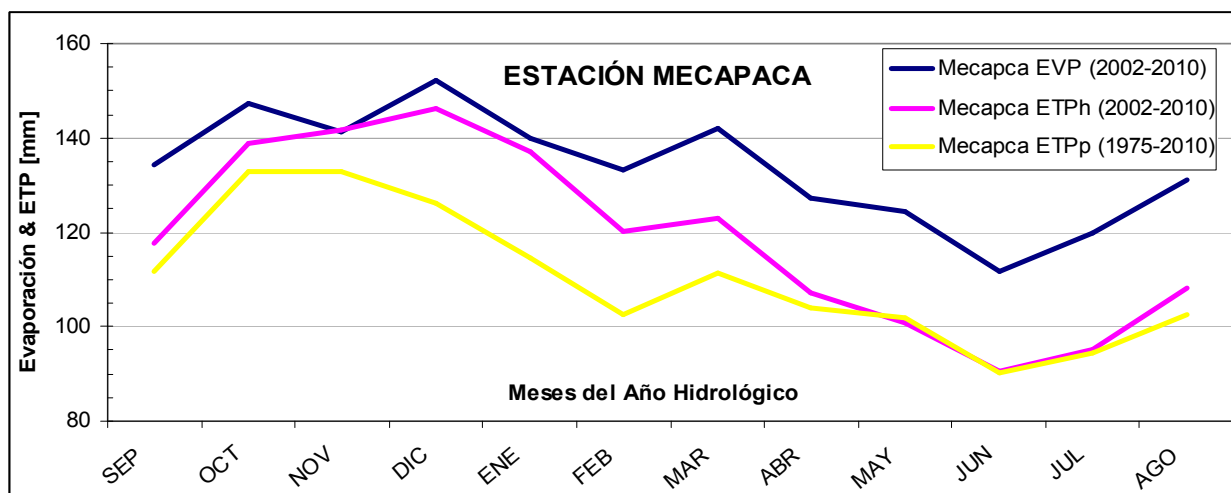
Los valores máximos de ETP se dan entre octubre y diciembre, cuando la temperatura y la radiación solar neta alcanzan sus valores máximos, esto para todas las estaciones regionales, y los valores mínimos de ETP se presentan en junio. Existe buena correspondencia entre Evaporación y ETP en las estaciones de La Paz, Mecapaca.

En la mayoría de los meses los valores de evaporación en tanque son mayores a los de ETP por Penman, como era de esperar.



NOTA: EVP=Evaporación media en Tanque, ETPH= Evapotranspiración potencial calculada por el método Hargraves, ETPp= Evapotranspiración potencial calculada por el método Penman

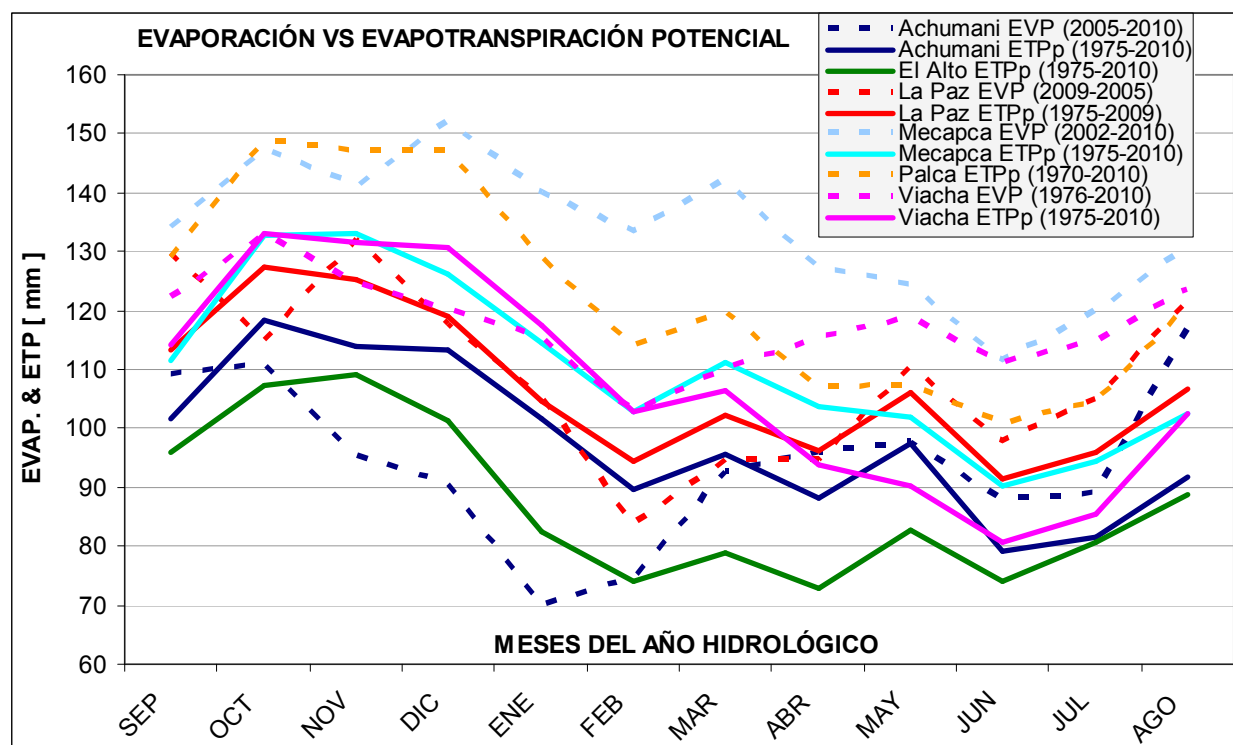
Figura 24: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia)



NOTA: EVP=Evaporación media en Tanque, ETPH= Evapotranspiración potencial calculada por el método Hargraves, ETPp= Evapotranspiración potencial calculada por el método Penman

Figura 24: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 25 muestra mensualmente los valores medios de la evapotranspiración potencial calculada por penman y de la evaporación medida en tanque para el periodo (1975-2010).



NOTA: EVP=Evaporación media en Tanque, ETPp= Evapotranspiración potencial calculada por el método Penman

Figura 25: Evaporación y Evapotranspiración potencial mensual en estaciones regionales
(Fuente: Elaboración propia)

3.6 Información Hidrométrica

Existen observaciones de caudal o de registros de aforos en ocho puntos de la cuenca del río Sajhuaya de estudio, que se llevaron a cabo por técnicos del proyecto durante el año 2010 (Figura 4). Los valores correspondientes a los aforos se presentan en la tabla 21 y la figura 26 muestra el límite de subcuencas, red de drenaje y puntos de aforo. Los puntos de aforo ubicadas en Jalancha, Khapi, Cebollullo y Tahuapalca determinan cuatro subcuencas cuya delimitación se muestra en la siguiente figura.

Es relevante mencionar que estos aforos fueron realizados durante los meses correspondientes y a las horas especificadas en la tabla. En este sentido, los valores pueden no ser representativos a caudales medios diarios y mensuales al no existir aforos durante las 24 horas del día ni todos los días del mes. Sin embargo sirven de referencia.



Figura 26: Límite de subcuencas, red de drenaje y estaciones de aforo
(Fuente: Elaboración propia)

Los datos de los puntos de aforos no serán rellenados por la baja disponibilidad de datos provenientes de observaciones, lectura de niveles, o aforos en sí y se utilizarán como valores de referencia para la comparación entre caudales simulados y estos caudales medidos o aforados.



CAUDAL JALANCHA VELO D NOVIA (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00			0,1300	0,0820	0,0460	0,1125	0,0810	0,0964
9:00			0,1300	0,0840	0,0500	0,1190	0,0843	0,1541
10:00			0,1700	0,0860	0,0580	0,1254	0,0979	0,3153
11:00			0,1990	0,0880	0,0600	0,1305	0,0993	0,4303
12:00			0,3000	0,0900	0,0480	0,1383	0,2030	0,5329
13:00			0,3800	0,1100	0,0560	0,1815	0,3718	0,6602
14:00			0,4784	0,1311	0,0591	0,2778	0,7090	1,3921
15:00			0,5376	0,1854	0,0900	0,3315	0,9036	1,2583
16:00			0,5068	0,2030	0,2200	0,4315	1,1069	0,8241
17:00			0,3500	0,1810	0,2900	0,5081	0,8101	1,1394
18:00			0,3410	0,1560	0,2990	0,4634	0,7133	0,8239
CAUDAL JALANCHA BOFEDAL (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00			0,0455	0,0453	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
9:00			0,0429	0,0435	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
10:00			0,0435	0,0433	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
11:00			0,0455	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
12:00			0,0455	0,0453	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
13:00			0,0462	0,0468	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
14:00			0,0501	0,0453	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
15:00			0,0501	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
16:00			0,0501	0,0453	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
17:00			0,0502	0,0462	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
18:00			0,0508	0,0460	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
CAUDAL JALANCHA MANANTIAL (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00			0,00415	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
9:00			0,00326	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
10:00			0,00416	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
11:00			0,00526	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
12:00			0,00412	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
13:00			0,00416	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
14:00			0,00399	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
15:00			0,00409	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
16:00			0,00496	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
17:00			0,00426	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
18:00			0,00416	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417	0,00417
CAUDAL JALANCHA TOTAL (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00			0,1797	0,1315	0,0963	0,1628	0,1313	0,1466
9:00			0,1761	0,1316	0,1003	0,1692	0,1345	0,2044
10:00			0,2176	0,1334	0,1083	0,1757	0,1482	0,3656
11:00			0,2498	0,1383	0,1103	0,1807	0,1495	0,4806
12:00			0,3496	0,1395	0,0983	0,1886	0,2532	0,5832
13:00			0,4303	0,1609	0,1063	0,2317	0,4221	0,7104
14:00			0,5325	0,1806	0,1093	0,3280	0,7593	1,4424
15:00			0,5918	0,2357	0,1403	0,3817	0,9539	1,3085
16:00			0,5620	0,2525	0,2703	0,4817	1,1571	0,8744
17:00			0,4045	0,2314	0,3403	0,5584	0,8604	1,1897
18:00			0,3959	0,2061	0,3493	0,5137	0,7636	0,8742

Tabla 21: Caudales medidos en Los puntos de aforo (2010)
(Fuente: Agua Sustentable, Proyecto Illimani)



CAUDAL TOMA AGUA KHAPI (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00								
9:00							0,0965	
10:00							0,1165	0,2980
11:00			0,1397				0,1565	
12:00							0,2465	0,4674
13:00							0,2965	0,6771
14:00			0,1500	0,1843			0,3765	0,8513
15:00			0,1057	0,1742			0,3965	0,9140
16:00			0,0882	0,1455			0,4965	1,0771
17:00			0,0363				0,4965	1,2306
18:00			0,0237				0,4015	

CAUDAL PUENTE COHONI (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00							0,0051	0,0822
9:00							0,0056	0,1668
10:00	0,4122				0,0268	0,0138	0,0062	0,1721
11:00					0,0327	0,0132	0,0447	0,1475
12:00						0,0204		0,1239
13:00						0,0213	0,0079	0,0968
14:00						0,0235	0,0816	0,1064
15:00						0,0383	0,0710	0,1071
16:00						0,0406	0,3021	0,2079
17:00						0,0373	0,3148	0,4179
18:00						0,0300	0,2286	0,6961

CAUDAL CEBOLLULLO (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00								
9:00								
10:00								
11:00					0,0221			
12:00					0,0299			
13:00								
14:00								
15:00								
16:00								
17:00								
18:00								

CAUDAL TAHUAPALCA (m ³ /s)								
HORA	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
8:00								
9:00	0,9285							
10:00						0,0486		0,0425
11:00						0,0499		
12:00						0,0483		
13:00	0,9284	0,1726	0,0780	0,0540	0,0427		0,0222	
14:00			0,0640	0,0461				
15:00								
16:00					0,0159	0,0084		
17:00								
18:00								

Tabla 21: Caudales medidos en los puntos de aforo (2010) (continuación)
(Fuente: Agua Sustentable, Proyecto Illimani)



4 MODELACIÓN GLACIOHIDROLÓGICA EN LA CUENCA DE ESTUDIO

4.1 Marco teórico - conceptual

4.1.1 Introducción

La modelación hidro-glaciológica es fundamental para intentar simular y estimar el escurrimiento de cuencas con áreas glaciadas o con cobertura nival, así como para evaluar los cambios en la criósfera asociados al cambio climático.

En regiones de alta montaña, la nieve y el hielo dificultan el estudio de balance hídrico al almacenar temporalmente el agua y dejarla escurrir en diferentes periodos de tiempo (*Jansson et al., 2003*). Esto produce diferentes regímenes de caudal a nivel anual y diario que difieren significativamente de aquellos que se producen en cuencas convencionales (*Röthlisberger y Lang, 1987*). En consecuencia, el éxito de la modelación hidrológica en cuencas glaciadas depende en gran medida de la cuantificación precisa del proceso de fusión de la nieve o hielo esencialmente y en menor medida el proceso precipitación – escurrimiento.

Los modelos para el cálculo de los caudales de deshielo, generalmente se dividen en dos categorías: **(1)** modelos de balance energético, que cuantifican el derretimiento como un residuo en la ecuación de balance de energía, y **(2)** modelos de índice de temperatura, que asumen una relación empírica entre la temperatura del aire y la tasa de derretimiento.

Aunque los modelos de balance de energía tienen una sólida base física, su uso no es muy frecuente, debido a que requieren muchos datos de entrada, donde la principal limitante para su aplicación en cuencas de montaña es la escasa información.

Los modelos de índice de temperatura han sido los más difundidos por cuatro razones:

- a) amplia disponibilidad de datos de temperatura del aire
- b) interpolación y pronóstico sencillo de los datos de temperatura del aire
- c) en general buen rendimiento (resultados) a pesar de su simplicidad
- d) facilidad de cálculo.

Los modelos de índice de temperatura son comúnmente usados por los bajos requerimientos de datos de entrada y buenos resultados que reportan así como la simplicidad en su cálculo (*Li y Williams, 2008*).

Estos modelos se inspiran en una proporcionalidad entre caudales y temperaturas, es decir una ecuación lineal que depende de un coeficiente “b” de la forma: $Q_d = b \cdot (T_d - T_{ref})$

Para el día “d”, el caudal diario (Q_d) está vinculado a la diferencia de la temperatura diaria (T_d) menos una temperatura de referencia (T_{ref}), elegida generalmente igual a cero (*Ribstein,*



Francou, Rigaudière y Saravia, 1995). El factor de proporcionalidad “b” es un parámetro clave, que resume la compleja interacción entre los diversos componentes energéticos.

Estos modelos de índice de temperatura fueron utilizados en hidrología de glaciares, en una forma a veces más sofisticada con variación estacional del parámetro “b” (*Braun y Aellen, 1990*) o formulando modelos que incluían a la radiación de onda corta o al albedo (*Cazorzi y Dalla Fontana, 1996; Kane y Gieck, 1997; Dunn y Colohan, 1999; Hock, 1999; Pellicciotti, 2005; Li y Williams, 2008*).

4.1.2 Base física de los modelos de índice de temperatura

Muchos estudios han revelado una alta correlación entre la temperatura del aire y la tasa de derretimiento. Aunque introducen simplificaciones en los procesos complejos, y que son evaluados de mejor manera por los modelos de balance de energía de la superficie del glaciar. Los modelos de índice de temperatura alcanzan eficiencias comparables a las obtenidas con los modelos de balance de energía a escala puntual (*WMO, 1986*). Algunos estudios realizados sobre glaciares tropicales (*e.g. Sicart, 2006*) muestran una subestimación de los caudales por métodos hidrológicos atribuidos a la ausencia de mediciones de precipitación en cuencas de montaña así como a la deficiencia que presentan los instrumentos de medición. Sin embargo, se observa que los métodos hidrológicos reproducen variaciones interanuales similares a las obtenidas con los métodos glaciológicos.

La elección de la temperatura del aire como único índice de la energía de fusión sin tener en cuenta el efecto predominante de la radiación neta como fuente de energía se atribuye a la alta correlación que existe entre la temperatura y varios componentes del balance de energía (*Ambach, 1988; Sato et al., 1984; Braithwaite y Olesen, 1990; Lang y Braun, 1990*).

Ohmura (2001) analizó la base física de los modelos de índice de temperatura y encontró que tanto la radiación de onda larga como el flujo sensible de calor, que proveen alrededor de $\frac{3}{4}$ de la energía total de fusión, están afectados en gran medida por la temperatura del aire, razón por la cual existe una estrecha relación entre el derretimiento (fusión) y la temperatura.

Además, la temperatura está influenciada en parte por la radiación global, la segunda fuente de energía para la fusión.

4.1.3 Factor grado – día

Los modelos de índice de temperatura o de grado – día están basados en una relación empírica entre la ablación y la temperatura del aire, comúnmente expresada como temperaturas positivas. La formulación más elemental relaciona la cantidad de nieve o hielo fusionada, M (mm), durante un periodo de “n” intervalos, Δt (d), con la temperatura media del aire en cada intervalo, T^+ (°C). El factor de proporcionalidad, el factor grado – día (DDF) se expresa en $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.



$$\sum_{i=1}^n M_i = DDF \cdot \sum_{i=1}^n T_i^+ \cdot \Delta t$$

Comúnmente, se emplea un intervalo de tiempo diario para la integración de las temperaturas, aunque se pueden elegir otros periodos de tiempo (horario o mensual).

4.2 Estructura matemática del modelo

Cada mes, el agua producida por el deshielo y la precipitación es calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{n+1} = \underbrace{[c_{Sn} \cdot (a_n \cdot 30) \cdot (T_n + \Delta T_n) \cdot S_n]}_{\text{Fusión hielo-nieve}} + \underbrace{c_{Rn} \cdot P_n}_{\text{Precipitación efectiva}} \cdot \underbrace{\frac{A \cdot 10000}{86400 \cdot 30} \cdot (1 - k_{n+1})}_{\text{Recesión hidrografa}} + Q_n \cdot k_{n+1}$$

Donde:

Q =	[m ³ /s]	Cauda medio mensual
C =	[]	Coeficiente de escurrimiento que expresa las pérdidas como razón (escurrimiento/precipitación)
		C_S : referida al aporte de la fusión del glaciar
		C_R : referida al aporte de la precipitación.
α =	[cm/°C·día]	factor grado – día que indica la pérdida de nieve resultante del aumento de 1°C de temperatura
T =	[°C · día]	número de grados día
S =	[A _C / A _T]	razón del área cubierta de nieve al área total
P =	[cm]	precipitación que contribuye al escurrimiento
T _{crítica}	[°C]	umbral de temperatura prefijado, que determina si el aporte de la precipitación líquida es inmediata o si se mantiene almacenada temporalmente en el área no cubierta de nieve hasta que ocurre la fusión de nieve (precipitación sólida).
A =	[km ²]	área de la cuenca o zona de elevación
k =	$k = \frac{Q_{m+1}}{Q_m}$	coeficiente de recesión que indica el decaimiento del hidrografa en un periodo sin lluvia ni fusión.
m, m+1		secuencia de meses durante un periodo de recesión real
n =		secuencia de meses durante un periodo de calibración o simulación
	$\frac{10000}{86400 \cdot 30}$	factor de conversión de [cm · km ² / mes] a [m ³ /s]

La temperatura, precipitación y cobertura de nieve son variables que deben determinarse para cada periodo, o estimarse en forma de series temporales para la simulación.



Los parámetros del modelo (c_s , c_R , ΔT , $T_{crítica}$, k) son característicos para cada cuenca o, de manera más general, para cada clima. Su calibración u optimización no se alcanza por comparación con datos históricos. Pueden ser derivados a partir de mediciones realizadas sobre la cuenca de estudio, sobre cuencas similares o estimadas por criterio hidrológico que tome en cuenta las características de la cuenca, las leyes físicas y las relaciones teóricas o regresiones empíricas. En nuestro caso se tomaran valores referenciales de cuenca similares instrumentadas.

4.3 Parámetros de entrada

4.3.1 Morfometría de cuencas glaciares

4.3.1.1 Delimitación de subcuencas y las zonas de elevación

La cuenca es delimitada a partir de la ubicación de una estación de aforo o cualquier punto sobre el curso principal, y con herramientas de sistemas de información geográfica, un modelo digital de terreno, cartografía digital IGM o mapa topográfico se traza la divisoria de aguas.

El mapa topográfico empleado en el presente estudio fue obtenido a partir de restitución fotogramétrica con una resolución de 5 metros (*ver figura 27*).

Como el gradiente altitudinal entre el punto más alto y el punto de salida de la cuenca excede los 500 metros (aprox. 4000 metros), es recomendable discretizar la cuenca en subcuencas e intercuencas que contengan un gradiente altitudinal aproximado de 500 metros de elevación. Esto para el caso de subcuencas con cobertura glacial o nival.

Una vez definidas las zonas altitudinales, y caracterización de cobertura (zonas glaciales o no glaciales), las diferentes variables y parámetros de las subcuencas son aplicadas en el modelo para la simulación glacio-hidrológica. Esta aplicación requiere el trazado de la curva hipsométrica (área – elevación) para la estimación de la altura media de cada zona. Para esto se utilizó herramientas de los sistemas de información geográfica.

La tabla 2 muestra la morfometría de las subcuencas con cobertura glacial y/o nival.

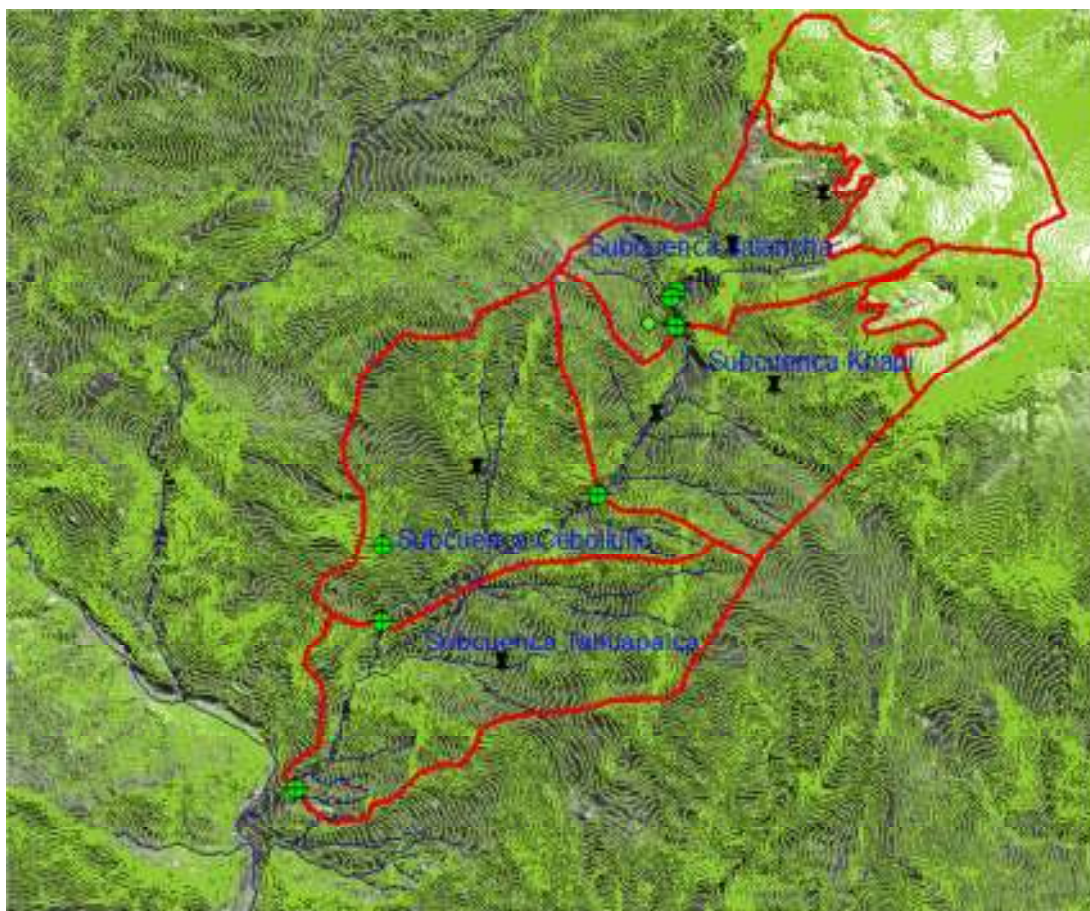


Figura 27: Mapa topográfico (curvas cada 20 metros), delimitación de subcuencas de estudio y puntos de aforo
(Fuente: Elaboración propia)

4.3.1.2 Curva hipsométrica

La curva área – elevación muestra el área dominada por un rango de altitud definida por dos cotas. Se traza calculando las áreas que encierran los límites de las zonas de elevación y otras curvas de nivel adicionales (ver figura 28 y 29).

La elevación media de cada zona se determina a partir de esta curva igualando las áreas por encima y por debajo de la altura media. Este valor es utilizado para extrapolar las temperaturas y precipitaciones de la estación base.

La curva hipsométrica mostrada a continuación fue obtenida a partir del modelo digital de elevación (DEM), y procesamiento bajo plataforma SIG.

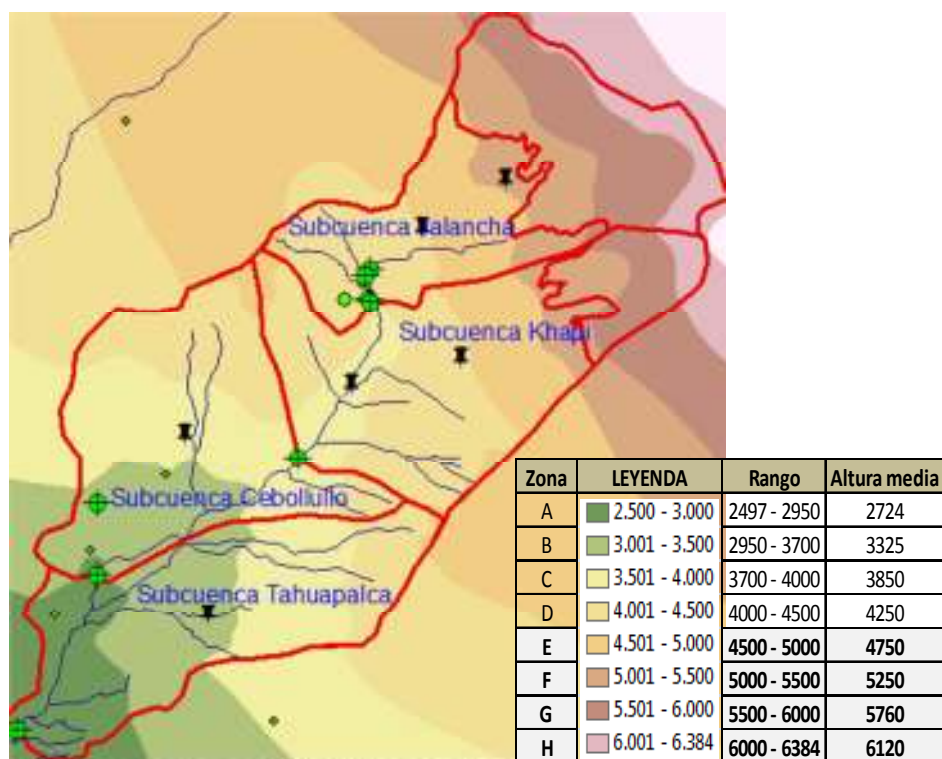


Figura 28: Rangos altitudinales o zonas de elevación en la cuenca del Río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia)

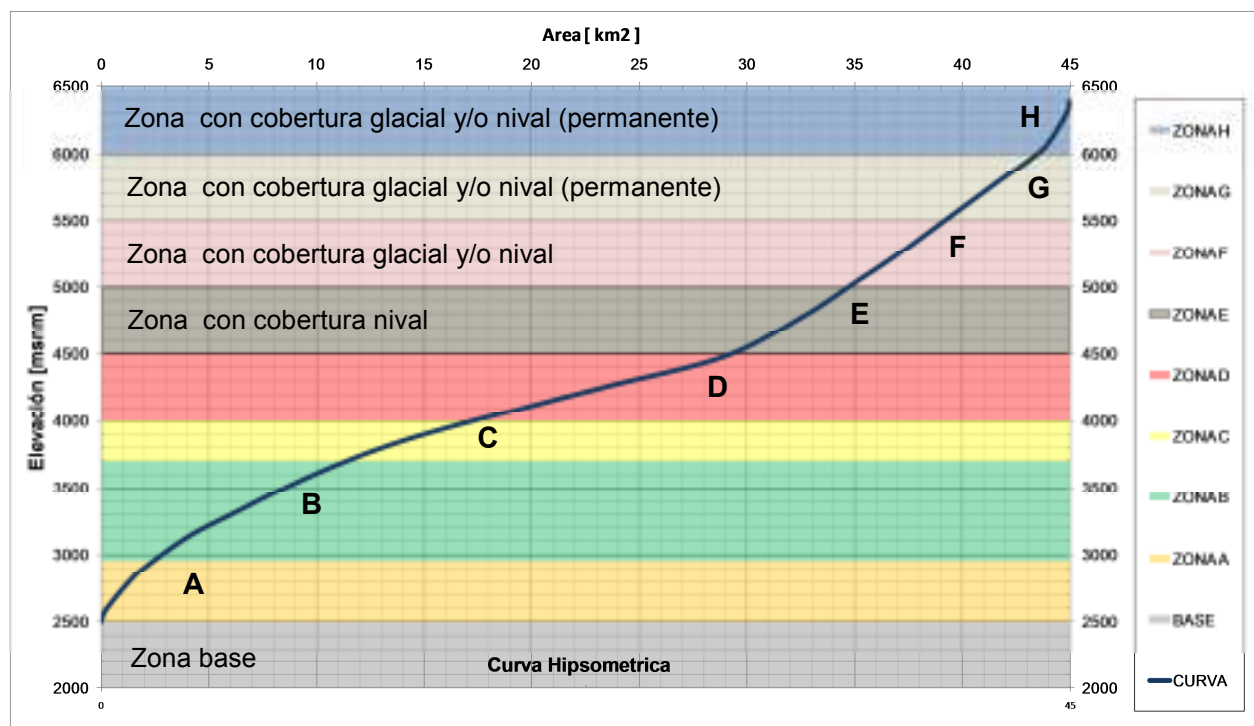


Figura 29: Curva hipsométrica de la cuenca del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia)



4.3.2 Datos meteorológicos de entrada

4.3.2.1 Temperatura

La temperatura media (número de grados – día) permite estimar la cantidad de agua que proviene del deshielo por efecto de la fusión, así como la naturaleza de la precipitación (sólida o líquida).

Si el número de grados día ($T+\Delta T$) es negativo, se fija automáticamente en 0°C de manera que no existan valores negativos de caudal.

El perfil termo-altimétrico estimado y descrito en el punto 3.5.2.1 permite generar series sintéticas de temperaturas para las diferentes zonas altitudinales (cuencas con y sin cobertura glacial y/o nival), definidas en la curva hipsométrica del punto anterior (4.3.1.2).

La tabla 22 y figura 30 presentan un resumen de los estadísticos de las series sintéticas recreadas de temperatura media mensual para las diferentes zonas altitudinales sobre el periodo 1975-2009. Estas series sintéticas son incluidas en la base de datos Hydracess. La figura 31 muestra las temperaturas medias por zonas altitudinales.

ZONA 'A' Altura media 2724 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	20.0	19.6	19.5	18.9	17.8	16.6	16.6	17.3	18.1	18.8	20.2	20.1	20.2
Min	16.7	16.9	17.1	16.8	15.5	14.8	14.4	15.2	15.7	17.3	17.3	17.4	14.4
Promedio	18.1	18.1	18.1	17.8	16.9	15.9	15.6	16.3	17.1	18.0	18.5	18.5	17.4
cuartil 25%	17.7	17.8	17.6	17.5	16.6	15.6	15.3	15.9	16.7	17.6	18.0	18.0	17.1
cuartil 75%	18.7	18.6	18.5	18.0	17.3	16.3	15.9	16.8	17.4	18.3	18.8	19.0	17.7
ZONA 'B' Altura media 3325 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	15.5	15.2	15.0	14.5	13.3	12.2	12.2	12.9	13.6	14.4	15.8	15.6	15.8
Min	12.2	12.5	12.7	12.3	11.1	10.4	9.9	10.8	11.3	12.8	12.8	12.9	9.9
Promedio	13.7	13.7	13.6	13.3	12.4	11.5	11.2	11.9	12.6	13.5	14.0	14.1	13.0
cuartil 25%	13.3	13.3	13.1	13.0	12.2	11.2	10.9	11.5	12.2	13.1	13.5	13.6	12.7
cuartil 75%	14.2	14.1	14.0	13.6	12.8	11.8	11.5	12.3	12.9	13.8	14.4	14.5	13.3
ZONA 'C' Altura media 3850 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	11.6	11.3	11.1	10.6	9.4	8.3	8.3	9.0	9.7	10.5	11.9	11.7	11.9
Min	8.3	8.6	8.8	8.4	7.2	6.5	6.0	6.9	7.4	8.9	8.9	9.0	6.0
Promedio	9.8	9.8	9.7	9.4	8.5	7.6	7.3	8.0	8.7	9.6	10.2	10.2	9.1
cuartil 25%	9.4	9.4	9.2	9.1	8.3	7.3	7.0	7.6	8.3	9.2	9.6	9.7	8.8
cuartil 75%	10.3	10.2	10.1	9.7	8.9	7.9	7.6	8.4	9.0	9.9	10.5	10.6	9.4

Tabla 22: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)



ZONA 'D' Altura media 4250 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	8.7	8.3	8.2	7.6	6.5	5.3	5.3	6.0	6.8	7.5	8.9	8.8	8.9
Min	5.4	5.6	5.8	5.5	4.2	3.5	3.1	3.9	4.4	6.0	6.0	6.1	3.1
Promedio	6.8	6.9	6.8	6.5	5.6	4.6	4.3	5.0	5.8	6.7	7.2	7.3	6.1
cuartil 25%	6.4	6.5	6.3	6.2	5.3	4.3	4.0	4.6	5.4	6.3	6.7	6.7	5.8
cuartil 75%	7.4	7.3	7.2	6.7	6.0	5.0	4.6	5.5	6.1	7.0	7.5	7.7	6.4
ZONA 'E' Altura media 4750 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	5.0	4.6	4.5	3.9	2.8	1.6	1.6	2.3	3.1	3.8	5.2	5.1	5.2
Min	1.7	1.9	2.1	1.8	0.5	-0.2	-0.6	0.2	0.7	2.3	2.3	2.4	-0.6
Promedio	3.1	3.2	3.1	2.8	1.9	0.9	0.6	1.3	2.1	3.0	3.5	3.6	2.4
cuartil 25%	2.7	2.8	2.6	2.5	1.6	0.6	0.3	0.9	1.7	2.6	3.0	3.0	2.1
cuartil 75%	3.7	3.6	3.5	3.0	2.3	1.3	0.9	1.8	2.4	3.3	3.8	4.0	2.7
ZONA 'F' Altura media 5250 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	1.3	0.9	0.8	0.2	-0.9	-2.1	-2.1	-1.4	-0.6	0.1	1.5	1.4	1.5
Min	-2.0	-1.8	-1.6	-1.9	-3.2	-3.9	-4.3	-3.5	-3.0	-1.4	-1.4	-1.3	-4.3
Promedio	-0.6	-0.5	-0.6	-0.9	-1.8	-2.8	-3.1	-2.4	-1.6	-0.7	-0.2	-0.1	-1.3
cuartil 25%	-1.0	-0.9	-1.1	-1.2	-2.1	-3.1	-3.4	-2.8	-2.0	-1.1	-0.7	-0.7	-1.6
cuartil 75%	0.0	-0.1	-0.2	-0.7	-1.4	-2.4	-2.8	-1.9	-1.3	-0.4	0.1	0.3	-1.0
ZONA 'G' Altura media 5760 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	-2.5	-2.8	-3.0	-3.5	-4.7	-5.8	-5.8	-5.1	-4.4	-3.6	-2.2	-2.4	-2.2
Min	-5.8	-5.5	-5.3	-5.7	-6.9	-7.6	-8.1	-7.2	-6.7	-5.2	-5.2	-5.1	-8.1
Promedio	-4.4	-4.3	-4.4	-4.7	-5.6	-6.6	-6.9	-6.1	-5.4	-4.5	-4.0	-3.9	-5.1
cuartil 25%	-4.7	-4.7	-4.9	-5.0	-5.8	-6.9	-7.1	-6.6	-5.8	-4.9	-4.5	-4.4	-5.3
cuartil 75%	-3.8	-3.9	-4.0	-4.5	-5.2	-6.2	-6.5	-5.7	-5.1	-4.2	-3.7	-3.5	-4.7
ZONA 'H' Altura media 6120 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	-5.2	-5.5	-5.7	-6.2	-7.4	-8.5	-8.5	-7.8	-7.1	-6.3	-4.9	-5.1	-4.9
Min	-8.5	-8.2	-8.0	-8.4	-9.6	-10.3	-10.8	-9.9	-9.4	-7.9	-7.9	-7.8	-10.8
Promedio	-7.0	-7.0	-7.1	-7.4	-8.3	-9.2	-9.5	-8.8	-8.1	-7.2	-6.6	-6.6	-7.7
cuartil 25%	-7.4	-7.4	-7.6	-7.7	-8.5	-9.5	-9.8	-9.2	-8.5	-7.6	-7.2	-7.1	-8.0
cuartil 75%	-6.5	-6.6	-6.7	-7.1	-7.9	-8.9	-9.2	-8.4	-7.8	-6.9	-6.3	-6.2	-7.4

Tabla 22: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (cont.)

(Fuente: Elaboración propia)

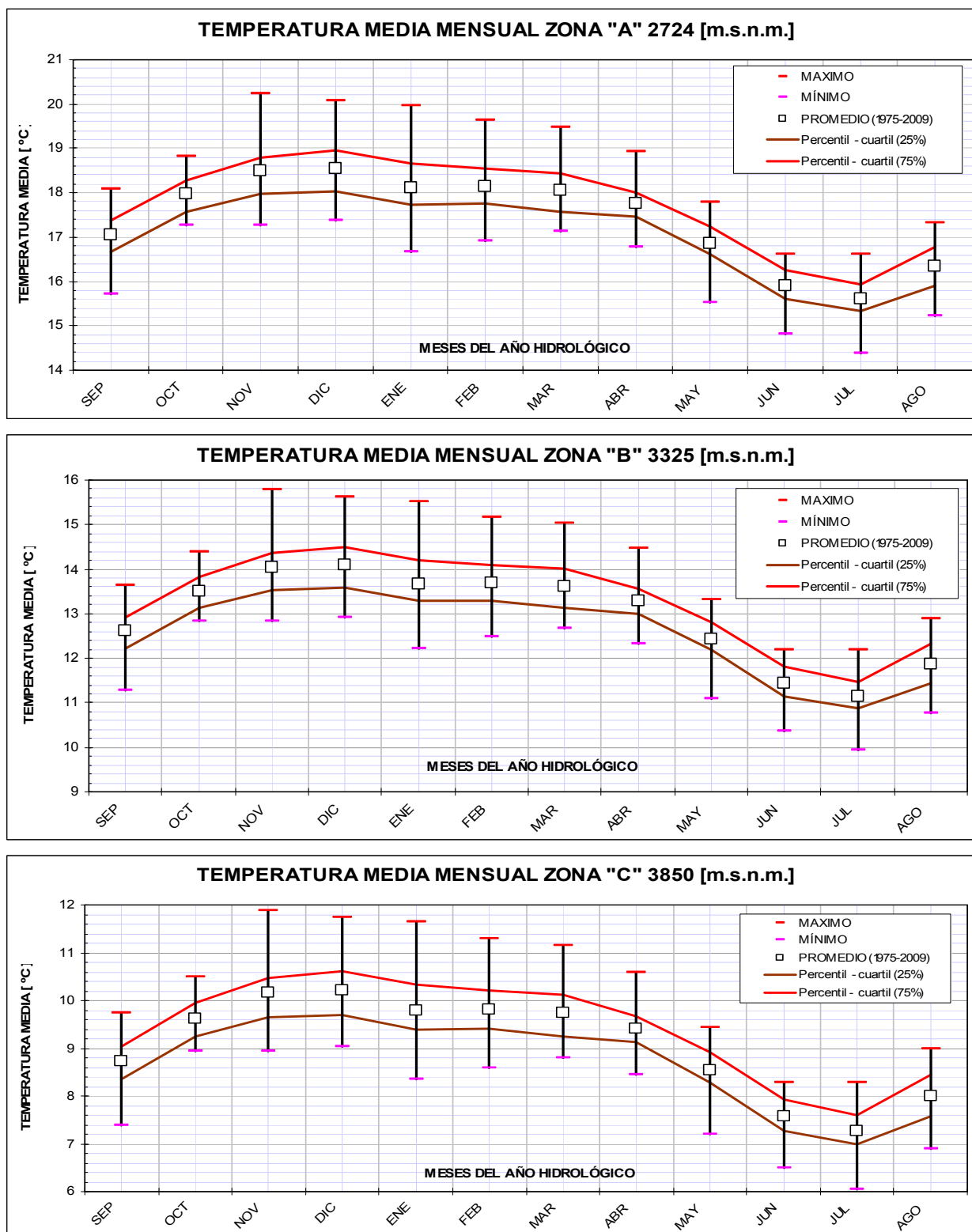


Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

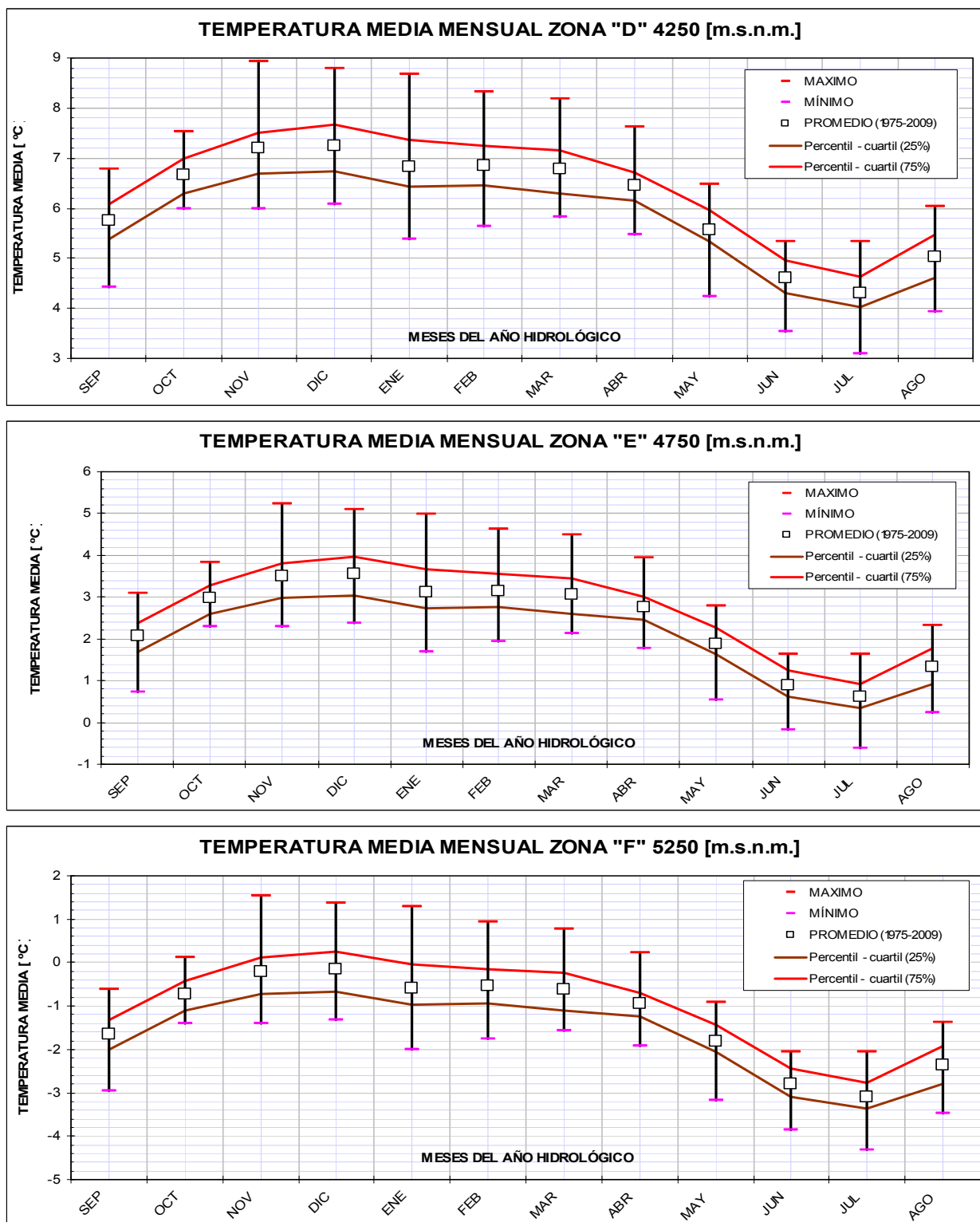


Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

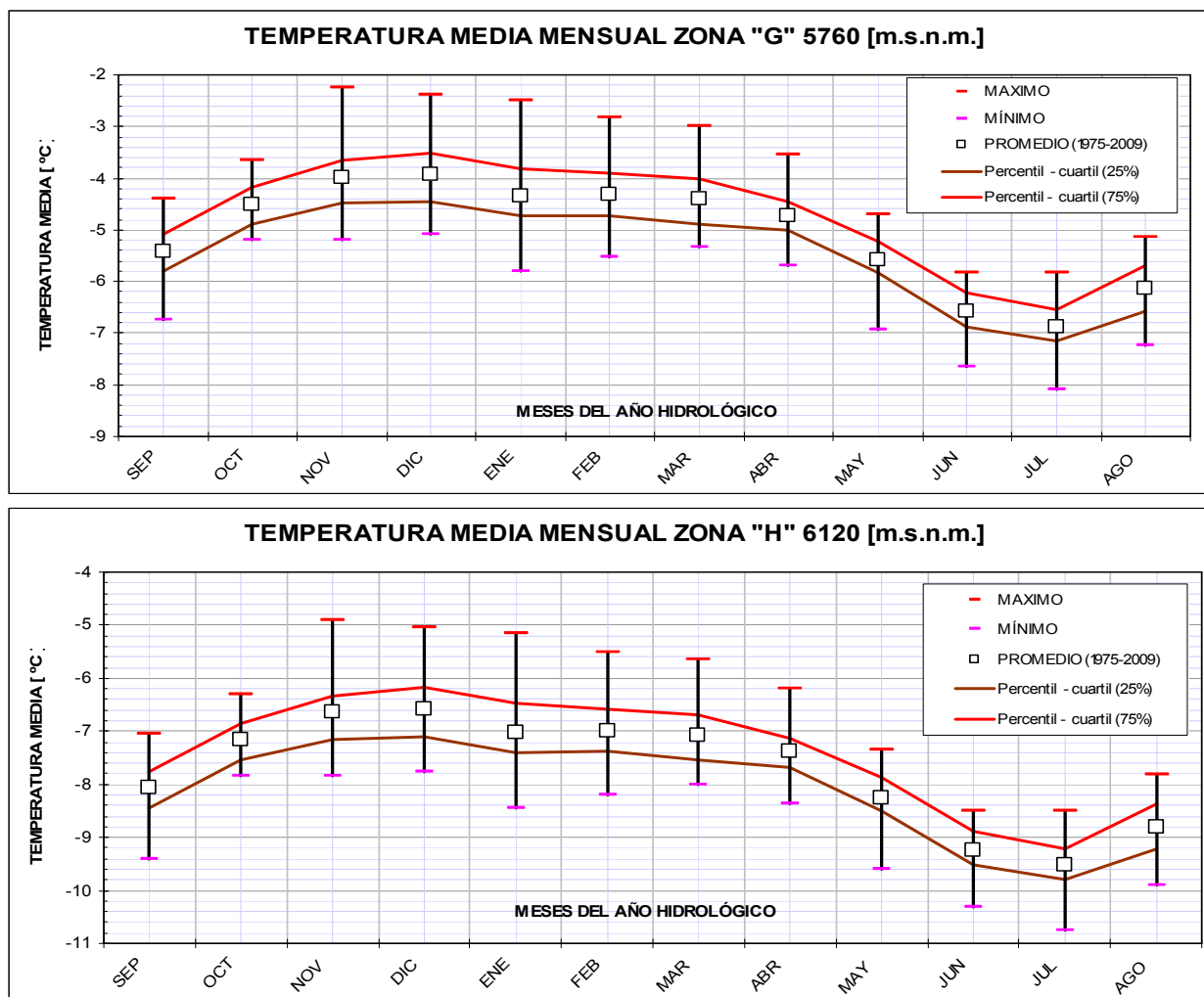


Figura 29: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de temperatura media por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)

(Fuente: Elaboración propia)

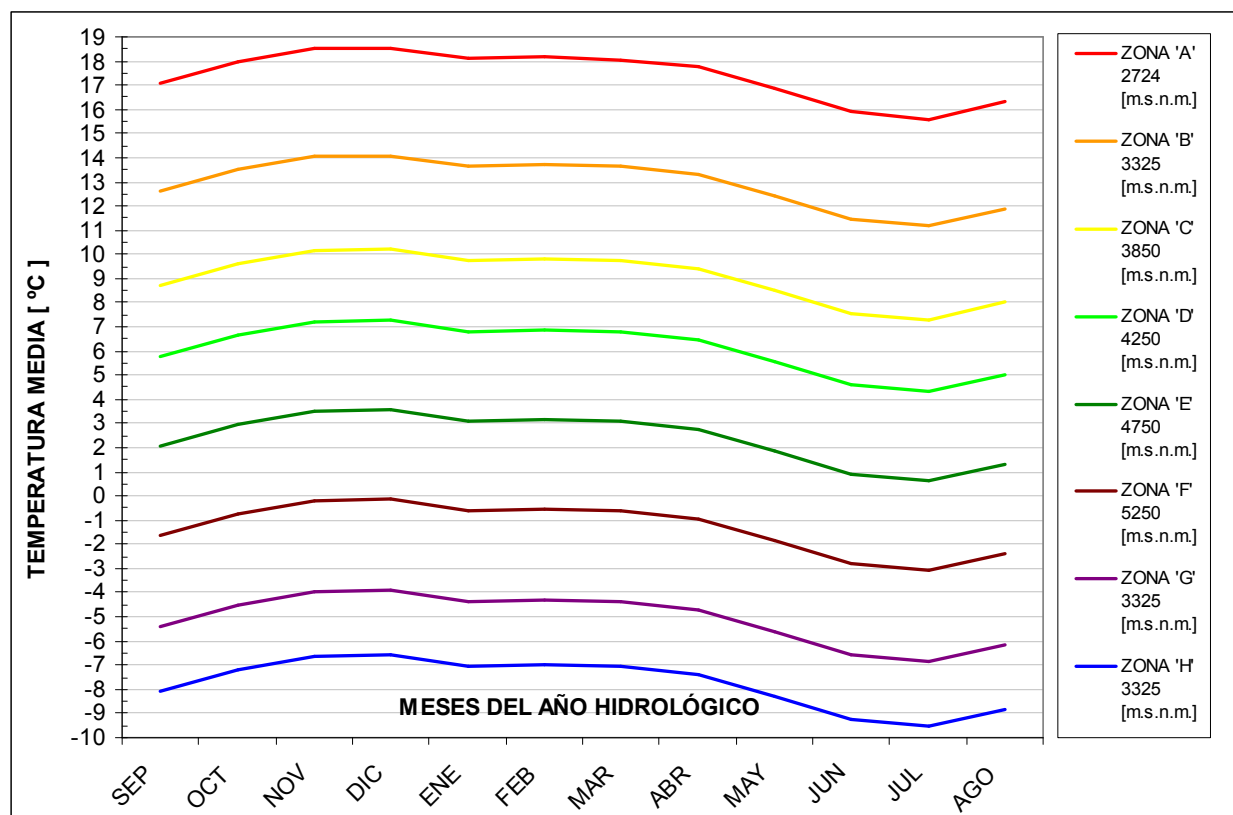


Figura 30: Temperatura media sintética mensual por zonas altitudinales para 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

4.3.2.2 Precipitación

La evaluación de la precipitación en cuencas de montaña (gradiente altitudinal alto) es bastante compleja. Generalmente la información pluviométrica no está disponible. Sin embargo, el caudal proveniente del deshielo prevalece sobre el componente precipitación en cuencas de montaña con cobertura glacial y/o nival. Por otra parte, los picos de los hidrogramas son subestimados al no considerarse el efecto de la precipitación, por lo que su estimación es relevante en la simulación glacio-hidrológica.

El perfil pluvio-altimétrico estimado y descrito en el punto 3.5.1.1 permitirá genera series de precipitación para las zonas altitudinales (cuencas con cobertura glacial y/o nival) de estudio definidas en la curve hipsométrica del punto anterior (4.3.1.2).

Una temperatura crítica ($T_{critica}$) prefijada define si la precipitación es tratada como lluvia líquida ($T \geq T_{crit}$) o nieve fresca ($T < T_{crit}$). Cuando se determina que el evento es nieve, su efecto retrasado en el escurrimiento es tratado de diferente manera, dependiendo si cae en el área cubierta de nieve o en el área no cubierta de la cuenca. La nieve fresca que cae en el área previamente cubierta se asume como parte de la capa de nieve estacional y su efecto se



incluye en la curva normal de decaimiento (recesión). La nieve fresca que cae en el área no cubierta se considera como precipitación que aporta al escurrimiento, con su efecto retrasado hasta el mes suficientemente caliente para producir fusión.

De manera análoga, si el evento es lluvia, puede tratarse de dos maneras. En la situación inicial, se asume que la lluvia que cae en la capa de nieve a comienzos de la época húmeda es retenida por la nieve, que está usualmente seca y profunda. La lluvia se añade al escurrimiento por fusión solamente en la zona no cubierta. Más tarde la cobertura de nieve se satura y se asume que la precipitación que cae sobre esta capa libera la misma cantidad de agua y la precipitación de toda la zona es añadida al escurrimiento por fusión.

La tabla 23 y figura 32 presentan un resumen de los estadísticos de las series sintéticas recreadas de precipitación mensual para las diferentes zonas altitudinales sobre el periodo 1975-2009. Estas series sintéticas son incluidos en la base de datos Hydraces La figura 33 muestra las temperaturas medias por zonas altitudinales.

Z O N A 'A' Altura media 2724 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	239.4	168.1	129.3	35.3	19.4	39.5	29.8	35.0	64.3	70.7	84.6	107.2	690.6
Min	36.5	13.4	3.9	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1	7.0	16.6	247.8
Promedio	101.0	62.9	52.2	18.3	6.5	5.0	4.9	8.1	21.4	25.9	35.2	60.7	402.0
cuartil 25%	74.1	41.6	28.7	9.4	1.1	0.0	0.2	2.2	10.7	14.9	16.6	43.2	345.0
cuartil 75%	117.7	80.8	61.2	26.6	11.8	7.1	6.0	10.7	29.2	36.3	49.7	76.7	447.9
Z O N A 'B' Altura media 3325 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	283.8	199.3	153.3	41.8	23.0	46.8	35.4	41.5	76.3	83.8	100.2	127.1	818.6
Min	43.3	15.8	4.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	8.3	19.7	293.8
Promedio	119.7	74.5	61.8	21.7	7.7	5.9	5.8	9.6	25.3	30.7	41.7	72.0	476.6
cuartil 25%	87.9	49.3	34.0	11.1	1.3	0.0	0.2	2.6	12.7	17.7	19.7	51.2	409.0
cuartil 75%	139.5	95.8	72.5	31.6	14.0	8.4	7.1	12.6	34.6	43.1	58.9	90.9	530.9
Z O N A 'C' Altura media 3850 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	322.6	226.5	174.2	47.6	26.1	53.2	40.2	47.1	86.7	95.2	113.9	144.5	930.4
Min	49.2	18.0	5.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	9.5	22.4	333.9
Promedio	136.1	84.7	70.3	24.7	8.7	6.7	6.6	10.9	28.8	34.9	47.4	81.8	541.7
cuartil 25%	99.9	56.0	38.7	12.6	1.5	0.0	0.3	3.0	14.4	20.1	22.3	58.2	464.9
cuartil 75%	158.6	108.9	82.4	35.9	15.9	9.5	8.0	14.4	39.3	49.0	67.0	103.3	603.4
Z O N A 'D' Altura media 4250 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	352.1	247.3	190.2	51.9	28.5	58.0	43.9	51.4	94.6	104.0	124.4	157.7	1015.6
Min	53.7	19.7	5.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	10.3	24.4	364.5
Promedio	148.5	92.5	76.7	26.9	9.5	7.3	7.2	11.9	31.4	38.1	51.7	89.3	591.3
cuartil 25%	109.0	61.1	42.2	13.8	1.7	0.0	0.3	3.3	15.7	22.0	24.4	63.6	507.4
cuartil 75%	173.1	118.9	90.0	39.1	17.3	10.4	8.8	15.7	42.9	53.4	73.1	112.8	658.6

Tabla 23: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)



ZONA 'E' Altura media 4750 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	389.1	273.2	210.1	57.4	31.5	64.1	48.5	56.8	104.6	114.9	137.4	174.3	1122.1
Min	59.3	21.7	6.3	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	11.4	27.0	402.7
Promedio	164.1	102.2	84.8	29.8	10.5	8.1	7.9	13.2	34.7	42.1	57.1	98.7	653.2
cuartil 25%	120.5	67.5	46.7	15.2	1.8	0.0	0.3	3.6	17.4	24.3	26.9	70.2	560.6
cuartil 75%	191.3	131.4	99.4	43.2	19.2	11.5	9.7	17.3	47.4	59.1	80.8	124.6	727.7
ZONA 'F' Altura media 5250 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	426.0	299.2	230.1	62.8	34.5	70.2	53.1	62.2	114.5	125.8	150.4	190.8	1228.6
Min	65.0	23.8	6.9	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.2	12.5	29.5	440.9
Promedio	179.7	111.9	92.8	32.6	11.5	8.9	8.7	14.5	38.0	46.1	62.6	108.1	715.2
cuartil 25%	131.9	73.9	51.1	16.7	2.0	0.0	0.3	4.0	19.1	26.6	29.5	76.9	613.9
cuartil 75%	209.4	143.8	108.8	47.4	21.0	12.6	10.6	19.0	51.9	64.7	88.5	136.4	796.8
ZONA 'G' Altura media 5760 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	463.6	325.6	250.4	68.3	37.5	76.4	57.8	67.7	124.6	136.9	163.7	207.7	1337.3
Min	70.7	25.9	7.5	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.3	13.6	32.2	479.9
Promedio	195.6	121.8	101.0	35.5	12.5	9.7	9.4	15.7	41.4	50.2	68.1	117.6	778.5
cuartil 25%	143.6	80.5	55.6	18.1	2.2	0.0	0.4	4.3	20.7	28.9	32.1	83.7	668.1
cuartil 75%	228.0	156.5	118.4	51.5	22.8	13.7	11.6	20.7	56.5	70.4	96.3	148.5	867.2
ZONA 'H' Altura media 6120 [m.s.n.m.]													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	490.2	344.3	264.8	72.3	39.7	80.8	61.1	71.6	131.7	144.7	173.1	219.6	1413.9
Min	74.8	27.4	7.9	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.3	14.4	34.0	507.4
Promedio	206.8	128.7	106.8	37.5	13.3	10.2	10.0	16.6	43.8	53.1	72.0	124.4	823.1
cuartil 25%	151.8	85.1	58.8	19.2	2.3	0.0	0.4	4.5	21.9	30.6	33.9	88.5	706.4
cuartil 75%	241.0	165.5	125.2	54.5	24.1	14.5	12.2	21.8	59.7	74.4	101.8	157.0	916.9

Tabla 23: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (cont.)

(Fuente: Elaboración propia)

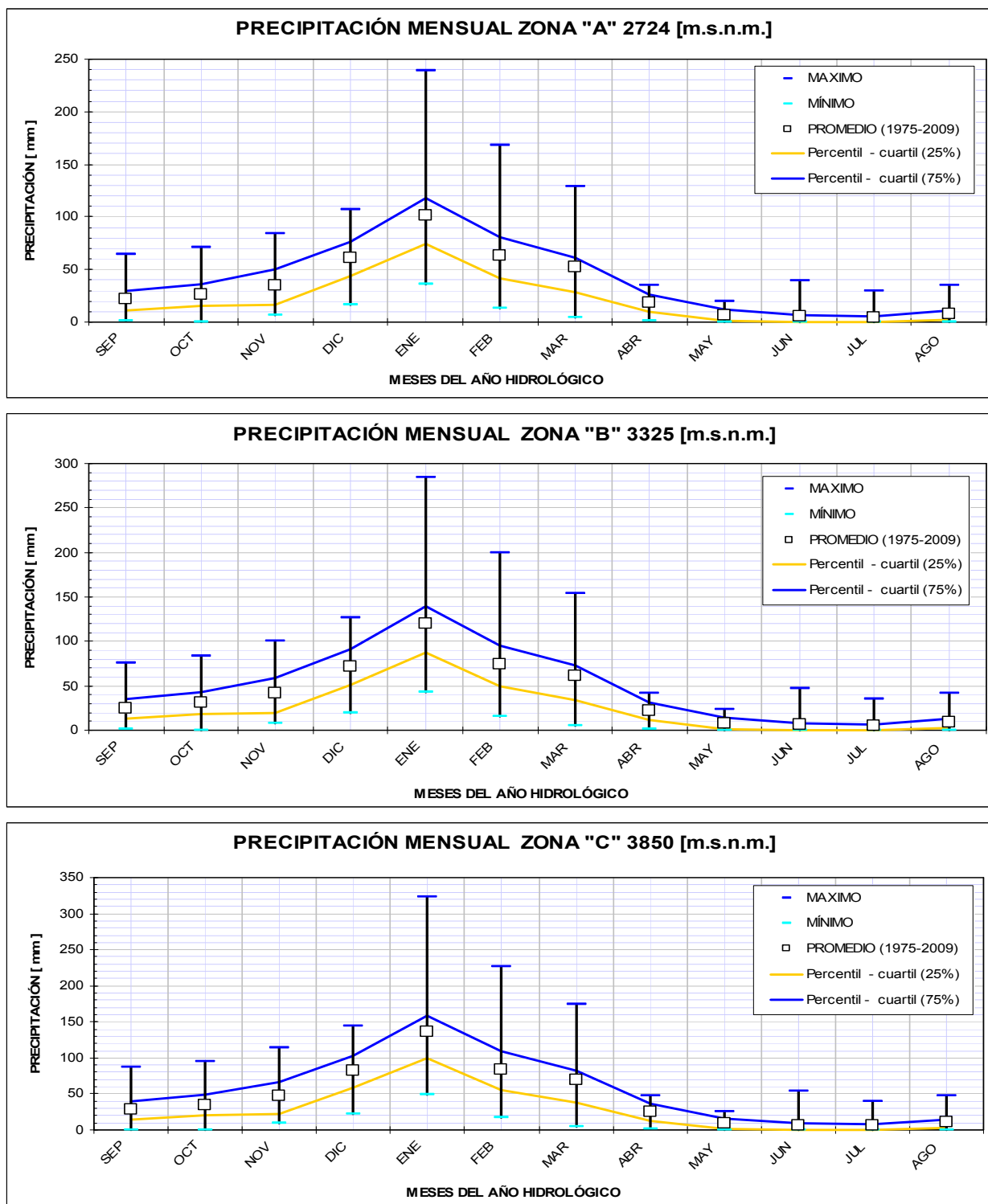


Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

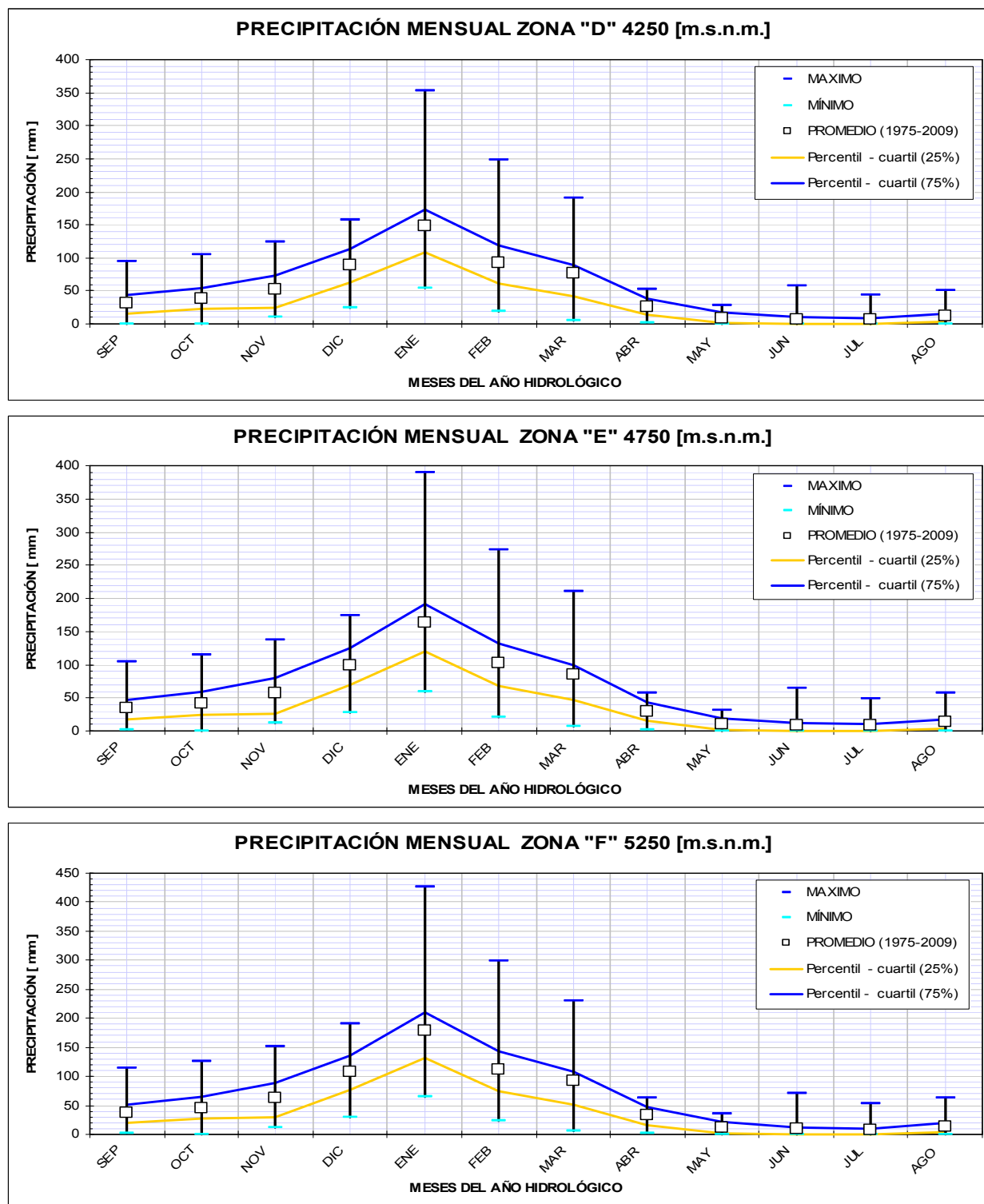


Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

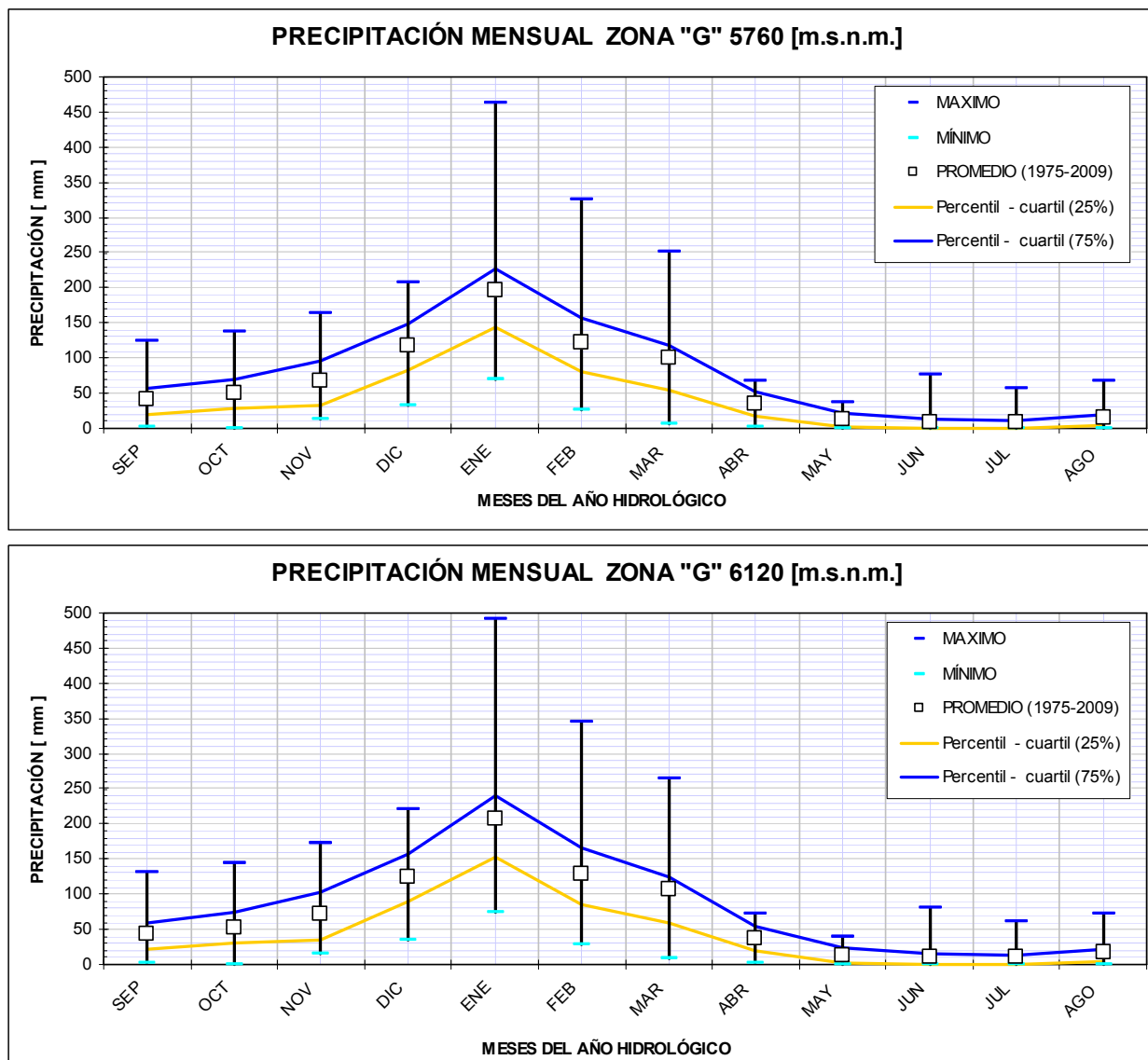


Figura 32: Estadísticos de las series sintéticas mensuales de precipitación por zonas altitudinales para el periodo 1975-2009 (Cont.)

(Fuente: Elaboración propia)

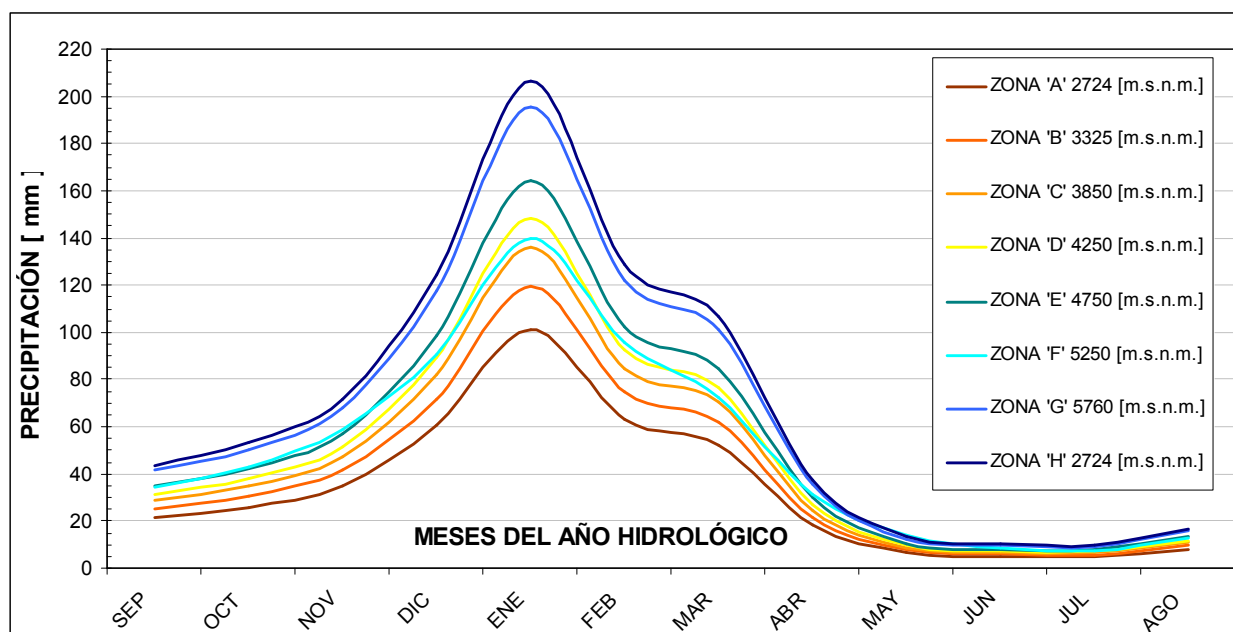


Figura 33: Precipitación sintética mensual por zonas altitudinales para 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

4.3.2.3 Cobertura de nieve

En cuencas de alta montaña (con cobertura glacial y/o nival) es característico que la cobertura de nieve disminuya durante el período de fusión (temperaturas más elevadas). En el caso de los glaciares tropicales, como es el caso del glaciar Illimani, esta cobertura glacial ha venido disminuyendo de forma sostenida desde la denominada “Pequeña Edad de Hielo” que se produjo en esta región entre los siglos XVI y XVII.

Para la aplicación del modelo SRM es importante proporcionar la información correspondiente a la evolución temporal de esta pérdida de superficie. Estos datos son introducidos a partir de la denominada “Curva de agotamiento del glaciar”, la cual debe ser determinada para cada uno de los rangos y/o zonas altitudinales definidos⁶.

Estas curvas de agotamiento o recesión del glaciar, pueden ser ajustadas a una función a partir de medidas periódicas, y luego ser interpoladas, de modo que los valores diarios pueden ser introducidos en el modelo SRM como variable de entrada. Los mapas de cobertura de nieve pueden obtenerse con observaciones desde la superficie (en cuencas muy pequeñas), mediante fotografía aérea (especialmente cuando hay riesgo de riadas) y, del modo más eficiente, mediante teledetección a partir del tratamiento de imágenes de satélite. Para obtener una adecuada precisión de los mapas de nieve, el área mínima de la cuenca depende de la resolución espacial de la imagen de satélite.

⁶ Ramírez, 2009



Las figuras 34 a la 37 muestran las coberturas glaciares de la cuenca del glaciar Illimani determinadas a partir del tratamiento de fotografías aéreas históricas obtenidas por el Servicio Nacional de Aerofotogrametría de la Fuerza Aérea Boliviana (FAB) desde el año 1963, luego para el año 1975, 1983 y finalmente para el año 2009.

Las áreas cubiertas de nieve en el nevado Illimani y los respectivos porcentajes fueron determinados a través del procesamiento de las fotografías aéreas utilizando como herramienta los SIGs (*Ver tablas 24 y 25 y figura 38*), obteniendo los siguientes resultados:

Zona	Rango de Cotas	Altitud media	Area Total	Área de cobertura glaciar [km ²]			
	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[Km ²]	1963	1975	1983	2009
A	2497 - 3000	2800	2.75	0.000	0.000	0.000	0.000
B	3000 - 3500	3280	5.94	0.000	0.000	0.000	0.000
C	3500 - 4000	3800	8.57	0.000	0.000	0.000	0.000
D	4000 - 4500	4250	12.19	0.000	0.000	0.000	0.000
E	4500 - 5000	4700	5.24	1.947	1.658	1.529	0.103
F	5000 - 5500	5250	4.52	2.797	2.438	2.411	1.954
G	5500 - 6000	5760	4.28	4.126	4.111	3.869	3.827
H	6000 - 6384	6120	1.46	1.460	1.460	1.460	1.460

Tabla 24: Evolución temporal de áreas de cobertura glaciar en el Illimani [km²] por zonas de elevación

(Fuente: Elaboración propia)

Zona	Rango de Cotas	Altura media	Area Total	% de Cobertura glaciar por Rango Altitudinal			
	[m.s.n.m.]	[m.s.n.m.]	[Km ²]	1963	1975	1983	2009
A	2497 - 3000	2800	2.754	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
B	3000 - 3500	3280	5.943	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
C	3500 - 4000	3800	8.568	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
D	4000 - 4500	4250	12.193	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
E	4500 - 5000	4700	5.235	37.19%	31.67%	29.21%	1.97%
F	5000 - 5500	5250	4.523	61.84%	53.90%	53.31%	43.20%
G	5500 - 6000	5760	4.278	96.45%	96.10%	90.44%	89.46%
H	6000 - 6384	6120	1.460	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Tabla 25: Evolución temporal Porcentual de cobertura glaciar en el Illimani por zona de elevación

(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se trazó la curva de decaimiento o retroceso del glaciar para cada zona de elevación y la línea de tendencia que mejor se ajusta a la serie de datos, como se muestra en la figura 38.

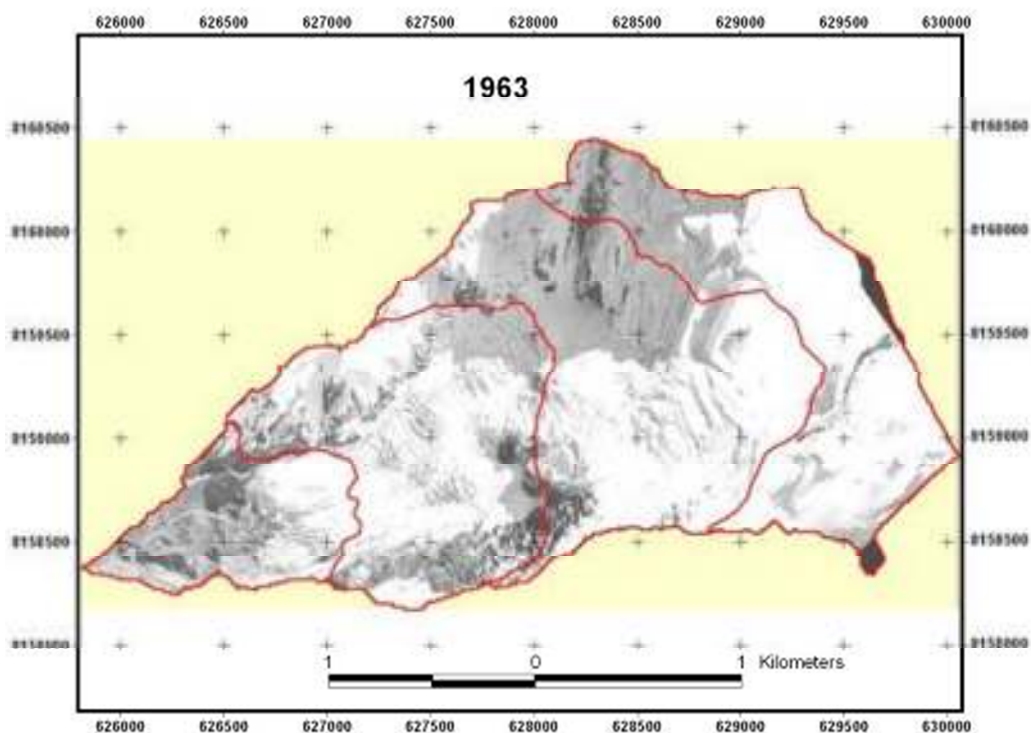


Figura 34: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1963
(Fuente: Ramírez, 2009)

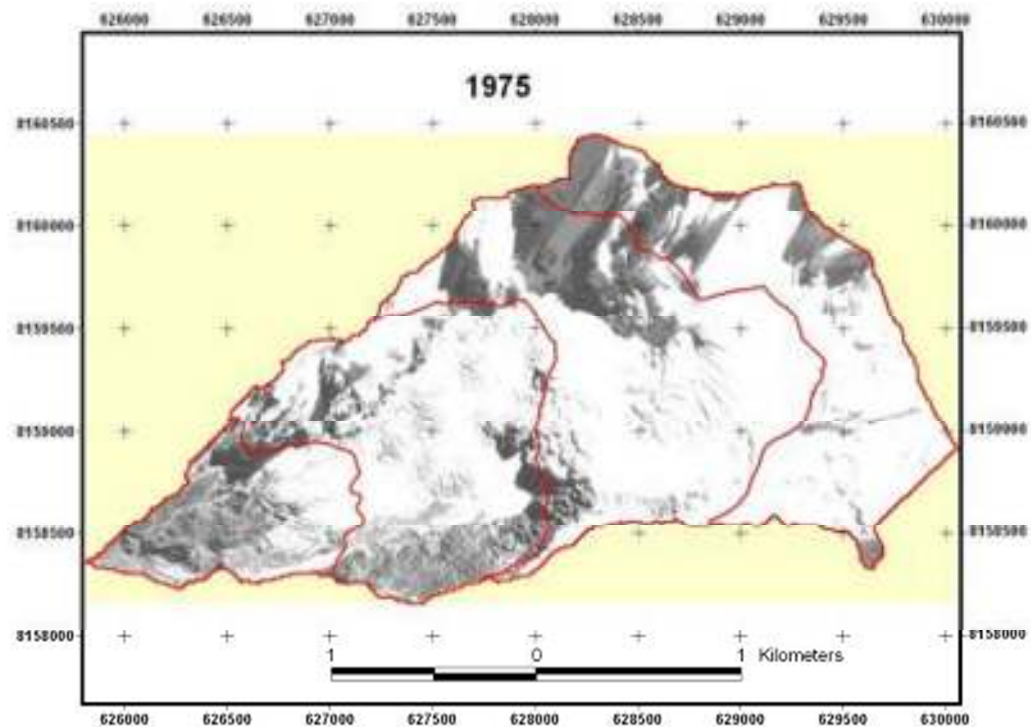


Figura 35: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1975
(Fuente: Ramírez, 2009)

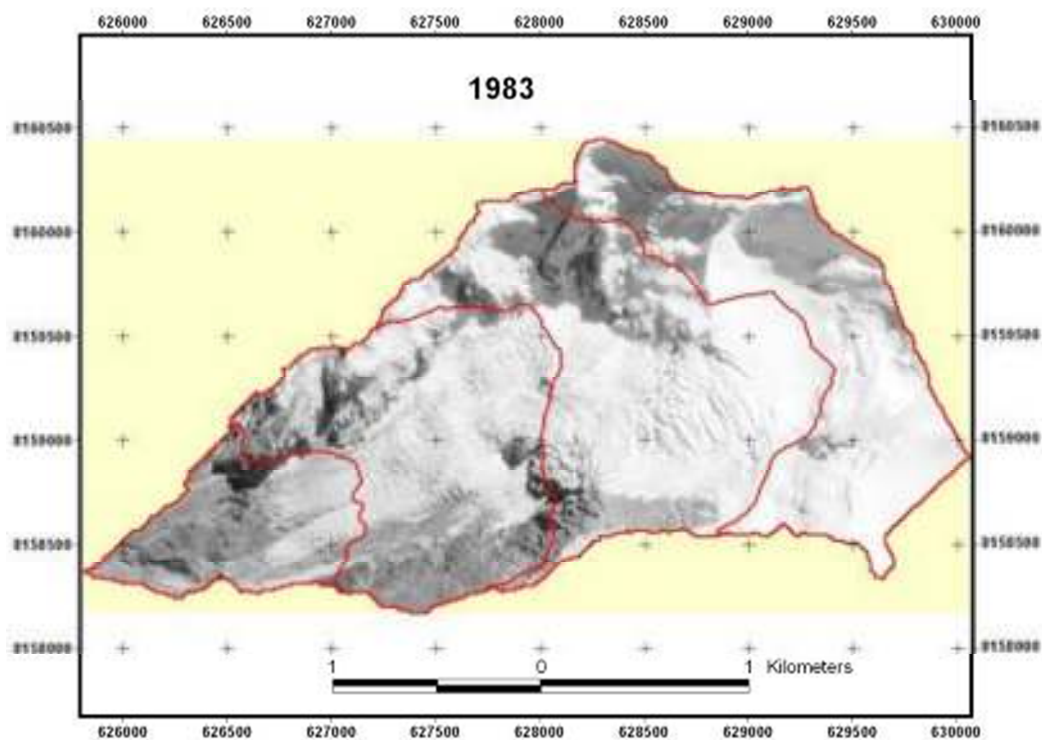


Figura 36: Cobertura del glaciar Illimani para el año 1983
(Fuente: Ramírez, 2009)

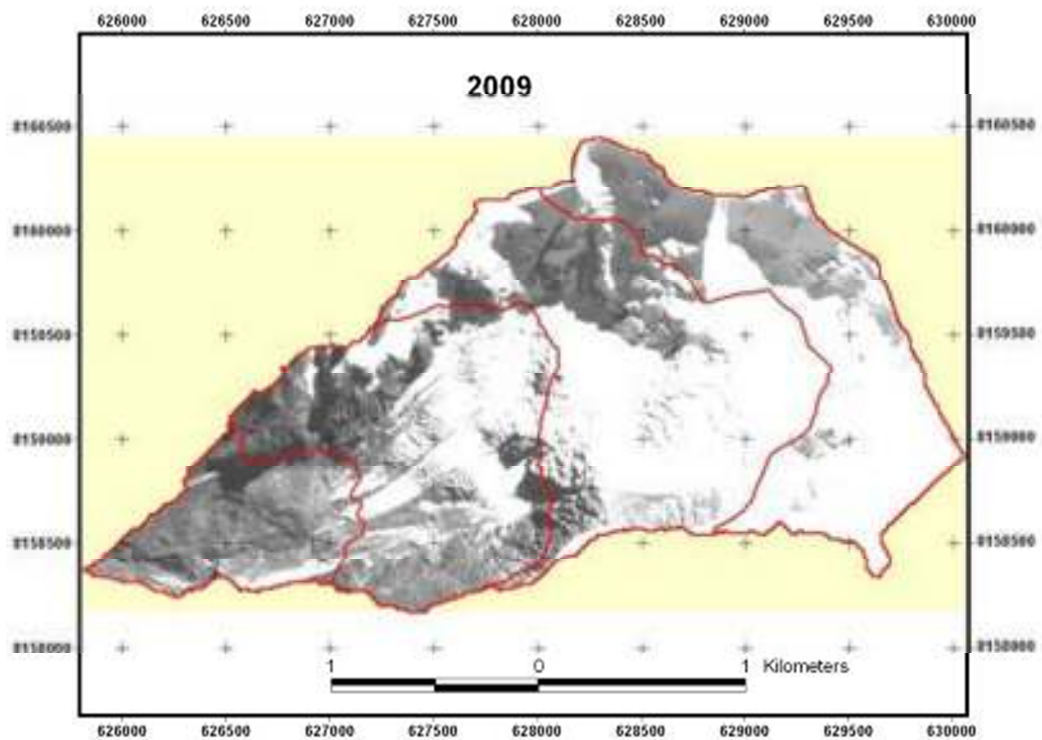


Figura 37: Cobertura del glaciar Illimani para el año 2009
(Fuente: Ramírez, 2009)

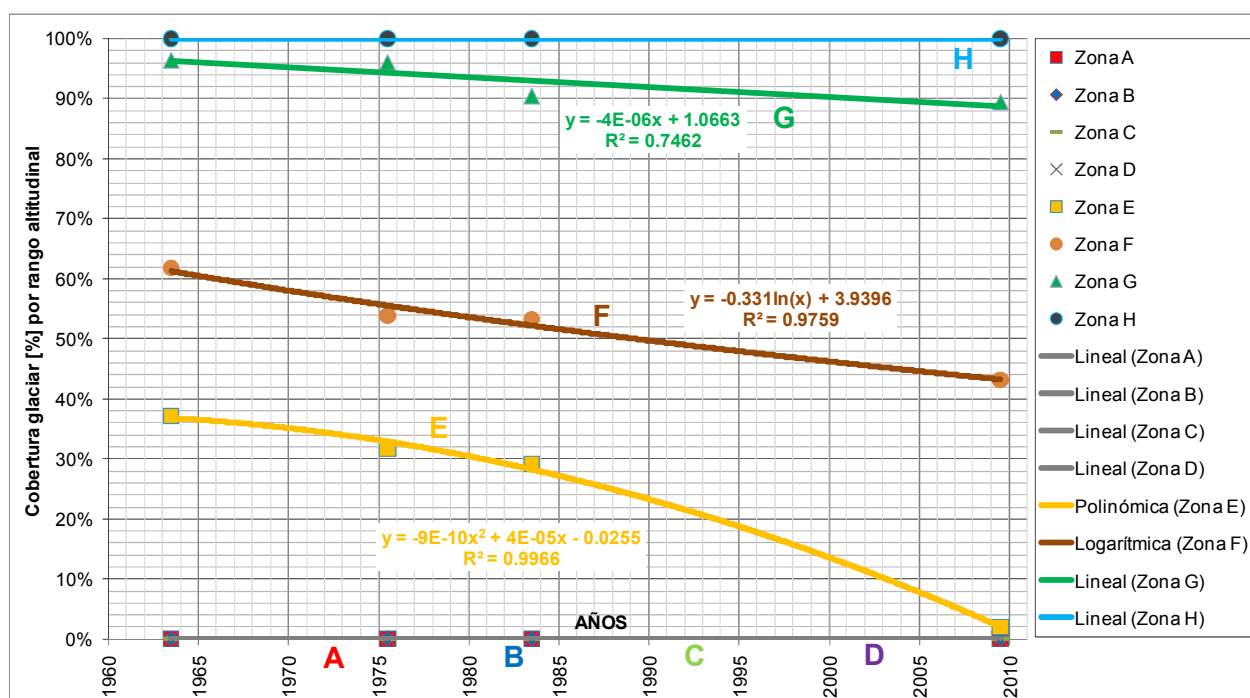


Figura 38: Curva de decaimiento del glaciar Illimani por zonas de elevación
(Fuente: Elaboración propia)

4.3.3 Parámetros de calibración

4.3.3.1 Coeficiente de escurrimiento C_S y C_R

El coeficiente de escurrimiento toma en cuenta las pérdidas, abstracciones o diferencia entre el agua disponible (fusión + precipitación, C_{SNOW} y $C_{RAINFALL}$) y el caudal de salida de la cuenca.

Estos coeficientes pueden variar estacional y espacialmente tanto para la fusión como para la precipitación.

Como no existe información suficiente para la determinación de este coeficiente, se considera a este coeficiente como un parámetro de calibración del modelo.

4.3.3.2 Factor grado – día (α)

El factor grado – día convierte el número de grados – día en altura de fusión. $M = \alpha \cdot T$

Donde: M = pérdida por fusión [cm]
 α = factor grado día [cm/°C.día]
 T = grados día [°C·día]



El factor grado día puede ser evaluado por comparación entre los grados – día y las láminas de escurrimiento medidas a través de lisímetros en caso de cuencas instrumentadas, que no es el caso del presente estudio. Al no disponerse de lisímetros u otro tipo de instrumentos de medición, se considera el factor grado – día como un parámetro de calibración del modelo.

4.3.3.1 Temperatura crítica

La temperatura crítica determina si un evento de precipitación es tratado como lluvia o nieve fresca. Un modelo que considera la evolución temporal de la cobertura de nieve, con el objetivo de simular los caudales, depende de este parámetro no sólo en la época de ablación (pérdida) sino particularmente en la época de acumulación (recarga).

El modelo SRM necesita este parámetro para definir si la precipitación contribuye inmediatamente al escurrimiento o si es almacenada hasta que los grados día sean suficientes para producir la fusión de hielo o nieve.

En el presente estudio para la zona con cobertura glacial y/o nival (cabeceras de la cuenca del río Sajhuaya), se establece la temperatura crítica en **0°C**.

4.3.3.4 Coeficiente de recesión

El coeficiente de recesión es una característica importante del modelo por cuanto $(1 - k)$ es la proporción diaria de agua proveniente del deshielo que aparece inmediatamente en el escurrimiento. El análisis de datos históricos es generalmente una buena forma de determinar el coeficiente de recesión.

El coeficiente de recesión indica el descenso de la descarga en un periodo sin lluvia ni fusión y varía inversamente con la descarga de acuerdo a la siguiente expresión:

$$k_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{Q_n} = x \cdot Q_n^{-y}$$

La anterior ecuación puede reformularse aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación:

$$\ln(Q_{n+1}) = \ln x + (1 - y) \cdot \ln(Q_n) = a + b \cdot \ln(Q_n) \quad \text{[ecuación logarítmica coef. recesión]}$$

Donde las constantes “x” y “y” se determinan por regresión lineal para la cuenca de estudio y deben cumplir la condición:

$$Q_{\text{mínimo}} > x^{\frac{1}{y}}$$

En cuencas sin control hidrométrico y cuando la información de caudales es insuficiente, “x” y “y” pueden derivarse indirectamente a partir de la información hidrométrica de una cuenca de apoyo instrumentada de la siguiente manera:

$$k_{Nn} = \left[x_M \cdot \left(\frac{\bar{Q}_M}{\bar{Q}_N} \cdot Q_{Nn-1} \right)^{-y_M} \right]^{\sqrt[4]{A_M/A_N}} \quad \text{[ecuación para el cálculo del coef. recesión]}$$

Donde: x_M, y_M = constantes determinadas para la cuenca de apoyo "M"
 Q_M, Q_N = caudales medios durante el periodo de análisis de las cuencas "M" y "N"
 A_M, A_N = áreas de las cuencas respectivas

La ecuación anterior indica que los coeficientes de recesión son, en general, mayores en cuencas grandes que en cuencas pequeñas.

Si el incremento de "k" con el tamaño de la cuenca parece ser muy grande, el exponente puede ser reemplazado con $\sqrt[8]{A_M/A_N}$.

El presente estudio se apoyo en dos cuencas de apoyo para la determinación de los coeficientes de recesión: la cuenca del Huayna Potosí y Zongo (para las subcuencas Jalancha y Khapi con cobertura glaciár) y la cuenca del río Palca (para las subcuencas intermedias sin cobertura glaciár) (ver figuras 39, 40 y 41). Se ha utilizado como referencia a estas dos cuencas, debido a que cuentan con un estudio previo y tienen algún control por instrumentación del escurrimiento que permitió calibrar el modelo glacio-hidrológico.

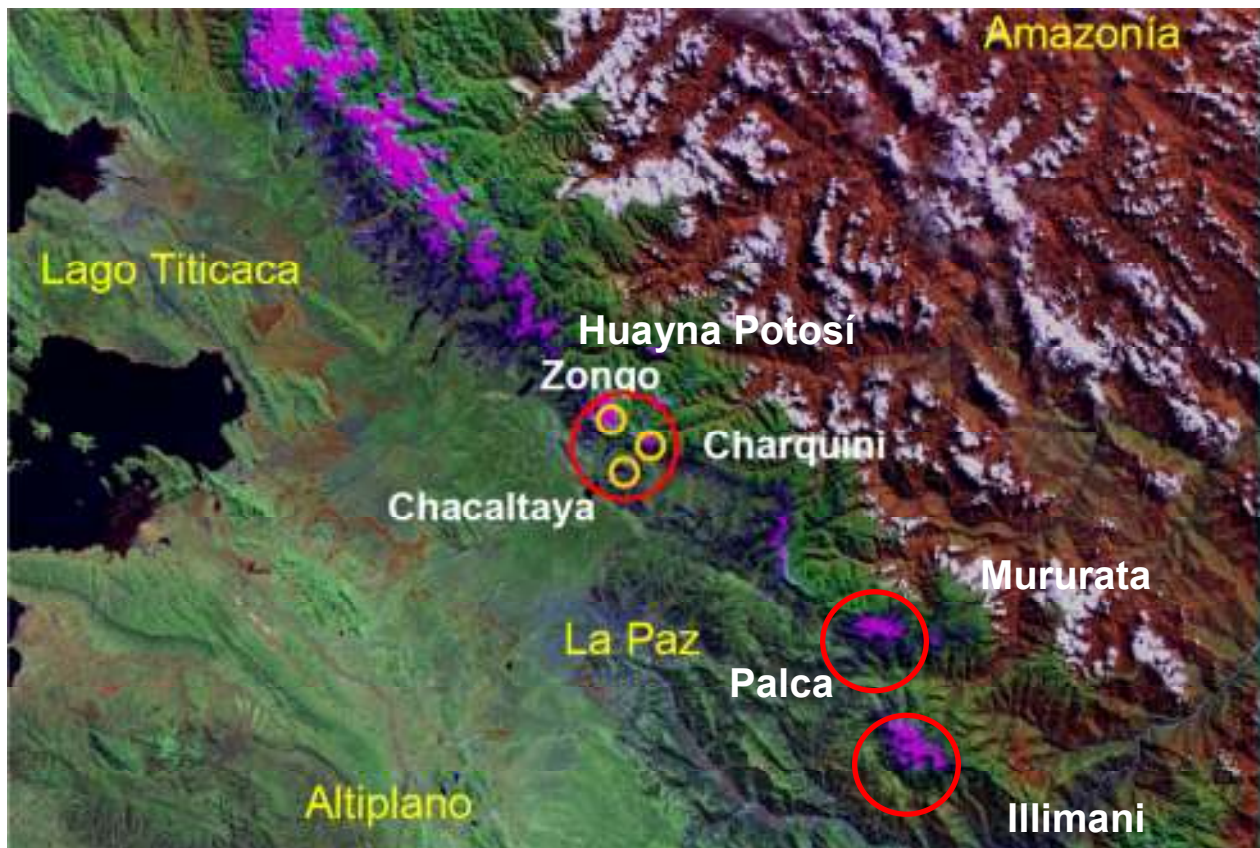


Figura 39: Ubicación geográfica del glaciar de estudio y de los glaciares de apoyo
(Fuente: Instituto de Hidrología e Hidráulica IHH-UMSA)

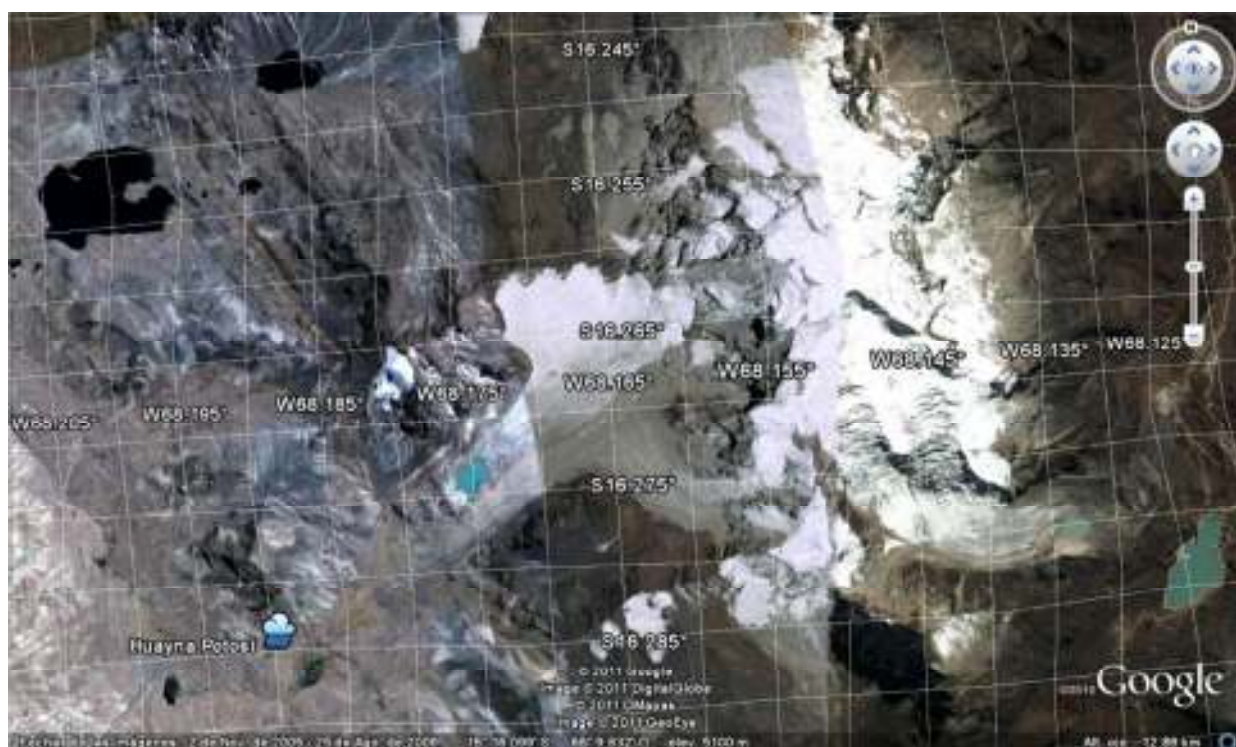


Figura 40: Ubicación geográfica del nevado Huayna Potosí
(Fuente: Google Earth)

La información del nevado Huayna Potosí define los coeficientes de recesión de las subcuencas cabeceras con cobertura glacial y/o nival de Jalancha y Khapi, situadas en la parte alta de la cuenca del Río Sajhuaya. La semejanza y compatibilidad entre cuencas es posible gracias a las condiciones similares de exposición que tienen las mismas. En la siguiente tabla se presentan las características de estas cuencas glaciares.

Cuenca	Tipo cuenca	Área [km ²]	Q medio anual [m ³ /s]	Q específico [lt/s- km ²]
Huayna Potosí	Subcuenca	8.38	0.237	28.3
Jalancha	Cabecera Glacial	6.32	0.225	35.6
Jalancha	Intercuenca	5.62	0.069	15.4
Jalancha	Cabecera + Intercuenca	11.94	0.294	24.6
Khapi	Cabecera Glacial	2.24	0.082	36.5
Khapi	Intercuenca	10.83	0.128	14.5
Khapi	Jalancha + Intercuenca	25.01	0.504	20.1

Tabla 26: Comparación de áreas y caudales medios anuales (2009) observados de las subcuencas cabeceras de la cuenca del río Sajhuaya y la cuenca de apoyo
(Fuente: Elaboración propia)

De manera análoga, los coeficientes de recesión para la simulación glacio-hidrológica de las cuencas sin cobertura glacial y/o nival, se estiman a partir de la información de la cuenca del río Palca, que está influenciada principalmente por el aporte la precipitación. Este análisis se lo presenta solo como referencia, ya que no fue utilizado en el modelo glacio-hidrológico.

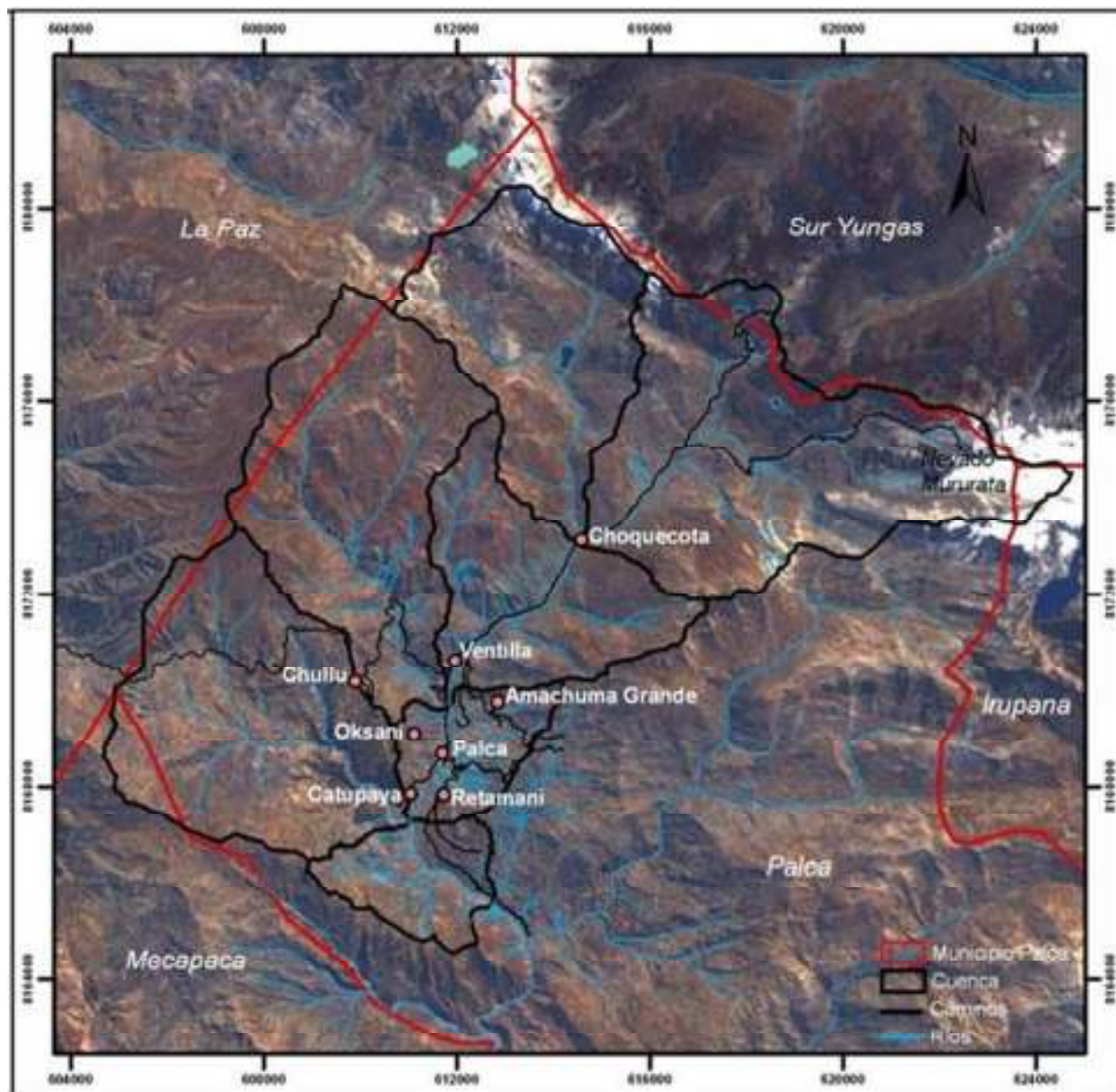


Figura 41: Ubicación geográfica de la cuenca del río Palca
(Fuente: Agua Sustentable)



Cuenca	Tipo cuenca	Área [km ²]	Q medio anual [m ³ /s]	Q específico [lt/s- km ²]
Palca	Subcuenca	106.54	1.333	12.51
Cebollullo	Intercuenca	9.84	0.098	12.1
Cebollullo	Khapi + Intercuenca	34.85	0.602	17.3
Tahuapalca	Intercuenca	11.38	0.101	10.7
Tahuapalca	Cebollullo + intercuenca	46.23	0.703	15.2

Tabla 27: Comparación de áreas y caudales medios anuales (2009) observados de las subcuencas intermedias de la parte baja de la cuenca del río Sajhuaya y la cuenca de apoyo
(Fuente: Elaboración propia)

Graficando los valores medidos de Q_{n+1} y Q_n durante un periodo de recesión en las cuencas de apoyo en escala logarítmica es posible determinar los valores de “x” y “y” (ver tabla 28), a partir de la ecuación logarítmica del punto 4.3.3.4.

						Palca					
						Fecha	Q observado	Qn	Qn+1	ln Qn	ln Qn+1
Huayna Potosí						16/04/2002 00:00	1.628	1.628	1.328	0.4871	0.2836
Fecha	Q observado	Qn	Qn+1	ln Qn	ln Qn+1	16/05/2002 00:00	1.328	1.328	0.467	0.2836	-0.7615
16/03/2002 00:00	0.550	0.550	0.264	-0.5978	-1.3318	16/06/2002 00:00	0.467	0.467	0.391	-0.7615	-0.9400
16/04/2002 00:00	0.264	0.264	0.066	-1.3318	-2.7181	16/07/2002 00:00	0.391	0.391	0.143	-0.9400	-1.9429
16/05/2002 00:00	0.066	0.066	0.050	-2.7181	-2.9957	16/08/2002 00:00	0.143	0.143	0.049	-1.9429	-3.0193
16/06/2002 00:00	0.050	0.050				16/09/2002 00:00	0.049	0.049			

Tabla 28: Cálculo del coeficiente de recesión en la cuenca de Nevado Huayna Potosí y de la cuenca del río Palca
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 42 muestra gráficamente el ajuste lineal de los valores Q_n y Q_{n+1} para las cuencas de apoyo de Huayna Potosí y la del río Palca. Los coeficientes “x” & “y” obtenidos para cada cuencas de apoyo se los presenta en la tabla 29.

Huayna Potosí				Palca (Cebollullo)			
a	-1.2505	b	0.7088	a	-1.05	b	0.9304
x	0.28636158	y	0.2912	x	0.3499	y	0.0696

Tabla 29: Coeficientes “x” & “y” para las cuencas de apoyo del Nevado Huayna Potosí y Palca
(Fuente: Elaboración propia)

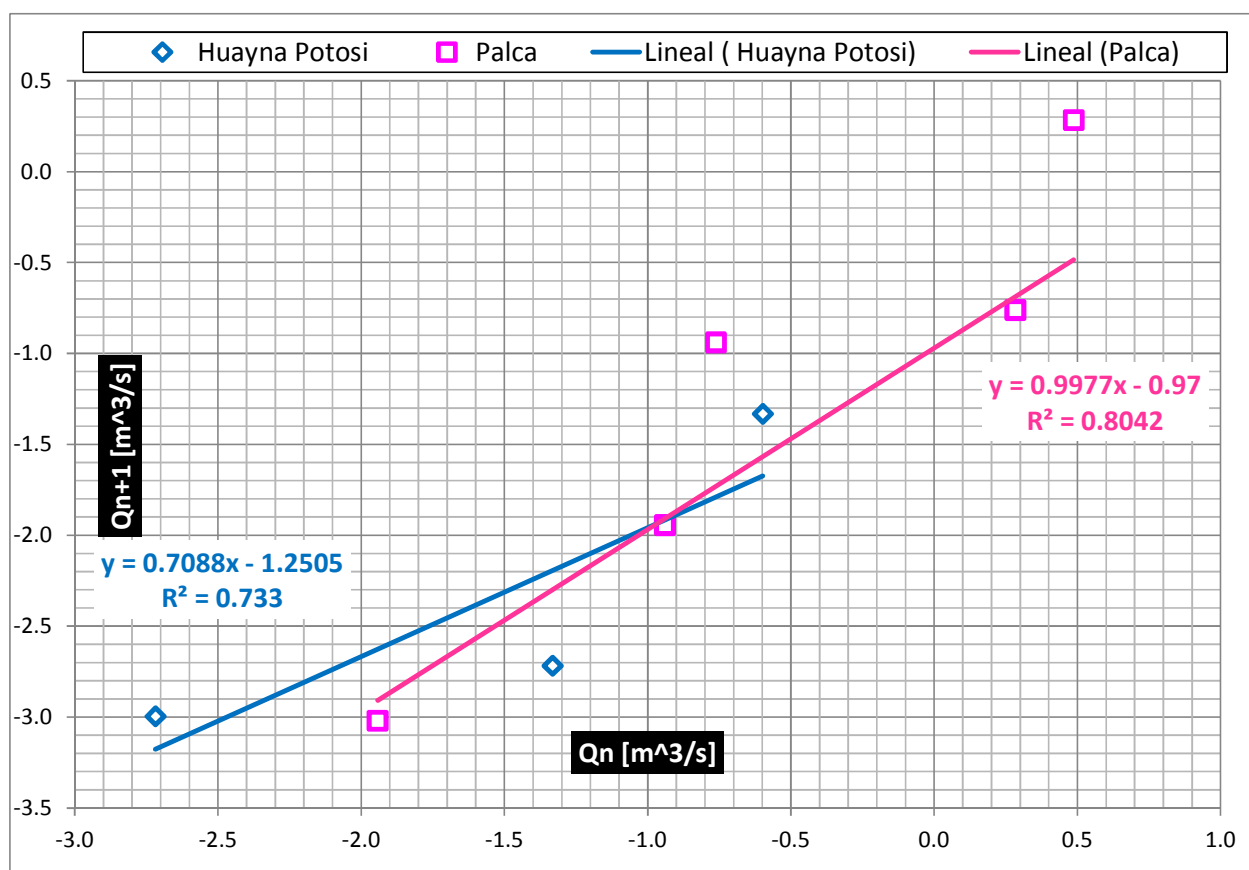


Figura 42: Ajuste del coeficiente de recesión para las cuencas de apoyo del Nevado Huayna Potosí y del río Palca
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente los coeficientes de recesión para las cuencas de estudio se calculan de acuerdo a la ecuación su cálculo, presentada anteriormente y se los presenta en el siguiente punto.

Adicionalmente se ha podido disponer de datos hidrométricos (caudales) del Glaciar Zongo (Ver figura 43 y tabla 30), mismos que servirán para comparar y validar las simulaciones en las cuencas glaciares estudiadas.



Figura 43: Ubicación geográfica del glaciar Zongo (Ortofoto)
(Fuente: Soruco, 2009)

Cuenca	Tipo cuenca	Área [km ²]	Q medio anual [m ³ /s]	Lamina de escurrimiento [mm / año]	Q específico anual [lt/s-km ²]
Zongo	Subcuenca	3.1	0.15	1526	48.4

Tabla 30: Caudales medios anuales (1992-2010) observados en la cuenca de apoyo Zongo
(Fuente: Elaboración propia)



4.3.3.5 Radiación Solar y albedo

Si bien el modelo hidro-glaciológico presentado no requiere directamente de la variable radiación, esta influencia implícitamente al albedo y a la temperatura.

El balance de radiación en la superficie del glaciar se calcula con la siguiente relación:

$$R_n = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}$$

Donde:

- R_n : radiación neta.
- SW_↓ : radiación incidente de longitudes de onda corta (o radiación solar incidente).
- SW_↑ : radiación reflejada de longitudes de onda corta (o radiación solar reflejada).
- LW_↓ : radiación de longitudes de onda larga incidente (o radiación térmica incidente)
- LW_↑ : radiación de longitudes de onda larga de la superficie (o radiación térmica de la superficie).

Se ha podido recopilar información del glaciar de Zongo (*Ginot et al, 2010*). Las mediciones disponibles a una altitud de 5050 m.s.n.m. son: R_n, SW_↓ y SW_↑, LW_↓ y LW_↑ (estación Campbell ORE sobre la morrena). Debido a la radiación de longitud de onda larga, se deben corregir estos datos brutos no corregidos por influencia de la temperatura (ley de Stefan Boltzman) y volver a aplicar estos valores después de esta corrección por temperatura. Estas correcciones ya están aplicadas sobre los datos presentados (*Ginot et al, 2010*).

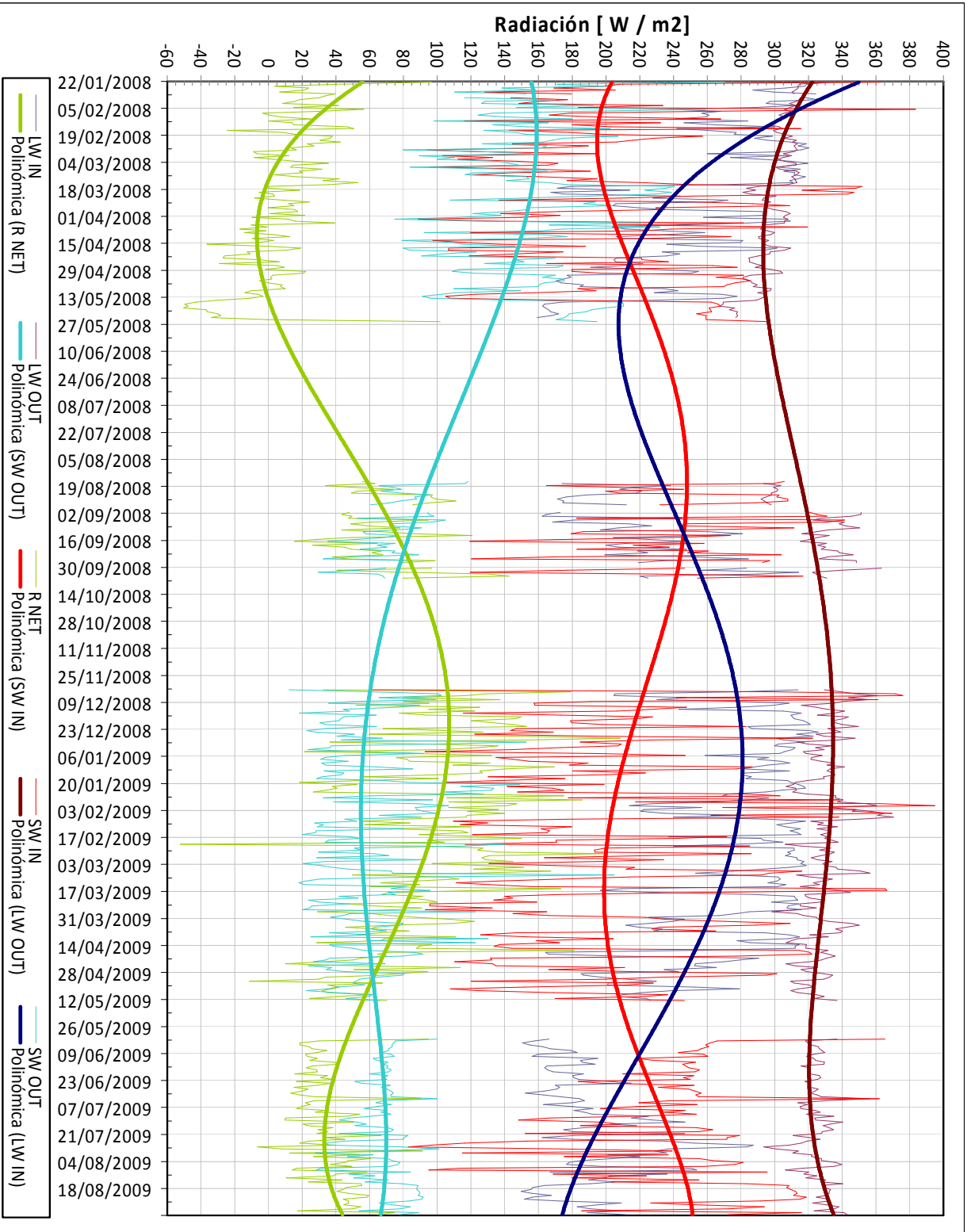
Durante la época húmeda (octubre - marzo) las nubes frecuentes reducen la radiación especialmente en la tarde. Esto explica la mayor amplitud de radiación. Para la época seca, los días son más cortos y la nubosidad muy débil. Esto explica una amplitud de la radiación más estrecha (corta). Se ha visto que la diferencia promedia de radiación de ondas varia muy poco respecto a la altitud (*Ginot et al, 2010*).

La figura 44 muestra los valores medios diarios corregidos de las radiaciones de onda corta, onda larga y de radiación neta para el periodo 2008-2009 en la estación ORE a 5050 m.s.n.m., en el Glaciar de Zongo, mismos que han sido ajustados a un funciones polinómicas.

El albedo está definido como la fracción de la energía solar incidente reflejada hacia el cielo por la superficie (del glaciar). Esta se calcula en longitudes de onda corta. Esto nos proporciona indicaciones sobre la energía disponible en la superficie del glaciar (para la fusión y la sublimación) y se expresa de la siguiente manera (*Ginot et al, 2010*):

$$Albedo = \frac{SW_{\uparrow}}{SW_{\downarrow}}$$

Figura 44: Radiación incidente y reflejadas de onda corta y onda larga y radiación neta diaria. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo
(Fuente: Elaboración propia en base a datos Gint et al, 2010)



El albedo promedio diario es calculado a partir de los promedios semi-horarios entre 9h y 15h. Esto permite limitar los momentos del día en que el captor orientado hacia el cielo este recubierto ya que en ese intervalo horario la escarcha o la nieve se ha derretido, y la estación no está en la sombra proyectada por el casco rocoso en la orilla derecha (Ginot et al, 2010).

Los promedios diarios son calculados después de eliminar los promedios semi-horarios superiores a 0.9 por 0.9 que es el máximo valor posible para la nieve fresca (Ginot et al, 2010).

La figura 45 presenta el albedo medido en la ORE comparado con la radiación neta (ORE tan bién) a nivel diario en la estación del glaciar Zongo para el periodo 2008-2009. Anualmente el albedo en la ORE se mantiene elevado entre 0.15 y 0.25 pero presenta variaciones fuertes y rápidas con valores mayores a 0.9 los días cuando las precipitaciones de nieve son elevadas (Ginot et al, 2010).

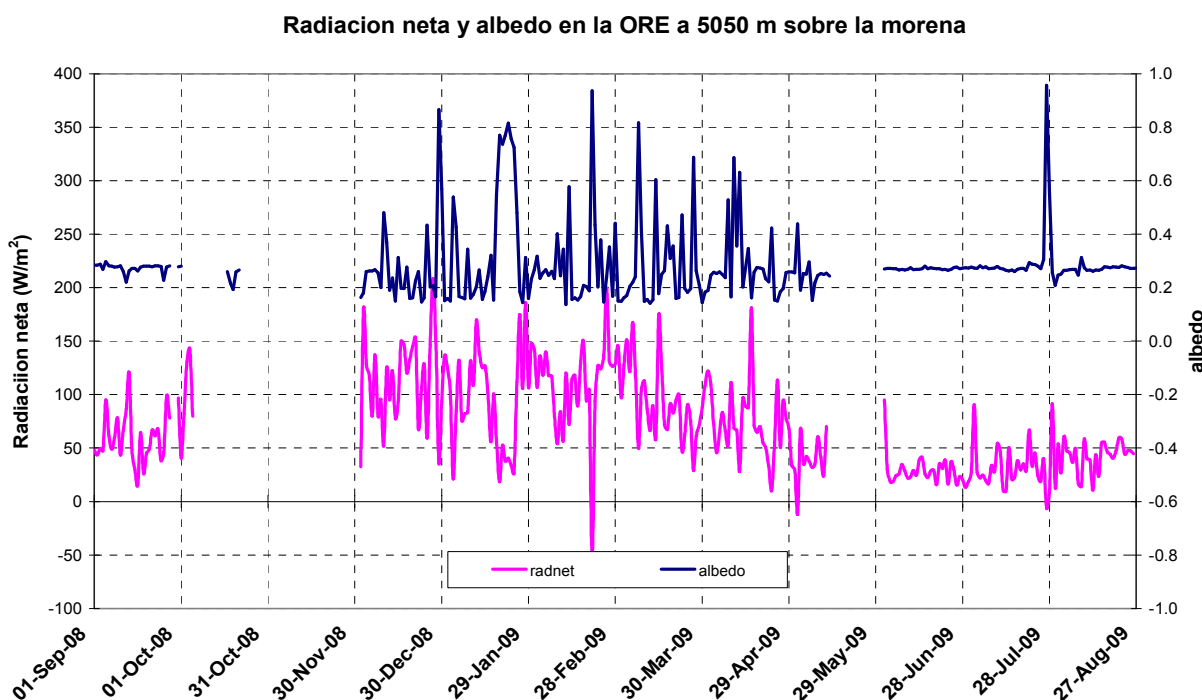


Figura 45: Albedo y radiación neta diaria. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo sobre la morrena
(Fuente: Ginot et al, 2010)

La figura 46 muestra los datos de la radiación neta y el albedo mensual medidos a una altura de 5050 m.s.n.m. en la estación ORE. Es relevante mencionar que los valores promedios mensuales son calculados a pesar de que en algunos días falte el dato medio (vacíos o lagunas). Sobre el glaciar, las fluctuaciones del albedo parecen controlar las variaciones de la radiación neta. Pero, en la ORE, la radiación neta varía de manera casi independiente del albedo. Sobre la morrena, la radiación no es influenciada por la cobertura de nieve (Ginot et al, 2010).

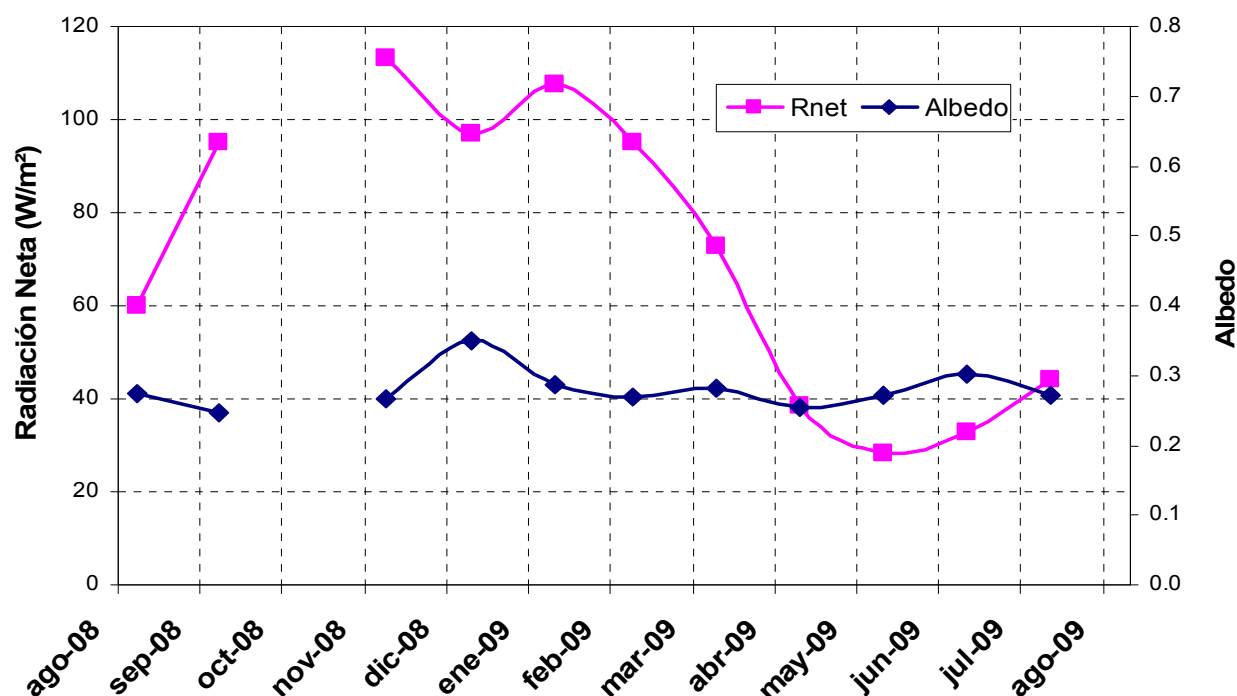


Figura 46: Radiación neta y albedo medio mensual. (2008-2009) Estación ORE a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo sobre la morrena

(Fuente: Ginot et al, 2010)

La figura 47 presenta una comparación de la evolución mensual de la radiación neta y del albedo sobre el glaciar de Zongo medida en la estación **SAMA**⁷ a 5050 m.s.n.m. durante los últimos 16 años hidrológicos. Esta figura ilustra la ausencia del ciclo repetitivo (estacionalidad) para los diferentes años hidrológicos medidos (1993-2009). El albedo es máximo en la estación de lluvias pero muchos años escapan a esta regla: 1997-1998 con un albedo muy bajo en la estación de lluvias pero también 1999-2000 donde el albedo es alto todo el año. El albedo es un reflejo de la radiación, por esta razón se tienen una buena correlación entre las dos variables. Las curvas de albedo y radiación neta presentan tendencias simétricas invertidas (Ginot et al, 2010).

⁷ **SAMA:** (Station Automatique Météorologique d'Altitude) Estación automática meteorológica de altura desarrollada por el IRD (Institut de recherche pour le développement) Instituto de investigación para el desarrollo de Francia, para

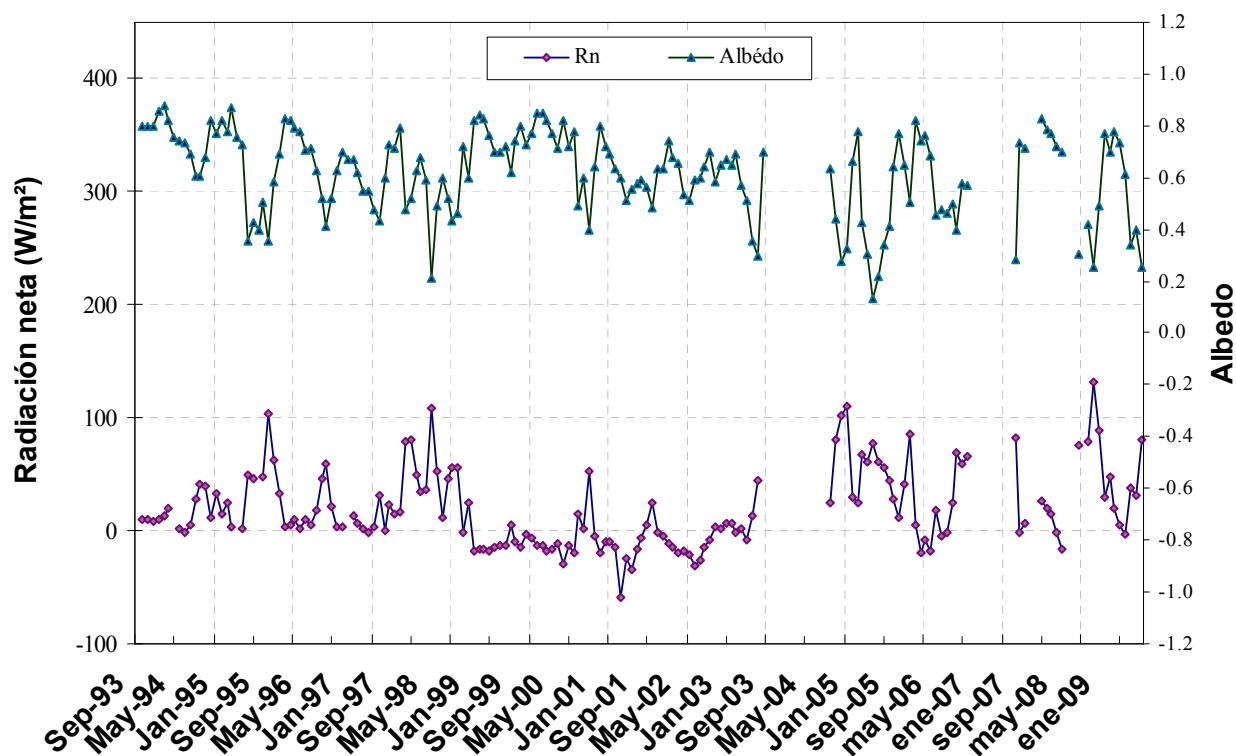


Figura 47: Radiación neta y albedo medio mensual (1993-2003 y 2007-2009). Estación SAMA a 5050 m.s.n.m. en el glaciar de Zongo

(Fuente: Ginot et al, 2010)

4.4 Parametrización y simulación glacio-hidrológica

4.4.1 Calibración indirecta

Los parámetros del modelo fueron determinados o estimados de acuerdo a los criterios expuestos anteriormente para la simulación glacio-hidrológica en las subcuencas cabeceras glaciares sobre el periodo 1975 – 2009, excepto los coeficientes de escorrentía y el factor grado – día que constituyen los parámetros de calibración del modelo.

La optimización de estos parámetros se alcanzó variando sistemáticamente los valores respectivos dentro de rangos físicos e hidrológicamente razonables.

El control y validación de estos parámetros se realizó utilizando criterios de balance hídrico y a través de la comparación entre caudales simulados en las cuencas de estudio y caudales medidos en las cuencas de apoyo (calibración indirecta).

Los parámetros del modelo calibrados y validados se presentan en la siguiente tabla:



Parámetro	Jalancha	Khapi	Huayna Potosí	Zongo
Coeficiente de escorrentía "c _s " Snow (fusión de nieve)	1.45	1.45	-	-
Coeficiente de escorrentía "c _R " rainfall (escurrimiento)	1.40	1.40	-	-
para las épocas seca (may-nov) y húmeda (*) (dic-abr)	0.10*	0.10*	-	-
Factor grado día "a" [cm/°C · mes]	49.5	49.5	-	-
x	0.2864	0.2864	-	-
y	0.2912	0.2912	-	-
$Q_{\text{MÍNIMO}} = x ^ (1/y)$	0.0137	0.0137	-	-
% Área CON cobertura Glacial / nival	92 %	91 %	25 %	75 %
% Área SIN cobertura Glacial / nival	8 %	9 %	75 %	25%

Tabla 31: Parámetros de calibración del modelo glacio-hidrológico para la simulación de las subcuencas Jalancha y Khapi
(Fuente: Elaboración propia)

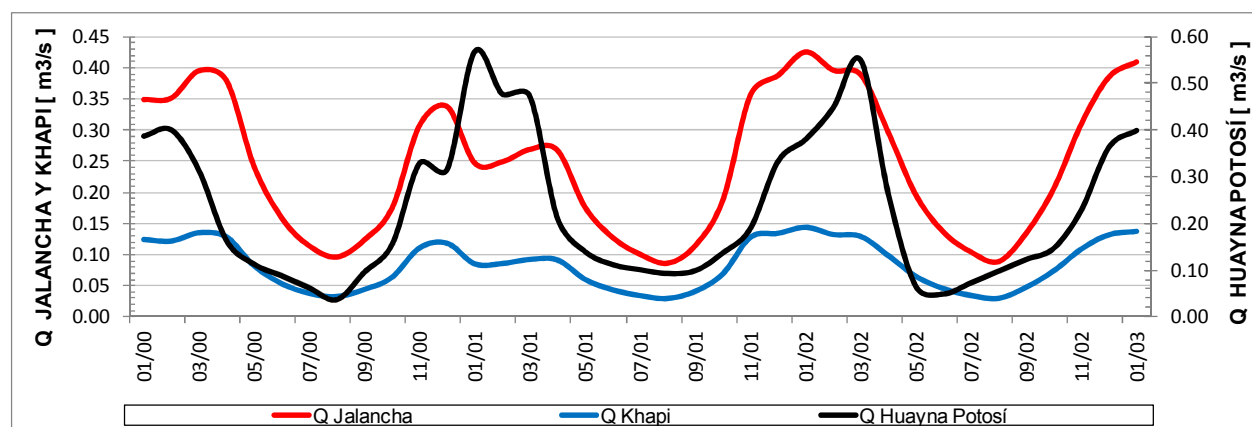


Figura 48: Caudales medios mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales medios mensuales medidos en Huayna Potosí (Apoyo) (2000-2002)
(Fuente: Elaboración propia)

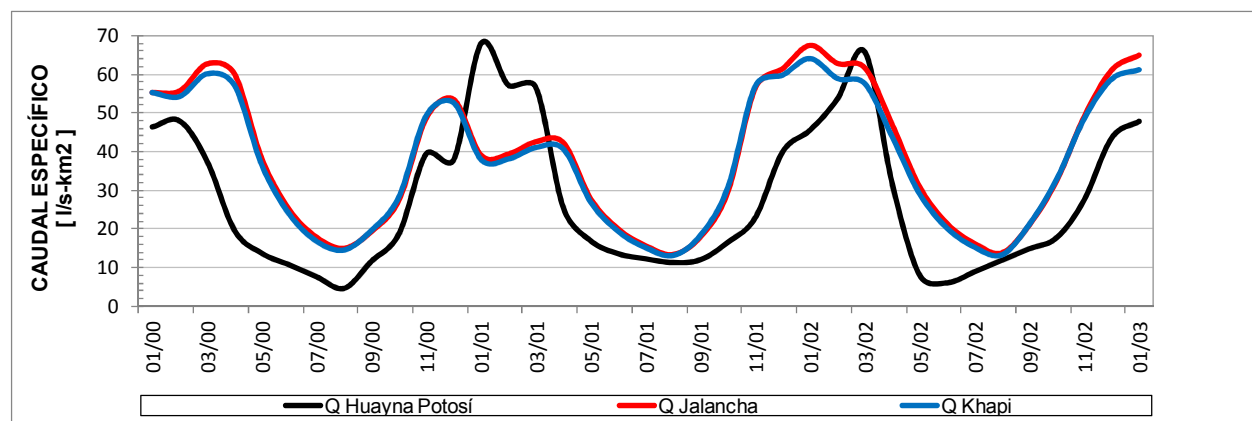


Figura 49: Caudales específicos mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales específicos medidos en Huayna Potosí (Apoyo) (2000-2002)
(Fuente: Elaboración propia)



La figura 48 permite comparar a nivel mensual los hidrogramas simulados en Jalancha y Khapi contra los medidos en Huayna Potosí (2000-2002), y la figura 49 permite comparar los caudales específicos entre estas cuencas. En general los picos de los hidrograma en las subcuencas Jalancha y Khapi se adelantan 1 mes salvo en 2000 que se retrasa 1 mes. Los valores mínimos de caudales ocurren en agosto en las dos subcuencas glaciares simuladas. Sin embargo en el año 2000 el pico en Jalancha y Khapi y la curva de recesión se desplaza un mes o tiene un efecto de retardo en el escurrimiento. Para los años 2001 y 2002 la curva de recesión solamente se desplaza en algunos meses para Jalancha y Khapi. En Jalancha y Khapi la curva de ascenso de los hidrogramas tiene un efecto adelantado, es decir, que en octubre se tiene un escurrimiento significativo. Es posible que estas diferencias sean a causa de que las cuencas Jalancha y Khapi tienen mayor influencia del glacial (área cubierta) que la de Huayna Potosí, y el escurrimiento se deba por efecto de ablación del glaciar. Huayna Potosí tiene mayor respuesta al escurrimiento por efecto de la precipitación. En Jalancha y Khapi el ascenso del hidrograma es más rápido y se adelanta un mes, y la recesión es menos brusca que en Huayna Potosí.

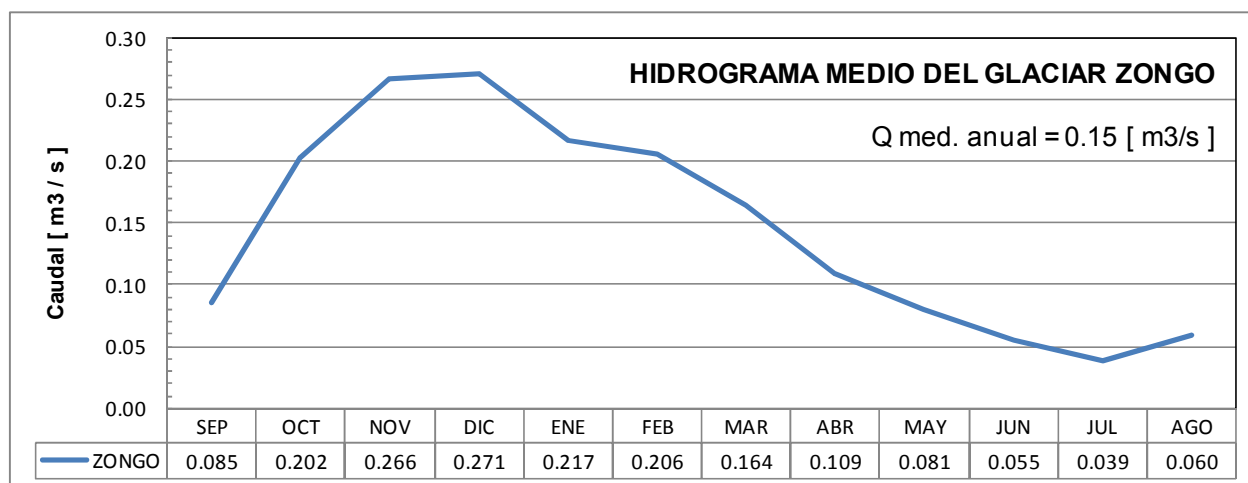


Figura 50: Caudales medios mensuales medidos en el glaciar de Zongo (Apoyo) (1992-2002)
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 50 muestra el hidrograma medio anual para el glaciar de Zongo, el que permite observar la distribución temporal de caudales en el año hidrológico septiembre-agosto.

La figura 51 permite comparar a nivel mensual los hidrogramas simulados en Jalancha y Khapi contra los medidos en Zongo (1991-2009) y la figura 52 permite compara los caudales específicos entre estas cuencas. Para los años 1992-1993 y 2007-2008 se producen los hidrograma más bajos de toda la serie en Jalancha y Khapi y 96-97 en Zongo. Mientras que para el hidrograma de mayor magnitud en Jalancha y Khapi se produce en 97-98 y en Zongo 98-99. La curva de recesión coincide en varios años (1993, 1995, 1997, 1998, 1999, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009). En general la curva de ascenso del hidrograma de Zongo tiene un efecto de adelantamiento del escurrimiento respecto a Jalancha y Khapi en un mes, es decir que en Zongo ya en octubre se tiene escurrimientos significativos.

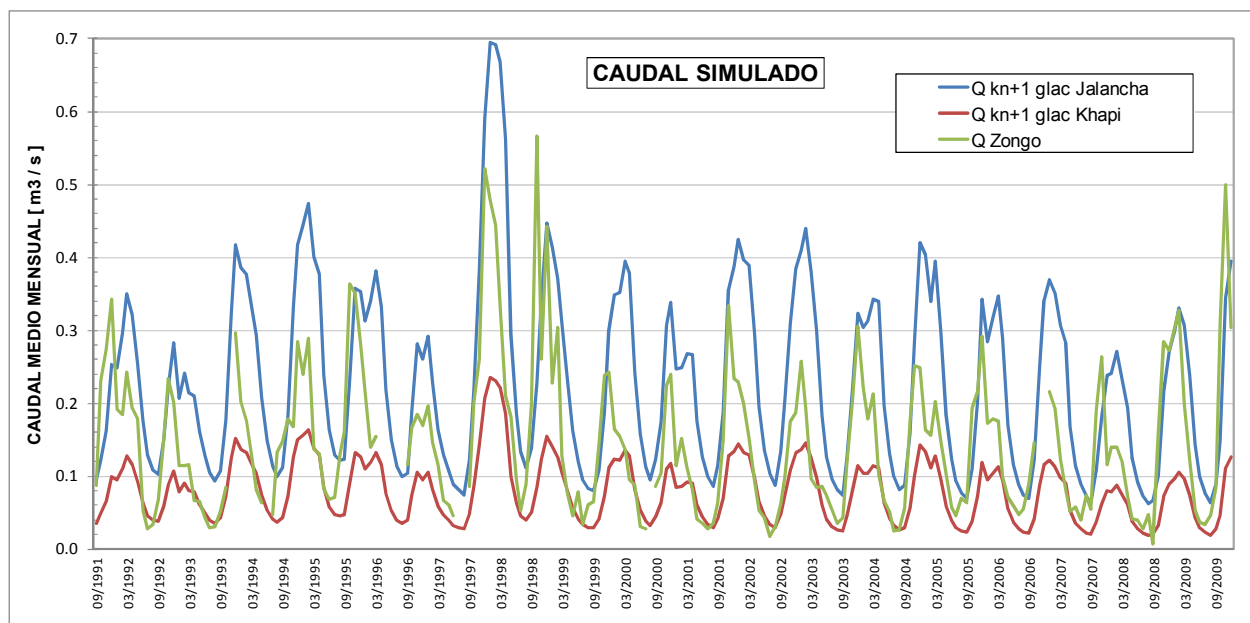


Figura 51: Caudales medios mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales medios mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

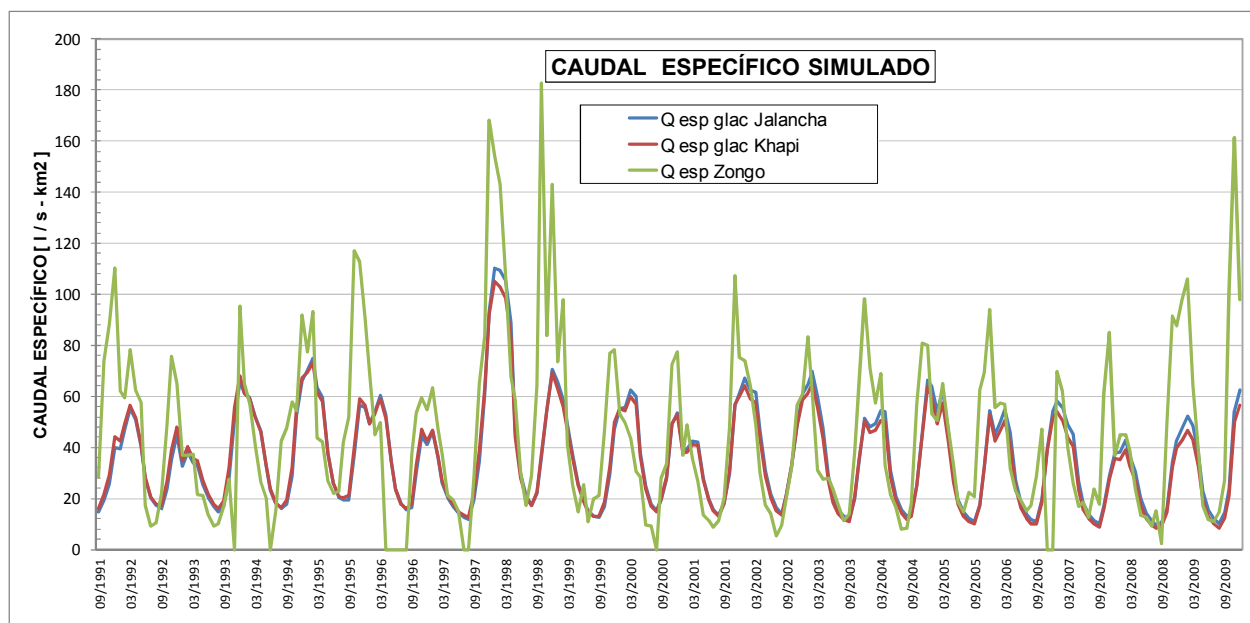


Figura 52: Caudales específicos mensuales simulados en Jalancha y Khapi vs. los caudales específicos mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)
(Fuente: Elaboración propia)



Es posible que estas diferencias sean a causa de que las cuencas Jalancha y Khapi tienen mayor influencia del glaciar que Zongo, o posibles problemas del modelo glacio-hidrológico para simular el efecto de ablación del glaciar por efecto de la radiación, temperatura y albedo. Las precipitaciones en Zongo son de magnitud mayor respecto a las cuencas glaciares de estudio, lo cual favorece al escurrimiento, mientras que en Jalancha y Khapi el escurrimiento se amortigua tanto en el ascenso del hidrograma, como en la recesión.

La tabla 32 muestra las láminas de escurrimiento y de precipitación en las subcuenca cabeceras con cobertura glacial, así como el coeficiente de esorrentía C (relación entre láminas de precipitación y escurrimiento) cuyos valores se encuentran dentro de los rangos aceptables. Estas subcuencas de la parte alta muestran coeficientes de escurrimiento notablemente altos, esto se explica por la influencia del aporte glacial en dichas cuencas por fusión de la nieve y/o hielo. Además el escurrimiento se ve favorecido por el relieve y altas pendientes en la cuenca (*ver punto 5*).

Balance Hídrico						
Subcuenca	Área [km ²]	Precipitación [mm/año]	Caudal Q [m ³ /s]	Caudal Laminar q [mm/año]	C	Caudal esp. [l/s-km ²]
Jalancha	6.32	760	0.225	1123	1.48	35.6
Khapi	2.24	762	0.082	1154	1.51	36.6

Tabla 32: Relación Precipitación – escurrimiento de las subcuencas cabeceras con glaciares
(Fuente: Elaboración propia)

Las láminas de deshielo, están estrechamente relacionadas con el factor grado – día, se controlan por comparación entre el volumen de masa glacial perdido durante el periodo de análisis (1975 – 2009), que se estima a través de las fotografías aéreas disponibles y del volumen calculado a partir de un caudal de deshielo promedio simulado durante el mismo periodo. Si bien esta hipótesis tiene muchas limitaciones, proporciona información útil sobre el orden de magnitud de los caudales de aporte por fusión de hielo o nieve que han sido simulados.

La superficie de glaciar perdida en las subcuencas durante el periodo 1975 – 2009 es:

$$A_{\text{GLACIAL JALANCHA (2009 - 1975)}} = (7.552 - 6.327) [\text{km}^2] = \mathbf{1.225 [\text{km}^2]}$$

$$A_{\text{GLACIAL KHAPE (2009 - 1975)}} = (3.096 - 2.245) [\text{km}^2] = \mathbf{0.851 [\text{km}^2]}$$

De acuerdo a estudios realizados por algunos investigadores (e.g. Ramírez), en el glaciar Illimani se tiene una profundidad promedio del orden de los 130 metros. Entonces los volúmenes de pérdida por subcuencas se estima como:

$$V_{\text{GLACIAL JALANCHA (2009 - 1975)}} = 1.225 [\text{km}^2] * 0.130 [\text{km}] = \mathbf{0.159 [\text{km}^3]}$$

$$V_{\text{GLACIAL KHAPE (2009 - 1975)}} = 0.851 [\text{km}^2] * 0.130 [\text{km}] = \mathbf{0.111 [\text{km}^3]}$$



Ajustando el factor grado – día a 49.5 [cm/°C·mes] para las subcuencas de Jalancha y Khapi, respectivamente, se obtienen caudales medios de deshielo del orden de 0.225 y 0.082 [m³/s] para las subcuencas Jalancha y Khapi respectivas.

Los volúmenes de deshielo para Jalancha y Khapi se calculan como:

$$V_{\text{SIMULADO JALANCH}} = 0.225 \text{ [m}^3\text{/s]} * 3600 \text{ [s]} * 24 \text{ [h]} * 365 \text{ [días]} * 35 \text{ [años/1'000'000.000]} = \mathbf{0.248 \text{ [km}^3\text{]}}$$

$$V_{\text{SIMULADO KHAPI}} = 0.082 \text{ [m}^3\text{/s]} * 3600 \text{ [s]} * 24 \text{ [h]} * 365 \text{ [días]} * 35 \text{ [años/1'000'000.000]} = \mathbf{0.091 \text{ [km}^3\text{]}}$$

La diferencia significativa para los volúmenes calculados y simulados en Khapi pueden deberse a que la profundidad del glaciar esta sobre estimada, y puede que sea algo menor a los 130 [m].

Estos volúmenes equivalen a una lámina de deshielo media anual en Jalancha y Khapi de:

$$L_{\text{DH JALANCH}} = 0.225 \text{ [m}^3\text{/s]} * 3600 \text{ [s]} * 24 \text{ [h]} * 365 \text{ [días]} / 6.32 \text{ [km}^2\text{]} / 1000 = \mathbf{1123 \text{ [mm/año]}}$$

$$L_{\text{DH KHAPI}} = 0.082 \text{ [m}^3\text{/s]} * 3600 \text{ [s]} * 24 \text{ [h]} * 365 \text{ [días]} / 2.24 \text{ [km}^2\text{]} / 1000 = \mathbf{1154 \text{ [mm/año]}}$$

4.4.2 Simulación glacio-hidrológica

Se ha simulado la hidrología de la cuenca glacial a partir de los parámetros y consideraciones adoptadas en el punto anterior.

Las figuras 53 y 54 muestran las series multi-temporales (1975-2009) por zonas altitudinales de caudal por fusión y escurrimiento directo a nivel mensual de la simulación glacio-hidrológica sin considerar el efecto de retardo por el coeficiente de recesión (*ver más en punto 4.2*).

$$Q_{i(zonas)} = [c_{Sn} \cdot (a_n \cdot 30) \cdot (T_n + \Delta T_n) \cdot S_n + c_{Rn} \cdot P_n] \cdot \frac{A \cdot 10000}{86400 \cdot 30} \cdot$$

En la Zona E (4750 m.s.n.m) el escurrimiento intermensual debido a la fusión va disminuyendo debido a la pérdida de cobertura nival o glacial es menor que en años anteriores además que el periodo 1975-1983 es más húmedo que años posteriores. En la zona F (5250 m.s.n.m.) se tienen temperaturas sobre y bajo el umbral de la temperatura crítica que define si se tiene lluvia o nieve. Es por esta razón que en la zona F se tiene algunos meses donde no se tiene escurrimiento debido a que la precipitación sólida (nieve) se acumula, además de esto la temperatura aumenta por lo que las temperaturas están más frecuentemente sobre la crítica por lo que se tiene mayor fusión. En las Zonas G (5760 m.s.n.m.) y H (6120 m.s.n.m.) las temperaturas inter-mensuales están por debajo de la temperatura crítica por lo que se tiene nieve acumulada y el factor grado – día solamente permite la fusión de hielo o nieve para temperaturas superiores a la temperatura crítica, es posible que en algunas horas del día se produzca fusión del hielo, sin embargo a nivel mensual es irrelevante y complejo de evaluar.

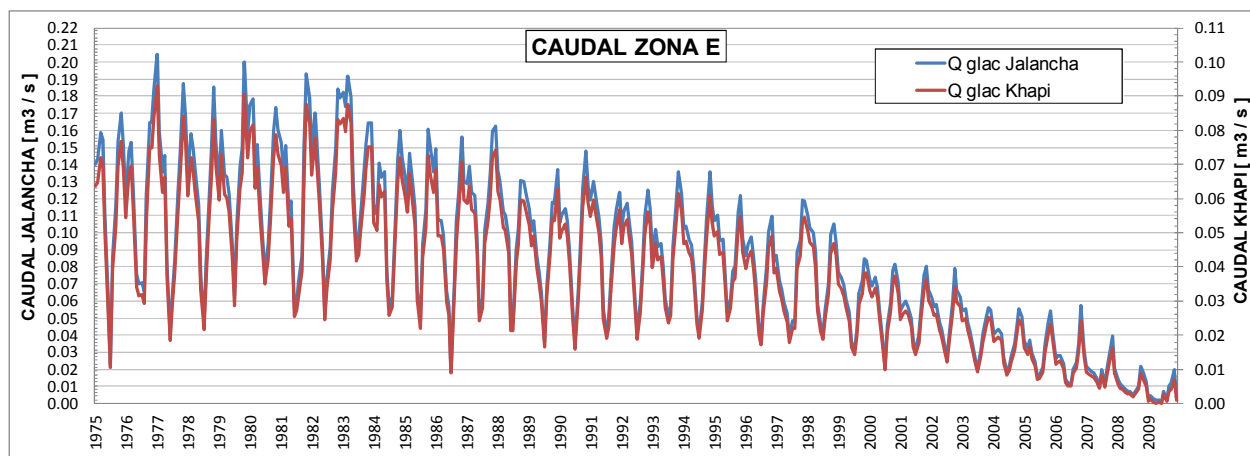


Figura 53: Caudal simulado en las **Zona E** (4750 m.s.n.m) en las subcuencas Jalancha y Khapi
(Fuente: Elaboración propia)

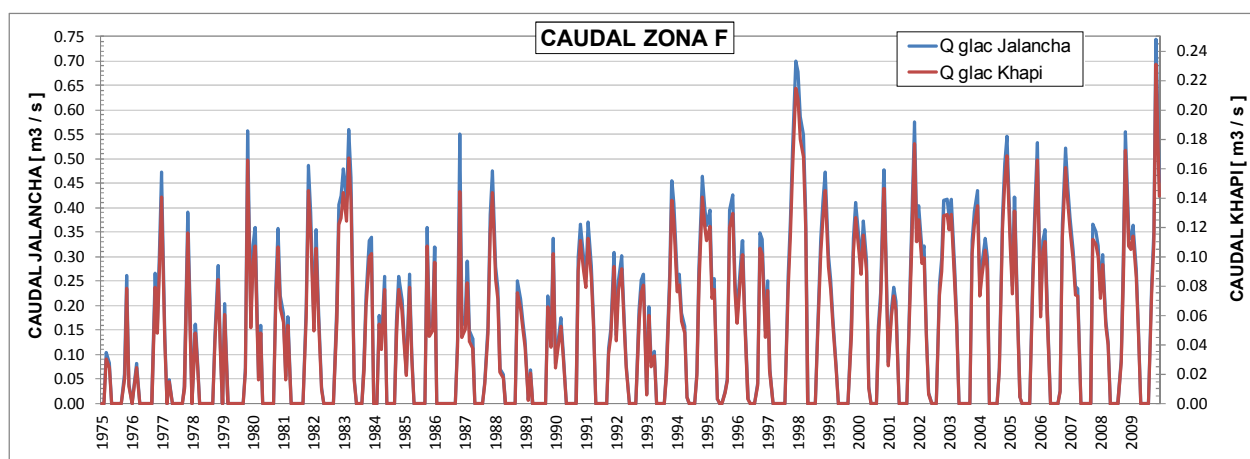


Figura 54: Caudal simulado en las **Zona F** (5250 m.s.n.m) en las subcuencas Jalancha y Khapi
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 55 muestra la variación multi-temporal a nivel mensual por subcuencas del coeficiente de recesión, calculada mes a mes con la relación $k_{Nn} = \left[x_M \cdot \left(\frac{\bar{Q}_M}{\bar{Q}_N} \cdot Q_{Nn-1} \right)^{-y_M} \right]^{\frac{4}{\sqrt{A_M/A_N}}}$. Donde Q_{Nn-1} inicial es la sumatoria de los caudales por zonas altitudinales (ver más en punto 4.3.3.4).

El comportamiento es simétrico entre las subcuencas pero con pequeñas variaciones en la Jalancha son ligeramente de mayor magnitud. Los valores de este coeficiente varían entre 0,45 y 0,85 tanto en Jalancha como en Khapi. Los valores menores se presentan en época húmeda y los valores mayores en época seca.

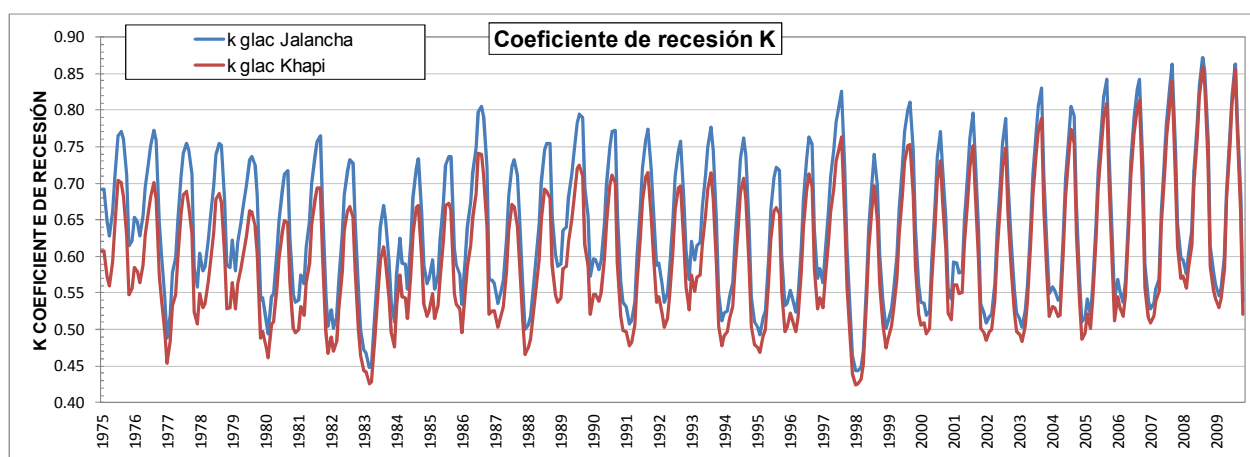


Figura 55: Coeficiente de recesión (subcuencas Jalancha y Khapi) (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

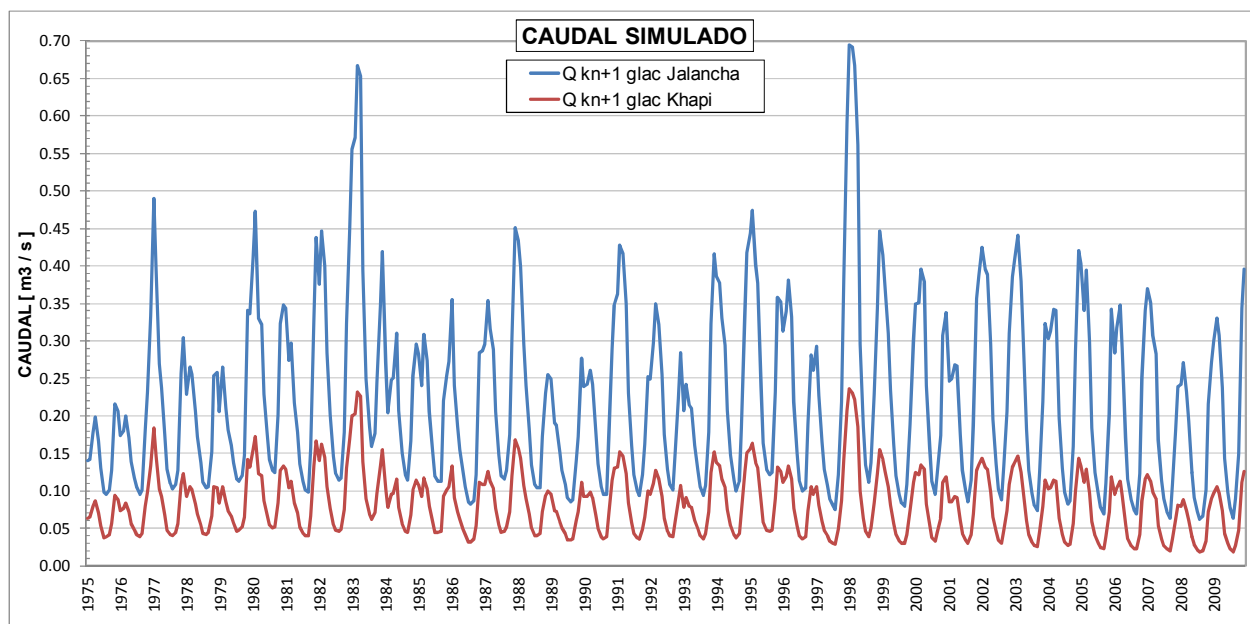


Figura 56: Caudales medios mensuales simulados (subcuencas Jalancha y Khapi) (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 56 muestra las series de caudal simulado multi-temporal a nivel mensual por subcuencas con influencia del coeficiente de recesión, mediante la relación que considera la simulación inicial por zonas altitudinales: $Q_{n+1} = \sum Q_{i(zonas)}_{n+1} \cdot (1 - k_{n+1}) + Q_n \cdot k_{n+1}$. (ver más en punto 4.2). La respuesta a la fusión y escurrimiento directo es mayor en Jalancha respecto a Khapi.

La figura 56 permite apreciar la variación intermensual y la variabilidad interanual en el periodo 1975-2009 de las cuencas glaciares de Jalancha y Khapi. Los valores medios mensuales de



caudales simulados para el periodo 1975-2009 en las subcuencas cabeceras con cobertura glacial/nival, se los resume en el punto 6, donde se presenta la síntesis de la evaluación de la oferta de agua en todas las subcuencas, cuencas intermedias y puntos de control del río Sajhuaya.

La figura 57 permite comparar los hidrogramas simulados contra los hietogramas para la serie mensual 1975-2009 en las cuencas simuladas. De esta manera se puede evaluar el comportamiento de las cuencas glaciales respecto al de una cuenca hidrológica natural sin cobertura glacial o nival, que es diferente. Los picos en caudales no corresponden a los picos de precipitación, debido a la condición definida por la temperatura crítica a producirse lluvia solida (nieve) favoreciendo la recarga del glacial (almacenamiento) y no así al escurrimiento (83-84). Por el contrario los mayores escurrimientos por aporte del glaciario, se producen en años relativamente secos 82-83 y 96-97 debido a las condiciones meteorológicas, influenciadas y favorecidas probablemente por la baja nubosidad y por la alta radiación que se produce en la cuenca glacial. Se puede observar también que en general el pico del caudal por aporte del glacial tiene un adelantamiento de un mes (desplazamiento). Los meses de estiaje (junio, julio y agosto) en las subcuencas glaciares de Jalancha y Khapi reciben aportes de la fusión del glaciario (ablación), vertientes y manantiales. Esto implica que los caudales mínimos tienen un retardo produciendo se estos entre los meses de julio y agosto o septiembre dependiendo el año.

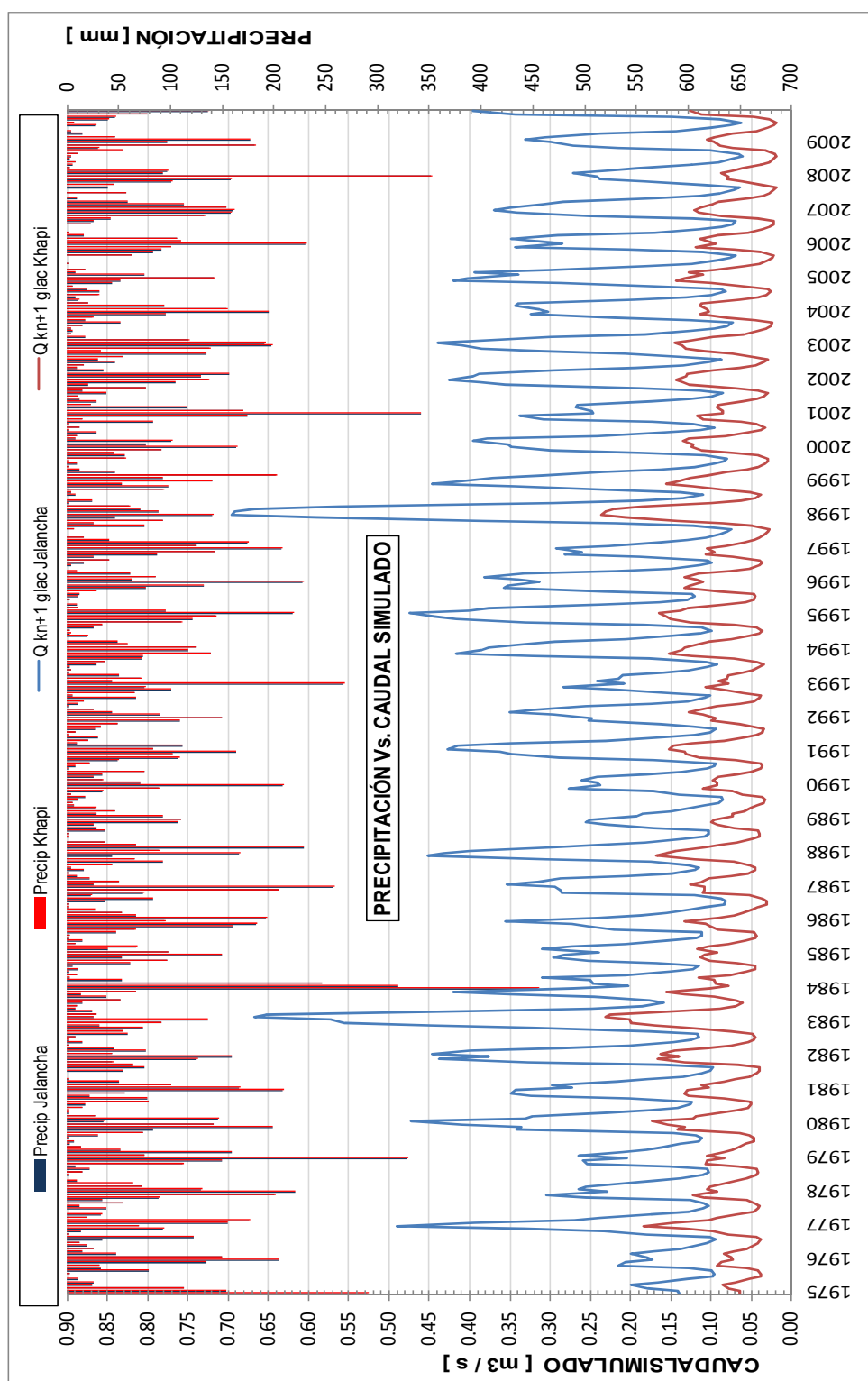


Figura 57: Evaluación del comportamiento de cuencas glaciares simuladas, precipitación vs. caudales (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)



5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE RECURSOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO

5.1 Descripción del modelo

Este modelo hidrológico, ha sido desarrollado el Centro de estudios y Experimentación del ministerio de fomento de España. Es un modelo matemático de transformación “precipitación – aportación”. CHAC-SIMULA realiza un balance hídrico a nivel mensual, por lo tanto su funcionamiento está a base de datos climatológicos e hidrométricos mensuales, además de algunos parámetros relacionados con las propiedades de físicas e hidrogeomorfológicas y morfométricas de la cuenca.

El modelo permite determinar los aportes hídricos a la salida de una cuenca, específicamente caudales medios mensuales, resultantes de precipitaciones ocurridas sobre un área determinada. El modelo matemático simula un sistema hidrológico frente a un fenómeno precipitación – aportación, sin que se utilice ley de probabilidad alguna, es decir que una entrada produce siempre una misma salida, por lo que pertenece a los modelos determinísticos.

El modelo representa a la cuenca como una unidad única, y en consecuencia los parámetros que la definen están representados por valores promedios, es decir que no varían de un punto a otro, por lo que también se lo clasifica como modelo hidrológico de parámetros concentrados o agregado.

5.2 Estructura matemática del modelo

El modelo estima el escurrimiento de agua a través de un cauce natural como el de un río, como la suma del escurrimiento directo a partir de la precipitación y el aporte de agua subterránea:

$$Q_{MED} = Q_{SUP} + Q_{SUB}$$

Donde:

Q_{MED} = Caudal medio en el periodo [m^3/s]

Q_{SUP} = Caudal superficial [m^3/s]

Q_{SUB} = Caudal subterráneo [m^3/s]

El modelo estima el escurrimiento a partir de la precipitación. El modelo calcula inicialmente el excedente T (en mm) del periodo con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P_o &= C \cdot (H_{MAX} - H_{INT1}) \\ DE &= H_{MAX} - H_{INT1} + OP \cdot ET \\ T &= (P - P_o)^2 / (P + DE - 2 \cdot P_o), \text{ [si } P > P_o \text{]} \\ T &= 0, \text{ [si } P < P_o \text{]} \end{aligned}$$

Donde: T: Excedente del periodo en [mm]



- H_{MAX} : Capacidad máxima de almacenamiento en el suelo en [mm]
 C : parámetro de excedencia (adimensional)
 $H_{INT\ 1}$: Agua almacenada en el estado intermedio 1 en [mm]
 correspondiente al subperiodo 1
 P : precipitación en el periodo en [mm]
 OP : Concentración de la lluvia = Número de días de lluvia tipo/30
 ET : Evapotranspiración potencial en el periodo en [mm]
 DE : Suma de la evaporación en el subperiodo más el almacenamiento
 no llenado ($H_{MAX} - H_{INT\ 1}$) del suelo en [mm]

Las anteriores ecuaciones indican que sólo habrá excedente si la precipitación P supera el valor de P_o , que representa un valor mínimo por debajo del cual no se produce infiltración o escorrentía superficial. Si $C=0$ el valor de $P_o=0$.

El modelo calcula luego la infiltración XI en [mm] con:
$$XI = XIMAX \cdot OP \cdot \frac{T}{T + XIMAX \cdot OP}$$

Donde: $XIMAX$: Infiltración máxima en el mes [mm/mes]

Luego se determina el escurrimiento Q_{SUP} [m³/s] superficial

directo con la ecuación:

$$Q_{SUP} = \frac{(T - XI) \cdot S \cdot 1000}{DT \cdot 24 \cdot 3600}$$

Donde: XI : Infiltración del periodo en [mm]
 S : Superficie de la cuenca [km²]
 DT : Número de días del periodo = 30 días

La intensidad de recarga al acuífero RE [m³/s] se calcula con:
$$RE = \frac{XI \cdot S \cdot 1000}{DT_2 \cdot 24 \cdot 3600}$$

El cálculo del caudal subterráneo o caudal base usa la siguiente relación, correspondiente a un embalse lineal:

$$Q_2 = Q_1 \cdot e^{-\Delta t/k} + RE (1 - e^{-\Delta t/k})$$

El caudal subterráneo Q_{SUB} [m³/s] se calcula con:
$$Q_{SUB} = \frac{VOL_1 + RE \cdot 86400 \cdot DT_2 - VOL_2}{DT \cdot 86400}$$

$$VOL_1 = Q_1 / AL \cdot 86400$$

$$VOL_2 = Q_2 / AL \cdot 86400$$

Donde:

AL : Parámetro alfa del acuífero en (1/días), equivalente a la inversa de la constante de recesión k ($AL=1/k$)
 VOL_1 : Acumulación de volumen inicial del acuífero [m³]
 VOL_2 : Acumulación de volumen final del acuífero [m³]
 RE : Intensidad de recarga al acuífero en [m³/s]



$$DT_2: OP \cdot DT$$

Q_1, Q_2 : Caudal subterráneo al principio y final del subperiodo [m^3/s]

5.3 Datos de entrada

El modelo matemático para ordenadores, necesitan archivos de entrada, que los podemos clasificar en:

Información pluviométrica. Archivo de series de precipitación media mensual areal en [mm] del área en estudio (1975-2009). Para el cálculo de la precipitación areal se consideró la ponderación areal de lluvia por zonas altitudinales (asimilables a las isoyetas).

	SUBCUENCA INTERMEDIA JALANCHA (5.62 km2)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Maximo de la serie	369.1	259.2	199.4	54.4	29.9	60.8	46.0	53.9	99.2	109.0	130.4	165.3	1064.7
Minimo de la serie	56.3	20.6	6.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	10.8	25.6	382.1
Promedio	155.7	96.9	80.4	28.2	10.0	7.7	7.5	12.5	33.0	40.0	54.2	93.6	619.8
cuartil 25%	114.3	64.1	44.3	14.4	1.7	0.0	0.3	3.4	16.5	23.0	25.6	66.6	532.0
cuartil 75%	181.5	124.6	94.3	41.0	18.2	10.9	9.2	16.5	45.0	56.0	76.7	118.2	690.5
	SUBCUENCA INTERMEDIA KHAPI (10.83 km2)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Maximo de la serie	357.3	250.9	193.0	52.7	28.9	58.9	44.5	52.2	96.0	105.5	126.2	160.0	1030.6
Minimo de la serie	54.5	19.9	5.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	10.5	24.8	369.8
Promedio	150.7	93.8	77.9	27.3	9.7	7.4	7.3	12.1	31.9	38.7	52.5	90.6	600.0
cuartil 25%	110.6	62.0	42.9	14.0	1.7	0.0	0.3	3.3	16.0	22.3	24.7	64.5	514.9
cuartil 75%	175.7	120.6	91.3	39.7	17.6	10.6	8.9	15.9	43.5	54.2	74.2	114.4	668.3
	SUBCUENCA INTERMEDIA CEBOLLULLO (9.84 km2)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Maximo de la serie	316.0	221.9	170.7	46.6	25.6	52.1	39.4	46.2	84.9	93.3	111.6	141.5	911.4
Minimo de la serie	48.2	17.6	5.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	9.3	21.9	327.1
Promedio	133.3	83.0	68.9	24.2	8.5	6.6	6.4	10.7	28.2	34.2	46.4	80.2	530.6
cuartil 25%	97.8	54.8	37.9	12.4	1.5	0.0	0.2	2.9	14.1	19.7	21.9	57.0	455.4
cuartil 75%	155.4	106.7	80.7	35.1	15.6	9.3	7.9	14.1	38.5	48.0	65.6	101.2	591.0
	SUBCUENCA INTERMEDIA TAHUAPALCA (11.38 km2)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Maximo de la serie	289.0	202.9	156.1	42.6	23.4	47.6	36.0	42.2	77.7	85.3	102.1	129.4	833.5
Minimo de la serie	44.1	16.1	4.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	8.5	20.0	299.1
Promedio	121.9	75.9	63.0	22.1	7.8	6.0	5.9	9.8	25.8	31.3	42.4	73.3	485.2
cuartil 25%	89.5	50.2	34.7	11.3	1.4	0.0	0.2	2.7	12.9	18.0	20.0	52.2	416.4
cuartil 75%	142.1	97.6	73.8	32.1	14.2	8.5	7.2	12.9	35.2	43.9	60.0	92.5	540.5

Tabla 33: Estadísticos de precipitación mensual y anual areal por subcuencas (serie 1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

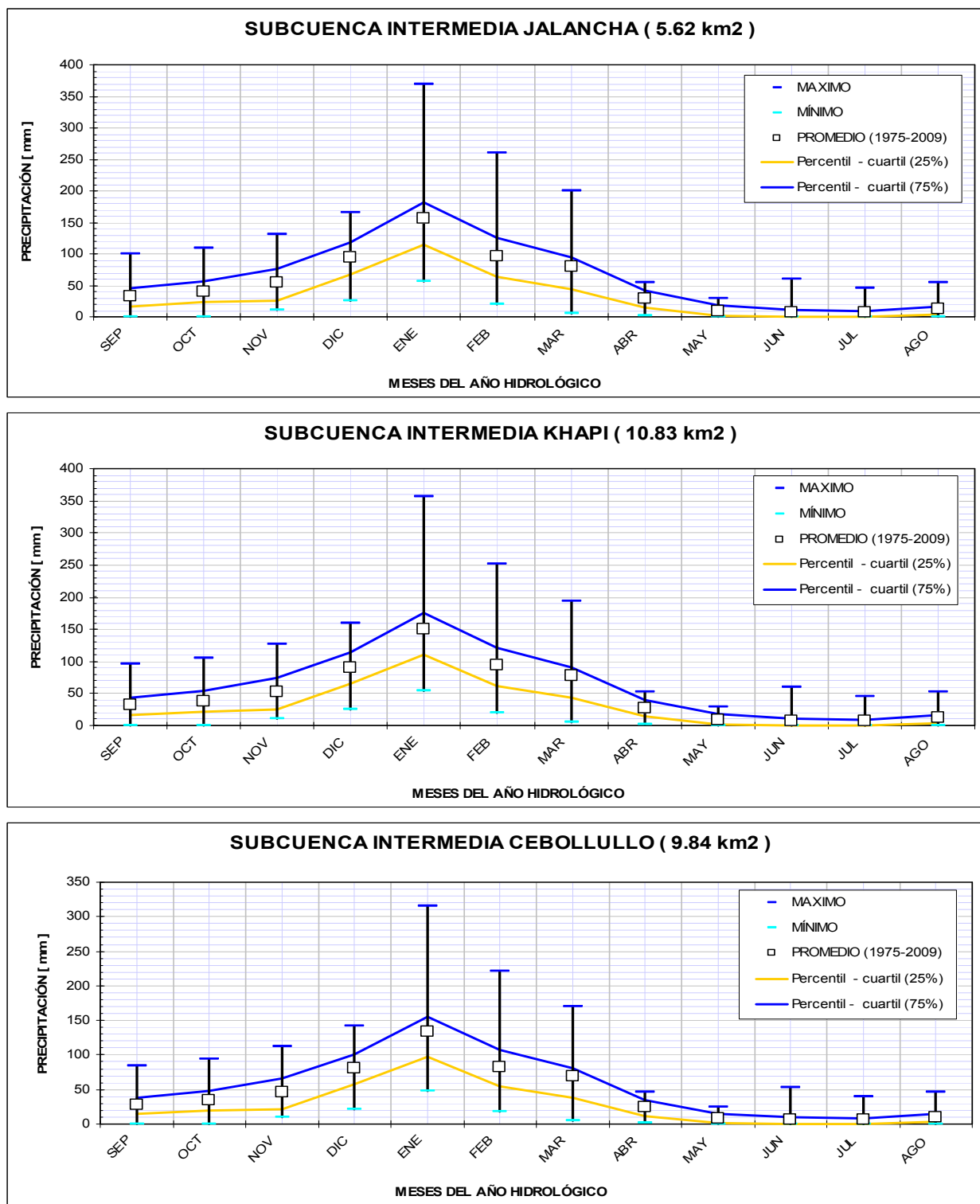


Figura 58: Estadísticos de precipitación mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

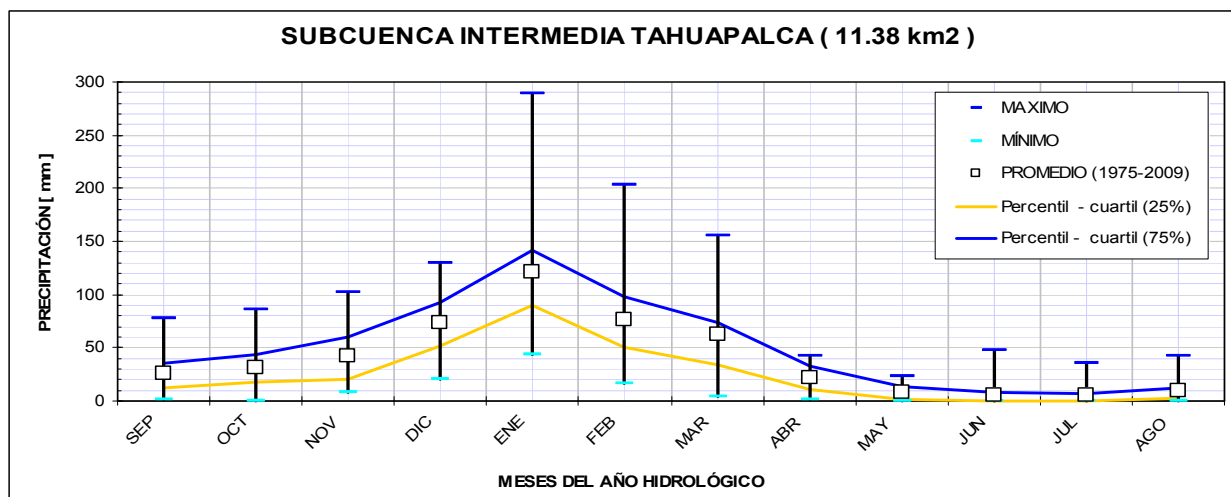


Figura 58: Estadísticos de precipitación mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009) (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

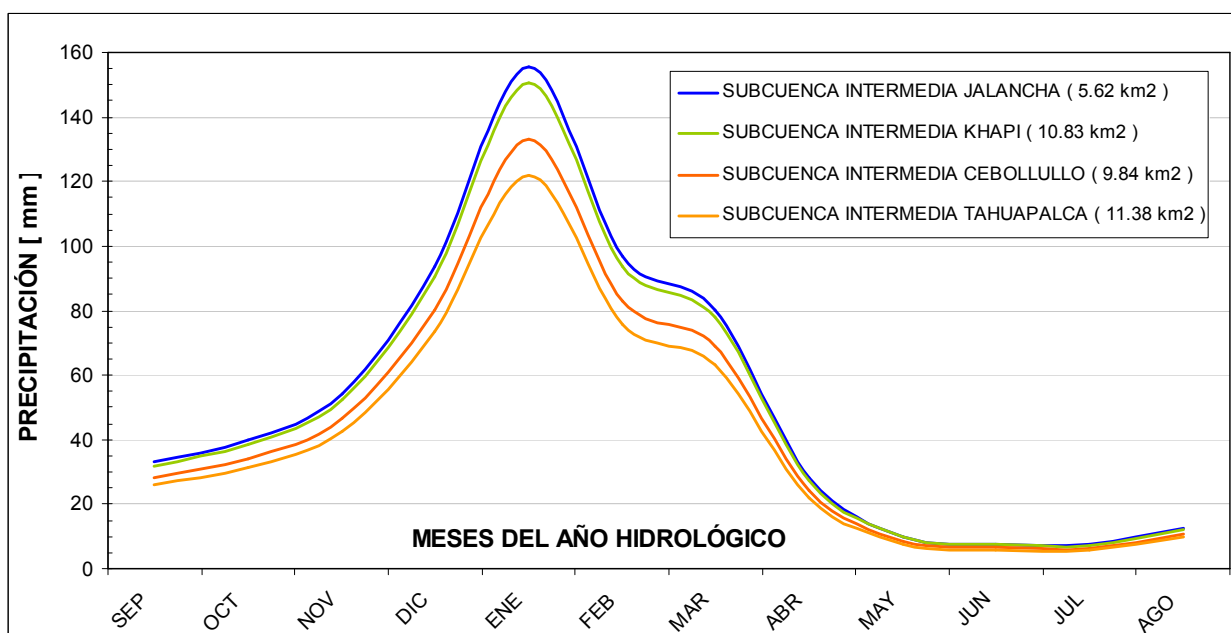


Figura 59: Precipitación sintética areal mensual por subcuencas intermedias para 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

Información hidrométrica. Archivo de series de caudales medios mensuales en [m³/seg], que se registraron en la estación hidrométrica control, ubicada a la salida de la cuenca. Su importancia radica, en la comparación gráfica que nos presenta el modelo entre los datos simulados y los datos observados (calibración). No se tienen series temporales en la cuenca de estudio, simplemente aforos esporádicos de 2009-2010. Por lo que no es posible una calibración.



Información de evapotranspiración potencial. Archivo de series de evapotranspiración potencial areal media mensual en [mm] del área de estudio (1975-2009). Para el cálculo de la ETP areal se considero el método geoestadística de interpolación por el método Kriging.

SUBCUENCA INTERMEDIA JALANCHA (5.62 km2)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	159.5	138.2	157.9	133.8	146.5	140.2	129.6	146.4	162.5	174.9	167.3	168.6	1711.4
Min	90.0	91.6	83.9	83.2	78.1	71.0	76.7	91.4	100.6	108.6	111.1	109.5	1158.1
Promedio	125.7	111.8	118.9	107.7	105.5	97.4	101.0	114.2	123.1	144.3	143.9	141.4	1435.0
cuartil 25%	115.6	103.1	110.2	100.9	96.0	87.4	90.0	108.2	113.1	136.6	135.0	129.7	1339.8
cuartil 75%	136.1	119.8	128.2	113.4	114.7	103.7	110.0	121.1	131.7	153.1	151.7	152.1	1515.6
SUBCUENCA INTERMEDIA KHAPI (10.83 km2)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	162.8	140.8	159.8	135.3	147.6	143.2	130.5	148.7	165.6	177.3	170.1	171.3	1732.2
Min	89.6	91.9	83.5	83.0	77.3	70.3	76.5	91.5	100.9	108.7	111.0	110.0	1159.1
Promedio	126.9	112.9	120.0	108.6	105.7	98.0	101.6	115.4	124.3	145.7	145.4	142.8	1447.2
cuartil 25%	116.5	103.9	110.9	101.8	96.0	87.7	90.5	109.2	113.8	137.8	136.4	130.8	1350.5
cuartil 75%	137.9	121.0	129.7	114.5	113.9	105.2	110.7	121.4	132.9	155.1	152.7	153.1	1523.9
SUBCUENCA INTERMEDIA CEBOLLULLO (9.84 km2)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	159.2	138.0	158.1	133.6	143.9	140.3	128.3	146.1	161.7	173.9	167.3	168.0	1710.0
Min	91.1	92.9	85.3	84.7	79.2	71.8	78.7	92.6	101.9	110.2	112.6	111.5	1174.5
Promedio	126.1	112.3	119.6	108.4	105.4	97.4	101.1	114.5	123.4	145.0	144.6	141.8	1439.5
cuartil 25%	116.6	104.3	110.6	102.2	96.7	88.1	90.3	108.9	113.9	137.7	136.4	131.1	1354.9
cuartil 75%	136.5	120.5	128.5	114.0	113.1	103.5	109.7	119.6	130.9	153.4	151.7	150.5	1512.2
SUBCUENCA INTERMEDIA TAHUAPALCA (11.38 km2)													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Max	155.8	135.4	156.5	131.9	140.0	137.6	126.1	143.6	158.1	170.8	164.5	166.5	1689.1
Min	92.6	94.1	87.1	86.4	80.9	73.2	81.0	93.7	103.0	111.7	114.3	113.0	1190.1
Promedio	125.5	111.9	119.2	108.2	104.9	96.8	100.6	113.6	122.6	144.4	144.1	140.9	1432.7
cuartil 25%	117.1	104.6	110.4	102.8	96.8	88.4	89.4	108.6	114.1	136.9	136.6	131.2	1360.0
cuartil 75%	135.7	119.2	127.5	113.6	111.7	102.0	109.1	118.2	128.9	151.8	150.8	148.5	1501.1

Tabla 34: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual y anual areal por subcuencas (serie 1975-2009)

(Fuente: Elaboración propia)

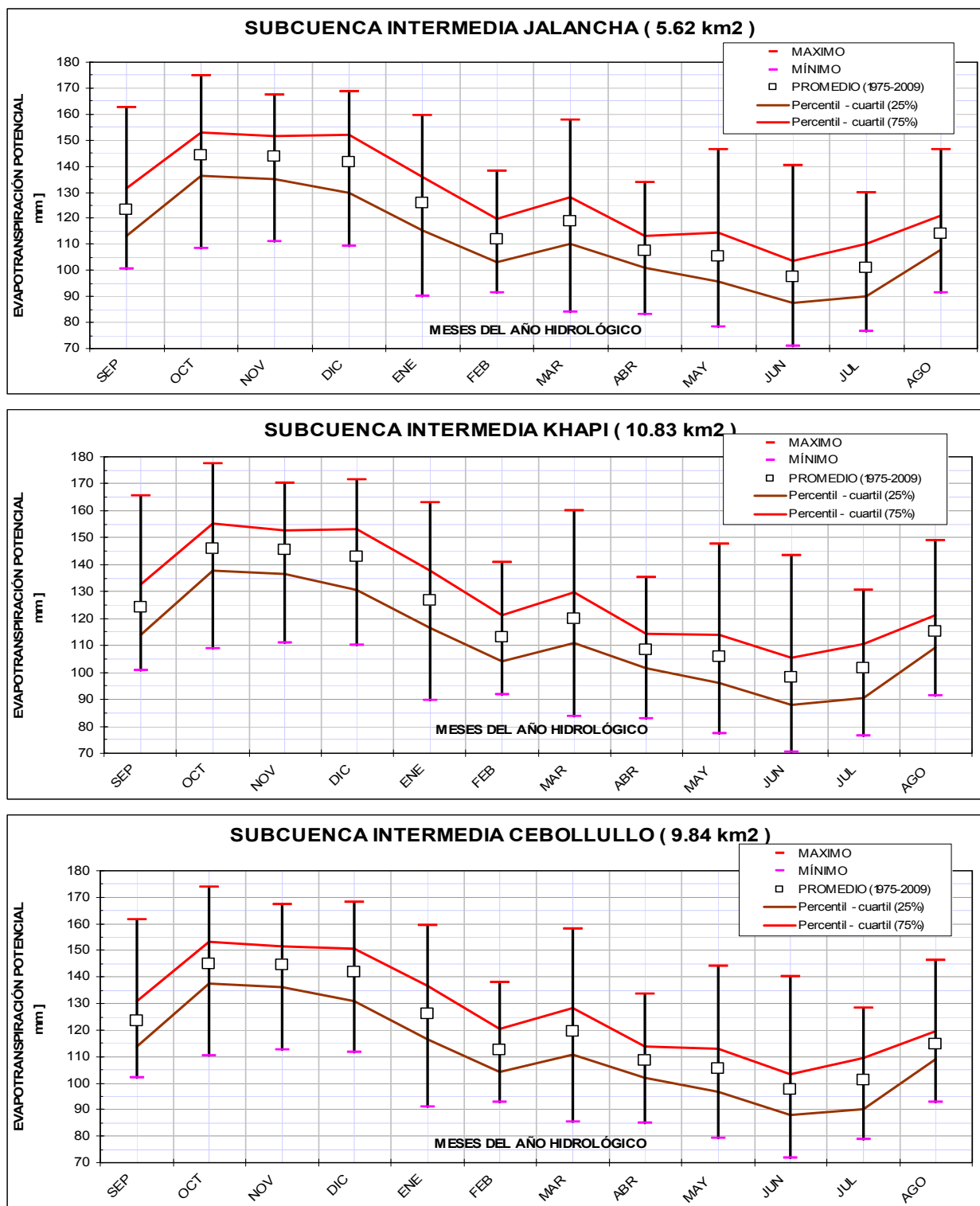


Figura 60: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

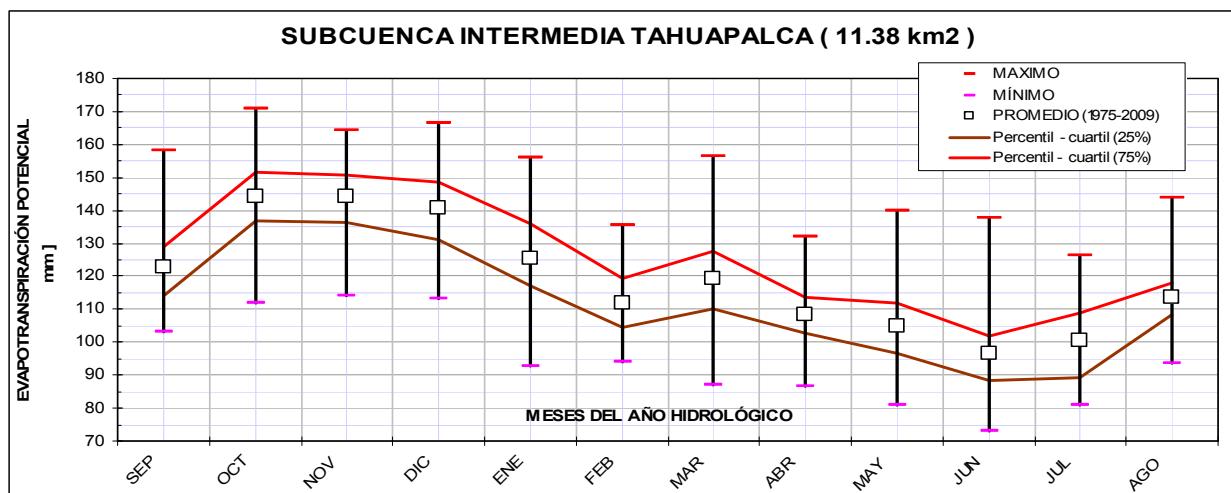


Figura 60: Estadísticos de evapotranspiración potencial mensual areal por subcuencas (serie 1975-2009) (Cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

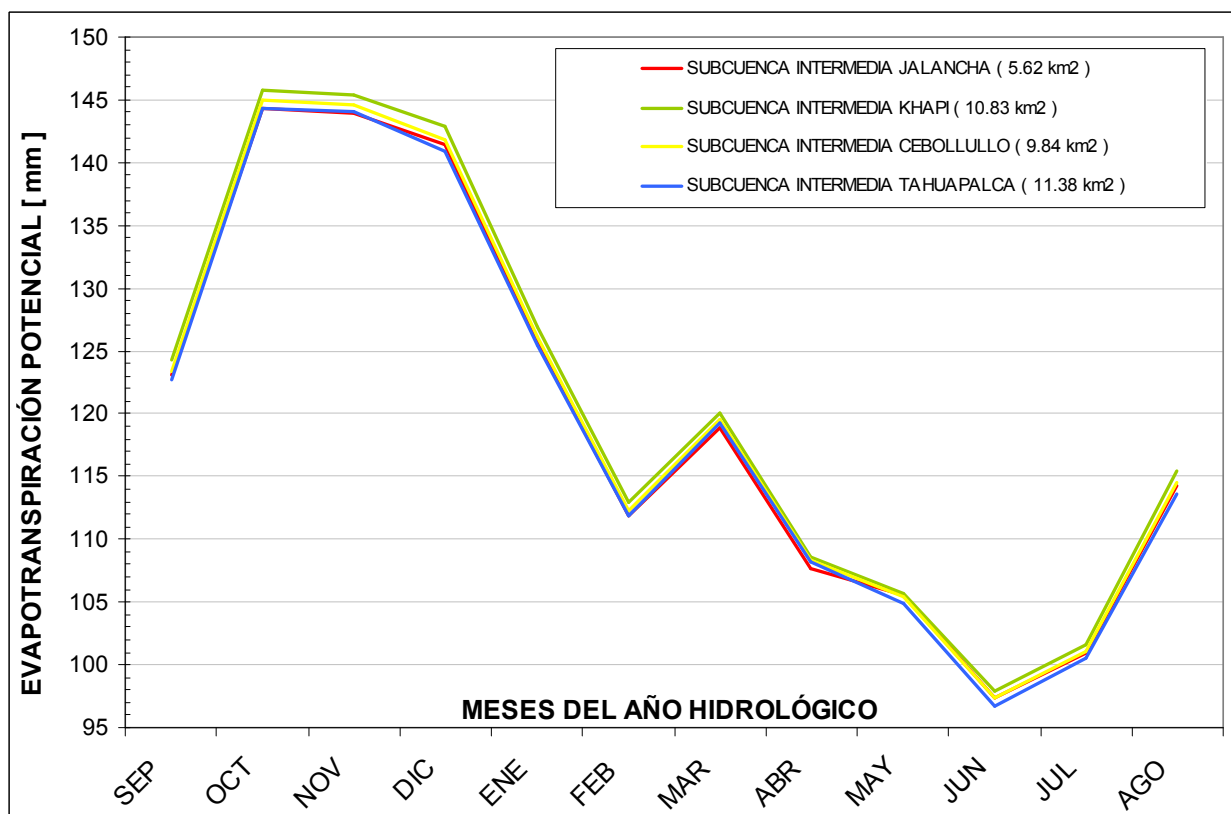


Figura 61: Evapotranspiración potencial sintética areal mensual por subcuencas intermedias para 1975-2009
(Fuente: Elaboración propia)

5.4 Parámetros de entrada



Área de la cuenca. Área total de la cuenca en [km²].

Número de días lluvias tipo. Valor promedio del número de días del mes que presentan precipitación en toda la cuenca.

Coeficiente ETP. Coeficiente de corrección de la evapotranspiración potencial.

Parámetro C de excedencia. Se usa para calcular el valor límite Po de la precipitación por encima del cual habrá excedente de agua para la escorrentía e infiltración. Si C es 0 el valor de Po=0, por lo que toda lluvia, aún de pequeña magnitud, producirá escurrimiento a la salida de la cuenca.

Parámetro H_{MAX}. Capacidad máxima de almacenamiento del suelo en [mm]. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración.

Parámetro I_{MAX}. Es la infiltración máxima en el mes, en [mm/mes]. Algunos autores recomiendan asociarlo con el valor S del método CN.

Caudal subterráneo inicial. Es el caudal subterráneo inicial en [m³/s] al principio del periodo de simulación.

Humedad inicial del suelo. Es el valor de humedad inicial en [mm], que contiene el suelo, al principio del periodo de simulación. El valor máximo de este parámetro es H_{MAX}.

Rama de descarga del acuífero. Es la inversa de la constante de recesión k (AL=1/k) expresada en (1/días). Resulta de considerar al acuífero un embalse lineal.

5.5 Relación del número de curva (CN) y el potencial máximo de retención (S)

El parámetro CN (número de curva de escurrimiento o número de complejo hidrológico suelo-cobertura) es una transformación de potencial máximo de retención de humedad del suelo “S” que se usa para hacer más lineales las operaciones de interpolación, promedio y ponderación. Si bien es más conveniente usar el CN, a veces es necesario usar S en otras aplicaciones, tales como el análisis de los datos de escurrimiento para el desarrollo de relaciones suplementarias

de escurrimiento. La transformación es: $CN = \frac{25400}{S + 254}$, $S = \frac{25400}{CN} - 254$ en mm.

Puesto que el modelo permite el ingreso de datos para la cuenca entera (no se pueden ingresar datos por subcuenca), requiere un único valor de S, de manera que para su determinación se debe encontrar el valor representativo de número de curva (CN) para toda la cuenca, por tal razón, si se tienen como en el presente proyecto, varios complejos hidrológicos suelo cobertura con sus respectivos valores de número de curva, el representativo será determinado según:

$$CN_p = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{A}$$

Donde:

- CN_p = Número de curva ponderado de la cuenca entera
 CN_i = Número de curva del complejo hidrológico suelo cobertura
 A_i = Área del complejo hidrológico
 A = Área total de la cuenca

El valor de número de curva a ingresarse en el modelo, está en la condición de humedad antecedente II (AMC II – condición media).

Las figuras 62 a la 67 muestran los diferentes mapas temáticos utilizados para estimar los parámetros hidro-geomorfológicos en las cuencas simuladas requeridas por el modelo hidrológico.

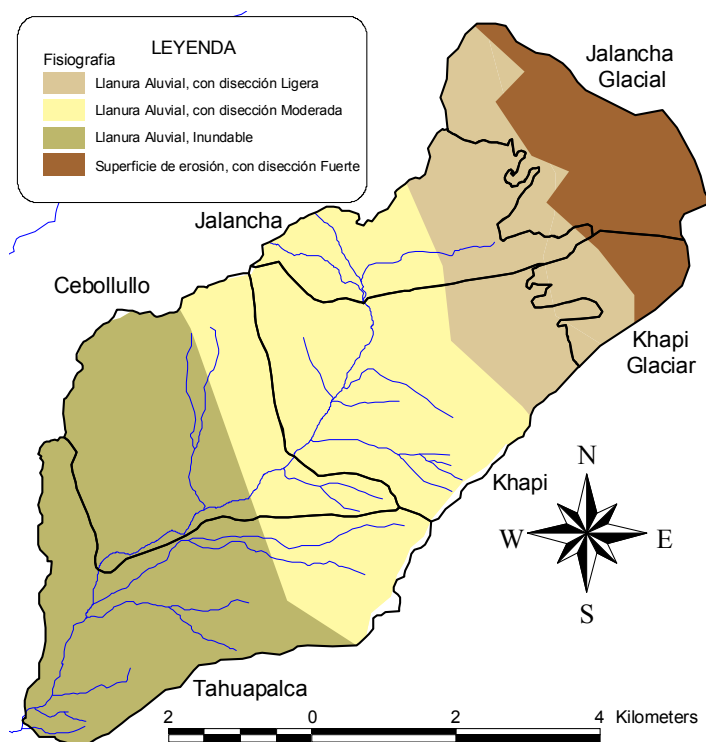


Figura 62: Mapa de fisiografía general de las subcuencas del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia en base a mapas del MDSP 2002)

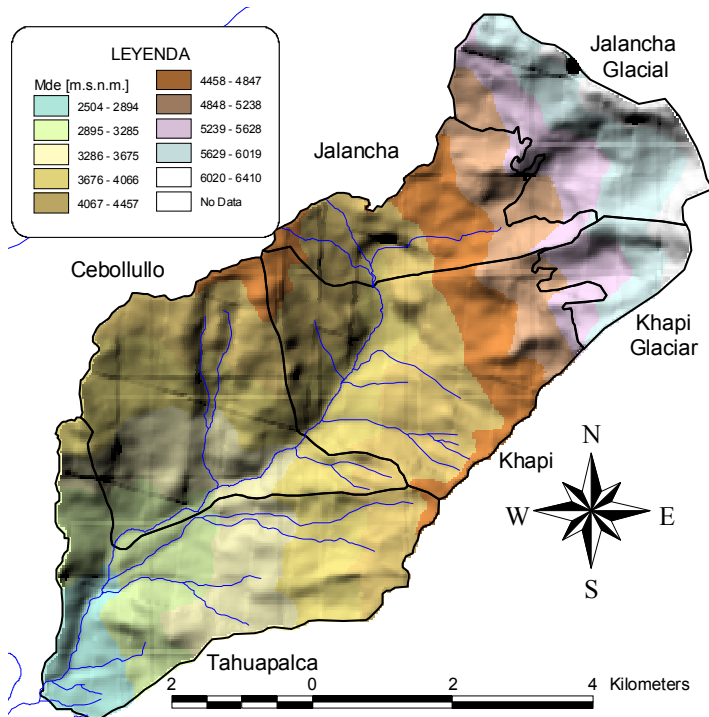


Figura 63: Mapa de altitudes en base al modelo digital de terreno por subcuencas
(Fuente: Elaboración propia)

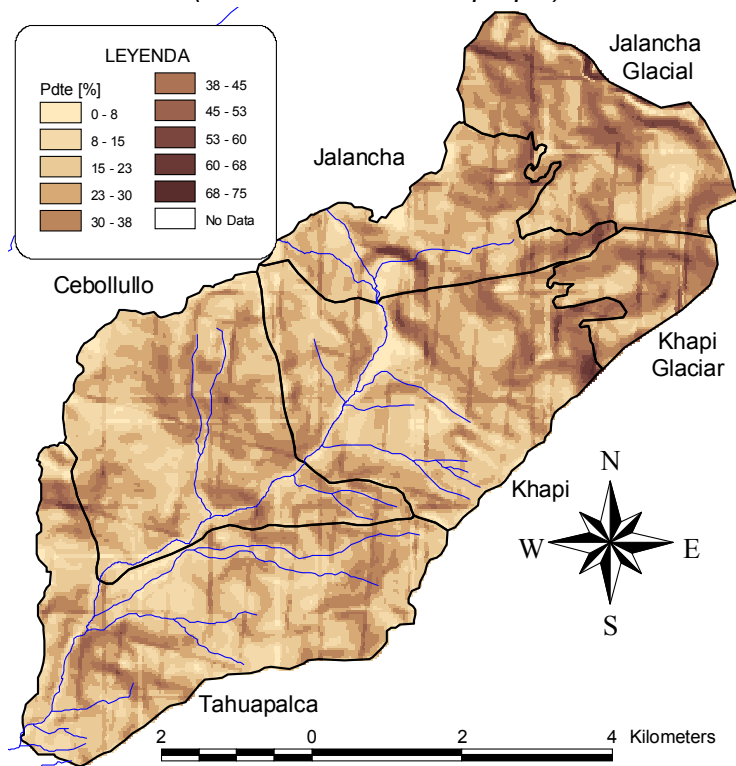


Figura 64: Mapa de pendientes en base al modelo digital de terreno por subcuencas
(Fuente: Elaboración propia)

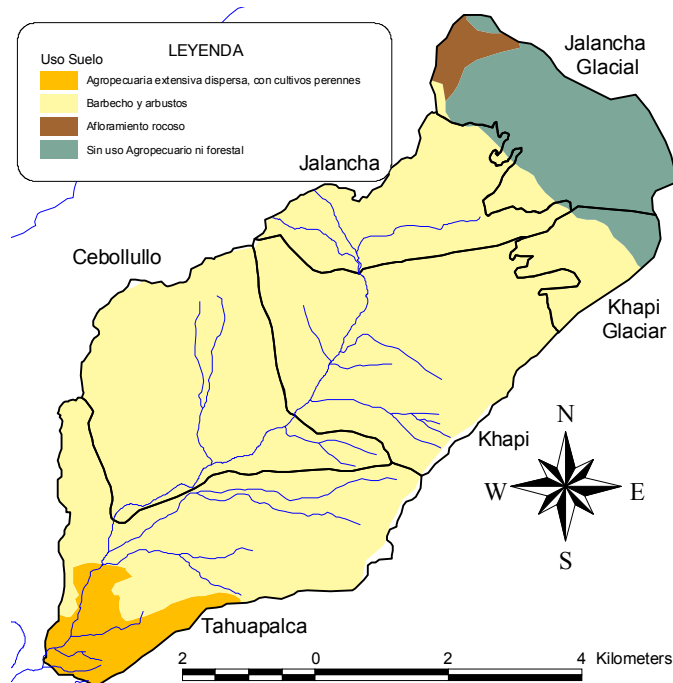


Figura 65: Mapa de uso de suelos de terreno por subcuencas del Río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia en base a mapas del MDSP 2002)

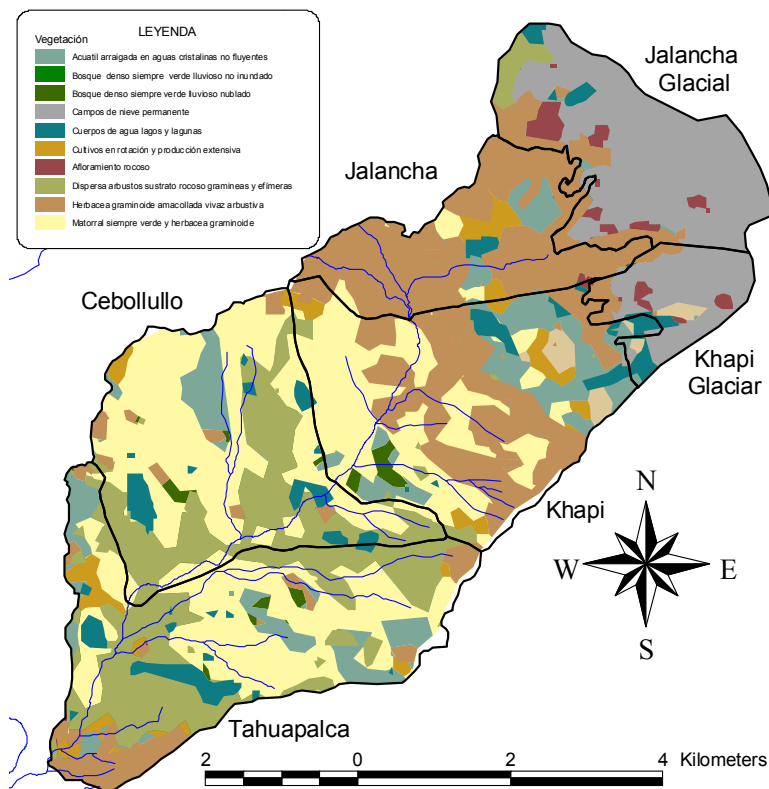


Figura 66: Mapa de cobertura vegetal por subcuencas del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia en base a mapas del MDSP 2002)

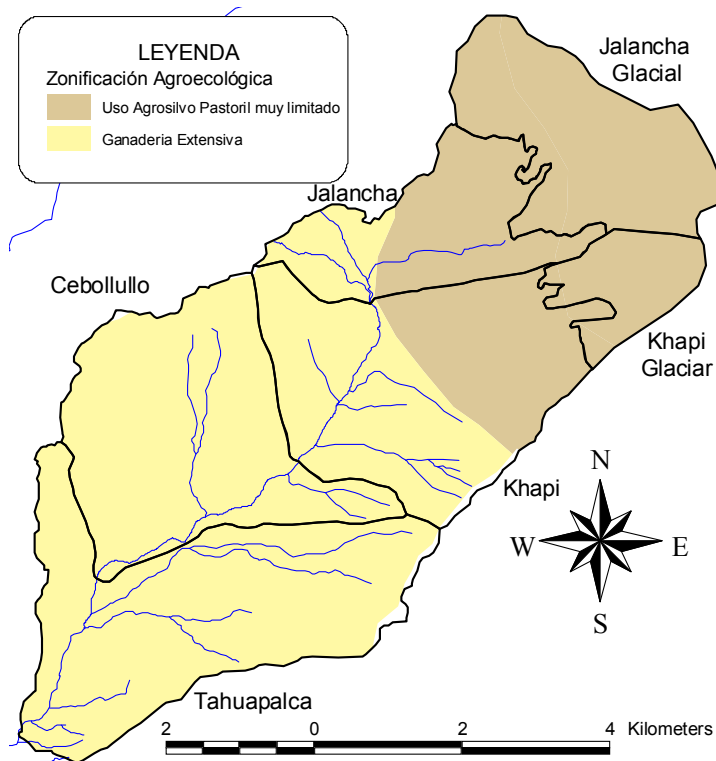


Figura 67: Mapa de zonificación agroecológica por subcuencas del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia en base a mapas del MDSP 2002)

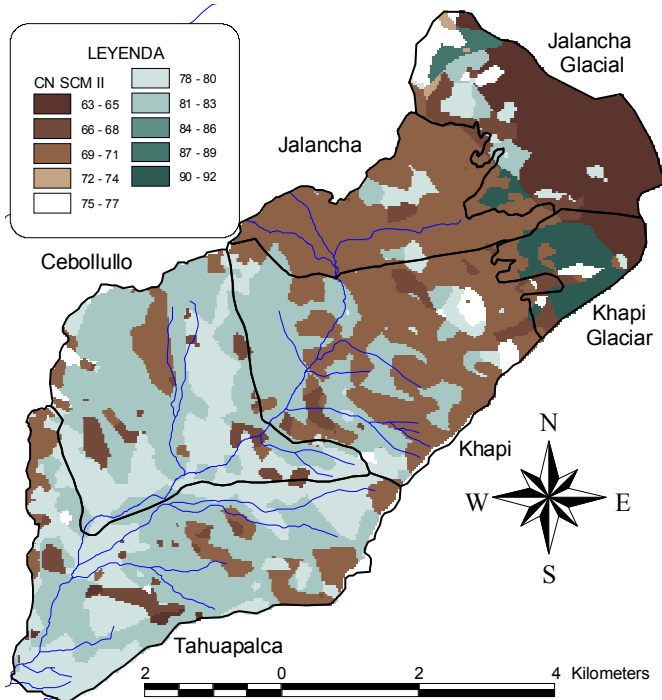


Figura 68: Mapa de Número de curva por subcuencas del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia)

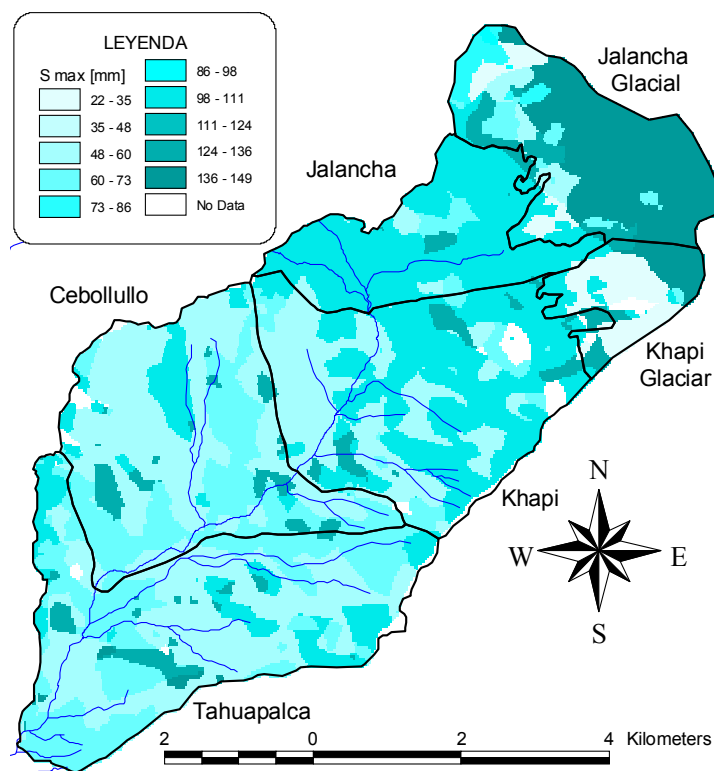


Figura 69: Mapa de Potencial de retención máxima de humedad en el suelo pendientes por subcuencas del río Sajhuaya
(Fuente: Elaboración propia)

5.6 Parametrización y simulación hidrológica

5.6.1 Calibración indirecta

Los parámetros del modelo fueron determinados o estimados de acuerdo a los criterios expuestos anteriormente para la simulación hidrológica en las subcuencas intermedias sobre el periodo 1975 – 2009. Los parámetros a calibrar o definir son el umbral de escorrentía C , la capacidad máxima de almacenamiento del suelo H_{max} , la capacidad de infiltración máxima del suelo, el coeficiente de recesión.

La optimización de estos parámetros se alcanzó variando sistemáticamente los valores respectivos dentro de rangos físicos e hidrológicamente razonables.

El control y validación de estos parámetros se realizó utilizando criterios de balance hídrico y a través de la comparación entre caudales simulados en las cuencas de estudio y caudales medidos en las cuencas de apoyo (calibración indirecta).

Los parámetros del modelo calibrados y validados se presentan en la siguiente tabla:



Cuenca - Control	Río	Periodo	Cuenca Aislada	Datos de entrada del Modelo					
				Área [Km ²]	Q _{CAL}	Año hidrológico		n _d	n _{rd}
						Inicial	Final		
Jalancha	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	5.62	Q _{JALAN}	1975-76	2008-09	10	1
Khapi	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	10.83	Q _{KHAPI}	1975-76	2008-09	10	1
Cebolullo	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	9.84	Q _{CEBOLL}	1975-76	2008-09	10	1
Tahuapalca	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	11.38	Q _{TAHUAP}	1975-76	2008-09	10	1

Cuenca - Control	Río	Periodo	Cuenca Aislada	Parámetros de Calibración del modelo						Mapas temáticos	
				C _{ETP}	C	H _{MAX}	I _{MAX}	α_1	Q _{SUB o 1}	H max	I max
Jalancha	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	0.6	0.01	10	150	0.015	0.01	NN	100
Khapi	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	0.8	0.01	10	150	0.012	0.01	NN	88
Cebolullo	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	1.0	0.01	10	200	0.011	0.01	NN	72
Tahuapalca	Sajhuaya	1975-2009	Intercuenca	1.0	0.01	10	200	0.010	0.01	NN	73

Tabla 35: Parámetros de simulación hidrológica por subcuencas (serie 1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

El escurrimiento en las subcuencas del río Sajhuaya es favorecido por el relieve de la cuenca, y sus pendientes que la parte alta está entre 30 y 40% y en la parte baja entre 15 y 30%. Estas condiciones además del tipo de suelo, la poca cobertura vegetal en no permiten almacenamientos significativos en el tiempo por lo que se tiene valores bajos de Hmax. El caudal base tanto en la parte alta como en la baja se ve favorecida por aportes de vertientes, manantiales, por lo que se tienen valores altos de Imax y valores del coeficiente de recesión entre 0.010 y 0.015. La presencia de algunos bofedales en la parte alta tiene un efecto regulador amortiguador del escurrimiento, que no es posible simular con este modelo.

La figura 70 permite comparar a nivel mensual los hidrogramas simulados en las cuencas intermedias de estudio contra los medidos en Palca (2002-2003), y la figura 71 permite comparar los caudales específicos entre estas cuencas. El pico de los hidrograma coincide en el año 2002 pero en 2003 el de palca se desplaza o retrasa un mes. Los caudales mínimos en las cuencas des estudio acurren en agosto 2003 mientras que para Palca se da en septiembre 2003. Para los meses de recesión de hidrograma abril y mayo en Palca se tiene mayores caudales, esto pude deberse a su mayor superficie de aporte respecto a las subcuencas de estudio, y esta recibe mayores aportes del caudal base. El desfase del pico de 2003 podría deberse a efectos de la recesión en palca y a que se tiene mayor infiltración en la misma. Otro factor son las condiciones favorables al escurrimiento que se tiene en las subcuencas de estudio como es la pendiente, poco almacenamiento superficial.

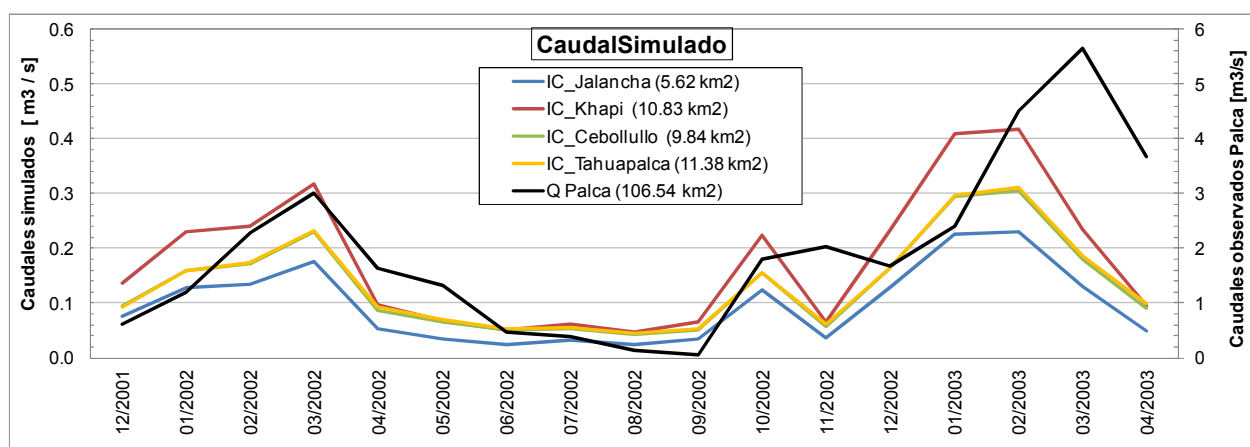


Figura 70: Caudales medios mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales medios mensuales medidos en Palca (Apoyo) (2000-2002)
(Fuente: Elaboración propia)

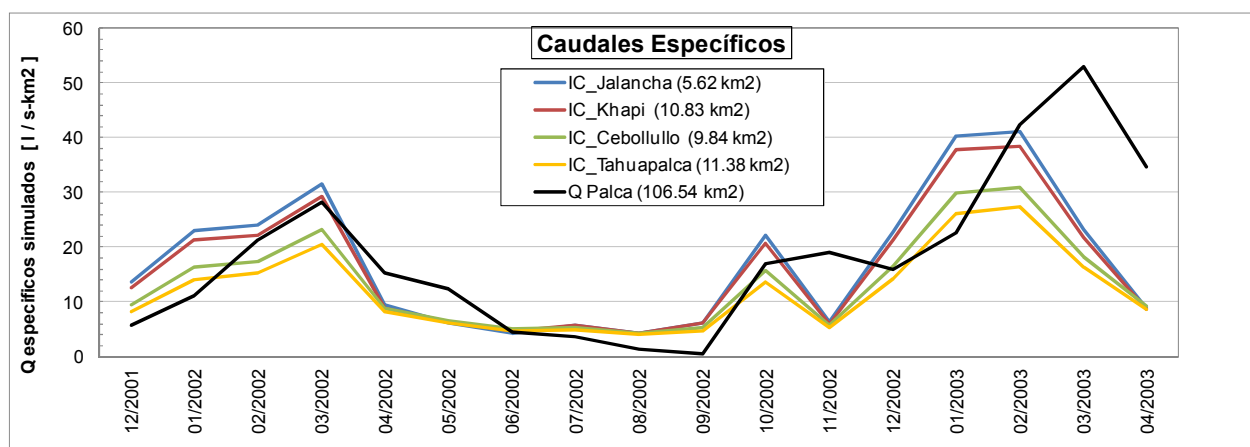


Figura 71: Caudales específicos mensuales simulados en las subcuencas de estudio vs. los caudales específicos medidos en Palca (Apoyo) (2000-2002)
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 72 permite comparar a nivel mensual los hidrogramas simulados en las subcuencas intermedias de estudio contra los medidos en Zongo (1991-2009) y la figura 73 permite compara los caudales específicos entre estas cuencas. En ambas figuras es evidente la diferencia entre estas subcuencas y la influencia o efecto del glacial en el caso de Zongo, que en el que se tiene bastante más escurrimiento que en las subcuencas de estudio. Las diferencias y desfases se dan en todos los sentidos, picos, recesión, caudal base.

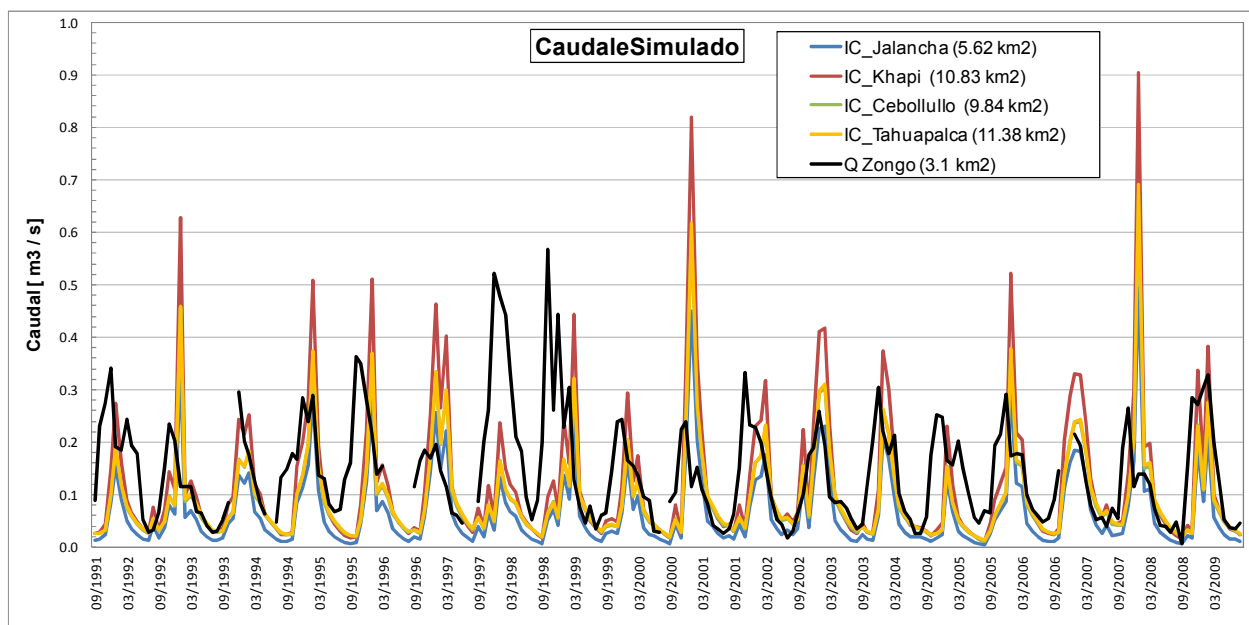


Figura 72: Caudales medios mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales medios mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

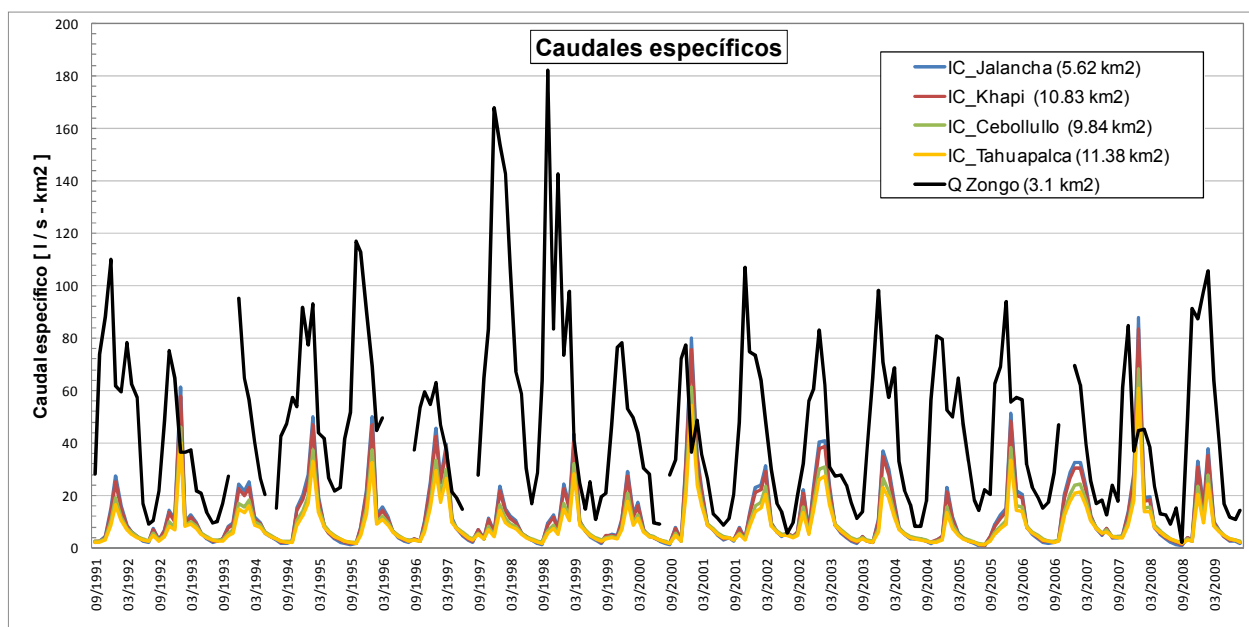


Figura 73: Caudales específicos mensuales simulados en las subcuencas intermedias de estudio vs. los caudales específicos mensuales medidos en Zongo (apoyo) (1991-2009)
(Fuente: Elaboración propia)



5.6.2 Simulación hidrológica

Se ha simulado la hidrología de las subcuencas hidrológicas a partir de los parámetros y consideraciones adoptadas en el punto anterior.

La tabla 36 muestra las láminas de escurrimiento y de precipitación en las subcuencas intermedias, así como el coeficiente de escurrimiento (relación entre láminas de precipitación y escurrimiento) cuyos valores se encuentran dentro de rangos aceptables. Estas subcuencas intermedias muestran coeficientes de escurrimiento relativamente altos, pero menores a los de las cuencas glaciares. Las condiciones favorables para que se tengan altos escurrimientos en las subcuencas intermedias son la pendiente y relieve, el poco almacenamiento y el aporte de vertientes y otros al caudal base.

Balance Hídrico						
Subcuenca intermedia	Área [km ²]	Precipitación [mm/año]	Caudal Q [m ³ /s]	Caudal Laminar q [mm/año]	C	Caudal esp. [l/s-km ²]
Jalancha	5.62	619	0.069	390	0.63	12.4
Khapi	10.83	599	0.128	372	0.62	11.8
Cebollullo	9.84	530	0.098	315	0.59	10.0
Tahuapalca	11.38	485	0.101	279	0.58	8.9

Tabla 36: Relación Precipitación – escurrimiento de las subcuencas intermedias de estudio
(Fuente: Elaboración propia)

La figura 74 muestra los hietogramas areales y los hidrogramas mensuales simulados en las subcuencas intermedias de Jalancha, Khapi, Cebollullo y Tahuapalca. Estos hidrogramas permiten mostrar la variación intermensual, y la variabilidad interanual (1975-2009). Las series del periodo 1975-2009 incluyen años muy secos, que en algunos casos (1982-83, 1988-89, 1993-94, 1997-98 y 2004-2005) coinciden con episodios ENSO (El Niño Oscilación Sur). Mientras que se presentan años muy húmedos los años 1978-79, 1983-84, 2000-01 y 2007-2008.

La figura 75 muestra los hidrogramas interanuales, mismas que permite identificar mejor la variabilidad en el periodo 1975-2009.

Los valores medios mensuales de caudales simulados para el periodo 1975-2009 en las subcuencas intermedias, se los resume en el punto 6, donde se presenta la síntesis de la evaluación de la oferta de agua en todas las subcuencas, cuencas intermedias y puntos de control del río Sajhuaya.

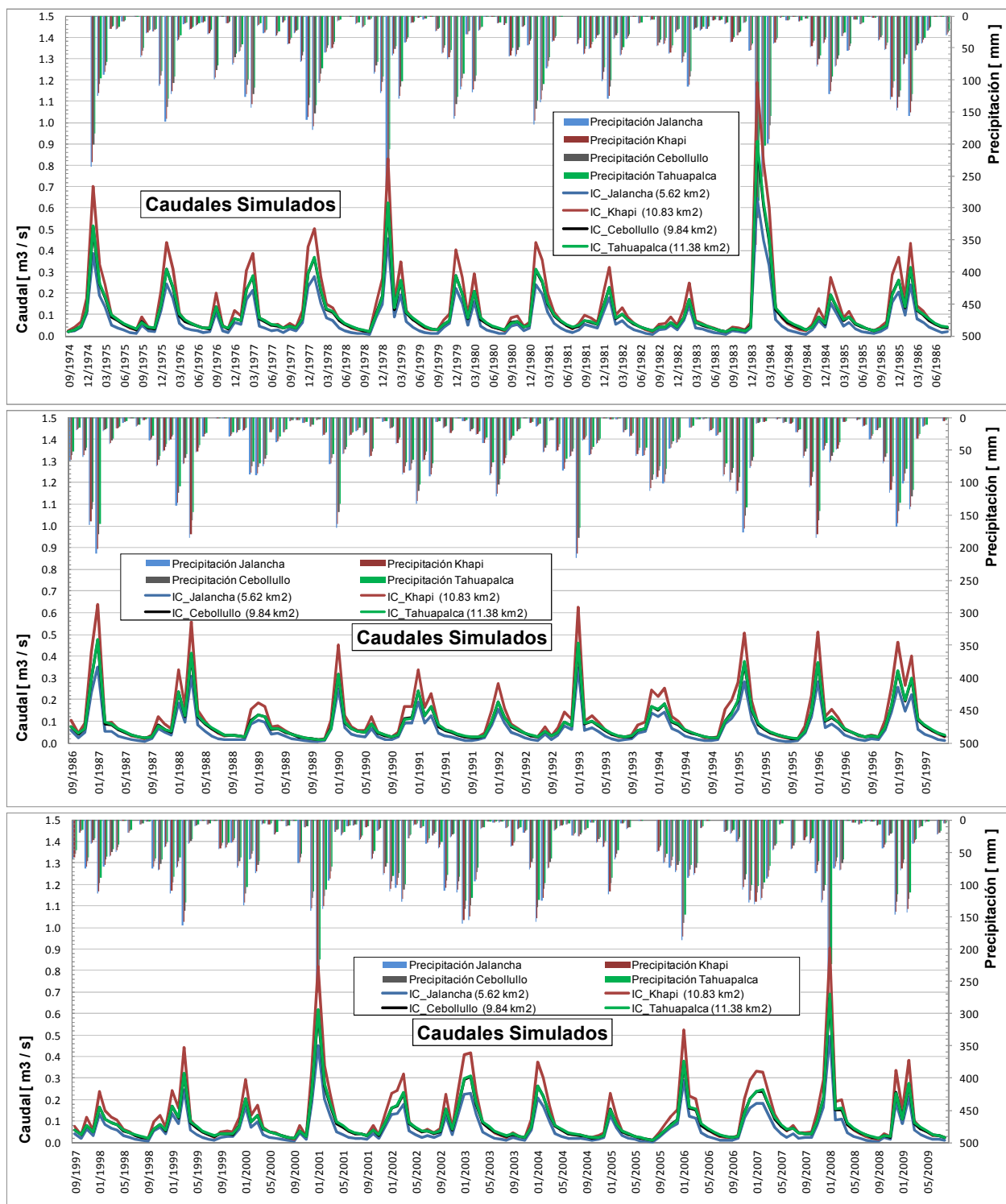


Figura 74: Hidrograma y hietogramas mensuales por subcuencas intermedias del río Sajhuaya (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

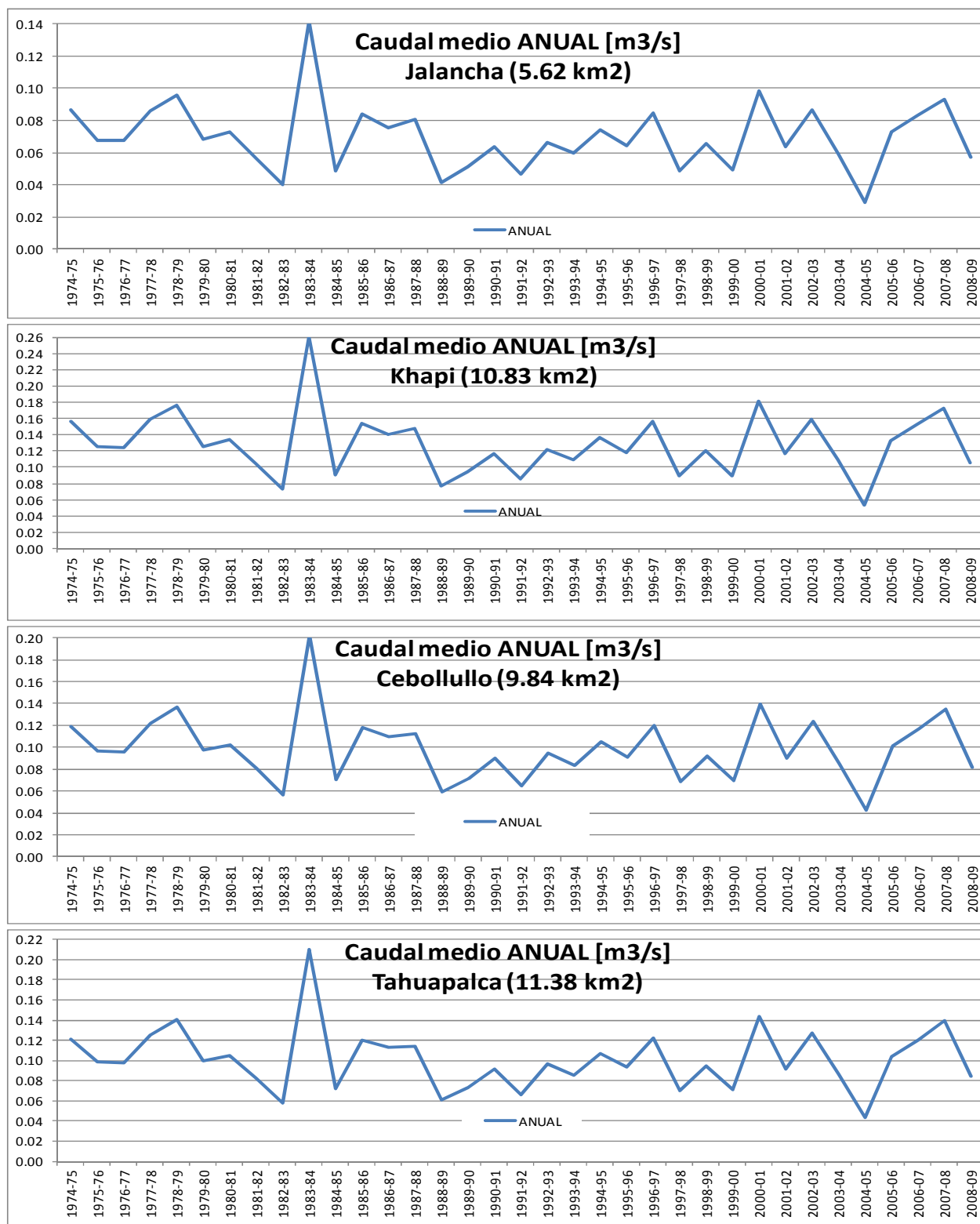


Figura 75: Hidrograma anuales por subcuencas intermedias del río Sajhuaya (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)



6 SÍNTESIS DE LA EVALUACIÓN DE LA OFERTA DE AGUA PARA EL PERIODO 1975-2009

En este punto se presentan el resumen de los resultados de la simulación glacio-hidrológica e hidrológica en las subcuencas de estudio, tanto con cobertura glacial/nival, como sin cobertura de este. La oferta de agua está expresada como caudal en [m³/s] o [l/s], como lámina de escorrentía y como aportación o volumen en [hm³] y como caudal específico. Cabe mencionar que las simulaciones son en régimen natural y no considera aprovechamientos, extracciones, usos o algún tipo de pérdida en la cuenca por acción antrópica.

Las simulaciones se las realizó a nivel mensual sobre el periodo 1975-2009. La tabla 37 y 38 y la figura 76 muestran los hidrogramas medios mensuales simulados para el periodo (1975-2009) en las subcuencas estudiadas. Estas tablas representan la oferta de agua o la evaluación de los recursos hídricos.

Subcuenca	TIPO	AREA [Km ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	0.335	0.334	0.320	0.279	0.194	0.140	0.109	0.097	0.104	0.164	0.276	0.344	0.225
Glacial Khapi	SC-C	2.24	0.121	0.118	0.113	0.099	0.070	0.050	0.039	0.036	0.040	0.065	0.105	0.126	0.082
Jalancha IC	IC	5.62	0.228	0.139	0.117	0.051	0.033	0.023	0.017	0.014	0.024	0.031	0.050	0.106	0.069
Jalancha SC	SC	11.94	0.563	0.473	0.437	0.330	0.227	0.163	0.126	0.111	0.128	0.195	0.326	0.450	0.294
Khapi IC	IC	10.83	0.412	0.249	0.210	0.094	0.065	0.049	0.037	0.031	0.047	0.058	0.090	0.191	0.128
Khapi SC	SC	25.01	1.096	0.840	0.760	0.522	0.362	0.263	0.202	0.177	0.215	0.317	0.522	0.767	0.504
Cebollullo IC	IC	9.84	0.296	0.184	0.159	0.083	0.062	0.048	0.037	0.031	0.038	0.044	0.065	0.133	0.098
Cebollullo SC	SC	34.85	1.393	1.024	0.919	0.605	0.423	0.311	0.240	0.208	0.253	0.362	0.586	0.900	0.602
Tahuapalca IC	IC	11.38	0.300	0.188	0.164	0.088	0.066	0.051	0.040	0.032	0.039	0.045	0.064	0.133	0.101
Tahuapalca SC	SC	46.23	1.693	1.212	1.083	0.693	0.489	0.362	0.279	0.240	0.292	0.406	0.651	1.033	0.703

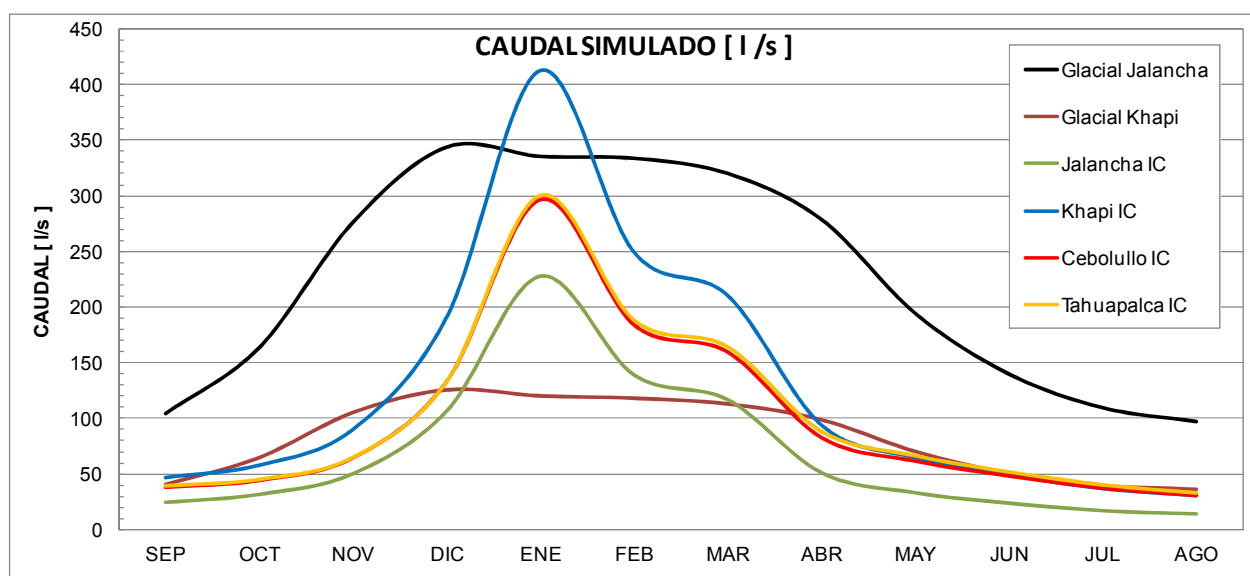
Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 37: Caudales medios mensuales simulados [m³/s] (1975-2009) (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)

Subcuenca	TIPO	AREA [Km ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	335	334	320	279	194	140	109	97	104	164	276	344	225
Glacial Khapi	SC-C	2.24	121	118	113	99	70	50	39	36	40	65	105	126	82
Jalancha IC	IC	5.62	228	139	117	51	33	23	17	14	24	31	50	106	69
Jalancha SC	SC	11.94	563	473	437	330	227	163	126	111	128	195	326	450	294
Khapi IC	IC	10.83	412	249	210	94	65	49	37	31	47	58	90	191	128
Khapi SC	SC	25.01	1096	840	760	522	362	263	202	177	215	317	522	767	504
Cebollullo IC	IC	9.84	296	184	159	83	62	48	37	31	38	44	65	133	98
Cebollullo SC	SC	34.85	1393	1024	919	605	423	311	240	208	253	362	586	900	602
Tahuapalca IC	IC	11.38	300	188	164	88	66	51	40	32	39	45	64	133	101
Tahuapalca SC	SC	46.23	1693	1212	1083	693	489	362	279	240	292	406	651	1033	703

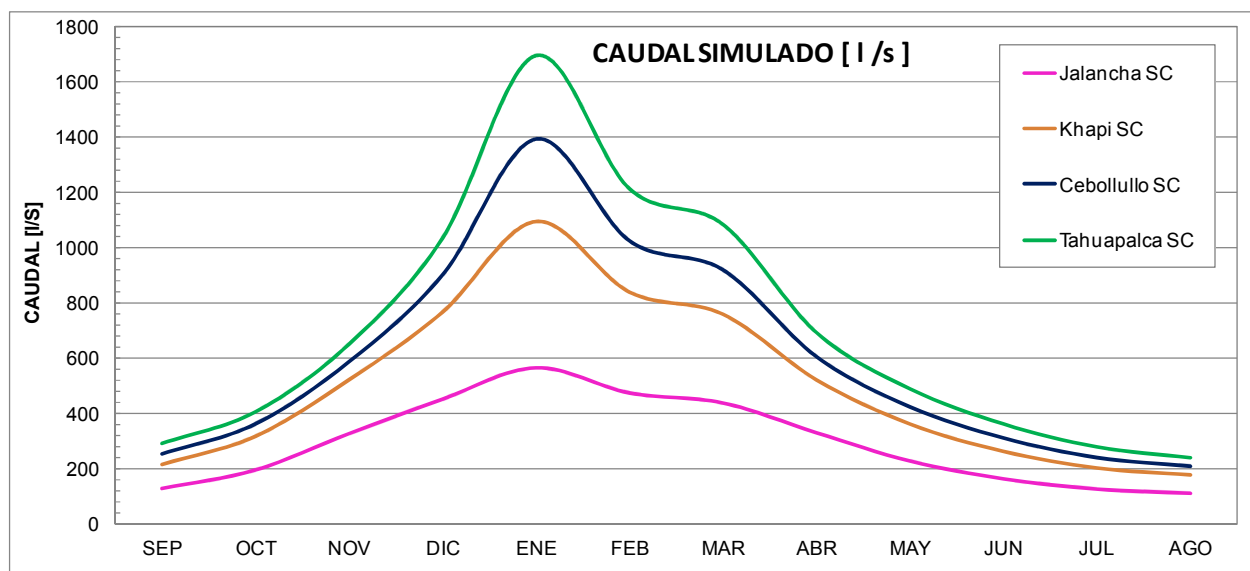
Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 38: Caudales medios mensuales simulados [l/s] (1975-2009) (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)



Nota: Subcuencas glaciares = Cabecera y IC=subcuenca intermedia

Figura 76: Hidrograma medio mensual simulado (1975-2009) [l/s] (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)



Nota: SC= Subcuenca total

Figura 77: Hidrograma medio mensual simulado (1975-2009) [l/s] (subcuencas de estudio)
(cont.)
(Fuente: Elaboración propia)

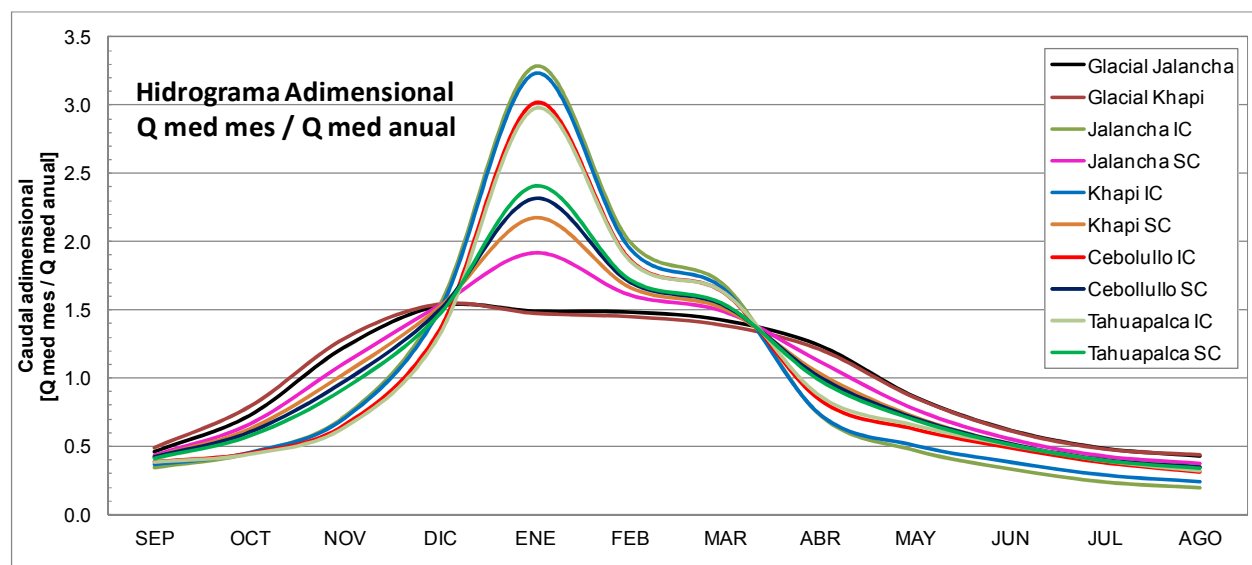
Es evidente la diferencia entre los hidrogramas de cuencas hidrológicas entre las cuencas con cobertura glacial. El glacial amortigua el pico y la recesión del escurrimiento. Para una mejor comparación se ha graficado los hidrogramas medios adimensionales por subcuenca (ver tabla 39 y figura 78), obtenidos por división entre el caudal medio del mes, entre el valor medio anual de la tabla 37 y 38.



Subcuenca	TIPO	AREA [Km ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	1.49	1.49	1.42	1.24	0.86	0.62	0.49	0.43	0.46	0.73	1.23	1.53	1.00
Glacial Khapi	SC-C	2.24	1.47	1.45	1.38	1.21	0.86	0.61	0.48	0.44	0.49	0.79	1.29	1.54	1.00
Jalancha IC	IC	5.62	3.28	2.00	1.68	0.73	0.47	0.34	0.24	0.20	0.35	0.45	0.72	1.53	1.00
Jalancha SC	SC	11.94	1.91	1.61	1.48	1.12	0.77	0.55	0.43	0.38	0.44	0.66	1.11	1.53	1.00
Khapi IC	IC	10.83	3.23	1.95	1.65	0.74	0.51	0.38	0.29	0.24	0.37	0.45	0.70	1.49	1.00
Khapi SC	SC	25.01	2.18	1.67	1.51	1.04	0.72	0.52	0.40	0.35	0.43	0.63	1.04	1.52	1.00
Cebollullo IC	IC	9.84	3.01	1.87	1.62	0.84	0.63	0.49	0.38	0.31	0.39	0.45	0.66	1.35	1.00
Cebollullo SC	SC	34.85	2.31	1.70	1.53	1.00	0.70	0.52	0.40	0.35	0.42	0.60	0.97	1.50	1.00
Tahuapalca IC	IC	11.38	2.98	1.86	1.62	0.87	0.65	0.51	0.39	0.32	0.38	0.44	0.64	1.32	1.00
Tahuapalca SC	SC	46.23	2.41	1.72	1.54	0.99	0.70	0.52	0.40	0.34	0.42	0.58	0.93	1.47	1.00

Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 39: Caudales medios mensuales y anuales adimensionales simulados (1975-2009)
(subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)



Nota: Subcuenca Cabecera= subcuenca glaciar, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Figura 78: Hidrograma medio mensual adimensional simulado (1975-2009) (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)

El pico de los hidrogramas se produce en enero salvo en las cuencas glaciares de Jalancha y Khapi, que se produce en diciembre. Los caudales mínimos se producen en agosto. Los hidrogramas de las subcuencas Jalancha y Khapi, cubierta en un 90% por glaciares y a altitudes medias de 5680 m.s.n.m. son más achatados (amortiguados) y que el hidrograma de las intercuenas de estudio sin cobertura glacial ni nival, que se encuentran a altitudes medias entre 4662 m.s.n.m. (Jalancha), 4384 m.s.n.m. (Khapi), 3827 m.s.n.m. (Cebollullo) y 3412 m.s.n.m. (Tahuapalca).



La tabla 40, 41, 42 y 43 muestran por subcuencas a nivel mensual y anual los caudales laminares o láminas de escorrentía, los caudales específicos, los coeficientes de escurrimiento y el potencial hídrico o volumen de aporte (ver figura 79) respectivamente.

Subcuenca	TIPO	AREA [Km ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	142.2	127.8	135.6	114.3	82.4	57.3	46.4	41.1	42.7	69.3	113.3	145.7	1118.2
Glacial Khapi	SC-C	2.24	144.1	127.9	135.3	114.4	83.7	58.1	46.9	42.8	46.4	77.2	122.0	150.6	1149.4
Jalancha IC	IC	5.62	108.6	59.8	55.6	23.5	15.7	10.8	8.0	6.6	11.1	15.0	23.1	50.7	388.4
Jalancha SC	SC	11.94	126.4	95.8	97.9	71.6	51.0	35.4	28.3	24.9	27.9	43.8	70.8	101.0	774.7
Khapi IC	IC	10.83	102.0	55.7	52.0	22.5	16.0	11.7	9.1	7.6	11.2	14.3	21.5	47.2	370.8
Khapi SC	SC	25.01	117.4	81.3	81.4	54.1	38.7	27.2	21.7	19.0	22.3	34.0	54.1	82.2	633.3
Cebollullo IC	IC	9.84	80.7	45.2	43.4	21.8	16.8	12.7	10.2	8.4	10.0	12.0	17.0	36.2	314.3
Cebollullo SC	SC	34.85	107.0	71.1	70.7	45.0	32.5	23.1	18.4	16.0	18.8	27.8	43.6	69.2	543.3
Tahuapalca IC	IC	11.38	70.6	39.9	38.5	20.0	15.5	11.7	9.3	7.6	8.8	10.5	14.7	31.2	278.4
Tahuapalca SC	SC	46.23	98.1	63.4	62.7	38.8	28.3	20.3	16.2	13.9	16.4	23.5	36.5	59.9	478.1

Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 40: Caudales medios mensuales laminares simulados (1975-2009) (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)

Subcuenca	TIPO	AREA [Km ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	53.1	52.8	50.6	44.1	30.7	22.1	17.3	15.4	16.5	25.9	43.7	54.4	35.6
Glacial Khapi	SC-C	2.24	53.8	52.9	50.5	44.1	31.3	22.4	17.5	16.0	17.9	28.8	47.1	56.2	36.5
Jalancha IC	IC	5.62	68.6	33.6	24.0	9.2	6.9	4.7	3.1	2.0	3.3	4.6	7.5	17.9	15.4
Jalancha SC	SC	11.94	47.2	39.6	36.6	27.6	19.0	13.7	10.6	9.3	10.7	16.3	27.3	37.7	24.6
Khapi IC	IC	10.83	64.7	31.1	22.2	8.8	7.0	5.1	3.6	2.5	2.4	3.7	6.4	16.2	14.5
Khapi SC	SC	25.01	43.8	33.6	30.4	20.9	14.5	10.5	8.1	7.1	8.6	12.7	20.9	30.7	20.1
Cebollullo IC	IC	9.84	51.6	24.9	18.3	9.1	7.3	5.6	4.2	3.1	1.9	2.8	4.6	11.8	12.1
Cebollullo SC	SC	34.85	40.0	29.4	26.4	17.4	12.1	8.9	6.9	6.0	7.3	10.4	16.8	25.8	17.3
Tahuapalca IC	IC	11.38	45.2	21.9	16.2	8.5	6.7	5.2	3.9	2.9	1.6	2.4	3.9	10.0	10.7
Tahuapalca SC	SC	46.23	36.6	26.2	23.4	15.0	10.6	7.8	6.0	5.2	6.3	8.8	14.1	22.3	15.2

Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 41: Caudales específicos medios mensuales simulados [l/s-km²] (1975-2009)
(subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)



Subcuenca	TIPO	AREA [Km2]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	0.77	1.11	1.42	3.41	6.96	6.28	5.21	2.77	1.09	1.46	1.76	1.31	1.51
Glacial Khapi	SC-C	2.24	0.79	1.13	1.43	3.45	7.15	6.44	5.32	2.91	1.20	1.65	1.92	1.37	1.58
Jalancha IC	IC	5.62	0.70	0.62	0.69	0.83	1.57	1.41	1.06	0.53	0.34	0.37	0.43	0.54	0.63
Jalancha SC	SC	11.94	0.74	0.90	1.11	2.31	4.65	4.19	3.43	1.81	0.77	1.00	1.19	0.98	1.13
Khapi IC	IC	10.83	0.68	0.59	0.67	0.82	1.65	1.58	1.25	0.63	0.35	0.37	0.41	0.52	0.62
Khapi SC	SC	25.01	0.72	0.80	0.96	1.83	3.70	3.37	2.75	1.45	0.65	0.81	0.95	0.84	0.97
Cebollullo IC	IC	9.84	0.61	0.54	0.63	0.90	1.96	1.93	1.58	0.78	0.36	0.35	0.37	0.45	0.59
Cebollullo SC	SC	34.85	0.69	0.74	0.88	1.60	3.28	3.02	2.47	1.28	0.57	0.70	0.81	0.75	0.88
Tahuapalca IC	IC	11.38	0.58	0.53	0.61	0.90	1.98	1.94	1.59	0.78	0.34	0.33	0.35	0.43	0.57
Tahuapalca SC	SC	46.23	0.67	0.69	0.83	1.46	3.01	2.80	2.29	1.18	0.53	0.62	0.72	0.68	0.82

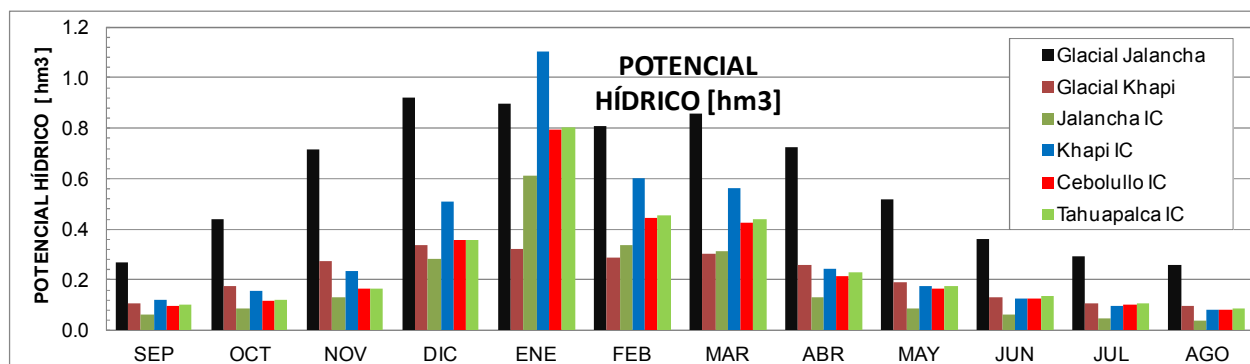
Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 42: Coeficientes de escurrimiento medios mensuales simulados (1975-2009)
(subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)

Subcuenca	TIPO	AREA [Km2]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	0.90	0.81	0.86	0.72	0.52	0.36	0.29	0.26	0.27	0.44	0.72	0.92	7.07
Glacial Khapi	SC-C	2.24	0.32	0.29	0.30	0.26	0.19	0.13	0.11	0.10	0.10	0.17	0.27	0.34	2.57
Jalancha IC	IC	5.62	0.61	0.34	0.31	0.13	0.09	0.06	0.04	0.04	0.06	0.08	0.13	0.29	2.18
Jalancha SC	SC	11.94	1.51	1.14	1.17	0.85	0.61	0.42	0.34	0.30	0.33	0.52	0.85	1.21	9.25
Khapi IC	IC	10.83	1.10	0.60	0.56	0.24	0.17	0.13	0.10	0.08	0.12	0.15	0.23	0.51	4.02
Khapi SC	SC	25.01	2.94	2.03	2.04	1.35	0.97	0.68	0.54	0.47	0.56	0.85	1.35	2.05	15.84
Cebollullo IC	IC	9.84	0.79	0.44	0.43	0.21	0.16	0.12	0.10	0.08	0.10	0.12	0.17	0.36	3.09
Cebollullo SC	SC	34.85	3.73	2.48	2.46	1.57	1.13	0.81	0.64	0.56	0.66	0.97	1.52	2.41	18.93
Tahuapalca IC	IC	11.38	0.80	0.45	0.44	0.23	0.18	0.13	0.11	0.09	0.10	0.12	0.17	0.36	3.17
Tahuapalca SC	SC	46.23	4.53	2.93	2.90	1.80	1.31	0.94	0.75	0.64	0.76	1.09	1.69	2.77	22.10

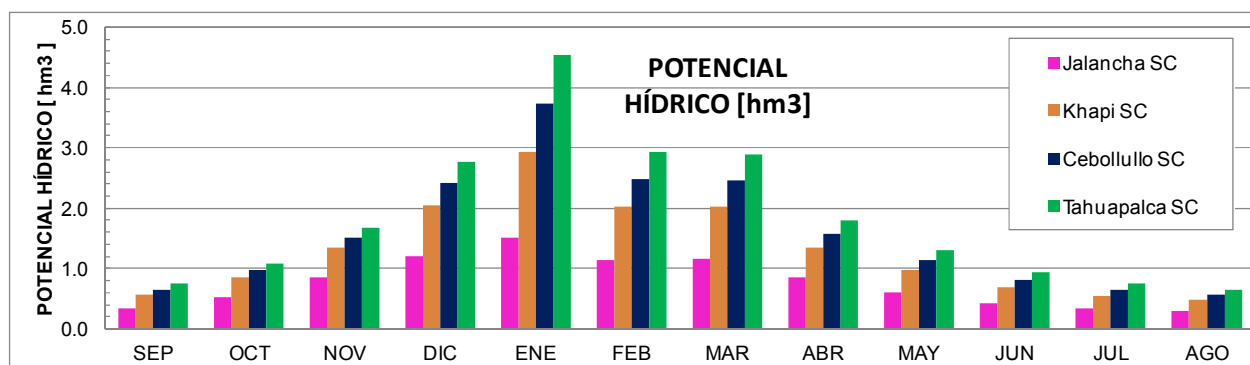
Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total

Tabla 43: Potencial hídrico medio mensual y anual simulados [hm3] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio)
(Fuente: Elaboración propia)



Nota: subcuenca Cabecera= glacial y IC=subcuenca intermedia

Figura 79: Potencial hídrico medio mensual simulado [hm3] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio) (Fuente: Elaboración propia)



Nota: SC=subcuenca total

Figura 79: Potencial hídrico medio mensual simulado [hm3] (Volumen de aporte) (1975-2009) (subcuencas de estudio) (cont.) (Fuente: Elaboración propia)

Los registros a nivel mensual para cada subcuenca se adjuntan en la base de datos Hydracces, la cual se describe en los anexos.



7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Hidrometeorología

Las variables hidrometeorológicas consideradas para el estudio de la hidrología glacial fue la temperatura media, precipitación y aforos o caudales, mientras que para la hidrología en subcuencas intermedias bajas además de estas se consideró la humedad relativa, insolación, velocidad del viento y evaporación en tanque.

Se tiene instaladas estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio, estas simplemente reflejan registros desde 2009, lo que es una limitante para evaluar la variabilidad climática en toda la zona de estudio. Sin embargo se ha estimado la meteorología recreando series sintéticas a nivel mensual para el periodo 1975-2009 de temperaturas y precipitación considerando la variación altitudinal, debido a la importancia del gradiente altitudinal de la cuenca entre los 6300 y 2500 m.s.n.m. Para esto se utilizaron datos meteorológicos de estaciones regionales con series observadas sobre periodos largos, que han pasado un filtro de consistencia regional y se han rellenado y corregido algunos meses. El gradiente pluvio-altimétrico estimado es de 18 mm/100 m y el termo-altimétrico de 0.74°C/100m. Se ha estimado para el periodo 1975-2009 que la temperatura media anual varía desde 17.4°C a 2724 m.s.n.m. y -7.7°C a 6120 m.s.n.m; mientras que la lluvia anual varía entre 402 mm a 2724 m.s.n.m y 823 m.s.n.m. a 6120 m.s.n.m.

La evapotranspiración potencial depende de varias variables climáticas por lo que es compleja su estimación en la zona de estudio y a diferentes altitudes. Se utilizó interpolación de valores estimados en estaciones regionales.

Se tiene aforos puntuales esporádicos en diferentes puntos desde el año 2009, esto ha servido como referencia para estimar el escurrimiento en las subcuencas de estudio, además de ello se utilizaron datos de caudales de otras cuencas regionales para evaluar el escurrimiento (Zongo, Huayna Potosí, Palca).

7.2 Hidrología del glacial

Es relevante mencionar que el comportamiento de un glaciar de montaña es dinámico y depende de varias condiciones físicas y geográficas locales del mismo, algunas de estas son: la posición latitudinal (polos o zona tropical), la orientación del glaciar respecto al horizonte, la pendiente de las zonas de acumulación y ablación, las dimensiones del glaciar, el espesor de la masa de hielo, la densidad del hielo, la energía incidente como radiación solar y albedo, la nubosidad, la infiltración, la sublimación.



Los glaciares son un indicador de cambio climático importante porque responde rápidamente a cambios en el clima (balance de masa, velocidades de desplazamiento).

El estudio del comportamiento hidrológico del glaciar se ha basado en un modelo de índice de temperatura adaptado para la simulación a nivel mensual para calcular el escurrimiento. La hidrología del glaciar se basa esencialmente en la fusión de nieve y/o hielo, expresada en el modelo matemático a partir de coeficientes de escurrimiento por aporte de fusión del glaciar, de un factor grado día de fusión, de temperatura media, de la temperatura crítica para la cual se tiene lluvia sólida o líquida, del área con cobertura nival o glaciar y de la cuenca, de un coeficiente de recesión; además de la lluvia y el coeficiente de escurrimiento por aporte de la precipitación en la cuenca.

Para el estudio de las subcuencas cabeceras de Jalancha y Khapi, se ha utilizado como referencia los casos estudiados de Huayna Potosí y Zongo. De ello se concluye que el glaciar estudiado debe tener importante aporte al escurrimiento debido a la fusión del glaciar y ablación del mismo. Para que el modelo glacio-hidrológico adoptado pueda simular el comportamiento del escurrimiento en las subcuencas glaciales, se han adoptado valores para los parámetros de manera que se ajusten al comportamiento en el glaciar de referencia Zongo.

El modelo ha discretizado el paso mensual temporal en dos estaciones: la época seca (mayo-noviembre) y época húmeda (diciembre-abril). Se tiene en coeficiente de escurrimiento por aporte de la fusión del glaciar de 1.45 y coeficientes de escurrimiento por aporte de la lluvia de 1.4 en época seca y de 0.1 en época de lluvias. Esta situación es físicamente opuesta a lo que debería ocurrir, sin embargo se han adoptado estos valores para bajar la magnitud de caudales de los hidrogramas en diciembre, enero, febrero, marzo y abril; dando al resto de los meses un mayor aporte por aporte de la fusión del glaciar. Se tiene un coeficiente grado día adaptado para nivel mensual de $49.5 \text{ cm}^{\circ}\text{C-mes}$.

El hidrograma medio de Zongo (1992-2009) y el hidrograma de las simulaciones mensuales en Jalancha y Khapi y el caudal medido en Zongo, muestran que en Zongo para el mes de octubre ya se tiene un escurrimiento importante a pesar de que no se tengan lluvias importantes y el pico del hidrograma ocurre en noviembre, la curva de recesión en Zongo tiene una forma más suave que la curva de ascenso del hidrograma con el mínimo en el mes de julio. Los hidrogramas simulados muestran que el ascenso del hidrograma es rápido a partir de noviembre con pico en diciembre (pico de lluvias en enero y temperaturas medias máximas en noviembre y diciembre), con la curva de recesión paralela a la de Zongo pero desplazada un mes y con el mínimo en agosto. Esto implica que el modelo adoptado presenta problemas para simular temporalmente el ascenso, pico, recesión y valor mínimo del hidrograma respecto al de referencias Zongo.

7.3 Hidrología



El estudio del comportamiento hidrológico en subcuencas intermedias de Jalancha, Khapi, Cebollullo y Tahuapalca sin cobertura glaciar o nival permanente se ha basado en un modelo hidrológico agregado determinístico de paso mensual para calcular el escurrimiento. El modelo está desarrollado para simular la hidrología de cuencas naturales, o en régimen natural por lo que no puede simular condiciones especiales como regulación por existencia de bofedales, extracciones o aprovechamientos antrópicos.

La hidrología tiene como principal entrada la lluvia y la ETP, es decir que es un modelo precipitación escurrimiento, expresado en el modelo matemático a partir de coeficientes de excedencia, parámetros hidrogeomorfológicos como almacenamiento máximo del suelo e infiltración máxima del suelo, un coeficiente de recesión del acuífero.

Para el estudio de las subcuencas intermedias de Jalancha, Khapi, Cebollullo y Tahuapalca, se ha utilizado como referencia el caso estudiado en Palza y el de Zongo (referencia). De ello se concluye que la hidrología y escurrimiento en las intercuenas es favorecida por las altas pendientes o relieve, y en las cuencas de Jalancha y Khapi mucho más por la presencia de formaciones rocosas, poca cobertura vegetal y presencia de nieve temporal no permanente debido a que presenta elevaciones superiores a la línea de equilibrio de hasta 5185 en Jalancha y 5620. Para que el modelo hidrológico adoptado pueda simular el comportamiento del escurrimiento como respuesta de las lluvias en las subcuencas intermedias, se han adoptado valores para los parámetros de manera que se ajusten al comportamiento esperado en la cuenca de alta montaña.

Se tiene un coeficiente de ajuste de la evapotranspiración potencia en Jalancha y Khapi de 0.6 y 0.8 debido a la altitud media de estas que está a 4870 y 4680 m.s.n.m respectivamente. Lo cual influye en la temperatura media que es menor, la poca cobertura vegetal, por lo que se tiene menor energía para la evaporación y transpiración. El coeficiente de excedencia es de 0.01 que es bastante bajo por lo que se tiene escurrimiento importante. El índice máximo de almacenamiento de agua en el suelo es físicamente bastante bajo 10 mm, esto para incrementar el escurrimiento, es posible que se tenga un aporte importante de aguas subterráneas que es la explicación para una alta tasa de caudal, para esto se tienen índices de infiltración en el suelo altos de 150 mm para las cuencas intermedias altas Jalancha y Khapi, y de 200 mm para las cuencas intermedias bajas de Cebollullo y Jalancha. El coeficiente de recesión del glaciar entre 0.010 y 0.015 entra dentro del rango esperado.

El hidrograma medio de las simulaciones mensuales en las intercuenas de estudio, muestran correspondencia con la distribución temporal de los hietogramas, lo que implica que el escurrimiento responde directamente a la precipitación. El pico se da en Enero y el mínimo en agosto. La curva de ascenso y la de recesión del hidrograma es más brusca que en las subcuencas.

7.4 Oferta de agua



Se tiene una oferta anual de agua por subcuencas del río Sajhuaya resumidas en la siguiente tabla:

Subcuenca	TIPO	AREA	CAUDAL		Lamina Escorrentamiento	Caudal Específico	Precipitación	Coeficiente de escurrimiento	Potencial Hídrico
		[Km ²]	[m ³ /s]	[l/s]	[mm]	[l/s-km ²]	[mm]	[mm/mm]	[hm ³]
Glacial Jalancha	SC-C	6.32	0.22	225	1118	35.56	741	1.51	7.1
Glacial Khapi	SC-C	2.24	0.08	82	1149	36.54	729	1.58	2.6
Jalancha IC	IC	5.62	0.07	69	388	15.45	619	0.63	2.2
Jalancha SC	SC	11.94	0.29	294	775	24.64	684	1.13	9.2
Khapi IC	IC	10.83	0.13	128	371	14.47	599	0.62	4.0
Khapi SC	SC	25.01	0.50	504	633	20.14	651	0.97	15.8
Cebollullo IC	IC	9.84	0.10	98	314	12.08	530	0.59	3.1
Cebollullo SC	SC	34.85	0.60	602	543	17.28	617	0.88	18.9
Tahuapalca IC	IC	11.38	0.10	101	278	10.68	485	0.57	3.2
Tahuapalca SC	SC	46.23	0.70	703	478	15.20	584	0.82	22.1

Nota: SCC=subcuenca Cabecera, IC=subcuenca intermedia y SC=subcuenca total
Cobertura glacial en Jalancha y Khapi de 92 y 91% respectivamente

Tabla 44: Resumen de oferta de agua anual en las subcuencas del Río Sajhuaya (1975-2009)
(Fuente: Elaboración propia)

Para llegar a la evaluación de la oferta presentada se ha considerado un análisis previo de la gestión de recurso hídricos en la cuenca, los aforos esporádicos de 2009-2010, visitas a la cuenca.

7.5 Recomendaciones

Es importante instrumentar la cuenca en cuanto a medida de caudal en diferentes puntos, en especial en la parte del glaciar y continuar con las mediciones meteorológicas distribuidas a diferente altitud en la cuenca, esto para tener mayor precisión en estudios posteriores regionales o en la misma cuenca.

Para estimar o calcular de manera más precisa el balance de glaciar, recesión o pérdida de masa, se deben estimar de mejor manera la profundidad del glaciar y su distribución espacial para tener volúmenes más precisos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambach, 1988; Sato et al., 1984; Braithwaite y Olesen, 1990; Lang y Braun, 1990. Journal of hydrology. Temperature index model modelling in mountains areas. www.elsevier.com/locate/jhydrol



- Braun, L.N. and Aellen, M. 1990 Modelling discharge of glacierized basins assisted by direct measurements of glacier mass balance. IAHS. Publ. no. 193, 99-106.
- Cazorzi y Dalla Fontana, 1996; Kane y Gieck, 1997; Dunn y Colohan, 1999; Hock, 1999; Pellicciotti, 2005; Li y Williams, 2008. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China. Hydrological Processes. DOI: 10.1002/hyp.7098
- Chow, V.T. 1986. Hidrología Aplicada, McGraw – Hill Interamericana, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Ramírez, Olmos, Román. 2007. Deshielo de la cuenca Tuní Condoriri y su Impacto sobre los Recursos Hídricos de las Ciudades de La Paz y El Alto. Programa de Investigación GRANT –GREAT ICE, IHH-IRD. Financiamiento Países Bajos – Plan Quinquenal PNCC, 2007
- ERSDAC, ASTER. July 2005. User's Guide Part I
- Favier, V., P. Wagnon, and P. Ribstein. 2004, Glaciers of the outer and inner tropics: A different behavior but a common response to climatic forcing, Geophys. Res. Lett., 31, L16403, doi: 10.1029/2004GL020654.
- Ginot Patrick, Ramallo Cinthya, Rojas Francisco, Fuertes Rolando, Perroy Edouard, Mendoza Javier, Litt Maxime. Noviembre 2009 Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16° S, Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas y Meteorológicas, Año Hidrológico 2007 – 2008, IRD (L'Institut de recherche pour le développement) – IHH (Instituto de hidráulica e hidrología) - SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).
- Ginot Patrick, Litt Maxime, Leonardini Gonzalo, Ramallo Cinthya, Cerutti Alexandre, Rojas Francisco, Fuertes Rolando, Mendoza Javier. Octubre 2010. Informe “Mediciones glaciológicas, hidrológicas y meteorológicas” Cuencas Glaciares Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur , Bolivia 16° (Año hidrológico 2008-2009). IRD (L'Institut de recherche pour le développement) – IHH (Instituto de hidráulica e hidrología) - SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).
- Hock, Regine, A distributed temperature – index ice and snowmelt model including potential direct solar radiation, Journal of Glaciology, Vol. 45, N° 149, 1999.
- Hock, Regine. 2003. Temperature index melt modeling in mountain areas, Journal of Hydrology, Elsevier B.V., doi:10.1016/S0022-1694(03)00257-9
- Jansson, P., Hock, R., and Schneider, T. (2003). The concept of glacier water storage: A review. Journal of Hydrology (in press).
- Li Xingong, Williams Mark. 2008. Snow Runoff Modeling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China, Wiley InterScience.
- Martinec, J., Rango, A., Roberts, R., Snowmelt Runoff Model (SRM), USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, USA, 2008.
- Molina C. Jorge & Espinoza R. Daniel R., 2006. Balance Hídrico Superficial de la cuenca Alta del Río Pilcomayo. Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) - Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI) - Instituto Francés de Investigación



Científica para el Desarrollo (IRD) – Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo (GIPMCRP). La Paz-Bolivia

- Ribstein Pierre, Francou Bernard, Rigaudière Pierre, Saravia Ronald. 1995. Variabilidad Climática y Modelización Hidrológica del Glaciar Zongo, Bolivia, Bull. Inst. fr. Études andines.
- Röthlisberger, H., Lang, H., 1987. Glacial hydrology. In: Gurnell, A.M., Clark, M.J. (Eds.), Glacio-fluvial Sediment Transfer, An Alpine Perspective, Wiley, New York, pp. 207–284, Chapter 10.
- Ohmura, A. 2001. Physical basis for the temperature-based melt-index method. – In: Journal of Applied Meteorology, Vol. 40, H. 4, S. 753-760.
- Sicart Emmanuel, J. et al. 2006. Glacier mass balance of tropical Zongo glacier, Bolivia, comparing hydrological and glaciological methods. Global and Planetary Change. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.024
- Sicart J.E., Ribstein P., Francou B., Pouyaud B., Condom T. 2007. Hydrological and Glaciological Mass Balances of a tropical glacier : Zongo, Bolivia. Global Planet change, 59(1-4), 27-36.
- Soruco, A. Etude du Retrait des Glaciers Depuis Cinquante Ans dans les Bassins Hydrologiques Alimentant en Eau la Ville de La Paz-Bolivia (16°S). Ph D Thesis, Université Joseph Fourier-Grenoble I.
- WMO "World Meteorological Organization". 1986. SCS (Soil conservation service) Snowmelt model.
- UNESCO, ROSTLAC. 1982. Guía Metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Montevideo – Uruguay.
- Wagnon P., J.-E. Sicart, E. Berthier, and J.-P. 2003. Chazarin, Wintertime high-altitude surface energy balance of a Bolivian glacier, Illimani, 6340 m above sea level, J. Geophys. Res., 108(D6), 4177, doi: 10.1029/2002JD002088.
- Sicart, J. E. (2002), Contribution à l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glacier tropical: Le Zongo, Bolivie, Ph.D. thesis, Univ. Paris VI, 333 pp., Paris.
- Sicart, J. E., Ribstein, P., Francou, B. & Gallaire, R. Etude des précipitations et de la fonte sur un glacier tropical: le glacier du Zongo, Bolivie, 16°S,; Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 48(5) octobre 2003.
- Sicart, J.E., Wagnon, P., Ribstein, P. Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). 2005. Journal of Geophysical research, 110(D12), D12106.(10.1029/2004JD005732).

<http://www.senamhi.gob.bo/sismet/>



ANEXOS

Descripción de la base de datos meteorológica (Hydraccess)

Proyecto_Illimani.dbf : Base de datos hidrometeorológica originales, reconstituidos, corregidos.

Id Estaciones: “Nombre de la estación” (max. 12 caracteres)

Orden : “ — ”

Custom_ID_2: “__” (según SENAMHI)

Custom_ID_3: “ — ”

Tipo de estación: Pluviométrica, termopluiométrica, sinóptica, climatológica ordinaria

Nombre: “Nombre completo de la estación” (descripción*)

Departamento: “País – departamento al que pertenece la estación”

Cuenca: “Cuenca a la que pertenece la estación”

Río: “Desconocido” (**)

Administrador: “Administrador de la estación”

Latitud: “Latitud de la estación” (Coord. Geográficas en ° decimales)

Longitud: “Longitud de la estación” (Coord. Geográficas en ° decimales)

Altitud: “Altitud de la estación” (altura sobre el nivel del mar en metros)

Superficie de cuenca: “__” (no se cuenta con esta información)

Inicio de actividad: “Año de inicio de actividad en la estación” (según SENAMHI)

Inicio del año hidrológico: “Año en que se inicia el año hidrológico en la región” (***)

Referencias: * Algunos casos presenta información adicional (según SENAMHI)

** La base datos de SENAMHI no presenta esta información

*** Año hidrológico asumido para el Balance Hídrico microregional



CAPTORES (M-...) “mensuales”

Editar los Captores

Id Estación: La Paz

La Paz

Captor	Tabla	Descripción	Naturaleza	Registrador
J-LP	M	Temperatura media diaria [°C]	T(°C)	
J-LP2	M	Datos Meteo	T(°C)	
J-TDCC	M	Temperatura media diaria [°C] corr complet	T(°C)	
J-TDO	M	Temperatura media diaria observada [°C]	T(°C)	
J-TNCC	M	Temperatura mínima diaria [°C] corr complet	T(°C)	
J-TNO	M	Temperatura mínima diaria observada [°C]	T(°C)	
J-TXCC	M	Temperatura máxima diaria [°C] corr complet	T(°C)	
J-TXO	M	Temperatura máxima diaria observada [°C]	T(°C)	
M-ETPH	M	Evapotranspiración Potencial HARGRAVES [mm]	Ev(mm)	
M-ETPP	M	Evapotranspiración Potencial Penman mensual [mm]	Ev(mm)	
M-EVP	M	Evaporación total en tanque mensual [mm]	Ev(mm)	
M-HRM	M	Humedad relativa media mensual [%]	H(%)	
M-INS	M	Insolación horas de sol [hr]	DS(hr)	
M-LP	M	Temperatura media mensual [°C]	T(°C)	
M-LP2	M	Datos Meteo	T(°C)	
M-TM	M	Temperatura media mensual [°C]	T(°C)	
M-VMV	M	Velocidad media del Viento mensual [m/s]	V(m/s)	
J-PO	P	Precipitación diaria [mm] observada	P(mm)	
M-PCC	P	Precipitación mensual [mm] corregida completada	P(mm)	
M-PMMO	P	Precipitación Mensual [mm] observada	P(mm)	

Icono de basura

Inventario Datos del Captor

+

↶

Propiedades

Inventario Datos de la Estación

STOP

Tipo de tablas (P=lluvias, M=datos meteo)

Captor: Descripción

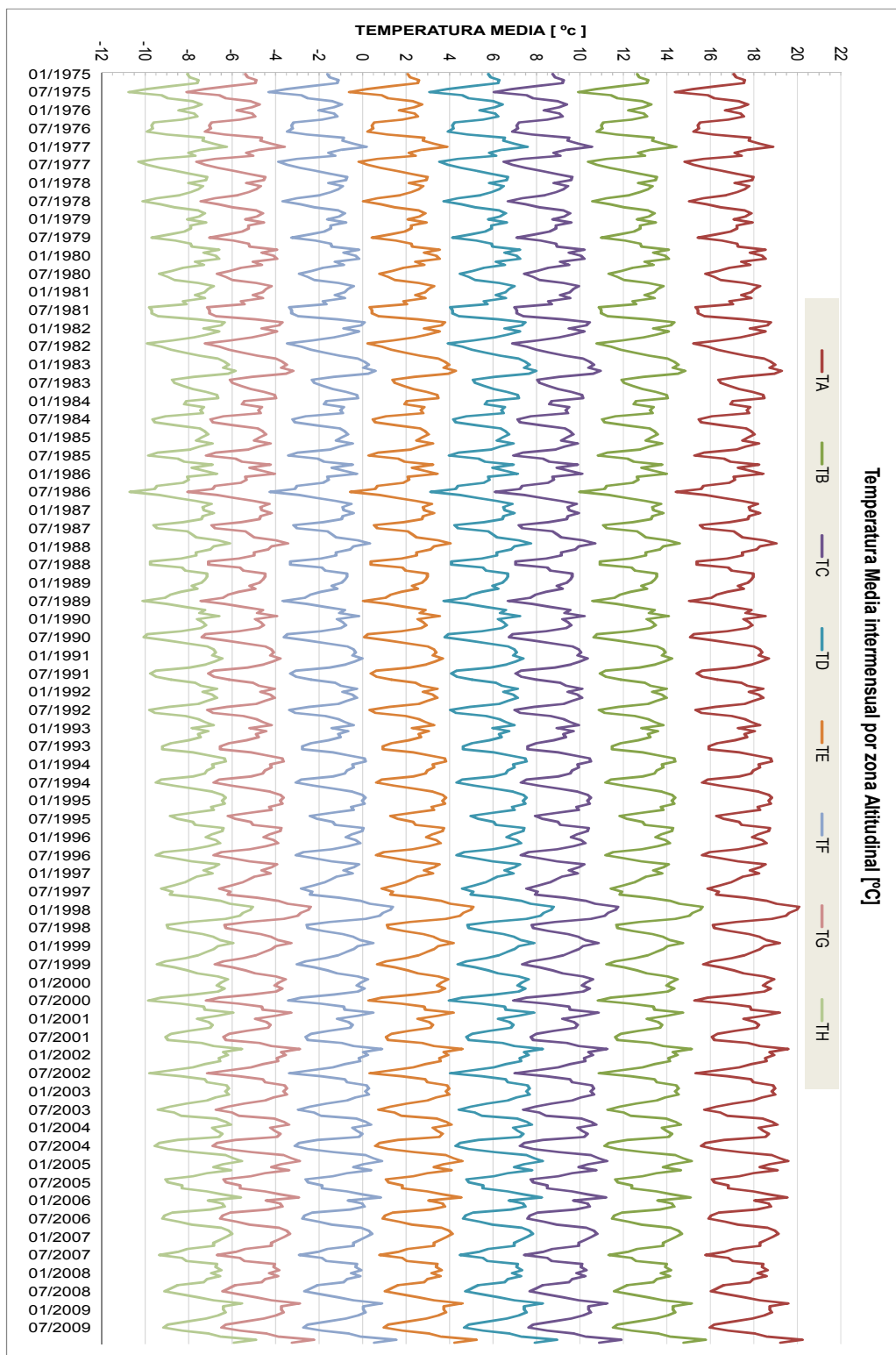
- J-TDcc: Temperatura media diaria corregida completada [°C]
- J-TDo: Temperatura media diaria observada [°C]
- J-Tncc: Temperatura mínima diaria corregida completada [°C]
- J-Tno: Temperatura mínima diaria observada [°C]
- J-Txcc: Temperatura máxima diaria corregida completada
- J-Txo: Temperatura máxima diaria observada [°C]
- M-ETPH: Evapotranspiración Potencial HARGRAVES [mm]



M-ETPP:	Evapotranspiración Potencial Penman mensual [mm]
M-EVP:	Evaporación total en tanque mensual [mm]
M-HRM:	Humedad relativa media mensual [%]
M-INS:	Insolacion horas de sol [hr]
M-TM:	Temperatura Media Ambiente mensual observada [°C]
M-TMC:	Temperatura Media Ambiente mensual completada [°C]
M-TNo:	Temperatura Mínima mensual observada [°C]
M-TNoc:	Temperatura Mínima Extrema mensual completada [°C]
M-Txo:	Temperatura Máxima Extrema mensual original [°C]
M-Txoc:	Temperatura Máxima Extrema mensual completado [°C]
M-PM:	Precipitación mensual observada [°C]
M-Pcc:	Precipitación mensual corregida y completada [°C]
M-PMMO:	Precipitación Mensual observada [mm]
J-Po:	Precipitación diaria observada [mm]
M-QLS:	Caudal Medio Mensual (en [l/s])
M-QM3:	Caudal Medio Mensual (en [m ³ /s])
M-VOL:	Volumen Medio de aportación en (Hm ³)
M-Lq:	Lámina de escurrimiento (mm)

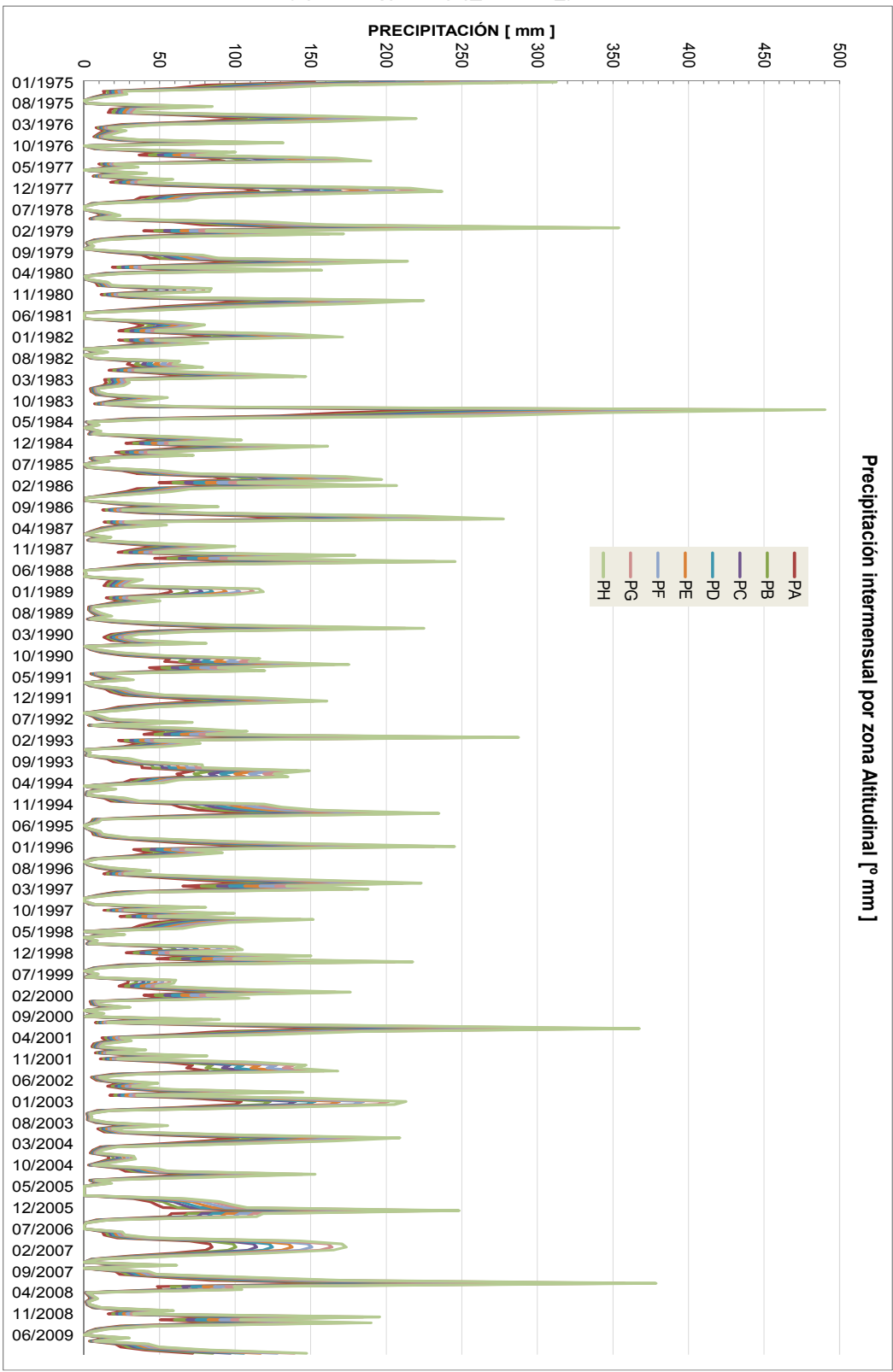


Series intermensuales 1975-2009 de temperatura media [°C] por zonas altitudinales



(Fuente: Elaboración propia)

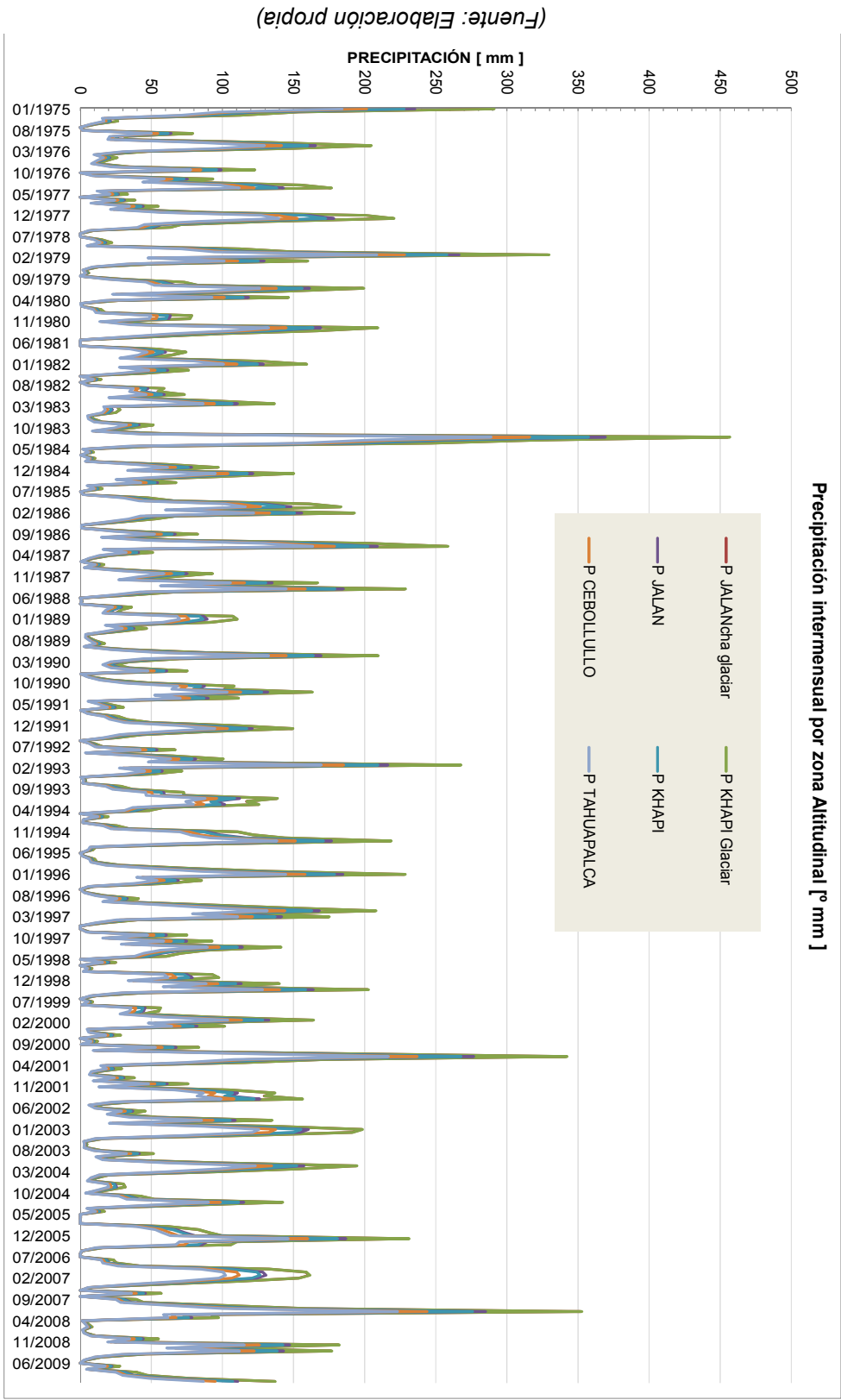
Series intermensuales 1975-2009 de precipitación [mm] por zonas altitudinales



Precipitación intermensual por zona Altitudinal [° mm]

(Fuente: Elaboración propia)

Serie intermensuales 1975-2009 de precipitación [mm] por subcuencas



Series intermensuales 1975-2009 de ETP [mm] por subcuencas

