

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA PARA LA
CUENCA DEL GUAYLLABAMBA, BAJO CONDICIONES DE
SEQUÍA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

WILSON ANDRÉS GONZÁLEZ QUILACHAMIN
andrs.gonzalez@outlook.com

DIRECTOR: Dr. Marcos Villacís Erazo
marcos.villacis@epn.edu.ec

Quito, abril 2016

DECLARACIÓN

Yo, Wilson Andrés González Quilachamin, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

WILSON ANDRÉS GONZÁLEZ QUILACHAMIN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilson Andrés González Quilachamin, bajo mi supervisión.

Dr. Marcos Villacís Erazo
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi familia, por estar conmigo a lo largo de este arduo camino.

A Dani, por apoyarme en los momentos más difíciles y compartir cada uno de estos años y muchos más.

A mis amigos Esteban, Víctor y Anita, por creer en mí y acompañarme siempre, aun estando lejos.

A los GROSSOS, por regalarme su amistad y por lo buenos momentos que hicieron más llevadero este andar.

Al Dr. Marcos Villacís y Dr. Wouter Buytaert, por su ayuda, paciencia y comprensión para poder culminar de la mejor manera este proyecto.

Al Ing. Marlon Calispa, gracias por ayudarme en etapas claves de este proyecto y su consejo siempre bien recibido.

Finalmente, agradezco a todas esas personas que siempre me apoyaron y de una u otra forma supieron aguantarme.

DEDICATORIA

A todas las personas que me han inspirado y han revolucionado mi vida.

Wilson

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE MAPAS	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
PRESENTACIÓN	XVII
CAPÍTULO 1	19
CONTEXTOS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	19
1.1 Introducción.....	19
1.2 Antecedentes	20
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo General	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 Estado del Arte y Problemática	22
1.4.1 Agua para las ciudades: el impacto del cambio climático y del crecimiento demográfico en los andes tropicales (W. Buytaert y B. De Bievre, 2012).....	22
1.4.2 Modelación oferta – demanda de agua en cuencas desarrolladas, cuenca alta del río guayllabamba y cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con la ayuda de la herramienta WEAP (Proaño, 2010).....	23
1.4.3 Composición y dinámica de los agrosistemas del Distrito Metropolitano de Quito en los últimos treinta años y posibles interrelaciones con los efectos del cambio climático global (Yáñez, 2012)	24
1.4.4 Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura en la región andina de Ecuador (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2013).....	25

1.4.5 Diagnóstico del balance entre oferta y demanda hídrica, manejo integrado de los recursos hídricos en la Hoya de Quito (Bievre y Coello, 2008).....	26
1.5 Metodología.....	30
1.6 Acance	31
1.7 Justificación.....	32
CAPÍTULO 2	33
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	33
2.1 Ubicación Geográfica	33
2.2 Características Generales	33
2.3 Cuencas hidrográficas y características físico – geográficas	35
2.3.1 Subcuenca del Río Pita	35
2.3.2 Subcuenca del Río San Pedro	36
2.3.3 Subcuenca Guayllabamba Alto	36
2.3.4 Subcuenca del Río Pisque	37
2.3.5 Subcuenca Guayllabamba Medio	37
2.3.6 Subcuenca del Río Intag	37
2.3.7 Subcuenca del Río Alambí	38
2.4 Principales usos del agua	38
2.4.1 Agua potable	38
2.4.2 Riego	41
2.4.3 Generación hidroeléctrica	41
2.4.4 Otros usos	42
2.5 Climatología	43
2.5.2 Variabilidad climática.....	44
2.6 Hidrología	52
2.7 Suelos	53
2.8 Cambio en el uso del suelo	57
2.9 Información básica evaluada.....	63
2.9.1 Información cartográfica	63
2.9.2 Información climática.....	64
2.9.3 Información hidrológica	66
CAPÍTULO 3	69
FUNDAMENTO TEÓRICO	69
3.1 Modelación hidrológica.....	69
3.1.1 Modelo basado físicamente	69

3.1.2 Modelo conceptual	70
3.1.3 Modelo empírico o de caja negra	70
3.1.4 Modelo determinístico	71
3.1.5 Modelo estocástico.....	71
3.2 Balance hídrico.....	72
3.2.1 Características especiales de la ecuación de balance hídrico para diferentes intervalos de tiempo	75
3.2.2 Características especiales de la ecuación de balance hídrico para diferentes dimensiones	76
3.3 Precipitación.....	77
3.3.1 Tipos de precipitación	79
3.4 Evapotranspiración.....	80
3.4.1 Evaporación (E).....	80
3.4.2 Transpiración (T).....	81
3.4.3 Evapotranspiración (ET).....	82
3.5 Enfoque del coeficiente de cultivo.....	86
3.6 Ecuación de hargreaves.....	87
3.7 Modelo y curva de balance hídrico budyko	88
3.7.1 Desviaciones dentro de la curva budyko.....	90
3.8 Reservoirio lineal.....	95
3.9 Contribución potencial de agua por parte de los glaciares, bajo diferentes condiciones climáticas.....	97
3.10 Necesidades hídricas de los cultivos	100
CAPÍTULO 4	102
METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL MODELO	102
4.1 Descripción del modelo	102
4.2 Información de entrada	104
4.2.1 Precipitación.....	104
4.2.2 Temperatura y radiación	105
4.2.3 Topografía	106
4.2.4 Uso y cobertura del suelo.....	106
4.2.5 Glaciares	107
4.2.6 Concesiones.....	107
4.3 Etapas de desarrollo	108
4.3.1 Etapa 1: Generación de capas.....	108

4.3.2 Etapa 2: Implementación del balance hídrico Budyko.....	109
4.3.3 Etapa 3: Calibración de reservorio lineal y caudales.....	110
4.3.4 Etapa 4: Contribución glaciar	111
4.3.5 Etapa 5: Determinación de la demanda y estrés hídrico.....	112
4.4. Pruebas del modelo	113
4.4.1 Prueba 1: Error del algoritmo que asigna el coeficiente de cultivo.....	113
4.4.2 Prueba 2: Ajuste del algoritmo y generación de resultados (Escenario 1).....	114
4.4.3 Prueba 3: Ajuste del coeficiente de cultivo y generación de resultados (Escenario 2)	115
CAPÍTULO 5	123
RESULTADOS	123
5.1 Escenario 1	123
5.1.1 Evapotranspiración de cultivo	123
5.1.2 Precipitación efectiva	124
5.1.3 Caudales y contribución glaciar	128
5.1.4 Demanda y estrés hídrico	128
5.2 Escenario 2	131
5.2.1 Evapotranspiración de cultivo	131
5.2.2 Precipitación efectiva	132
5.2.3 Necesidades hídricas de los cultivos	133
5.2.4 Caudales y contribución glaciar	145
5.2.5 Demanda y estrés hídrico	145
5.3 Comparación de caudales de sequía y condiciones normales	148
CAPÍTULO 6	150
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
6.1 Conclusiones.....	150
6.2 Recomendaciones.....	152
BIBLIOGRAFÍA.....	153
ANEXOS	156
ANEXO 1 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS REPRESENTATIVAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA	157
ANEXO 2 DATOS CLIMATOLÓGICOS DE ENTRADA DEL MODELO	158
ANEXO 3 RESULTADOS PARA PRUEBAS DEL MODELO (ESCENARIO 1 Y ESCENARIO 2)	168

ANEXO 4 OFERTA, DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (ESCENARIO 1 Y ESCENARIO 2).....	178
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 CONSUMO Y FLUJO DE RETORNO POR SECTOR DURANTE EL MES DE MAYOR DEMANDA (AGOSTO).....	28
TABLA 1.2 CAUDALES MEDIOS NATURALES Y ACTUALES POR SUBCUENCA. ...	28
TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO GUAYLLABAMBA.	39
TABLA 2.4 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.	42
TABLA 2.5 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS DEL CLIMA.	45
TABLA 2.6 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA PRECIPITACIÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).....	46
TABLA 2.7 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA TEMPERATURA DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).....	47
TABLA 2.8 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA EVAPORACIÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).....	50
TABLA 2.9 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA HUMEDAD RELATIVA DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).	51
TABLA 2.10 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA VELOCIDAD DEL VIENTO DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010). .	52
TABLA 2.11 ESTACIONES HIDROLÓGICAS REPRESENTATIVAS DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).....	53
TABLA 2.12 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS Y GRUPOS HIDROLÓGICOS. .	55
TABLA 2.13 TEXTURA DE SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA. ...	56
TABLA 2.14 TEXTURA DE SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA. ...	57
TABLA 2.15 USO Y COBERTURA VEGETAL EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	59
TABLA 2.16 FUENTES DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	64
TABLA 2.17 TIPOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.	65
TABLA 2.18 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON REGISTROS CLIMÁTICOS (1981-2010).	66

TABLA 2.19 ESTACIONES HIDROLÓGICAS CONSIDERADAS (1981-2010).	67
TABLA 4.20 CODIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA CAPA GLOBCOVER PROJECT.	115
TABLA 4.21 CODIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA PARA MAGAP – MAE (2014).	118
TABLA 5.22 OFERTA HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.	129
TABLA 5.23 DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	130
TABLA 5.24 PARÁMETROS HÍDRICOS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	138
TABLA 5.25. NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.	141
TABLA 5.26 OFERTA HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.	146
TABLA 5.27. DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	147
TABLA 5.28 COMPARACIÓN DE CAUDALES DE SEQUÍA Y CONDICIONES NORMALES.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 SISTEMAS ATMOSFÉRICOS QUE INFLUYEN EN EL ECUADOR.....	44
FIGURA 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DE ACUERDO A LA FORMA, ALEATORIEDAD Y VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LOS FENÓMENOS HIDROLÓGICOS.	73
FIGURA 3.3 CICLO HIDROLÓGICO, PARA LA DETERMINACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DENTRO DEL BALANCE HÍDRICO.	75
FIGURA 3.4 DINÁMICA DE MOVIMIENTOS ASCENDENTES DENTRO DE LA PRECIPITACIÓN, A. CICLÓNICA, B. CONVECTIVA, C. OROGRÁFICA	78
FIGURA 3.5 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.	84
FIGURA 3.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO DE REFERENCIA (ET _o), BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC) Y CONDICIONES NO ESTÁNDAR (ET _{CAJ}).	87
FIGURA 3.7 CURVA BUDYKO, PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDICIONES LÍMITE DE AGUA Y ENERGÍA.	90

FIGURA 3.8 CURVA BUDYKO, DESVIACIONES EN LOS CAMBIOS DE PARTICIÓN ET/Q Y CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	91
FIGURA 3.9 COMPARACIÓN DE LA CURVA BUDYKO, CON RELACIÓN A OTROS TRABAJOS SIMILARES.....	93
FIGURA 3.10 ANÁLISIS DE DESVIACIONES, DE ACUERDO A MILLY (1994) Y ZHANG (2001).....	94
FIGURA 3.11 BALANCE DE MASA, CON VALORES DE ÍNDICE EVAPORATIVO POR SOBRE EL LÍMITE DE ENERGÍA.....	94
FIGURA 3.12 REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE RESERVORIO LINEAL.....	96
FIGURA 3.13 CONTRIBUCIÓN GLACIAR, PARA DIFERENTES CUENCAS HÍDRICAS.....	99
FIGURA 4.14 ETAPA 1: GENERACIÓN DE CAPAS.....	109
FIGURA 4.15 ETAPA 2: IMPLEMENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.....	110
FIGURA 4.16 ETAPA 3: CALIBRACIÓN DE RESERVORIO LINEAL Y CAUDALES.....	111
FIGURA 4.17 ETAPA 4: CONTRIBUCIÓN GLACIAR.....	112
FIGURA 4.18 ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO.....	113
FIGURA 4.19 GRUPOS Y SUBGRUPOS PARA LA CAPA DE USO Y COBERTURA MAGAP - MAE.....	117
FIGURA 4.20 PROCESO DE MODELADO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA - ESCENARIO 1.....	121
FIGURA 4.21 PROCESO DE MODELADO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA - ESCENARIO 2.....	122
FIGURA 5.22 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 1.....	126
FIGURA 5.23 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 1.....	127
FIGURA 5.24 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 2.....	134
FIGURA 5.25 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 2.....	135
FIGURA 5.26 NECESIDADES HÍDRICAS MEDIAS MENSUALES - ESCENARIO 2.....	136
FIGURA 5.27 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE CAUDAL.....	149

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 2.1. UBICACIÓN DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	40
MAPA 2.2. ISOYETAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	48
MAPA 2.3. ISOTERMAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	49
MAPA 2.4. TEXTURA DE SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA. ...	60
MAPA 2.5. PENDIENTES PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	61
MAPA 2.6. COBERTURA DEL SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.....	62

RESUMEN

La Cuenca del Río Guayllabamba proporciona agua para un sin número de actividades dentro de la ciudad de Quito y sus alrededores, con una población aproximada de 2,5 millones de personas y con una variedad de sistemas agrícolas que mantienen, sobre todo, el mercado interno. El cambio climático en los últimos años ha modificado la temporada y altitud de la siembra, expandiendo la actual frontera agrícola, que de la mano de un incremento demográfico ha generado un déficit en los diferentes usos, por lo que es necesario el aporte de cuencas aledañas.

Bajo este punto de vista, se ha realizado un análisis de las condiciones secas de la cuenca, no solo de los parámetros climáticos e hidrológicos sino también de sus diferentes zonas de cultivo. A través de un modelo de oferta y demanda de agua, el mismo que utiliza datos de precipitación y temperatura media (1970 a 2010), topografía, zonas de glaciar y cobertura vegetal. Considerando, principalmente, el comportamiento de la precipitación en el año más seco (2005), y relacionándolos dentro de un balance hídrico que permita conocer la disponibilidad de agua a lo largo de la cuenca principal (~ 5893 m a 1000 m).

Para lo cual, se han generado dos escenarios en los cuales se ha modificado la cobertura vegetal; para el primer escenario se trabajó con los datos generados por Globcover Project (ENVISAT, 2010), mientras que para el segundo escenario se implementó la capa de cobertura y uso del suelo (MAGAP, 2014) con una resolución en ambos casos de 100 metros, haciendo énfasis en el segundo escenario. Ya que cuenta con datos actuales de las zonas agrícolas y los diferentes tipos de cultivos de la cuenca, cabe indicar, que el primer escenario no muestra una zonificación de los cultivos, por lo cual, no se puede establecer un coeficiente de cultivo individual, sino que establece un coeficiente promedio para el tipo de cultivo anual, lo cual no refleja los cambios del mismo.

Mientras que, para el segundo escenario se consideran los diferentes tipos de cultivos, épocas de siembra y cambios fenológicos, supeditados a las características climáticas de la zona. Con lo cual, se ha podido ajustar de mejor manera el balance hídrico, obteniendo como resultado un mayor caudal en el cauce principal e incremento de aporte glaciar, este último, principalmente, en época de verano.

A su vez, se ha considerado la demanda de agua dentro de la cuenca, para usos tales como: agua potable, uso doméstico, riego y generación hidroeléctrica; con lo cual se ha podido establecer el estrés hídrico para cada una de las subcuencas. Esto en gran medida por el aumento de las zonas agrícolas que han promovido un incremento del número de concesiones de riego a lo largo de la cuenca. Es importante indicar que la afectación de estos cambios da como resultado que bajo condiciones de sequía, existe un detrimento en la cantidad y calidad de agua, así como del cambio en las épocas de cultivo, tamaño del cultivo y la movilización de la frontera agrícola.

ABSTRACT

Guayllabamba River Basin provides water for a number of activities within the city of Quito and the surrounding area, with a population of 2.5 million people and with a variety of agricultural systems that maintain, above all, the domestic market. Climate change in recent years has changed the season and altitude planting, expanding the current agricultural frontier, that the hand of a population increase has generated a deficit in the different uses, thus requiring input from surrounding basins.

Under this view, it has performed an analysis of the dry conditions of the basin, not only of climate and hydrological parameters, but of their different growing areas. Through a model of supply and demand for water, the same as using data of precipitation and average temperature (1970-2010), topography, glacier areas and vegetation cover. Considering mainly the behavior of precipitation in the driest year (2005), and relating within a water balance that allows to know the availability of water along the main basin (~ 5893 m to 1000 m).

For which, we have generated two scenarios in which has been modified plant cover; for the first scenario we worked with the data generated by GlobCover Project (ENVISAT, 2010), while for the second scenario the cover layer and land use (MAGAP, 2014) with a resolution in both cases of 100 meters was implemented, emphasizing the second stage. Since it has current data from agricultural areas and different types of crops in the basin, it is noted that the first scenario shows no zoning of crops, therefore, you can not establish an individual crop coefficient, but which provides an average coefficient for the annual crop.

As for the second scenario considers the different types of crops, planting dates and phenological changes, subject to the climatic characteristics of the area. Whereupon, it has been adjusted to better water balance, resulting in a higher flow in the main channel and increase of glacier contribution, the latter mainly in summer.

In turn, it has been considered the demand for water within the basin, for uses such as drinking water, domestic use, irrigation and hydroelectric generation; thus it has been possible to establish the water for each of the sub-basins stress. This largely by increased agricultural areas that have promoted an increase in the number of irrigation concessions along the basin. It is important to note that the impact of these changes results in drought conditions, there is a detrimental effect on the quantity and quality of water as well as the change in times of cultivation, crop size and mobilization of the agricultural frontier.

PRESENTACIÓN

Debido a la creciente presión sobre los recursos hídricos, principalmente sobre la cuenca del río Guayllabamba, donde se asienta el D.M. Quito. Es necesario implementar herramientas y estudios que permitan diagnosticar las diferentes alteraciones, tanto climáticas como de gestión de los recursos.

Motivo por el cual, se ha llevado a cabo el presente Análisis de un Modelo de Oferta y Demanda de Agua para la Cuenca del Río Guayllabamba, en el que se ha propuesto generar dos escenarios, los mismos que buscan ajustar de mejor manera las características fenológicas de los cultivos, de acuerdo a sus épocas de sequía, etapas de desarrollo de las plantas y las condiciones climatológicas de sequía. Lo que permita determinar las necesidades hídricas de los cultivos a nivel mensual, así como los de mayor demanda y el caudal necesario para los mismos a través de su área cultivada.

Es por ello, que se ha llevado a cabo el análisis de los caudales de oferta a lo largo de toda la cuenca y la demanda de los mismos bajo condiciones de sequía, para lo cual se tiene.

Capítulo 1, la determinación de objetivos y estudios previos que permitan comparar y tener una idea clara de los posibles resultados que puedan arrojar el modelo.

Capítulo 2, se ha definido la cuenca de estudio, la misma que se compone de 8 subcuencas, las cuales presenta diferentes características geomorfológicas, así como climatológicas e hidrológicas.

Capítulo 3, se fundamenta el marco teórico que permite ejecutar el modelo, a través de una serie de procesos y comandos que determinan las características de la cuenca y relacionan los procesos hidrológicos de la misma.

Capítulo 4, se establece la metodología y desarrollo del modelo, identificando 5 etapas que permiten ejecutar ordenes que modelan características como la geomorfología, precipitación, evapotranspiración, caudales y aporte glaciar.

Capítulo 5, determina los resultados del modelo y la comparación de los escenarios propuestos.

Capítulo 6, establece las conclusiones y recomendaciones, a las cuales se ha llegado con este proyecto con el fin de mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la cuenca con una mejor gestión y administración de los recursos.

Finalmente, se anexan mapas y gráficas que permiten sustentar el presente estudio al reunir a detalle cada uno de los datos de entrada y salida del presente modelo aquí propuesto.

CAPÍTULO 1

CONTEXTO Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la cuenca del río Guayllabamba sufre graves estragos relacionados al incremento poblacional, el cual ha promovido diferentes usos que han ido en detrimento de la cantidad y calidad del recurso hídrico. Sin embargo, este deterioro no solo se debe a la acción del hombre, sino también al cambio climático que experimenta la región, lo cual influye directamente sobre la oferta natural de agua.

Por dicho motivo, el presente estudio pretende brindar un acercamiento de la disponibilidad de agua bajo condiciones de sequía, considerando el régimen de precipitación para el año más seco dentro de una serie temporal de 40 años (1970 – 2010), su cobertura vegetal ajustada a dichas condiciones y la demanda del recurso. Todo esto relacionado dentro de un Modelo de Oferta y Demanda, el mismo que a través de un balance hídrico permita determinar la cantidad de agua, tanto de escorrentía como de contribución glaciar para usos como: agua potable, hidroelectricidad y riego. Además, de la necesaria para el desarrollo de los cultivos, ya que la mayoría de los mismos se distribuyen dentro del mercado regional. Lo cual a su vez, puede brindar ciertas pistas sobre la administración de las concesiones para riego a lo largo de la cuenca.

Finalmente, se busca determinar el nivel de estrés atribuido a la demanda y a las condiciones experimentadas, a través del índice de estrés hídrico WSI (Water Stress Index), el cual relaciona la demanda y la oferta de agua ponderando dicha relación. Para con ello identificar la alteración espacio – temporal del recurso, lo cual permita conocer el nivel de sequía al que podría estar expuesta la cuenca ante condiciones adversas como las aquí mostradas. Con lo cual, generar políticas que

promuevan una mayor y mejor administración de los recursos hídricos tanto en su uso como en el avance de la zona agrícola, la misma que ha deteriorado las zonas de producción de agua.

1.2 ANTECEDENTES

Existen estudios previos realizados por el Fondo de Protección del Agua para Quito (FONAG) y el Instituto de Investigaciones para el Desarrollo (IRD, por sus siglas en francés), el cual ha llevado a cabo una serie de proyectos cuyo objetivo primordial es el desarrollo social, económico y cultural de los países en vías de desarrollo.

Dichas entidades se han enfocado en promover la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en los Andes, específicamente para la cuenca alta del río Guayllabamba, a través del manejo y gestión integral del agua, suelo y demás recursos relacionados de manera coordinada. Este proceso busca ser flexible con respecto a los desafíos relacionados con la distribución y manejo sostenible del recurso.

Dentro de las dificultades que se afrontan, principalmente se basan en el tratamiento convencional sectorial, lo cual ha generado una serie de conflictos entre comunidades y el sector privado condicionando la cantidad del recurso y repercutiendo en la calidad del mismo. Por otro lado, el eventual cambio climático ha alterado las actividades de desarrollo y modificado las condiciones de oferta de agua a lo largo de toda la cuenca.

Es evidente que deben llevarse a cabo cambios, a través de políticas públicas que permitan garantizar la oferta y buen uso del recurso con la finalidad de satisfacer las necesidades de los actores que interviene dentro de este complejo sistema, para lo cual se hace necesaria la intervención de los múltiples sectores que la conforman.

Es por tal motivo, que para un uso equitativo del recurso hídrico, se deban considerar todas las diversas necesidades, en cuyo caso el Fondo de Protección

del Agua para Quito, busca de manera comprometida mecanismos que permitan un desarrollo sustentable tanto de ecosistemas vitales que se encuentren bajo amenaza, como de proponer soluciones que permitan satisfacer no solo las necesidades actuales sino también de las generaciones futuras.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los requerimientos de agua para los cultivos en secano, irrigación y agua potable, mediante el análisis de la disponibilidad del recurso, bajo condiciones de sequía para la cuenca del Guayllabamba, concentrándonos en las zonas de cabecera desde donde se provee el agua, a través de un Modelo de Oferta y Demanda.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar las variaciones de cobertura vegetal y usos de suelo existentes dentro de la cuenca del Río Guayllabamba, para incluirlas en un modelo de oferta y demanda.
- Determinar la evapotranspiración de la cubierta vegetal, de acuerdo a los diferentes tipos existentes de la misma y sus fases de desarrollo en el caso de los cultivos, que ajusten el modelo de oferta y demanda.
- Identificar escenarios de sequía a través de datos de precipitación y caudales mínimos, que permitan conocer su intensidad y frecuencia.
- Analizar la variación espacial y temporal del impacto potencial de las sequías sobre el funcionamiento del balance entre oferta y demanda de la cuenca del Guayllabamba, para los usos de cultivos en secano, riego y agua potable.

1.4 ESTADO DEL ARTE Y PROBLEMÁTICA

El estudio de las condiciones hidrometeorológicas de las diferentes zonas y regiones a nivel mundial ha tomado importancia, debido al proceso de cambio climático que se ha venido dando en los últimos años. El cual, ha influenciado en la variación espacio temporal de las precipitaciones, temperatura, humedad y evapotranspiración.

Por lo cual, se han visto afectados los requerimientos de agua para cultivos en secano, agua potable e irrigación, esto debido a temporadas de sequía más prolongadas y continuas en estos años. Y que a corto o mediano plazo se avizora como una problemática de las ciudades y regiones con un crecimiento demográfico desordenado, lo cual, hace necesario generar y tomar medidas que eviten dicho déficit hídrico a futuro.

Es por tal motivo, que se han llevado a cabo una serie de estudios con la finalidad de mostrar los cambios que se han venido dando en las condiciones climáticas y de uso del recurso para la cuenca del Río Guayllabamba, la cual posee una fuerte influencia como fuente de abastecimiento y de drenaje para el Distrito Metropolitano de Quito.

A continuación, se describen algunos estudios revisados y que sirven como fuente bibliográfica para el presente trabajo.

1.4.1 AGUA PARA LAS CIUDADES: EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DEL CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO EN LOS ANDES TROPICALES (W. Buytaert y B. De Bievre, 2012)

Dicho estudio hace referencia al cambio climático al que se ven expuestas ciudades andinas como Bogotá, Quito, Lima y La Paz. El estudio considera variables como: incremento demográfico, topografía y los diversos gradientes climáticos de la región, para evaluar la disponibilidad de agua e identificar los posibles conflictos en sus diferentes usos.

Esto a través de un conjunto de modelos climatológicos globales (CMIP3, Coupled Model Intercomparison Project), los cuales generan datos de entrada para un modelo de balance hídrico para la región, todo esto, dentro de un marco geoespacial, que permite identificar la disponibilidad de agua per cápita a lo largo de la corriente principal de abastecimiento, sin considerar aportes de agua de otras cuencas (trasvases), para de esta manera modelar y simular escenarios presentes y futuros de crecimiento poblacional y cambio climático.

En las proyecciones realizadas, se define que existe un grado importante de incertidumbre para determinar la disponibilidad de agua, principalmente, por la forma compleja de abastecimiento y suministro de agua para cada ciudad, pero dejando de lado dicha incertidumbre recalca la necesidad de políticas de gestión del recurso.

1.4.2 MODELACIÓN OFERTA – DEMANDA DE AGUA EN CUENCAS DESARROLLADAS, CUENCA ALTA DEL RÍO GUAYLLABAMBA Y CUENCAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE QUITO, CON LA AYUDA DE LA HERRAMIENTA WEAP (Proaño, 2010)

Este estudio se refiere a la modelación de oferta y demanda hídrica para la cuenca alta del Río Guayllabamba, además de los aportes de cuencas aledañas, por medio de la herramienta de modelación hidrológica Water Evaluation And Planing System (WEAP). Para representar la respuesta hidrológica de la variabilidad espacio - temporal, tomando en cuenta las condiciones naturales y antrópicas de la cuenca.

Para llevar a cabo, dicho efecto, se procedió a delimitar la cuenca en subcuencas, denominadas “catchments”, de acuerdo a puntos de interés hidrológico, y dentro de las cuales el modelo representa procesos específicos como: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y riego. Para este último punto se espacializó la distribución de las captaciones para riego, en función de las subcuencas propuestas, para posteriormente esquematizar dichos procesos.

Posteriormente, se representó dos formas de riego, para evaluar la mejor alternativa dentro de WEAP, para finalmente calibrar dichos datos hidrológicos de los años 1963 a 1973 y validar con los datos históricos obtenidos y los simulados para la cuenca del Río San Pedro, para el periodo de 1975 a 2007.

1.4.3 COMPOSICIÓN Y DINÁMICA DE LOS AGROSISTEMAS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO EN LOS ÚLTIMOS TREINTA AÑOS Y POSIBLES INTERRELACIONES CON LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL (Yáñez, 2012)

El presente estudio muestra información referente a la presencia, estructura y dinámica de los agrosistemas en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) y su evolución en las últimas décadas, esto en gran medida debido al incremento demográfico local, además de circunstancias asociadas al cambio climático. Las mismas que pudieran estar generando impactos socio – económicos importantes en este sector, todo esto sujeto a un grado de incertidumbre, debido a la variabilidad climática y cambio climático poco estudiados en la zona y que, a largo plazo, representan un riesgo en la seguridad alimentaria de la región y la productividad del sector agrario.

En base, a que no existen estudios desarrollados de los sistemas agrícolas para el Distrito Metropolitano de Quito, el presente busca ser una herramienta para evaluar los riesgos a los que puede verse abocado el sector en los próximos años, no solo en el ámbito del cambio climático sino en el uso, caracterización y dinámica en sí de los agrosistemas. Por lo cual, y con la información disponible se puede evidenciar que este sector productivo es bastante sensible (a mediano plazo) al aumento de temperatura media anual y a una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos (períodos de sequías gradualmente más prolongadas en las estaciones secas, mayores precipitaciones e inundaciones en las estaciones lluviosas, así como de una menor disponibilidad de agua para riego proveniente de los deshielos de glaciares, debido a su actual retroceso).

1.4.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA AGRICULTURA EN LA REGIÓN ANDINA DE ECUADOR (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2013)

El objetivo de este estudio fue evaluar la vulnerabilidad al cambio climático del sector agrícola de 154 cantones ubicados en la región Andina de Ecuador e identificar algunas medidas de adaptación.

Se ha determinado, que para el año 2050, habría un aumento en la temperatura de 1,7 [°C] y una mayor precipitación, con lo que, se observa una tendencia a desplazarse por parte de los cultivos, perdiendo su aptitud climática en las zonas donde actualmente se cultivan y ganan espacio en zonas contiguas más altas.

Por medio de este análisis, se ha llegado a determinar que 15 cantones son los más vulnerables, de acuerdo con el porcentaje de área agrícola cantonal fuertemente afectada por el cambio climático. También muestra los valores de una serie de indicadores que se considera tienen alguna relación con la capacidad de adaptación. Dentro del análisis hay que tener en cuenta, que la distribución de las anomalías en la precipitación no es homogénea, por lo cual, la ocurrencia de eventos extremos puede incrementarse en el futuro. Por otro lado, el impacto de estos cambios dependerá de las condiciones actuales del clima. En algunos casos, las temperaturas actuales son altas, mientras que en otros casos las temperaturas son bajas; en el caso de la lluvia es similar, en algunos lugares las precipitaciones actuales son bajas, mientras que para otros las precipitaciones son altas. Todo esto hace que los impactos del cambio climático sobre un cultivo sean variados a lo largo del territorio.

Con el fin de definir algunas medidas de prevención y control, el estudio busca identificar zonas de conservación y promover un manejo sostenible de los recursos naturales por parte de los productores, esto a través de un trabajo adecuado del suelo y un óptimo aprovechamiento de agua, ya que el aumento de resiliencia en los sistemas agrícolas es vital ante los potenciales cambios climáticos, lo que es de paso reconocido por todos los actores y que además impulsa a incorporar nuevas

políticas de desarrollo rural por parte del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP).

1.4.5 DIAGNÓSTICO DEL BALANCE ENTRE OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA, MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA HOYA DE QUITO (Bievre y Coello, 2008)

El presente diagnóstico describe el balance entre la oferta hídrica natural y la demanda actual en la Hoya de Quito. Cuyos principales sectores de consumo son los sectores de riego, agua potable, industrial e hidroeléctrico. El balance que resulta entre la oferta natural y estos consumos indica la disponibilidad actual de los recursos hídricos en la cuenca. En donde dicho balance resulta negativo para una cierta época del año, en la cual, existe déficit o estrés hídrico. Por lo tanto, el objetivo general del estudio es determinar la disponibilidad medio mensual del recurso hídrico en la red hidrográfica de la Hoya de Quito, tomando en cuenta la demanda actual del recurso y sus flujos de retorno.

La metodología utilizada se basa en la diferencia entre la oferta natural del agua en la Hoya de Quito y la demanda neta, en donde la demanda calculada se basa en las captaciones de agua existentes que representan los usos actuales y los flujos de retorno asociados.

En este sentido la expresión que define la disponibilidad de agua en la hoya de Quito, es la siguiente:

$$Q_{\text{disponible}} = Q_{\text{natural}} - Q_{\text{captado}} + Q_{\text{retorno}} \quad (1.1)$$

En donde:

- $Q_{\text{disponible}}$: caudal actual en un punto de la red hidrográfica.
- Q_{natural} : caudal natural en ese punto.
- Q_{captado} : caudal captado aguas arriba de ese punto.
- Q_{retorno} : caudal de retorno aguas arriba de ese punto.

El caudal de retorno es parte del consumo que vuelve a la red hidrográfica de

manera directa o indirecta, lo que quiere decir que es el caudal que no se consume de manera real y que tampoco se evapora.

Debido a la falta de información sobre porcentajes de caudal que retornan para cada tipo de uso en lo referente a la Hoya de Quito, se ha llevado a cabo una estimación de factores de ajuste para cada uno de los mismos, a través de una serie de análisis realizados por expertos en el tema hidrológico y con experiencia en la región Andina.

El modelo aplica la ecuación 1.1 de manera distribuida a nivel mensual, lo cual, ejecuta 12 imágenes raster de caudales actuales. El cálculo asume que la demanda de agua para sectores tales como: agua potable, industrias e hidroelectricidad es constante y que, para riego, dicha demanda es variable en función de los requerimientos de agua en distintos meses del año.

Los resultados que arroja este estudio muestran la diferencia entre el agua captada y los flujos de retorno lo que indica un consumo consuntivo. En la Tabla 1.1 se muestra el agua captada y el flujo de retorno total de cada sector, para el mes máximo de consumo de riego, que para el caso es agosto, y en donde, el total de agua captada es de $92 \left[\frac{m^3}{s} \right]$, más $6 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ en trasvases, cifra que incluye un uso no consuntivo de $29 \left[\frac{m^3}{s} \right]$. Obviamente, a nivel de subcuenca la proporción entre captación total y uso consuntivo varía.

En la Tabla 1.2 se muestra la oferta natural y actual según subcuenca, la misma que ha sido obtenida del modelo de oferta – demanda desarrollado en ArcGIS, cuyos resultados se los muestra a continuación.

TABLA 1.1 CONSUMO Y FLUJO DE RETORNO POR SECTOR DURANTE EL MES DE MAYOR DEMANDA (AGOSTO).

Sector	Total Captado [$\frac{m^3}{s}$] (con trasvases)	Flujo de Retorno [$\frac{m^3}{s}$]
Riego	57	28
Agua Potable	10	8
Hidroeléctricas	28	28
Industrias	2,3	1,8
Total	98	67

FUENTE: De Bievre, Bert y Coello Xavier, 2008.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

TABLA 1.2 CAUDALES MEDIOS NATURALES Y ACTUALES POR SUBCUENCA.

Subcuenca	Caudal Medio Natural [$\frac{m^3}{s}$]	Caudal Medio Actual [$\frac{m^3}{s}$]
Pisque	17,10	14,80
Pita	12,50	8,30
San Pedro	14,30	10,20
Guayllabamba Alto	22,30	22,70
Guayllabamba Bajo	11,00	11,00
Total	77,20	67,00

FUENTE: De Bievre, Bert y Coello Xavier, 2008.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Del análisis realizado se ha podido identificar que la cuenca del Río Guayllabamba se encuentra bajo condiciones de estrés hídrico, de acuerdo al indicador de escasez de Falkenmark (1989). Por lo tanto, se procedió a elaborar una metodología que, además del consumo de agua, considera tanto el caudal medio mensual y el caudal mensual con probabilidad de 80% de excedencia en el tiempo.

Para poder comprender mejor este componente se definieron cinco categorías en el tiempo, respectivamente:

- Sin estrés hídrico, durante todo el año tanto el caudal medio como el caudal $Q_{80\%}$ son mayores a la demanda.
- Estrés hídrico ligero, durante todo el año el caudal medio es mayor que la demanda pero durante 1 a 3 meses la demanda es mayor al $Q_{80\%}$.
- Estrés hídrico moderado, durante 0 a 2 meses la demanda es mayor al caudal medio; y, durante 4 a 5 meses la demanda es mayor al $Q_{80\%}$.
- Estrés hídrico alto, durante 3 a 5 meses la demanda es mayor al caudal medio; y, durante 4 a 5 meses la demanda es mayor al $Q_{80\%}$.
- Estrés hídrico severo, durante 3 o más meses la demanda es mayor al caudal medio; y, durante 6 meses o más la demanda es mayor al $Q_{80\%}$.

Finalmente, de este análisis se ha podido rescatar la existencia de lugares donde los caudales llegan a niveles críticos a pesar de que en el punto de salida de la Hoya de Quito existe un estrés ligero. En algunos tramos más críticos (estrés severo) la demanda es mayor que el caudal con 80% de probabilidad de excedencia durante más de 6 meses de un año promedio, e incluso existen meses en los que la demanda es mayor al caudal medio.

En general, se observa que en la Hoya de Quito durante un año promedio, su déficit de agua varía entre ligero a severo. Esto muestra una situación de alta demanda de agua en la cuenca, un uso ineficiente del recurso y la falta de control a través de las concesiones de agua, lo cual a su vez y en la mayor parte de la cuenca no existe un caudal ecológico, necesario para el servicio hídrico de la cuenca a futuro.

1.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio se ha combinado un balance hídrico (Curva Budyko) con un modelo de contribución glaciar, los cuales permiten determinar la oferta de agua para la cuenca del río Guayllabamba bajo una resolución espacial de 100 metros y una temporal mensual.

El desarrollo del modelo se lo ha dividido en cinco etapas, de las cuales se obtienen una serie de capas raster, a través de un algoritmo que funciona dentro del entorno de GRASS GIS Open Source. Por lo cual, es necesario contar con nociones de la programación y funciones de dicho software.

Para ejecutar dicho algoritmo se cuenta con datos de entrada, basados en la precipitación del año más seco, dentro de una serie temporal de cuarenta años (1970 – 2010) y en cuyo caso corresponde a 2005. Además, es necesario incluir datos de temperatura (mínima, media y máxima), cobertura vegetal, radiación, zonas de glaciar y topografía de la región. Toda esta información se la ha obtenido de los diferentes repositorios y bibliotecas digitales suministradas por sondas y satélites de monitoreo alrededor del planeta, así como de entidades de monitoreo dentro del país.

Una vez cotejada la información de entrada, se prepara el algoritmo que ejecuta cada una de las etapas, las cuales comprenden: generación de capas, implementación del balance hídrico, calibración del reservorio lineal, contribución glaciar y demanda hídrica.

Finalmente, se procede a generar capas mensuales de los resultados obtenidos y mapas que permiten dar un mejor acercamiento de los parámetros climatológicos e hidrológicos de la cuenca, bajo condiciones de sequía.

1.6 ALCANCE

Debido a una demanda importante de los recursos hídricos dentro de la cuenca del Río Guayllabamba, para distintos ámbitos como: generación hidroeléctrica, agua potable y riego. Atribuido a su vez, al incremento demográfico que se ha venido dando en los últimos años en el D.M. Quito. Se hace necesario un mayor aporte procedente tanto de las zonas de producción de la cuenca como de cuencas aledañas (orientales), principalmente para consumo humano, tomando en cuenta que la existencia de infraestructura hidráulica con fines de generación hidroeléctrica, genera competencia entre los diferentes usos del agua.

Por tal motivo, es importante establecer la demanda de agua necesaria para los principales usos de manera que los actores puedan ver reflejados sus intereses en una herramienta de ayuda para la planificación de los recursos hídricos.

Para poder cumplir este objetivo, es necesario que dicha herramienta permitan la realización de un balance a escala regional entre la oferta y la demanda (Buytaert, W. y Bievre, B., 2012). Mismas que permiten revelar patrones de disponibilidad de agua del ciclo anual con una resolución mensual. En este trabajo se utiliza una representación de cobertura vegetal y de los usos del suelo, a través de mapas y capas de libre disponibilidad generados a partir de información satelital. Los cuales han sido obtenidos por la ESA (Agencia Espacial Europea), NASA (Agencia Espacial Norteamericana), Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) entre otros de libre acceso, con el objeto de analizar el balance de oferta y demanda en condiciones de sequía. Este balance podría dar ciertas pistas de cómo deberían gestionarse los recursos hídricos, de manera que se reduzca la posibilidad de conflictos por la competencia por el recurso.

1.7 JUSTIFICACIÓN

En vista del aumento en la demanda de agua para los diferentes usos y las condiciones de cambio climático e incremento demográfico que experimenta el D.M. Quito, es necesario conocer y evaluar mediante herramientas de gestión la cantidad del recurso hídrico, principalmente, en condiciones de caudales mínimos y sequía, con la finalidad de conocer e identificar las zonas más propensas a dicho fenómeno, así como la frecuencia y duración del mismo.

Por tal motivo, en los últimos años se ha visto reflejado el interés de los diferentes sectores en el incremento de la demanda del recurso, por lo cual, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), ha tenido que recurrir a una serie de proyectos de trasvase para poder cubrir el suministro de agua potable necesario dentro de la cuenca del Guayllabamba, sin embargo, es necesario involucrar a otros organismos de control y manejo como lo son la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) e Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ya que la demanda no es solo para agua potable, sino que también es aprovechada para riego entre otros, por lo cual, el presente proyecto busca conocer a través de un modelo de oferta y demanda, si los caudales bajo condiciones de sequía permiten cubrir la demanda de los cultivos en secano y regadío. Con lo cual, impulsar nuevas políticas y formas de gestión del recurso bajo condiciones de sequía y a su vez proponer nuevos proyectos que permitan brindar un mejor manejo de los cultivos dentro de la cuenca y sus diferentes zonas de riego.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El presente capítulo muestra la ubicación y caracterización de la zona de estudio, a través de los diferentes elementos que conforman el complejo sistema entre los cuales tenemos: suelo, clima e hidrología. Todo esto con la finalidad de tener una línea base que permita desarrollar posteriormente, las condiciones secas a las cuales va a ser sometida la cuenca del río Guayllabamba.

2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca alta del río Guayllabamba se encuentra ubicada en la Sierra Norte de Ecuador, concretamente entre las provincias de Pichincha e Imbabura y tiene relación directa con los cantones: Quito, Mejía, Rumiñahui, Pedro Moncayo y Cayambe. Cuenta con una superficie aproximada de 6300 [km²], que se extienden desde una cota máxima de 5893 m.s.n.m. (Volcán Cotopaxi), a su cota de cierre a 870 m.s.n.m., en la unión con el río Alambí. Ver Mapa 2.1.

Dicha cuenca pertenece a una de las zonas más densamente pobladas del Ecuador, ya que es la principal fuente de abastecimiento y drenaje del Distrito Metropolitano de Quito, con una población de 2,5 millones de personas (INEC, 2010) y que afronta problemas por competencias en el uso, procesos de contaminación hídrica y efectos de escasez.

2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La oferta de agua proviene principalmente de aguas superficiales de la cuenca alta del Guayllabamba, trasvases de cuencas amazónicas y aguas subterráneas, especialmente de los acuíferos de Quito.

Debido al sin número de actividades económicas y al actual incremento de la población, los usuarios demandan un mayor acceso a agua de calidad y en cantidad suficiente, lo cual en cierta medida se ve afectado por la contaminación, cambio en el uso del suelo, deforestación y la creciente urbanización, factores que ejercen presión sobre las fuentes de abastecimiento.

Es importante mencionar que, la cuenca tiene influencia de microcuencas de la región oriental (Oyacachi, Papallacta y Antisana), consideradas importantes ya que permiten cubrir el abastecimiento de agua potable para el Distrito Metropolitano de Quito. En estas cuencas a su vez, se desarrollan una serie de actividades que permiten dinamizar la economía de las pequeñas poblaciones, y que de no mediar o ejecutar políticas de apoyo y protección en estos sectores, podrían deteriorar la disponibilidad del recurso a largo plazo. Adicionalmente, los potenciales efectos del cambio climático que han influenciado el retroceso glaciar, podrían causar cambios significativos en la oferta del recurso, por lo cual se hace evidente la toma de decisiones a fin de disminuir la vulnerabilidad de los ecosistemas alto andinos, mantener el almacenamiento de agua y regular los caudales ecológicos.

Al encontrarse la cuenca del Guayllabamba en el callejón interandino, presenta una serie de gradientes topográficos importantes que se extienden de sur a norte, por lo que los primeros ríos son de alta montaña. El Plan de Manejo de la Calidad del Agua (PMCA) elaborado en 2005, cita como principales fuentes de abastecimiento del sistema a las subcuencas de los ríos:

- **San Pedro**, inicia a 2760 m.s.n.m. y termina en la confluencia con el río Machángara, a 2080 m.s.n.m.
- **Machángara**, inicia a 2180 m.s.n.m. y se nutre de varias quebradas atravesando el sur de Quito, con lo que se convierte en el principal receptor de las descargas de aguas residuales del centro-sur de la ciudad.

- **Guayllabamba**, se forma a 2080 m.s.n.m. por la confluencia de los ríos San Pedro y Machángara; otros afluentes importantes son los ríos Chiche, Guambi, Urvia, Coyango, Pisque y Monjas.
- **Monjas**, inicia a una cota de 2470 m.s.n.m. y converge con el río Guayllabamba a 1650 m.s.n.m., cabe indicar además que este río recibe las aguas residuales del sector norte de la ciudad (Rodríguez, 2011).

2.3 CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO - GEOGRÁFICAS

La delimitación de las unidades hidrográficas de la cuenca del río Guayllabamba se la realizó mediante el método PFAFSTETTER, adoptado por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2011) y con apoyo de cartografía a escala 1:50000 (Geoportal IGM, 2012).

La SENAGUA es la autoridad nacional del agua, por lo que el método PFAFSTETTER es un estándar para la delimitación y codificación de las cuencas hidrográficas dentro del país. Se encuentra en el sistema WGS 1984 Zona 17S, lo cual facilita la transferencia y manejo de la información geográfica a nivel nacional (Rosas, 2011).

A continuación, se aprecia cada una de las subcuencas hidrográficas que forman parte de la cuenca del río Guayllabamba y sus principales características (Tabla 2.3).

2.3.1 SUBCUENCA DEL RÍO PITA

El río Pita escurre en dirección sur – norte, el mismo que nace de los deshielos y páramos del volcán Cotopaxi y Sincholhua, cruza la población de Sangolquí (cantón Rumiñahui) en un recorrido de 60 [km], en donde se une al río San Pedro.

La subcuenca de forma alargada, ocupa el 7,2% de la cuenca del Guayllabamba, y su área es de 592 [km²], con una pendiente media de 26,7% (laderas escarpadas) (Heras, 1976).

2.3.2 SUBCUENCA DEL RÍO SAN PEDRO

El río San Pedro nace en las laderas orientales de los Illinizas en la cordillera Occidental, atraviesa las poblaciones de Machachi (cantón Mejía) y Sangolquí (cantón Rumiñahui).

En Sangolquí recibe como tributario (margen Oriental) al río Pita, y posteriormente en las cercanías de la ciudad de Quito, se une con el río Machángara para formar el río Guayllabamba.

La cuenca del río San Pedro, de forma alargada, se la considera como una unidad hidrográfica independiente, con sección de cierre justo antes de la confluencia con el río Pita, por lo que su área de drenaje es de 751 [km²]. La pendiente media de la cuenca alcanza el 27,2% (terrenos escarpados) (Heras, 1976). Esta cuenca representa el 9,1% del área de drenaje total del río Guayllabamba.

2.3.3 SUBCUENCA GUAYLLABAMBA ALTO

Considerada como el área de aportación directa al río Guayllabamba, desde la junta de los ríos San Pedro y Pita hasta antes de la unión con el río Pisque. Incluye en su recorrido a los siguientes ríos tributarios: río Machángara (margen occidental), ríos del Inga (Chiche), Guambi, Uravia y Coyago (margen oriental).

Esta subcuenca forma parte de una de las áreas más densamente pobladas del país, ya que esta aporta y drena las aguas del Distrito Metropolitano de Quito y sus parroquias tanto rurales como urbanas, cuyos efluentes domésticos e industriales son descargados directamente al río Machángara y sus tributarios.

Con una extensión de 1359 [km²] y una pendiente media de 35,6% (cuenca escarpada) (Heras, 1976), ocupa el 16,5% del área total de la cuenca del Guayllabamba. Debido a su factor de forma cercano a 1 refleja una configuración redondeada, por lo que es susceptible a la formación de crecidas súbitas.

2.3.4 SUBCUENCA DEL RÍO PISQUE

Esta subcuenca esta localizada en el sector centro - oriente de la cuenca del río Guayllabamba, y ocupa territorios de los cantones Cayambe, Pedro Moncayo, y de la parroquia Guayllabamba del Distrito Metropolitano de Quito.

Dicha subcuenca tiene una forma irregular que representa el 13,7% del área de la cuenca del río Guayllabamba, con una superficie de 1127 [km²]. La pendiente media alcanza 35,5% (escarpada) (Heras, 1976). La longitud del cauce principal es de 78,2 [km].

2.3.5 SUBCUENCA GUAYLLABAMBA MEDIO

Forma parte del área tributaria al tramo del río Guayllabamba, entre la sección aguas abajo de la junta con el río Pisque, hasta la sección antes de la junta con el río Intag, con una pendiente media del cauce de 2,2% (baja).

El área de drenaje alcanza 878 [km²] y la pendiente media de la cuenca es 54,4%, (escarpado) (Heras, 1976). Entre las poblaciones localizadas al interior de esta subcuenca constan: Pomasqui, San Antonio de Pichincha, Puéllaro, Perucho y San José de Minas. Esta subcuenca representa el 10,7% de la cuenca del río Guayllabamba.

2.3.6 SUBCUENCA DEL RÍO INTAG

Localizada al norte de la cuenca del río Guayllabamba y correspondiente a la provincia de Imbabura (suroeste). Tiene una extensión de 1044 [km²], ocupa el 12,7% del área total de la cuenca. La pendiente media alcanza 51,4% (área muy

escarpada) (Heras, 1976). De forma es irregular, tendiendo a ser alargada.

2.3.7 SUBCUENCA DEL RÍO ALAMBÍ

Ubicada al noroeste de la Provincia de Pichincha, y al interior del Distrito Metropolitano de Quito. Ocupa parte de la parroquia de Nanegal, con una extensión de 550 [km²] y el 6,7% del total de la cuenca del río Guayllabamba. Tiene una pendiente media de 57,9% (muy escarpada) (Heras, 1976), y una pendiente media del cauce principal de 3,4%. La cuenca se presenta de forma irregular y alargada.

2.4 PRINCIPALES USOS DEL AGUA

Dentro del presente estudio es importante considerar a los sectores de consumo existentes en la cuenca, que permitan identificar las afectaciones y riesgos a los que pueden verse abocados, y entre los cuales se tiene:

2.4.1 AGUA POTABLE

Debido al incremento poblacional que ha experimentado el Distrito Metropolitano de Quito, se ha constituido en el sector de mayor demanda, el mismo que se encuentra bajo responsabilidad de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), la cual busca garantizar el abastecimiento en los próximos años a través de cuatro principales sistemas de captación:

- **La Mica – Quito Sur**, capta las aguas provenientes del Volcán Antisana y las conduce hacia la planta de El Troje, desde la cual se reparte a las plantas de Conocoto, Puengasí y El Placer, su capacidad es de 1650 litros por segundo.
- **Sistema de Conducciones Occidentales**, capta las aguas de los subsistemas Atacazo, Lloa y Pichincha para abastecer a las plantas El Placer, Toctiuco, Chilibulo, entre otras. Está constituido por aproximadamente 90 [km], de canal abierto, de 700 litros por segundo.

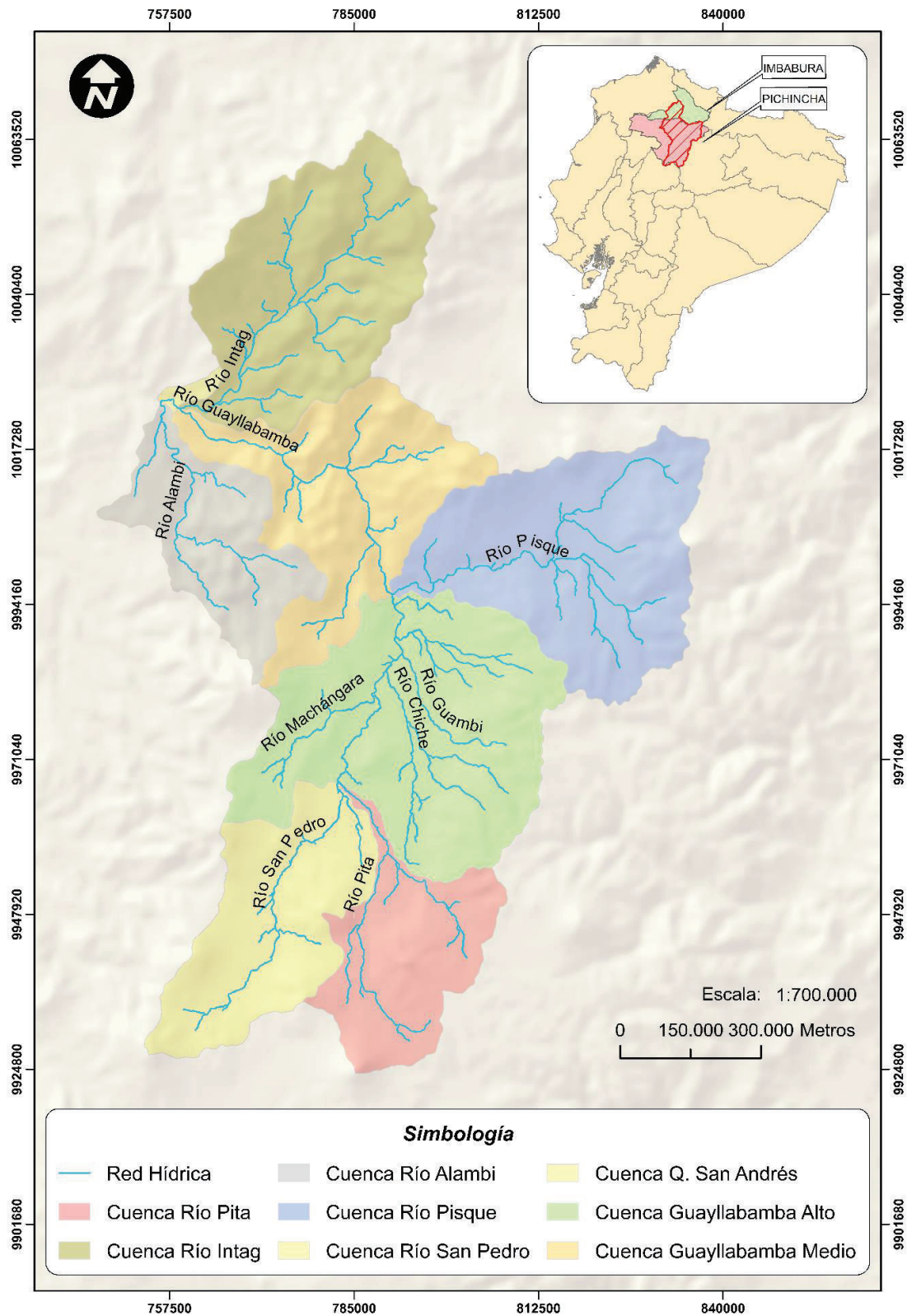
TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Código PFAFSTETTER	Nombre	Cota de Cierre [m.s.n.m.]	Área [Km ²]	Perímetro [Km]	Longitud del Cauce [Km]	Pendiente del Cauce [%]	Pendiente Cuenca [%]	Coefficiente de Compacidad	Factor de Forma
15249	San Pedro	2440	751	140	70,10	1,50	27,20	1,40	0,30
15248	Pita	2440	592	141	59,60	2,70	26,70	1,40	0,40
15247	Guayllabamba Alto	1840	1359	186	69,30	2,10	35,60	1,40	0,70
15246	Pisque	1840	1127	172	78,20	2,00	35,50	1,40	0,40
15245	Guayllabamba Medio	800	878	200	82,60	2,20	54,40	1,90	0,50
15244	Intag	800	1044	154	70,60	3,20	51,40	1,30	0,40
15243	Quebrada San Andrés	720	29	31	14,10	5,60	54,00	1,60	0,30
15242	Alambi	720	550	144	67,60	3,40	57,90	1,70	0,30
1524	Guayllabamba	720	6330	655	211,50	0,80	38,40	2,10	0,40

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba, 2013.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

MAPA 2.1. UBICACIÓN DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

- **Sistema Papallacta Integrado**, capta, almacena y conduce agua que se produce en la reserva Antisana, por medio de tres embalses, tres estaciones de bombeo, una central hidroeléctrica y 85 km. de tubería con una capacidad de 3000 litros por segundo que son tratados en las plantas de Bellavista, Chaupi, El Quinche entre otras.
- **Sistema de Conducciones Orientales**, su captación principal está ubicada en el río Pita, y sirve para abastecer a las plantas de Puengasí, Conocoto y El Placer, está constituido principalmente por una conducción de 40 [km], de canal abierto, con un capacidad de 3000 litros por segundo.

Cada planta cuenta con procesos de tratamiento y distribución para un caudal seguro de $8,6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ y una cobertura promedio del servicio de agua potable estimado en la actualidad en 98,37% (EPMAPS, 2014).

2.4.2 RIEGO

Las áreas de riego se dividen en sistemas públicos y áreas de riego privadas, con una cobertura total de 140075 [ha]. Los sistemas de riego públicos son 7 y se localizan en los valles interandinos, con una extensión de 62652 [ha], y son los siguientes: Pisque, Tabacundo, Perucho - Atahualpa - Puéllaro, Nayón - Calderón, Tumbaco, Cangahua y otros (Le Goulven y Ruf, 1992). Se reportan también 21 sistemas particulares de riego, que cubren 77423[ha], como lo refiere el informe de De Bievre, B.(2008). Este mismo estudio establece demandas de riego mensuales variables con máxima en agosto ($57,4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$) y mínima en marzo y abril ($0,4$ y $0,1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$).

2.4.3 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

La cuenca del Guayllabamba cuenta con centrales operadas por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), la Empresa Eléctrica de Quito (EEQ) y por entidades privadas, como se visualiza a

continuación:

TABLA 2.4 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Central Hidroeléctrica	Operador	Potencia [MV]	Caudal [$\frac{m^3}{s}$]
La Unión	Privado	1,60	2,00
Noroccidente	Privado	0,10	0,40
Vindobona	Privado	2,80	2,00
Recuperadora	Privado	14,50	S / D
Sillunchi	Privado	0,40	0,50
La Caldera	Municipio	2,80	2,10
Pasochoa	EEQ	4,50	1,30
Nayón	EEQ	1,80	4,10
Cumbayá	EEQ	29,70	13,80
Guangopolo	EEQ	40,00	13,80
El Carmen	EPMAPS	20,90	2,10
Total		119,10	--

FUENTE: De Bievre, Bert y Coello Xavier, 2008.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Cabe mencionar que la generación hidroeléctrica no constituye un uso consuntivo, ya que se limita al aprovechamiento de agua en los tramos entre las captaciones y las secciones correspondientes a las restituciones.

2.4.4 OTROS USOS

En este aspecto la principal actividad corresponde a la recreativa, la cual genera ingresos económicos a través del turismo e incide positivamente en la calidad de vida de las personas. Estas actividades demandan la presencia del recurso en caudal y además en calidad.

Estos usos se refieren a cascadas, fuentes termales, balnearios, zonas de pesca, deportes acuáticos y áreas turísticas (Información turística de Pichincha y DMQ, 2013).

Por otro lado, está el uso industrial considerando una media superior a 100 litros por segundo, las empresas con un consumo mayor o igual son:

- The Tesalia Springs Company (Machachi)
- The Coca Cola Company (Quito)
- Cervecería Nacional
- Además de industrias textiles y de lácteos

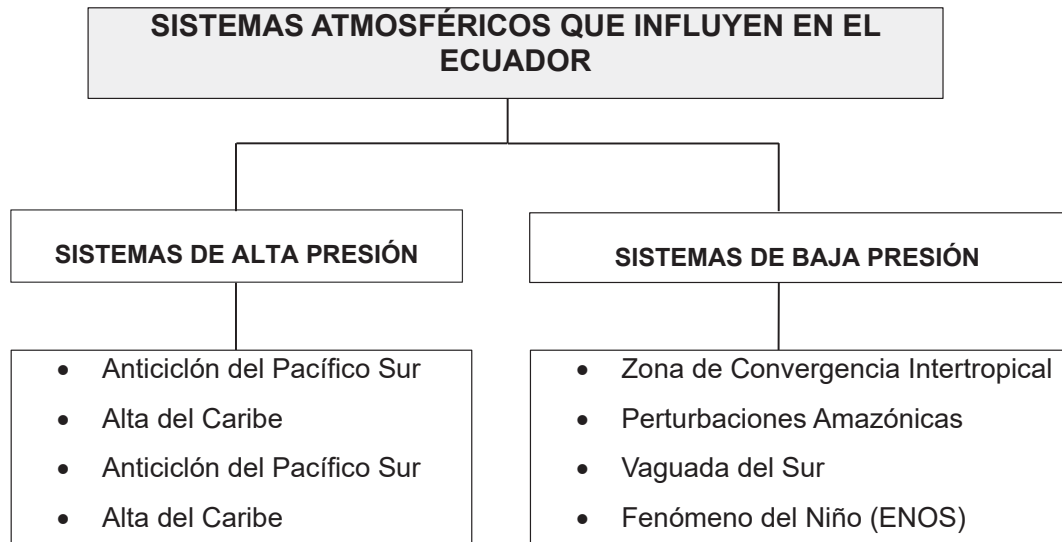
La zona con mayor número de captaciones ($1,54 \frac{m^3}{s}$) y retornos ($1,23 \frac{m^3}{s}$) es la subcuenca del río San Pedro, que conjuntamente con la subcuenca del Guayllabamba Bajo, aportan con un caudal de $2,66 \frac{m^3}{s}$ para embotelladoras, gaseosas y cervezas (De Bievre, B. et al, 2008b).

2.5 CLIMATOLOGÍA

El clima de la cuenca está directamente influenciado por la cordillera de los Andes, sin embargo, existe una variedad de sistemas atmosféricos que modifican he inciden directamente sobre la zona entre los cuales tenemos: (Ver Figura 2.1)

- **Zona de Convergencia Intertropical**, uno de los principales sistemas y de influencia moderada que presenta una circulación atmosférica a niveles altos y medios de actividad convectiva y que generan inestabilidad sobre los 7° de latitud norte.
- **Perturbaciones de la Amazonía**, existen células de moderada actividad convectiva, en las zonas norte y noroeste de la cuenca amazónica y por circulación del viento proveniente del este en niveles medios y bajos, los mismos que generan precipitaciones de intensidad moderada, principalmente, en la parte oriental de la cuenca (INAMHI, 2014).

FIGURA 2.1 SISTEMAS ATMOSFÉRICOS QUE INFLUYEN EN EL ECUADOR.



FUENTE: INAMHI, 2014.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.5.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA

A continuación, se describen algunas de las características climáticas principales para la cuenca del Guayllabamba, que permiten entender la ocurrencia y permanencia de caudales, cuyo régimen depende directamente de las precipitaciones y de la evaporación.

Las series mensuales de temperatura, humedad relativa, evaporación y velocidad del viento se conformaron con la información del INAMHI. En el Tabla 2.5 se detalla las estaciones meteorológicas, cuya información sustenta el análisis (Andrade, 2013).

TABLA 2.5 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS PARA EL ANÁLISIS DEL CLIMA.

Código	Estación	Coordenadas		Altitud [m. s. n. m.]	Tipo	Institución
	Nombre	Latitud	Longitud			
M003	Izobamba	-78,553	-0,362	3058	AP	INAMHI
M022	Tabacundo H Mojanda	-78,235	0,053	2955	CO	INAMHI
M023	Olmedo - Pichincha	-78,048	0,148	3120	CO	INAMHI
M046	Pachijal Mashpi	-78,950	0,189	560	CP	INECEL
M055	Quito Aeropuerto	-78,485	-0,140	2794	AR	DAC
M107	Cahuasqui	-78,211	0,518	2335	CO	INAMHI
M117	Machachi	-78,769	-0,500	2944	CO	INAMHI
M212	Mindo	-78,735	-0,047	1235	CP	INECEL
M213	La Perla	-78,669	0,192	1410	CP	INECEL
M216	San Miguel de los Bancos	-78,890	0,016	1115	CP	INECEL
MA2T	Tomalón - Tabacundo	-78,233	0,033	2790	AP	INAMHI

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013).

ELABORACIÓN: Wilson A. González Quilachamín

2.5.1.1 PRECIPITACIÓN

De acuerdo al Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013), la precipitación se la ha caracterizado para las siguientes estaciones representativas, dentro de las subcuencas hidrográficas (SENAGUA, 2011). (Ver Mapa 2.2)

TABLA 2.6 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA PRECIPITACIÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

Subcuencas	Estaciones		Precipitaciones [mm]		
	Código	Nombre	Máxima	Media	Mínima
San Pedro	M003	Izobamba	2032,30	1017,55	983,60
Pita	M364	Loreto Pedregal	2108,40	1524,12	1045,30
Guayllabamba Alto	M002	La Tola	1179,80	573,00	553,30
Pisque	MA2T	Tomalón	784,30	596,48	358,80
Guayllabamba Medio	M338	Perucho	821,50	505,61	83,40
Intag	M318	Apuela	2673,10	1489,96	297,70
San Andrés	M325	García Moreno	2717,30	1747,59	1128,60
Alambí	M339	Nanegalito	3345,20	2309,56	633,90

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba, 2013.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Se ha realizado un mapa de isoyetas, mediante el método de interpolación Spline del software ArcGIS 10 con datos de precipitación media anual (1981 - 2010) de 89 estaciones y una disponibilidad de datos mayor a 75%, es importante mencionar que para ciertas estaciones se debió realizar una regresión para rellenar datos de la serie temporal (Proaño, 2010).

2.5.1.2 TEMPERATURA

Para la temperatura máxima, media y mínima se ha considerado un número mayor de estaciones, para el mismo intervalo de tiempo (1981 - 2010), para de igual manera realizar un mapa de isotermas, a partir de datos anuales (Andrade, 2013).

TABLA 2.7 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA TEMPERATURA DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

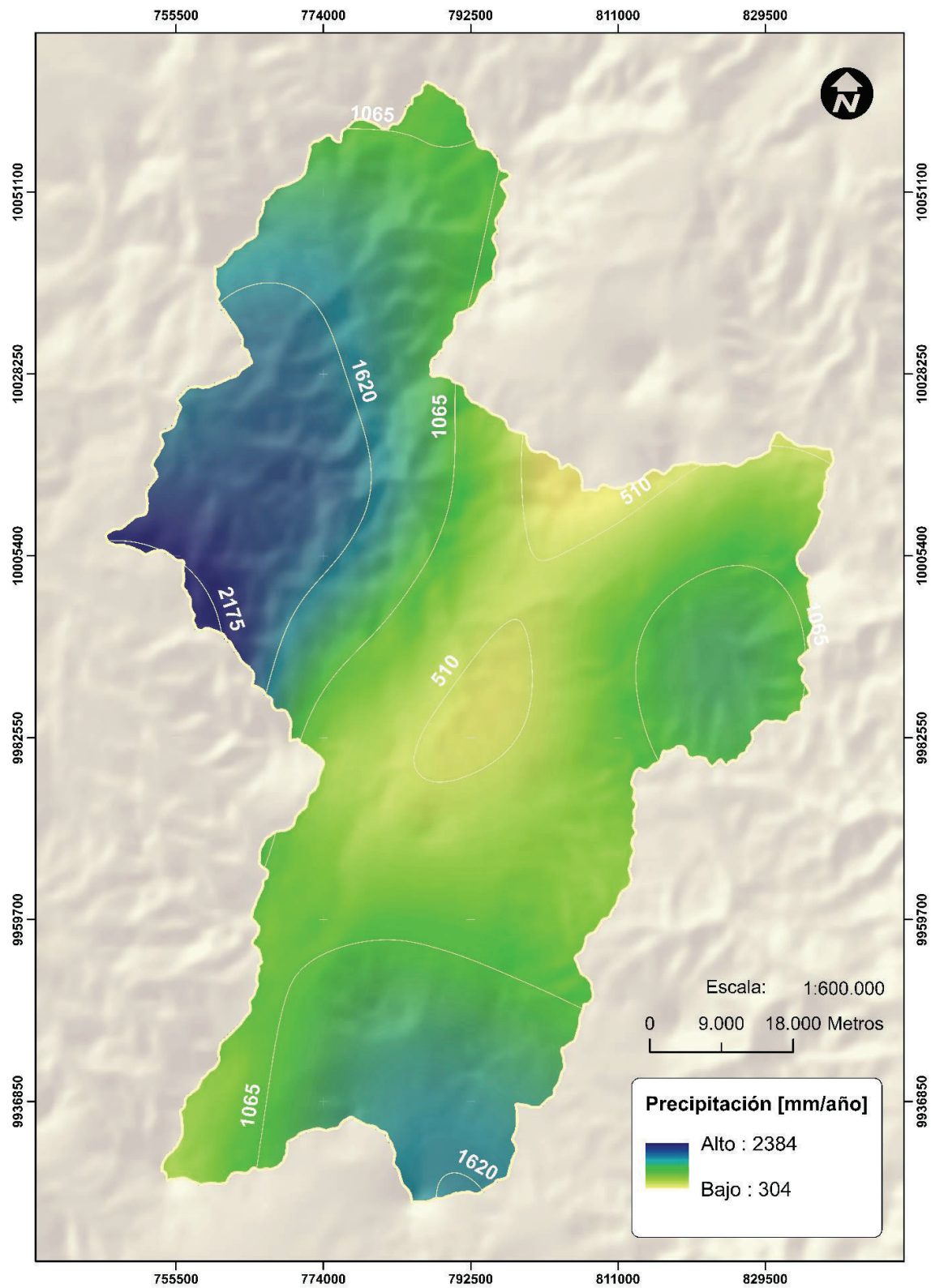
Código	Estación Nombre	Temperatura [°C]		
		Máxima	Media	Mínima
M003	Izobamba	23,80	10,50	-4,30
M022	Tabacundo H Mojanda	24,80	12,90	1,10
M023	Olmedo - Pichincha	25,20	11,80	3,60
M046	Pachijal - Mashpi	31,50	23,10	14,50
M055	Quito Aeropuerto	25,20	13,80	1,40
M107	Cahuasqui	27,00	16,60	4,00
M117	Machachi	30,80	12,80	0,00
M212	Mindo	27,40	19,10	8,50
M213	La Perla	27,50	18,40	1,00
M216	San Miguel de los Bancos	28,80	20,10	5,00
MA2T	Tomalón - Tabacundo	26,00	14,90	3,20

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

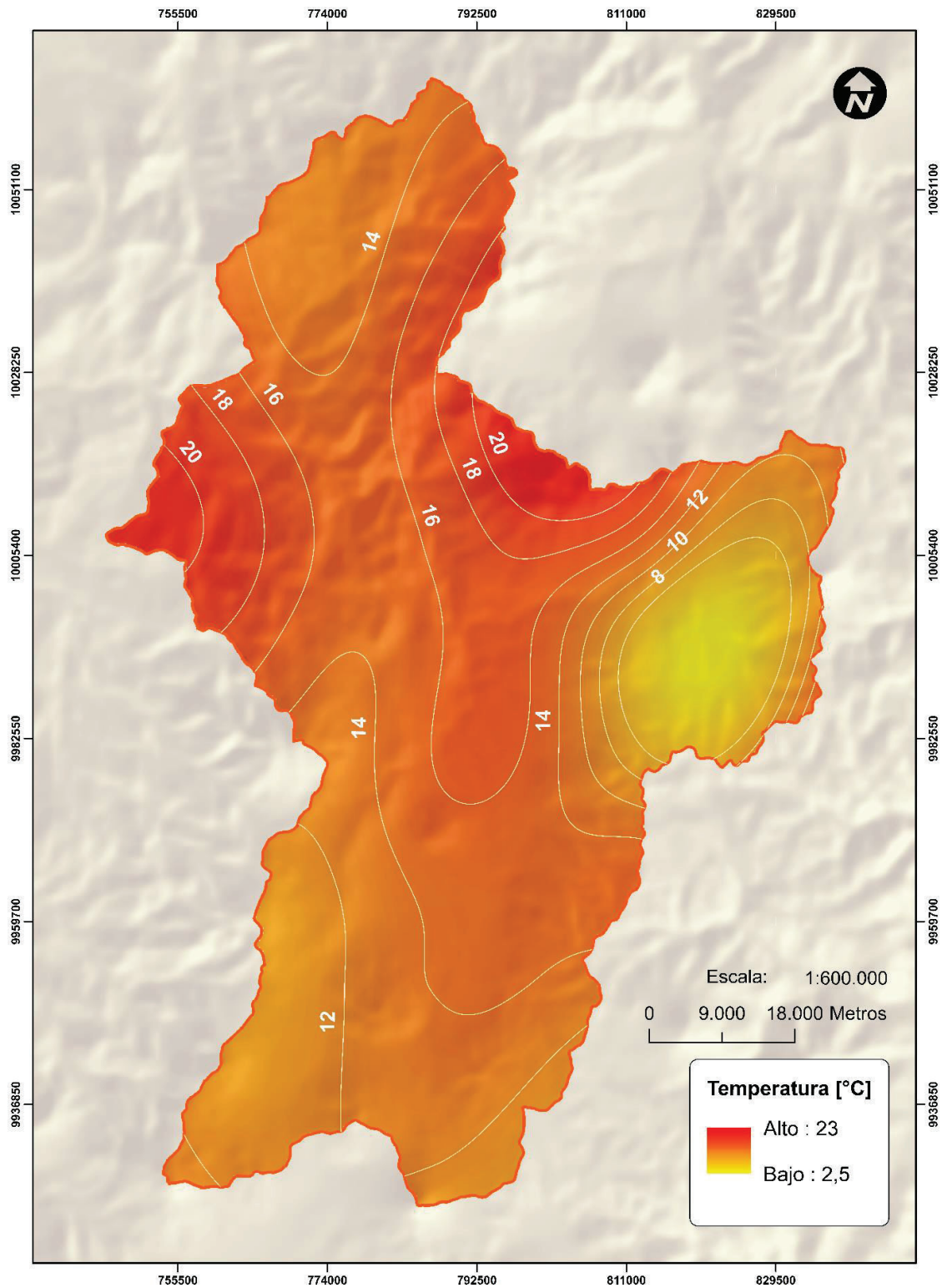
El mapa de isotermas (Ver Mapa 2.3) generado a partir de la temperatura media anual, muestra una variación entre 10 y 20 [°C], condiciones que determinan una alta influencia de la región andina.

MAPA 2.2. ISOYETAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

MAPA 2.3. ISOTERMAS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.5.1.3 EVAPORACIÓN

Se la conoce como la capacidad potencial evaporante de una masa de aire que se relaciona con la temperatura, la humedad presente en la masa de aire y la velocidad del viento, por lo que, en este caso se la analiza como tendencia general.

En la Tabla 2.8 se incluyen datos registrados para diferentes estaciones de las más representativas, cuyos valores medios anuales son (Andrade, 2013).

TABLA 2.8 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA EVAPORACIÓN DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

Estación	Evaporación [mm]	
	Código	Nombre
M003	Izobamba	1056,80
M022	Tabacundo H Mojanda	1242,80
M107	Cahuasqui	1484,30
M212	Mindo	910,10
M213	La Perla	1167,10
MA2T	Tomalón - Tabacundo	1570,20

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.5.1.4 HUMEDAD RELATIVA

Es una medida importante de las condiciones climáticas de un área o zona. La Tabla 2.9 muestra el comportamiento de esta característica en donde, la mayor cantidad de precipitación de las zonas bajas de la cuenca está directamente relacionado con un mayor índice o porcentaje de humedad relativa.

TABLA 2.9 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA HUMEDAD RELATIVA DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

Código	Estación		Humedad Relativa [%]
	Nombre		Media
M003	Izobamba		77,00
M022	Tabacundo H Mojanda		78,60
M023	Olmedo - Pichincha		79,70
M046	Pachijal - Mashpi		89,80
M055	Quito Aeropuerto		73,20
M107	Cahuasqui		77,90
M117	Machachi		84,90
M212	Mindo		93,00
M213	La Perla		89,00
M216	San Miguel de los Bancos		93,10
MA2T	Tomalón - Tabacundo		72,10

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.5.1.5 VELOCIDAD DEL VIENTO

El movimiento horizontal de una masa de aire, se define como viento que responde a su desplazamiento desde las zonas de alta presión a las zonas de baja presión. En la cuenca del río Guayllabamba se aprecia como tendencia general el incremento de la velocidad del viento con la altitud (Andrade, 2013).

TABLA 2.10 ESTACIONES REPRESENTATIVAS PARA VELOCIDAD DEL VIENTO DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

Código	Estaciones		Velocidad del Viento $[\frac{\text{km}}{\text{h}}]$
	Nombre		Media
M003	Izobamba		1,19
M022	Tabacundo H Mojanda		4,21
M046	Pachijal Mashpi		0,41
M055	Quito Aeropuerto		3,03
M107	Cahuasqui		1,93
M117	Machachi		6,04
M212	Mindo		1,76
M213	La Perla		2,19
MA2T	Tomalón - Tabacundo		6,16

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.6 HIDROLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio, es necesario realizar una comparación de la información obtenida y los valores medidos, los mismos que se sustentan en los datos históricos levantados por las estaciones hidrológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), y el cual es un organismo adjunto a la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA, 2013), a pesar de que no es un valor representativo dado que el modelo muestra condiciones extremas (sequía), si permite dar una pauta del porcentaje de cambio en relación a condiciones normales de los caudales.

Mediante técnicas de correlación y regresión entre estaciones se rellenaron datos faltantes, con lo cual se conformaron las series en valores mensuales para el período 1981 hasta 2010.

Es así que se tienen caudales medios para las estaciones hidrológicas más representativas dentro de la cuenca, las mismas que están conformadas de la siguiente manera y cuya información está disponible más adelante dentro de este capítulo.

TABLA 2.11 ESTACIONES HIDROLÓGICAS REPRESENTATIVAS DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (1981 – 2010).

Est.	Caudal [$\frac{m^3}{s}$]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Sep	Oct	Nov	Dic
H136	19,0	26,3	29,3	31,9	28,0	14,6	10,2	7,3	7,0	7,8	8,5	10,5
H143	4,7	6,0	5,8	6,6	6,2	6,2	5,1	3,1	2,6	3,5	4,8	5,8
H144	4,1	4,7	5,2	5,8	6,1	8,1	9,5	7,0	5,3	4,4	4,4	4,3
H145	44,5	51,5	57,3	61,5	55,0	44,3	40,4	31,1	30,2	34,6	45,2	42,7
H146	134,5	181,4	204,5	224,0	187,6	135,9	96,9	72,6	72,2	82,1	102,5	105,0
H149	47,4	54,6	63,1	73,3	66,6	53,5	42,1	33,2	35,5	40,2	45,5	46,2
H158	3,0	3,1	3,1	3,1	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,7	2,9	2,9
H159	4,5	5,6	6,2	7,1	6,6	5,0	3,3	2,7	3,1	3,8	4,1	4,2

FUENTE: Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2013) e Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.7 SUELOS

Para establecer los tipos de suelos se los debe caracterizar en función de su pendiente, textura del suelo, profundidad y condición de drenaje. De esta manera se genera la clasificación de acuerdo a los Grupos Hidrológicos de Suelo (Ven Te Chow, 1964).

Los diferentes grupos analizados a escala 1: 250000 han definido los diferentes grupos de suelo:

- **Grupo A: Suelos con Bajo Potencial de Escorrentía**, corresponde a suelos profundos de textura entre arenosa y franco arenosa, con tasas de infiltración de $10 - 12 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$ bajo condiciones húmedas; el drenaje natural de los suelos varía de muy permeable a excesivamente permeable, lo que determina una movilidad del agua en el suelo entre muy rápida a rápida.
- **Grupo B: Suelos con Moderado Potencial de Escorrentía**, con una textura franco, franco - arenosa o limosa, son moderadamente profundos. La tasa de infiltración se ubica entre 7 y $9 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$, cuando están muy húmedos. El drenaje en dichos suelos puede variar de excesivamente drenados a moderados o bien drenados, y la movilidad del agua en el suelo va de rápida a moderadamente rápida u óptima.
- **Grupo C: Suelos con Moderadamente Alto Potencial de Escorrentía**, identificados como suelos con textura franco - arcillo - arenosa, franco - arcillosa o franco - arcillo - limosa, son suelos superficiales o moderadamente profundos. La tasa de infiltración de este tipo de suelo, cuando están muy húmedos, está entre 4 y $6 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$. El drenaje natural de estos suelos se identifica con el rango de bien drenados a moderadamente bien drenados, y la movilidad del agua en el suelo varía de óptima a moderadamente lenta o lenta.
- **Grupo D: Suelos con Alto Potencial de Escorrentía**, son suelos superficiales de textura arcillo - arenosa, arcillo - limosa o arcillosa y presentan infiltración cuando están muy húmedos. La tasa de infiltración varía entre 4 y $6 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$. El drenaje natural de estos suelos varía de bien drenados a moderadamente bien drenados, y la movilidad del agua en el suelo varía de lenta a muy lenta.

De acuerdo a las características indicadas anteriormente, se clasificó a los suelos como se observa en el Tabla 2.12. Dicha clasificación es válida para la cuenca del río Guayllabamba y sus subcuencas, en donde las texturas que prevalecen son:

franco - arenosa, franco, franco - limosa, franco - arcillo - arenosa y arcillo arenosa (Engineering Field Manual SCS, 1982).

TABLA 2.12 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS Y GRUPOS HIDROLÓGICOS.

Grupo	Textura	Tasa de Infiltración [$\frac{mm}{h}$]	Profundidad Efectiva del Suelo		Drenaje de los Suelos	Movimiento del Agua
			[cm]	Denominación		
A	Arenoso	12	160	Muy profundos	Muy excesivamente drenados	Muy rápido
	Areno franco	11	145		Excesivamente drenados	
	Franco arenoso	10	130	Profundo	Algo excesivamente drenados	Rápido
B	Franco	9	115		Moderadamente bien drenados	Moderado
	Franco limoso	8	100			
	Limoso	7	85	Moderadamente profundos	Bien drenados	Óptimo
C	Franco arcillo arenoso	6	70	Superficiales	Moderadamente bien drenados	Moderado
	Franco arcilloso	5	55			
	Franco arcillo limoso	4	40		Imperfectamente drenados	Lento
D	Arcillo arenoso	3	25	Muy superficiales	Escasamente drenados	Muy lento
	Arcillo limoso	2	10	Exteriores superficiales		
	Arcilloso	1	0		Muy escasamente drenados	

FUENTE: Engineering Field Manual SCS, 1982.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

De acuerdo, al Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013) se concluye que los suelos de la superficie de drenaje corresponden al Grupo B (61%), los cuales constituyen suelos con textura franca y franco - limosa, seguido del Grupo A (18%), dicho estudio es corroborado con el mapa de textura del suelo para la cuenca y que cuya información se la puede

encontrar en el Sistema Nacional de Información (SNI, 2012), y en donde los grupos A y B representan el 83,78% del área total de la cuenca.

En la Tabla 2.13 se observan las categorías de tipos de suelo con los Grupos Hidrológicos correspondientes al Engineering Field Manual, mientras que en la Tabla 2.14 se puede apreciar la clasificación de acuerdo al Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2012), pertenecientes a la cuenca del río Guayllabamba. (Ver Mapa 2.3)

TABLA 2.13 TEXTURA DE SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Grupo Hidrológico	Textura del Suelo	Área Ocupada	
		[km ²]	[%]
A	Arenosa	484	7,65
	Franco arenosa	845	13,35
	Franco limoso	1200	18,96
B	Franco	2090	33,01
	Franco arcilloso < 35% Arcilla	48	0,76
C	Franco arcilloso arenoso	374	5,90
	Arcilloso	166	2,62
D	Arcilloso arenoso	712	11,25
	Nieve y Hielo	53	0,84
	Poblados	148	2,34
	Cuerpos de agua	10	0,16
	Afloramiento rocoso	200	3,16
Total		6330	100,00

FUENTE: Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013) y Engineering Field Manual SCS, 1982.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

TABLA 2.14 TEXTURA DE SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Textura	Área Ocupada	
	[km ²]	[%]
Fina	307,02	1,80
Media	646,74	3,78
Medianamente Gruesa	14011,83	81,98
Gruesa	1477,78	8,64
Urbana o Erosionada	648,21	3,80
Total	17091,58	100,00

FUENTE: Sistema Nacional de Información del Ecuador (SNI) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2012).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

En lo que tiene que ver a las pendientes de la cuenca, se concluye que en la parte occidental existen pendientes abruptas (montañosas) mayores a 70%, mientras que en la parte central y oriental predominan las pendientes colinadas (25 a 50%) y escarpadas (50 a 70%). (Ver Mapa 2.4).

2.8 CAMBIO EN EL USO DEL SUELO

El uso y cobertura vegetal dentro de la cuenca, de acuerdo a información de la Secretaría Nacional de Información (SNI), generada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP, 2002) y en colaboración con el Ministerio del Ambiente (MAE), a escala 1:100000 para todo el país. Concluye que existe un cambio importante en el uso, ya que gran parte de la vegetación arbustiva y bosque natural, ha ido perdiendo espacio a lo largo de la cuenca.

Dando paso a cultivos de ciclo corto, bosque plantado y pasto. Es así que en el año 1982 la mayor parte de la cuenca del río Guayllabamba se encontraba cubierta por vegetación natural (64,2%), seguida de cultivos (18,9%) y Pastos (13,2%). Esta situación se modifica para 1990, pues la vegetación natural (en la cual se incluyen los páramos) se reduce al 45,8%, y las áreas bajo cultivos y pastos se incrementan

al 27,1% y 19,5%, correspondientemente. Por último la situación para el año 2002, muestra que la vegetación natural en la cuenca se reduce aún más al 34,39%, incrementando el área de bosque intervenido (10,5%) y reduciendo ligeramente las áreas de cultivos 21,02% y pastos 22,34%.

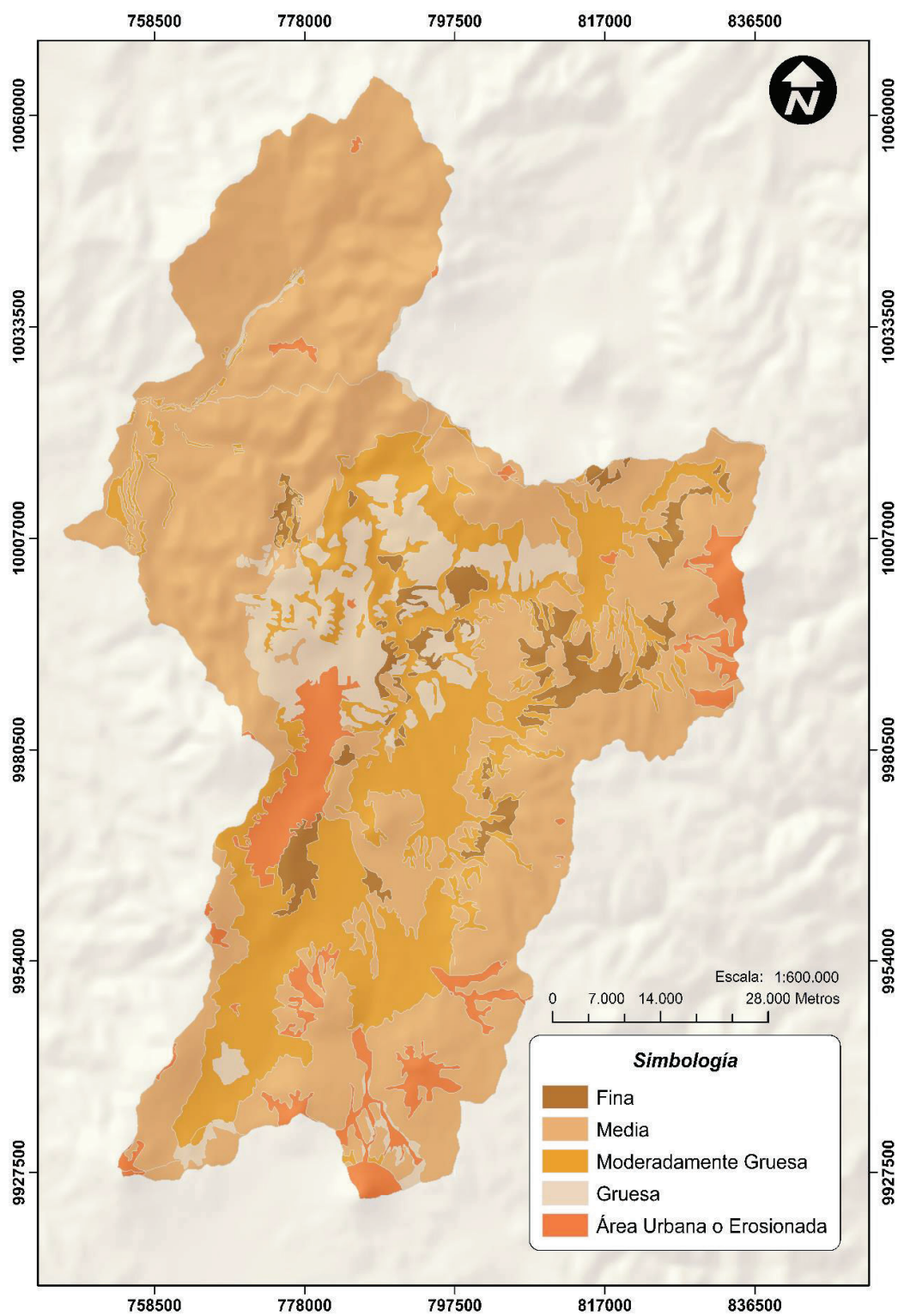
A partir de esto el uso y cobertura vegetal para el año 2014, cuenta con 46,87% de bosque nativo, 26,30% de páramo, 11,31% como pastizal, 5,86% como área propiamente de cultivo, 4,89% entre plantaciones forestales y áreas erosionadas y 4,77% como vegetación arbustiva y herbácea, lo cual refleja un cambio significativo en el transcurso de los últimos años y en donde se puede apreciar que se ha modificado las zonas de cultivo en muchos casos en zonas de pastizal o agrícolas, lo cual ha ido en detrimento de las zonas de bosque natural y páramo. (Ver Mapa 2.5).

TABLA 2.15 USO Y COBERTURA VEGETAL EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Código MAGAP	Uso y Cobertura del Suelo (2014)	Área	
		[ha]	[%]
11	Bosque Nativo	874507,71	46,817
12	Plantación Forestal	23257,55	1,245
25	Pastizal	211243,27	11,309
31	Vegetación Arbustiva	80539,45	4,312
32	Páramo	491327,82	26,303
33	Vegetación Herbácea	8526,79	0,457
41	Cuerpo de Agua Natural	1330,58	0,071
51	Área Poblada	46830,96	2,507
52	Infraestructura	3840,26	0,206
61	Área Sin Cobertura Vegetal	14527,23	0,777
62	Áreas Erosionadas	2640,58	0,141
211 / 261	Cultivo de Cereales	18213,16	0,975
212	Cultivo de Leguminosas	1329,94	0,071
213	Cultivo de Raíces y Tubérculos	666,94	0,036
214 / 263	Cultivo de Hortalizas	1668,91	0,089
221 / 231 / 265	Cultivo de Frutales	4707,49	0,252
222	Cultivos Industriales	4555,79	0,244
241	Tierras Agrícolas	259,57	0,014
262	Cultivos de Ciclo Corto	24041,66	1,287
264	Cultivo de Flores y Rosas	2111,04	0,113
267	Cultivo Indiferenciado	37501,60	2,008
2131	Cultivo de Papa	2946,56	0,158
2313	Cultivo de Café	292,29	0,016
21121 / 21122	Cultivo de Maíz	101,41	0,595
Total		1867922,10	100,00

FUENTE: Sistema Nacional de Información (SNI) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP).

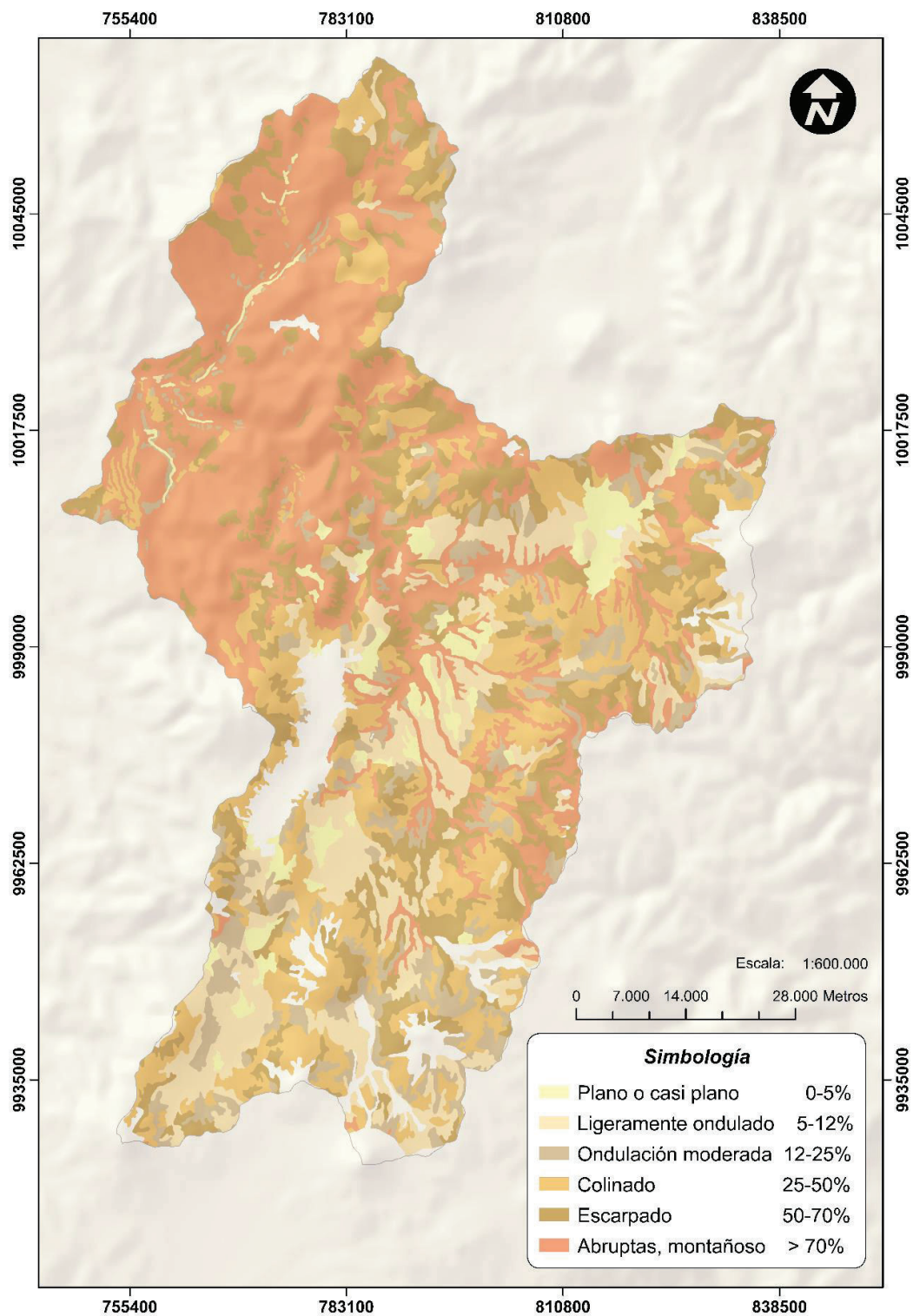
MAPA 2.4. TEXTURA DE SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FUENTE: Sistema Nacional de Información del Ecuador (SNI) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2012).

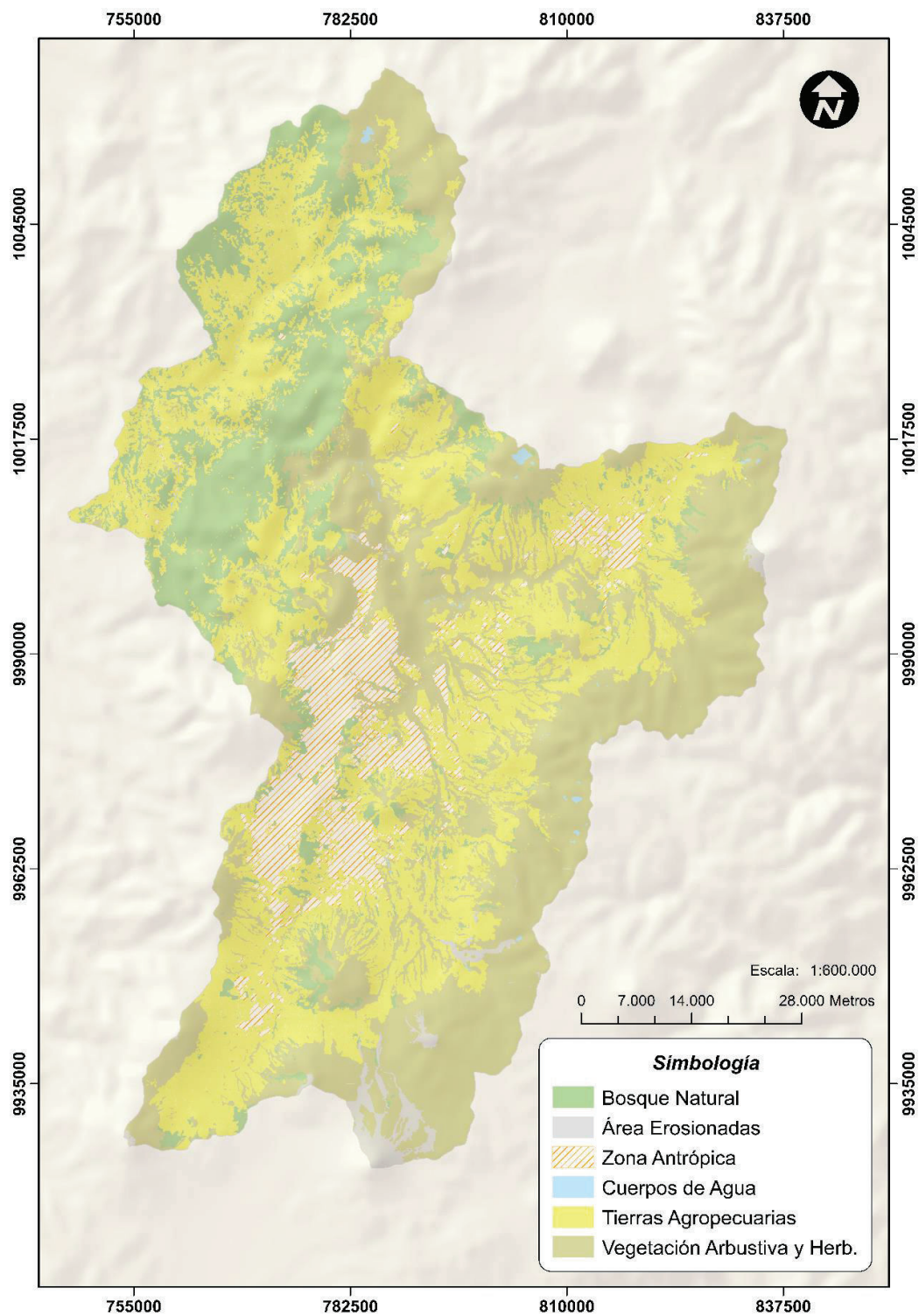
MAPA 2.5. PENDIENTES PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FUENTE: Sistema Nacional de Información del Ecuador (SNI) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2012).

MAPA 2.6. COBERTURA DEL SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FUENTE: Sistema Nacional de Información del Ecuador (SNI) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2012).

2.9 INFORMACIÓN BÁSICA EVALUADA

2.9.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

El área de estudio constituida principalmente por la cuenca del río Guayllabamba, recorre de sur a norte, desde las estribaciones del Volcán Cotopaxi (5897 m.s.n.m.), Illinizas (5320 m.s.n.m.) y Sincholhua (4873 m.s.n.m.); atravesando las provincias de Cotopaxi, Pichincha e Imbabura, hasta la junta con el río Alambi. Dicha cuenca comprende una superficie de 6300 [km²] y está dividida en 8 subcuencas de acuerdo a la metodología PFAFSTETTER, propuesta por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2009).

Para llevar a cabo el análisis de las características físico – geográficas de la cuenca, se ha considerado la siguiente información cartografía:

- **Sistema Nacional de Información (SNI)**, bajo el concepto de División PFAFSTETTER para cuencas y subcuencas hidrográficas con una escala de 1: 50000 con curvas de nivel cada 40 metros.
- **Cartas Topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM)**, en escala 1: 50000 con curvas de nivel cada 40 metros: Cotopaxi, Machachi, Sincholhua, Laguna de Mica, Manuel Cornejo Astorga, Amaguaña, Pintag, Papallacta, Santo Domingo de los Colorados, Quito, Sangolquí, Oyacachi, Monterrey, Cristóbal Colón, Mindo, Nono, El Quinche, Cangahua, Cerro Sarahurco, La Concordia, Pedro Vicente Maldonado, San Miguel de los Bancos, Calacalí, Mojanda, Cayambe, Nevado Cayambe, Rosa Zárate, Río Guayllabamba, Vacas Galindo, San Pablo del Lago, Mariano Acosta, Rosa Zárate Norte, Zapallo, Apuela e Imantag.
- **Geoportal del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca**, capas de pendientes, textura de suelo y cobertura vegetal (2002) a escala 1: 250000 con curvas de nivel cada 200 metros.

La cartográfica temática en formato shape comprende puntos, polilíneas, polígonos y coberturas de la cuenca del río Guayllabamba, y se describe a continuación.

TABLA 2.16 FUENTES DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.

Información Cartográfica (formato .shp)	Institución	Año
Riego	SENAGUA	2013
Hidroeléctricas	SENAGUA	2013
Cartas Topográficas	Instituto Geográfico Militar (IGM)	2002
Uso y Cobertura Vegetal	SENPLADES	2014
Pendientes	MAGAP - SIGAGRO	2013
Textura del Suelo	MAGAP - SIGAGRO	2013
División PFAFSTETTER	SNI	2011

FUENTE: Sistema Nacional de Información (SNI), Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.9.2 INFORMACIÓN CLIMÁTICA

La información meteorológica utilizada ha permitido realizar la caracterización climática de la cuenca, la misma que consiste en series de tiempo obtenidas en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para el periodo (1981 – 2010).

Las estaciones hidrometeorológicas utilizadas más representativas, constan de:

- Ubicación en coordenadas UTM
- Cota o elevación
- Tipo de estación, y;
- Número de años con registros

Donde tenemos estaciones de categoría A (con más de 20 años de datos), categoría B (con datos entre 10 y 20 años) y de categoría C (con datos de menos de 10 años) y se los considera referenciales.

Finalmente, el Anexo 1.1, muestra un mapa de distribución espacial de las estaciones meteorológicas conforme a la clasificación detallada anteriormente, de donde se concluye que el número de estaciones es alto en la zona media de la cuenca, con una cobertura espacial aceptable pero con vacíos en los sectores de cabecera (tramos altos de las laderas).

La red meteorológica del Ecuador cuenta con varios tipos de estaciones, que responden a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y que son operadas por el INAMHI y otras instituciones del estado. Dichas estaciones son:

- Aeronáuticas (AR)
- Agrometeorológicas (AP)
- Climáticas Ordinarias (CO)
- Climáticas Principales (CP)
- Pluviográficas (PG); y,
- Pluviómetricas (PV).

En la Tabla 2.17 se observa el número total de estaciones por clase y período y en donde, el número de estaciones de clase A y B (con más de 20 años de datos) representa el 69% del total, con una densidad media de 1 estación de Clase A o Clase B por cada 131, constituye la más alta del país, y es mayor a lo recomendado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), la cual recomienda para zonas de montaña 1 estación pluviométrica por cada 250 m.s.n.m., 1 estación pluviográfica por cada 2 500 m.s.n.m.

TABLA 2.17 TIPOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.

Clase	Cantidad	
	Valor	[%]
A	35	38
B	28	31
C	28	31

FUENTE: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Las series mensuales de temperatura, humedad relativa, evaporación y velocidad del viento se completaron con aquellas estaciones con disponibilidad de datos, utilizando los valores medios mensuales.

Las estaciones consideradas en el análisis de la disponibilidad de registros del clima en meses de información del período (1981 – 2010) se presentan en la Tabla 2.18.

TABLA 2.18 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON REGISTROS CLIMÁTICOS (1981-2010).

Variable Climática	Número de Estaciones
Precipitación mensual	91
Temperatura mensual	11
Evaporación mensual	8
Humedad relativa mensual	11
Velocidad del viento	11

FUENTE: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

2.9.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

Para la evaluación de la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Guayllabamba se ha considerado la información hidrológica de 9 estaciones hidrométricas ubicadas en el cauce principal y en sus afluentes de mayor relevancia (ver Anexo 1.2).

En la Tabla 2.19 se indican las estaciones y el porcentaje de información en el período de análisis 30 años (1981 - 2010), para caudales medios mensuales. Además se incluye una clasificación de acuerdo a la cantidad de información disponible.

- Clase A: con datos entre 20 y 30 años (más del 66% de datos);
- Clase B: con datos entre 10 y 20 años (entre el 33% y el 66%); y,
- Clase C: menor a 10 años completos (menor al 33 %).

TABLA 2.19 ESTACIONES HIDROLÓGICAS CONSIDERADAS (1981-2010).

Código	Estación	Coordenadas		Cota [m.s.n.m.]	Tipo	Datos [%]	Clase
		Longitud	Latitud				
H136	Alambi en Churupamba	78,68	0,15	920	LG	28,9	C
H143	Granobles A.J. Guachala	78,17	0,03	2750	LG	68,6	A
H144	Guachala A.J. Granobles	78,16	0,01	2740	LG	47,8	B
H145	Guayllabamba A.J. Cubi	78,43	0,09	1540	LG	32,2	C
H146	Guayllabamba D.J. Alambi	78,74	0,24	625	LG	64,4	B
H149	Guayllabamba en Pte. Chacapata	78,64	0,18	855	LG	47,8	B
H150	Intag D.J.Pamplona	78,62	0,22	1000	LG	28,1	C
H158	Pita A.J. Salto	78,43	0,57	3550	LG	64,2	B
H159	San Pedro en Machachi	78,55	0,46	2680	LG	86,9	A

FUENTE: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2013).

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Por lo indicado, 2 estaciones corresponden a la clase A, 4 estaciones a la clase B y 3 estaciones a la clase C. Considerando que la estación río Guayllabamba D.J. Alambi dispone del mayor volumen de datos (clase A) en la parte media y baja de la cuenca, es la más representativa y por ende es considerada como la estación base para análisis hidrológicos.

En conclusión, la cuenca alta del río Guayllabamba ubicada en la sierra norte del Ecuador cuenta con una superficie aproximada de 6300 [km²] que recorre la cuenca alta del Río Pita hasta su cierre en la cuenca baja de la Quebrada San Andrés. Por otro lado, cuenta con valores de precipitación entre 2300 y 570 $\frac{\text{mm}}{\text{año}}$ cuyos valores más altos se registran en la zona occidental, mientras que los

menores corresponden a la zona seca de la cuenca media. Además su temperatura fluctúa entre 23 y 10 [°C] lo cual corresponde a un clima templado.

Adicionalmente, la textura de su suelo corresponde al Grupo B (franco y franco limoso), lo cual representa el 61%, así también cuenta con variadas pendientes entre montañosas mayores a 70% y colinadas entre 25 y 50%. Finalmente, el 46% de cobertura vegetal corresponde a bosque nativo, mientras que un 26% es páramo, dejando un 28% a zonas urbanas y cultivos.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTO TEÓRICO

El objetivo de este capítulo es entender el fundamento teórico, que rige los procesos y etapas de desarrollo del modelo combinado, por lo cual es importante conocer su enfoque y ecuaciones pertinentes que permitan comprender de mejor manera los resultados una vez ejecutadas las pruebas pertinentes.

3.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Es la representación de los procesos naturales de manera simplificada, con el objeto de entender como puede verse afectado el complejo sistema hidrológico ante eventos naturales o antropogénicos no habituales. En la actualidad, existe un sin número de modelos hidrológicos desarrollados, que de acuerdo a dos criterios de simplificación (Merz y Bárdossy, 1998), se clasifican por su descripción en:

- **De procesos**, que pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos.
- **Espacial**, muestran los procesos de la cuenca como agregados o distribuidos.

3.1.1 MODELO BASADO FÍSICAMENTE

Lleva a cabo una descripción de un sistema natural basado en representaciones matemáticas básicas de flujos de masa, momentos y tipos de energía que infieren en los procesos. La mayoría de estos modelos, en general, son distribuidos y se los denomina comúnmente de caja blanca (De Bievre y Coello, 2008).

3.1.2 MODELO CONCEPTUAL

Construido sobre una base de procesos físicos de observaciones cualitativas realizadas a nivel de cuenca, se estructura por medio de ecuaciones físicas semiempíricas. Dicho significado no es lo bastante claro, debido a que muchos de los parámetros usados no pueden ser medidos directamente, por lo que deben ser estimados mediante un ajuste o calibración. Para lo cual se hace necesario trabajar con series de tiempo de entrada y salida como punto de evaluación de dichos modelos conocidos como agregados o de caja gris (De Bievre, 2008).

3.1.3 MODELO EMPÍRICO O DE CAJA NEGRA

Es desarrollado sin ninguna concepción de los procesos físicos que podrían ocurrir en el área de estudio, ya que únicamente considera las observaciones y mediciones obtenidas de las series de tiempo tanto de entrada como de (Ven te Chow, 1994).

Por otro lado, existen los modelos hidrológicos que son desarrollados en base de la aleatoriedad de las variables que dependen de las tres dimensiones espaciales y del tiempo, lo cual conlleva una ardua tarea, por consiguiente, es necesario simplificar el modelo, sin tomar en cuenta algunos parámetros de variación, principalmente, los que no influyen o no tienen un peso representativo dentro de la calidad y expectativa del modelo (Ven te Chow, 1994).

Es por ello que, los modelos hidrológicos pueden a su vez clasificarse bajo dicha simplificación, además de tomar en cuenta tres consideraciones que son:

- Aleatoriedad de las variables.
- Variación o uniformidad espacial.
- Variación temporal o se mantiene constante.

3.1.4 MODELO DETERMINÍSTICO

El mismo que no considera la aleatoriedad, por lo que al dar datos de entrada al modelo este siempre producirá el mismo resultado, bajo las mismas condiciones iniciales (pronóstico), con lo que la relación causa-efecto se conoce en su totalidad a diferencia de modelos estocásticos (De Bievre y Coello, 2008). Dentro de este modelo se tiene:

- **Agregado**, donde el sistema es promediado en el espacio o considerado como un único punto sin dimensiones en el espacio (Ven te Chow, 1994).
- **Distribuido**, al contrario de lo anterior, este considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y definen las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales (Ven Te Chow, 1994).

3.1.5 MODELO ESTOCÁSTICO

Dicho modelo tiene salidas que son parcialmente aleatorias (predicción), por lo que tratan de modelar los procesos aleatorios que pasan en el tiempo, y proveen series de tiempo alternativas de salida a lo largo de sus probabilidades (Loucks y Van Beek, 2005). Para dicho modelo se considera, además, la influencia de las variables aleatorias entre ellas en diferentes puntos del espacio, y pueden ser:

- Independencia de las variables en el espacio, y;
- La correlación en el espacio.

Finalmente, se considera la variabilidad temporal. Los modelos determinísticos se clasifican en modelos de flujo permanente (la tasa de flujo no cambia con el tiempo) y modelos de flujo no permanente. Los modelos estocásticos, por otro lado poseen salidas que son variables en el tiempo. Éstos a su vez, se clasifican como independientes del tiempo y correlacionados en él; un modelo independiente del tiempo representa una secuencia de eventos hidrológicos que no influyen entre sí,

mientras que un modelo correlacionado en el tiempo, representa una secuencia en la cual el evento siguiente está parcialmente influenciado por el evento anterior y probablemente por otros (Ven te Chow, 1994). Para comprender de mejor manera cada uno de los modelos aquí mencionados dirigirse a la Figura 3.2.

3.2 BALANCE HÍDRICO

Basado en la ecuación fundamental de la mecánica de fluidos, de conservación de masa, momentum y energía. La misma que dice: *“que todo lo que entra menos lo que sale es igual a un cambio de almacenamiento”*, bajo un volumen de control, para un periodo dado de tiempo (Herrera, 2008).

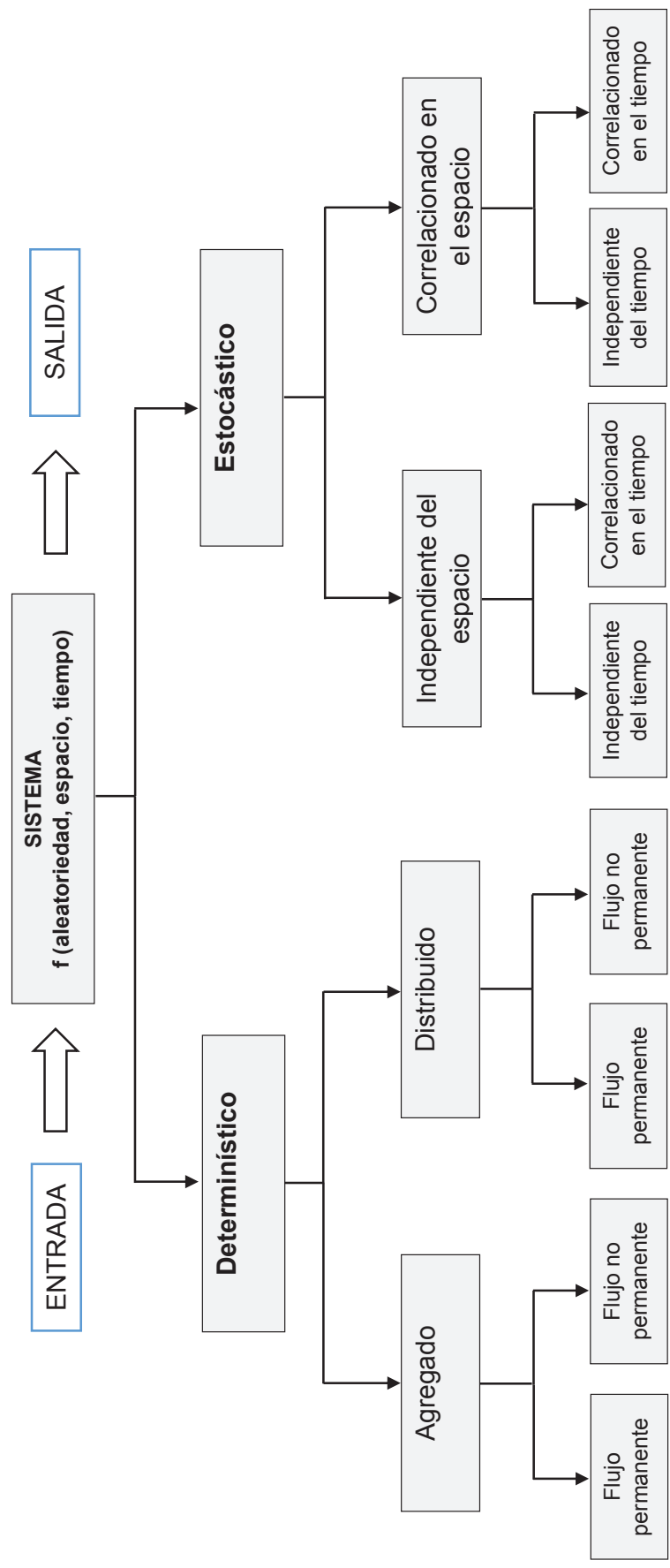
Entre los componentes que es necesario conocer para llevar a cabo un balance hídrico tenemos (Herrera, 2008):

- Precipitación (líquida y sólida)
- Pérdidas (evaporación, evapotranspiración y sublimación)
- Escorrentía (superficial, subsuperficial y subterránea)
- Almacenamiento o regulación (ríos, lagos, embalses, nieve, glaciares o agua subterránea)
- Infiltración
- Uso del agua

El conocimiento de la distribución, movimiento, cantidad, permanencia, variación y transporte del agua en los distintos lugares donde puede encontrarse (Ver Figura 3.3), sirve para determinar el balance global que gobierna el ciclo hidrológico. Una forma general del balance de agua para cualquier cuerpo de agua e intervalo de tiempo será:

$$P + Q_{\text{Sing}} + Q_{\text{Uing}} - E - ET - Q_{\text{Ssal}} - Q_{\text{Usal}} - \Delta S - \eta = 0 \quad (3.1)$$

FIGURA 3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DE ACUERDO A LA FORMA, ALEATORIEDAD Y VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LOS FENÓMENOS HIDROLÓGICOS.



FUENTE: Hidrología Aplicada (Ven te Chow, 1994).
 ELABORADO: Wilson A. González Quilachamín

donde:

- P : Precipitación
- Q_{Sing} : Entrada de agua superficial a la cuenca
- Q_{Uing} : Entrada de agua subterránea a la cuenca
- E : Evaporación
- ET : Evapotranspiración
- Q_{Ssal} : Salida de agua superficial
- Q_{Usal} : Salida de agua subterránea
- ΔS : Variación del almacenamiento de agua en la cuenca
- η : Término residual de discrepancia, error de medición

En razón, de que para computar cada uno de los elementos se utilizan variadas mediciones y estimaciones, usando métodos independientes, siempre quedará involucrado un error. Es por ello que la ecuación de balance hídrico presentará discrepancias; η es el término residual, valores pequeños indican que el balance es compensando (UNESCO, 2010).

Por otro lado, la ecuación 3.1 evalúa por separado el flujo superficial y subterráneo, además de considerar la variación en el almacenamiento de la cuenca, lo que es indispensable para balances de paso mensual. Las unidades de la ecuación pueden ser expresadas en altura media de agua [mm], como volumen de agua [m³] o en forma de flujo [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$].

Para cálculos en áreas extensas y largos períodos de tiempo, se recomienda utilizar la ecuación simplificada:

$$\langle \bar{P} \rangle - \langle \bar{Q} \rangle = \langle \bar{ET} \rangle + \eta \quad (3.2)$$

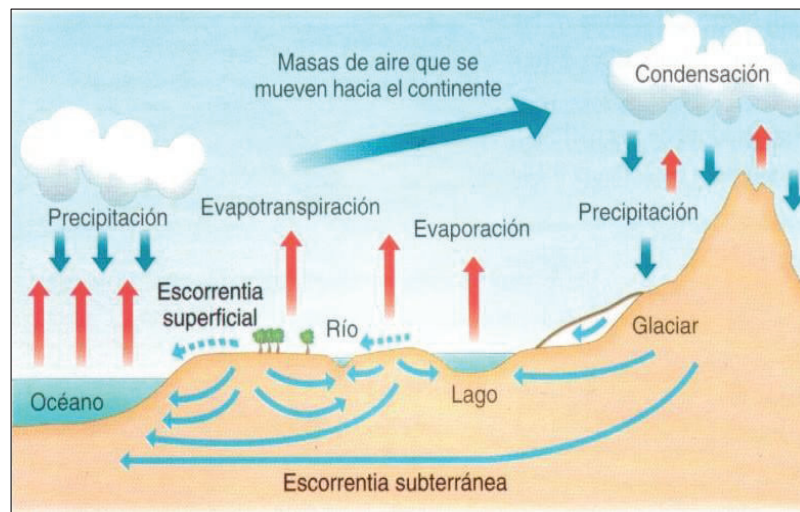
donde:

- \bar{P} : Precipitación media del período y área
- \bar{Q} : Caudal medio del período y área
- \bar{ET} : Evapotranspiración media del período y área

- η : Término de discrepancia
 $\langle \bar{f} \rangle$: Promedio espacial horizontal y barra promedio temporal

Esto es aplicable si los cambios de almacenamiento en un período largo de tiempo y en áreas extensas tiende a minimizarse y puede suponerse nulo. Dicha simplificación permite la construcción de mapas que puedan ser comparados entre sí (UNESCO, 2010).

FIGURA 3.4 CICLO HIDROLÓGICO, PARA LA DETERMINACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS DENTRO DEL BALANCE HÍDRICO.



FUENTE: Geología, Ed. Laberinto.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO PARA DIFERENTES INTERVALOS DE TIEMPO

El balance hídrico se lo puede calcular para cualquier intervalo de tiempo, pero deberá hacerse una distinción entre balances medios y balances para períodos determinados (tales como un año, una estación, un mes o un número de días), llamados algunas veces corrientes, comunes o balances operacionales (UNESCO, 2010).

Los balances hídricos para valores medios se calculan para un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), aunque también puede hacerse para cualquier

estación o mes (UNESCO, 2010).

La determinación del balance hídrico para un año medio es el caso más simple, ya que se puede desprestigiar la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca ΔS , que es difícil de medir y calcular. Para un largo período los incrementos del agua almacenada, positivos y negativos, a escala anual, tienden a equilibrarse y su valor neto al final puede considerarse igual a cero (UNESCO, 2010).

La situación contraria ocurre cuando se calculan los balances hídricos para períodos cortos, para los cuales $\Delta S \neq 0$. Cuanto más corto es el intervalo de tiempo, más precisa deberá ser la medida y determinación de los componentes del balance hídrico y más subdivididos estarán los valores de ΔS_y , de otros elementos. Esto da como resultado una ecuación del balance compleja, que es difícil de ajustar aceptablemente (UNESCO, 2010).

3.2.2 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO PARA DIFERENTES DIMENSIONES

El balance hídrico puede calcularse para masas de agua de cualquier tamaño, pero la complejidad del cálculo depende fundamentalmente de la extensión del área estudiada (UNESCO, 2010).

La cuenca de un río es la única zona natural para la cual las determinaciones a gran escala del balance hídrico pueden simplificarse, ya que la exactitud del cálculo aumenta al hacerlo la superficie de la cuenca. Cuanto más pequeña sea la superficie de la cuenca, más complicado es su balance, ya que es más difícil estimar componentes secundarios, tales como intercambio de aguas subterráneas con cuencas adyacentes, almacenamiento de agua, en lagos, embalses y glaciares, además de la dinámica del balance hídrico de bosques y zonas regables. El efecto de estos factores decrece gradualmente al aumentar el área de la cuenca y puede llegar a desprestigiar (UNESCO, 2010).

La complejidad para determinar el balance hídrico de lagos, embalses, aguas subterráneas y glaciares de montaña, aumenta con el área, debido a la dificultad de realizar mediciones precisas y exactas, así como calcular los numerosos e importantes componentes del balance hídrico en grandes masas de agua, tales como flujo lateral y variaciones del volumen de agua almacenada en grandes lagos o embalses, considerando un evento de precipitación sobre la superficie del embalse (UNESCO, 2010).

3.3 PRECIPITACIÓN

La precipitación en términos generales son todas las formas de humedad (lluvia, granizo y nieve) provenientes de las nubes que caen al suelo. Y es aquella porción dentro del ciclo hidrológico que se condensa como vapor de agua, formando pequeñas gotas de agua del tamaño de micras, alrededor de núcleos de condensación (partículas microscópicas), que al ser lo suficientemente grandes caen por gravedad (Soil Conservation Service, 1990).

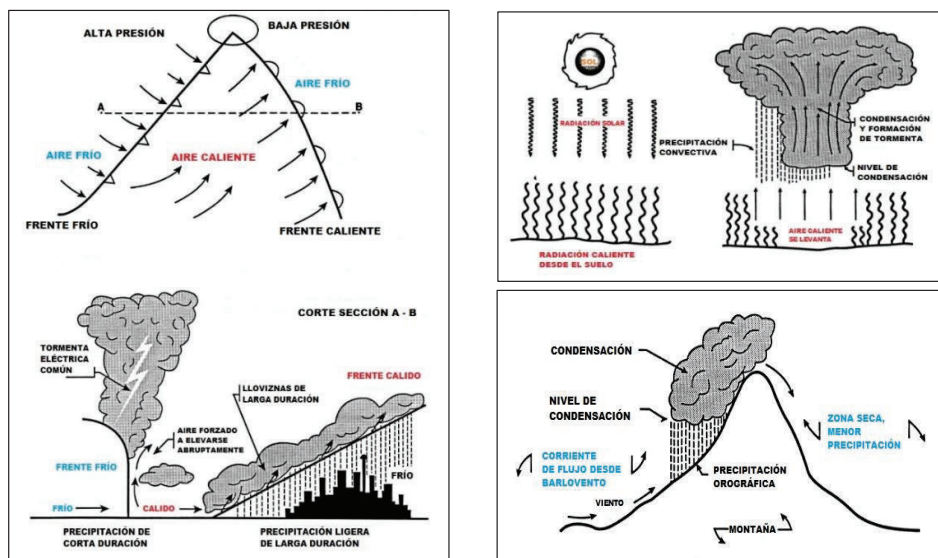
Aunque el vapor de agua en la atmósfera es un factor necesario en la formación de la precipitación, no es de ninguna forma el único requisito. Ya que la masa de aire contenida en el vapor de agua debe ser enfriada para condensar en forma de gotas de agua (Soil Conservation Service, 1990). El enfriamiento a gran escala necesario para el proceso de precipitación se lo consigue mediante el levantamiento o elevación de dichas masas y en cuyo caso consiste de tres formas, las cuales son:

- **Precipitación ciclónica**, es el resultado del levantamiento de aire convergente hacia zonas de baja presión o ciclones. Un ciclón se define como un zona de baja presión en sentido antihorario (Hemisferio Norte) o viceversa (Hemisferio Sur), en el cual existe una masa de aire que lo rodea y direccionada hacia el centro. Este tipo de precipitación puede ser calificada como frontal o no frontal, ya que al ser no frontal puede ocurrir en cualquier tipo de depresión barométrica y en cuyo caso el levantamiento de aire es causado por la convergencia horizontal del flujo de aire desde una zona de mayor presión hacia una de menor presión, mientras que la precipitación

frontal es el resultado del levantamiento de una mezcla de aire cálido y húmedo (ligero) por sobre la masa fría de aire (Soil Conservation Service, 1990).

- **Precipitación convectiva**, este proceso se da a través de la elevación o movimiento ascendente de aire más caliente y ligero, que el frío y denso entorno del cual puede verse rodeado. Por lo general, esto ocurre en un día caluroso en donde al calentarse el suelo y el aire en contacto tiende a elevarse, expandirse y enfriarse de forma dinámica, causando la condensación y precipitación (Soil Conservation Service, 1990).
- **Precipitación orográfica**, otro proceso importante que permite levantar las masas de aire, se da cuando fluye por sobre una característica topográfica como una barrera montañosa, dichas barreras permiten en ciertos casos compensar las precipitaciones en determinadas zonas, por esta razón, la precipitación es mayor en las laderas de barlovento y menor o deficiente en las laderas y valles de sotavento. Finalmente, la precipitación orográfica asociada a la acción ciclónica o convectiva tiende a ser de baja intensidad con duraciones relativamente largas (Soil Conservation Service, 1990).

FIGURA 3.5 DINÁMICA DE MOVIMIENTOS ASCENDENTES DENTRO DE LA PRECIPITACIÓN, A. CICLÓNICA, B. CONVECTIVA, C. OROGRÁFICA



FUENTE: Soil Conservation Service

3.3.1 TIPOS DE PRECIPITACIÓN

Existen diferentes tipos de precipitación que dependen de las condiciones meteorológicas de la región. Para lo cual, el presente estudio únicamente ha considerado la precipitación por lluvia y acumulación de nieve (Soil Conservation Service, 1990), que tienen contacto directo con el suelo y entre las más importantes tenemos:

- **Llovizna**, la cual es considerada como una capa fina de aspersion de gotas pequeñas y bastante uniformes, con un diámetro no menor a 0,5[mm]. Las gotas son tan pequeñas que parecen flotar en el aire y siguen las irregularidades del movimiento del este (Soil Conservation Service, 1990).
- **Lluvia**, es la precipitación de agua líquida en forma de gotas, por lo general, son más grandes que las de llovizna. Se informa de tres tipos de intensidades, entre las que tenemos: un moderado de 2,50 a 7,50 [$\frac{\text{mm}}{\text{h}}$] y mayor a 7,50 [$\frac{\text{mm}}{\text{h}}$] es considerada como fuerte (Soil Conservation Service, 1990).
- **Nieve**, dicha precipitación se presenta en estado sólido, principalmente, en forma de cristales hexagonales ramificados resultantes de la condensación de vapor de agua directamente a hielo. Los cristales de hielo a temperaturas inferiores al punto de congelación conservan una ligera capa de agua líquida, lo cual, les permite aglutinarse y mantenerse unidos entre ellos formando grandes copos (Soil Conservation Service, 1990).
- **Granizo**, un tipo de precipitación en forma de bolas o trozos de hielo sobre los 5 [mm] de diámetro, formado por congelación y fusión, ya que se produce en zonas bastante frías y alta turbulencia con probabilidad de tormentas violentas (Soil Conservation Service, 1990).

3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Se trata como la combinación de dos procesos separados mediante los cuales se pierde una parte de agua por la evaporación de la superficie del suelo y la otra por la transpiración de la cubierta vegetal y que es mejor conocida como evapotranspiración .

3.4.1 EVAPORACIÓN (E)

Proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización), con lo cual es removida de las superficies, tales como: lagos, ríos, suelos, pavimentos, vegetación húmeda y demás (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Pero para poder realizar dicho proceso, es necesario el aporte de energía para cambiar el estado de las moléculas de agua, de líquido a vapor. Por lo cual, la radiación solar directa, y en menor medida la temperatura ambiente proporcionan esta energía (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Además es necesaria una fuerza que permita eliminar el vapor de agua de la superficie de evaporación, misma que se obtiene de la diferencia entre la presión de vapor de agua a la superficie de evaporación y de la atmósfera circundante. Como producto de la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se ralentiza, lo que en consecuencia disminuiría la transferencia de aire húmedo a la atmósfera (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

La sustitución de aire saturado por aire más seco depende en gran medida de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad del mismo y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar antes de evaluar el proceso de evaporación (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Dado que la superficie de evaporación en la mayoría de los casos es el suelo, el grado de sombreado del dosel del cultivo y la cantidad de agua disponible en la

superficie de evaporación son otros factores que afectan el proceso como tal. Las frecuentes lluvias, el riego y agua transportados hacia arriba en el suelo de un nivel freático poco profundo, muestra que el suelo es capaz de suministrar agua lo suficientemente rápido como para satisfacer la demanda de evaporación, la misma que a su vez se ve determinada por las condiciones meteorológicas (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Sin embargo, cuando el intervalo entre lluvias y el riego se hace grande y la capacidad del suelo para llevar la humedad cerca de la superficie es pequeña, el contenido de agua en el suelo superficial se seca casi que inmediatamente. En tales circunstancias, la limitada disponibilidad de agua ejerce un poder de control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier suministro, evidentemente, la evaporación disminuye rápidamente y puede incluso desaparecer completamente al cabo de unos días (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

3.4.2 TRANSPIRACIÓN (T)

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y la eliminación de vapor a la atmósfera. Los cultivos a su vez pierden agua a través de sus estomas, los cuales son pequeñas aberturas en la hoja de la planta, por donde pasan los gases y vapor de agua. El agua junto con algunos nutrientes es absorbida por las raíces y se transporta a través de la planta. La vaporización se produce dentro de la hoja, es decir, en los espacios intercelulares, y el intercambio de vapor con la atmósfera está controlada por la abertura de los estomas. Casi toda el agua absorbida por el suelo se pierde por transpiración y sólo una pequeña fracción se utiliza dentro de la planta (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Este proceso como la evaporación directa, depende del suministro de energía, el gradiente de presión de vapor y el viento, los mismos que se deben considerar en la evaluación de la transpiración, así como también, el contenido de agua en el suelo y la capacidad del suelo para conducir el agua a las raíces, lo que su vez determina la tasa de transpiración. Dicha tasa en gran medida se ve influenciada

por las características del cultivo, aspectos ambientales y prácticas de cultivo, los diferentes tipos de plantas pueden tener diferentes tasas de transpiración, no solo del cultivo, sino también el desarrollo de los mismos, con lo cual se debe evaluar en conjunto tanto el medio ambiente, como la gestión que se les pueda dar (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

3.4.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

La evaporación y transpiración se producen simultáneamente y no hay manera fácil de distinguir entre los dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en la capa superior del suelo, la evaporación de un suelo recortada se determina principalmente por la fracción de la radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye durante el periodo de crecimiento y desarrollo del cultivo, ya que el dosel empieza a aumentar de tamaño y disminuye la radiación incidente en el suelo. Cuando el cultivo es pequeño, el agua se pierde principalmente por evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo se ha desarrollado y cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. La partición de la evapotranspiración se traza en correspondencia con el área foliar por unidad de superficie de suelo por debajo de ella (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

3.4.3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los parámetros meteorológicos, las características del cultivo, el manejo y los aspectos ambientales son los factores que afectan la evaporación y la transpiración. A continuación, se puede ver cómo influyen los mismos en la evapotranspiración (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

- **Variables climáticas**, entre las más importantes tenemos; la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento, para lo cual se ha desarrollado una serie de metodologías para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de

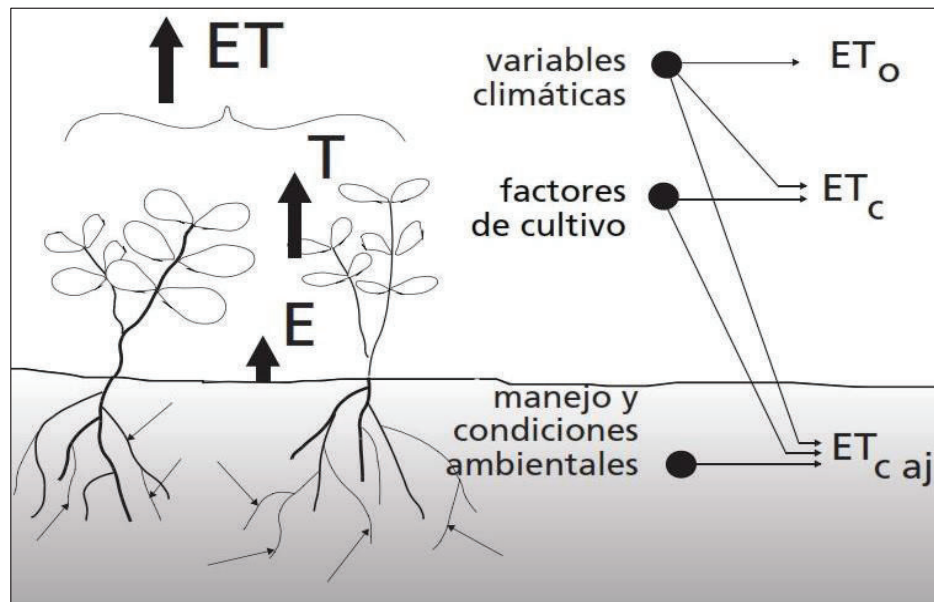
referencia (ET_o), el cual representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

- **Factores de cultivo**, el tipo de cultivo, la variedad y su etapa de desarrollo deben ser considerados para evaluar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de manejo adecuadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, altura del cultivo, rugosidad del mismo, el reflejo, cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).
- **Manejo y condiciones ambientales**, la salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros, ausencia sobre el control de enfermedades o parásitos y un mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Una condición importante es el contenido de agua en el suelo sobre la ET, el cual está determinado por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este, lo que podría dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

3.4.3.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). Dicha superficie corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

FIGURA 3.6 FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.



FUENTE: Estudio Riego y Drenaje (FAO, 2006)

Este concepto se introdujo con la finalidad de estudiar la demanda de evapotranspiración a la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de sus prácticas de manejo. Al tener disponibilidad de agua en la superficie evaporante de referencia, los factores de la misma no tiene ningún efecto sobre la ET. Con lo cual, dicha evapotranspiración de referencia permite relacionarla a otras ET y sus respectivas superficies. Además de eliminar la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades y en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia ET bajo la misma superficie de referencia (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Pero los factores que realmente alteran la ET_o son los climáticos, por lo que, la ET_o se convierte en un parámetro climático que también puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. Por lo tanto, la ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, como ya se ha mencionado sin tomar en cuenta las características del cultivo, ni los factores del suelo. Bajo este punto de vista, la Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), ha seleccionado el método FAO-56 Penman – Monteith (FAO, 1990), como el que mejor aproxima de una manera cercana la ET_o de cualquier

localidad evaluada, ya que cuenta con bases físicas sólidas e incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos, así como procedimientos que permiten la estimación de los parámetros climáticos faltantes (Ver Figura 3.5).

3.4.3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ET_c)

Esta evapotranspiración es la que presenta cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con una buena fertilización y cuyo desarrollo se da en amplias parcelas, con óptimas condiciones de riego y suelo, y con una máxima producción dependiendo de las condiciones climáticas presentes (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

La cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas por evapotranspiración del cultivo, se denominan como necesidades hídricas del cultivo. Si bien es cierto, que los valores de evapotranspiración del cultivo y las necesidades hídricas del mismo son parecidos, conceptualmente sus definiciones son diferentes. Ya que al hablar de necesidades hídricas estas se refieren a la cantidad de agua necesaria para el cultivo o lo que mejor se conoce como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración de cultivo se refiere a la cantidad de agua pérdida por la transpiración del cultivo. Por lo tanto, la necesidad de riego representa la diferencia entre la necesidad hídrica del cultivo y la precipitación efectiva, considerando además que, el requerimiento de agua de riego incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua (FAO, 2006).

3.4.3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO BAJO CONDICIONES NO ESTÁNDAR ($ET_{c_{aj}}$)

La evapotranspiración bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) se refiere a la evapotranspiración de cultivo que se desarrolla bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a las estándar, entre las cuales podemos nombrar: presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o

exceso de agua. Todas estas son conocidas como condiciones no óptimas para el desarrollo y crecimiento de la planta, lo cual da como resultado una menor densidad de plantas y una reducción y ajuste de los valores de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c (Estudio Riego y Drenaje FAO, 2006).

Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se utiliza un coeficiente de estrés hídrico K_s o ajustado K_c a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo (FAO, 2006).

3.5 ENFOQUE DEL COEFICIENTE DE CULTIVO

Para llevar a cabo este enfoque es necesario aclarar que, la evapotranspiración del cultivo ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o y el coeficiente del cultivo K_c (FAO, 2006).

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (3.3)$$

donde:

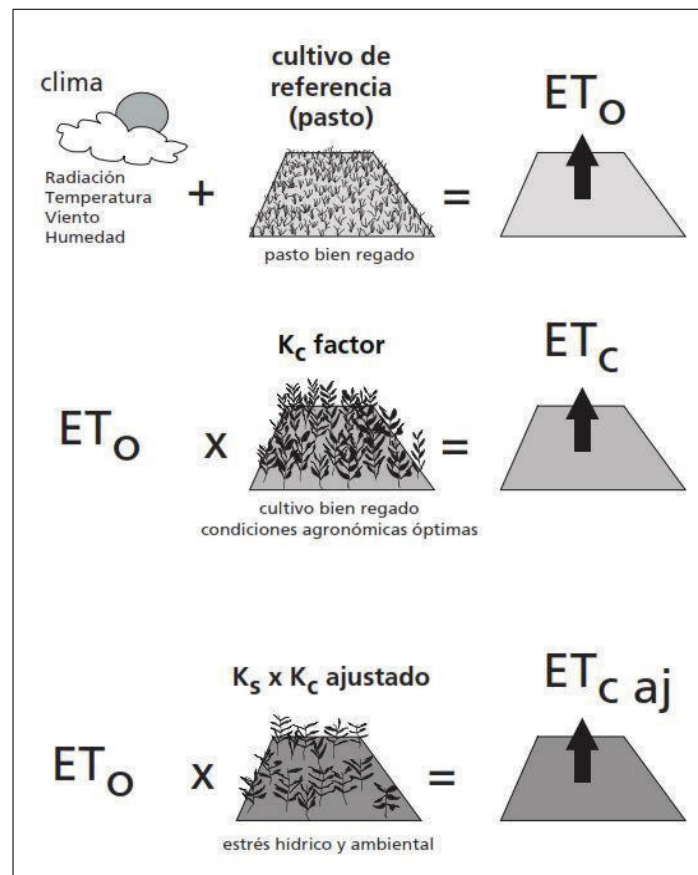
ET_c : Evapotranspiración de cultivo $\left[\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right]$

K_c : Coeficiente de cultivo [adimensional]

ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia $\left[\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right]$

La mayoría de los efectos meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o . Con lo cual, mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de K_c desarrollados en estudios anteriores (FAO, 2006) (Ver Figura 3.6).

FIGURA 3.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO DE REFERENCIA (ET_0), BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ET_c) Y CONDICIONES NO ESTÁNDAR ($ET_{c aj}$).



FUENTE: Estudio Riego y Drenaje (FAO, 2006).

3.6 ECUACIÓN DE HARGREAVES

Es una variación de la ecuación FAO-56 Penman – Monteith (Allen, 1998), para la determinación de la evapotranspiración de referencia, la misma que requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento (FAO, 2006).

Sin embargo, el presente modelo al no contar con suficiente información de las variables requeridas por la ecuación FAO-56 Penman – Monteith (Allen, 1998), es necesario aplicar una variante de dicha ecuación, la cual se denomina ecuación Hargreaves, donde (FAO, 2006):

$$ET_o = 0,0023 \times [T_{med} + 17,8][T_{max} - T_{min}]^{0,5} \times Ra \times 30 \quad (3.4)$$

donde:

- ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia [$\frac{mm}{día}$]
 T_{min} : Temperatura mínima del aire [°C]
 T_{med} : Temperatura media del aire [°C]
 T_{max} : Temperatura máxima del aire [°C]
 Ra : Radiación neta incidente [$\frac{W}{m^2}$]

Es necesario verificar para cada nueva región mediante la comparación de estimaciones, producto de la calibración de FAO-56 Penman – Monteith (Allen, 1998) en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Además, la ecuación 3.3 se puede ajustar de forma mensual o anual, mediante la determinación de los coeficientes empíricos $ET_o = a + b \times ET_o$, de los cuales a y b se pueden determinar mediante un análisis de regresión, mientras que ET_o se obtiene de la ecuación 3.3 (FAO, 2006), y con ello encontrar la mejor correlación posible de acuerdo al lugar.

Esto se puede llevar a cabo en gran medida por la capacidad de las ecuaciones de incorporar características climáticas generales, tales como velocidad del viento alta o baja y humedad relativa alta o baja. Es importante indicar que la ecuación de Hargreaves tiene una tendencia a subestimarse en condiciones altas de viento y a sobreestimarse en alta humedad relativa (FAO, 2006).

3.7 MODELO Y CURVA DE BALANCE HÍDRICO BUDYKO

A mediados del siglo pasado Budyko (1958), publicó un marco conceptual que describe la partición de la precipitación media (\bar{P}) en evapotranspiración media (\overline{ET}) y escorrentía media (\bar{Q}), basado en relaciones físicas simples de primer orden. Dicha ecuación se la puede representar de la siguiente manera.

$$\frac{ET_a}{P} = f\left(\frac{ET_c}{P}\right) \quad (3.4)$$

donde:

- ET_a : Evapotranspiración actual anual
 P : Precipitación anual
 f : Índice de sequía
 ET_c : Evapotranspiración de cultivo anual

Derivada en escala media anual, esta ecuación es también aplicable a escalas de tiempo subanuales. En términos generales, la ecuación de balance hídrico puede considerar otro tipo de ajustes, como lo son: la capacidad de almacenamiento de agua de captación (Mouelhi, 2006 y Zhang, 2008) y la estacionalidad de las precipitaciones (Potter y Zhang, 2009).

Para una región dada la tasa promedio anual actual de evapotranspiración está sujeta a la disponibilidad de energía y agua. Si la tasa de evapotranspiración de cultivo para el caso del presente estudio es relativamente baja, entonces la relación evapotranspiración - precipitación también será baja y tendiendo a cero, lo cual determina condiciones secas. Mientras que, una relación alta (cercana a la unidad), determina una precipitación relativamente más elevada y con una demanda evaporativa satisfecha. Esta relación se la puede sintetizar a través del modelo semiempírico conocido como "Curva de Budyko" (Oudin, 2008).

$$\left[\frac{\overline{ET_a}}{\overline{P}}\right] = \{\overline{\phi}[1 - \exp(-\overline{\phi})]\tanh[(\overline{\phi})^{-1}]\}^{0.5} \quad (3.5)$$

donde:

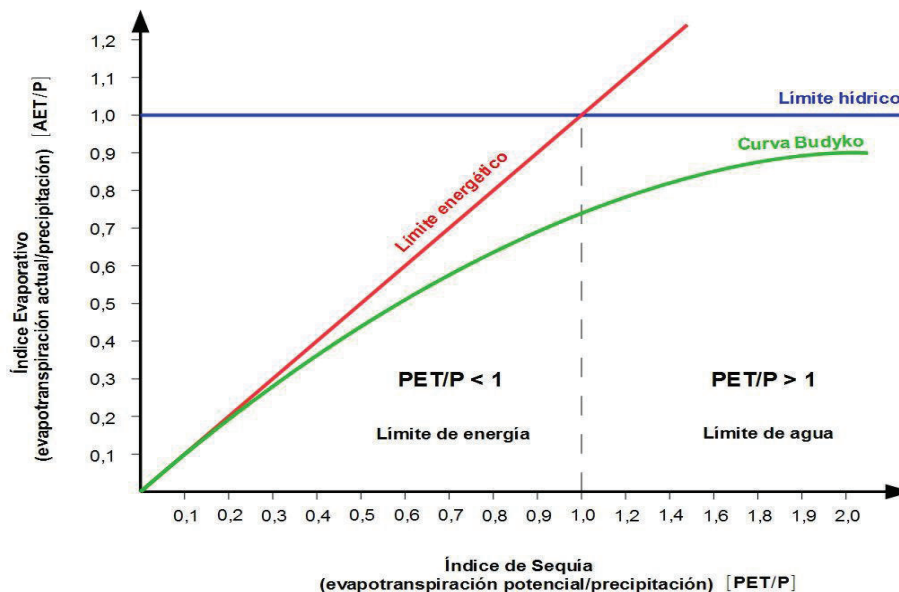
- $\overline{\phi}$: denota el promedio anual de un periodo largo de evapotranspiración de cultivo y precipitación $\left[\frac{\overline{ET_c}}{\overline{P}}\right]$.

Esta relación ha sido probada para una evapotranspiración anual, para cuencas de captación mayores a 1000 [km²], esto en gran parte para minimizar el efecto de cualquier flujo de aguas subterráneas. Sin embargo, bajo este supuesto, la pérdida de agua es a través de la evaporación del suelo o transpiración de las plantas. Es

así que, la profundidad a la que se encuentren las plantas, determinara el potencial de agua disponible para las mismas (Oudin, 2008)

En condiciones de equilibrio, cuando el agua es el limitante, el máximo posible de \bar{E} es \bar{P} y en el cual $\bar{Q} = 0$. Del mismo modo cuando la energía es el limitante el calor latente es igual a cero. Bajo este marco del balance de masa y energía, así como la oferta y la demanda el limitante de la evapotranspiración es el componente clave del modelo de Budyko. El tipo y grado de limitación está determinado por el índice de sequía radiativo ($\bar{\phi}$), donde valores de ($\bar{\phi} < 1$) representan el límite energético ambiental, mientras que ($\bar{\phi} > 1$) el límite hídrico. Así como también relaciones intermedias de ($\bar{\phi} \sim 1$) (Oudin, 2008) (Ver Figura 3.7).

FIGURA 3.8 CURVA BUDYKO, PARA LA DETERMINACIÓN DE CONDICIONES LÍMITE DE AGUA Y ENERGÍA.



FUENTE: Budyko Guide for Exploring Sustainability of Water Yields from Catchments under Changing Environmental Conditions (Creed and Spargo, 2014).

3.7.1 DESVIACIONES DENTRO DE LA CURVA BUDYKO

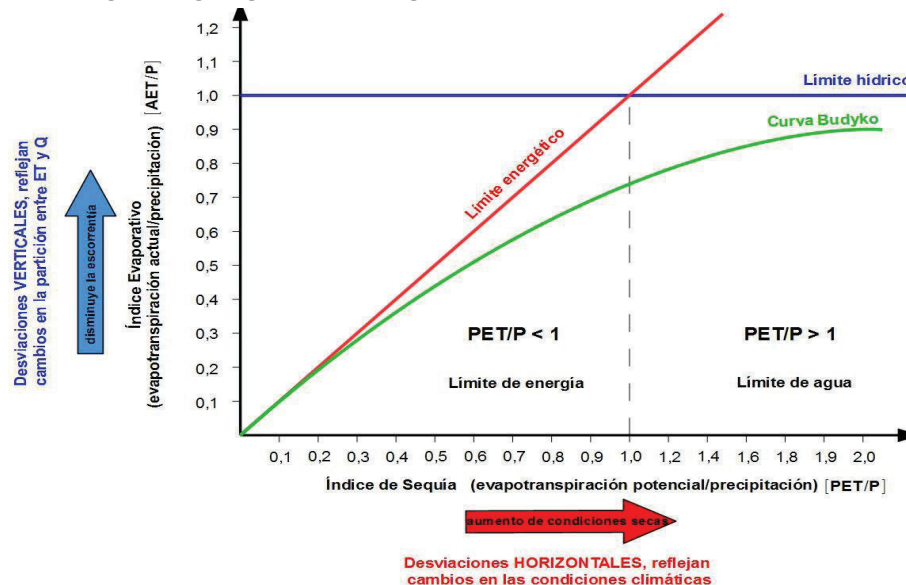
Las desviaciones o dispersión dentro de la curva de Budyko se define como la variación que viene dada por el cambio en las condiciones climáticas de la región en gran medida, más no son determinantes, ya que a su vez dependen de la

cantidad de agua que puede llegar a ser almacenada o retenida por el suelo (capacidad de campo) y la variación de la cobertura vegetal (Oudin, 2008).

Budyko consideraba que las desviaciones sistemáticas ocurren entre valores reales y esperados y que es más pronunciada en los climas intermedios dichas desviaciones a su vez están relacionadas con los ciclos estacionales de P y ET (Budyko, 1974). Cuando están en fase, los valores medidos de AET/P son ligeramente más altos de lo esperado y fuera de fase son ligeramente inferiores (Ver Figura 3.8).

Existe un sin número de estudios que buscan determinar las razones de las desviaciones en la curva de Budyko (Eagleson, 1978; Milly, 1994; Choudhury, 1999; Dooge, 1999; Koster y Suarez, 1999; Zhang, 2001; Sankarasubramanian y Vogel, 2002; Porporato, 2004; Potter, 2005).

FIGURA 3.9 CURVA BUDYKO, DESVIACIONES EN LOS CAMBIOS DE PARTICIÓN ET/Q Y CONDICIONES CLIMÁTICAS.



FUENTE: Budyko Guide for Exploring Sustainability of Water Yields from Catchments under Changing Environmental Conditions (Creed and Spargo, 2014).

Muchos de estos estudios se han enfocado en los procesos geofísicos y climáticos o a su vez han incluido la cobertura vegetal pero como una constante. En particular cabe mencionar a Milly (1994), quien mediante un modelo estocástico determinó

que cuando los suministros de energía y agua varían estacionalmente las diferentes fases de la relación ET/P, cambian de acuerdo a la capacidad de almacenamiento del suelo. Un ejemplo es el cambio de estación de lluviosa a seca en donde esto cobra relevancia, al considerar que la capacidad de campo del suelo retiene o almacena agua que es aprovechada por la vegetación y otra porción es puesta de vuelta a la superficie, lo cual refleja un desviación clara en la relación ET/P dentro de la curva de Budyko, ya que si bien el suministro de energía es mayor, no necesariamente significa que el nivel de escorrentía haya disminuido por el claro efecto de la disminución de la precipitación.

Para el presente estudio es importante de igual manera mencionar a Zhang (2001), el cual estudia de una manera más profunda la importancia de la vegetación en la curva de Budyko, afirmar que existe un sin número de características clave que afectan la tasa de evapotranspiración, motivo por el cual evidentemente estas ejercen desviaciones de la curva, es así que planteo una ecuación que permite determinar el efecto de la vegetación a largo plazo sobre la tasa de evapotranspiración adaptando lo ya planteado por Budyko.

$$\varepsilon = \frac{1+w\Phi}{1+w\Phi+\frac{1}{\phi}} \quad (3.6)$$

donde:

ε : representa la evapotranspiración actual sobre la precipitación (Índice evaporativo).

Φ : representa la evapotranspiración potencial sobre la precipitación (Índice de sequía).

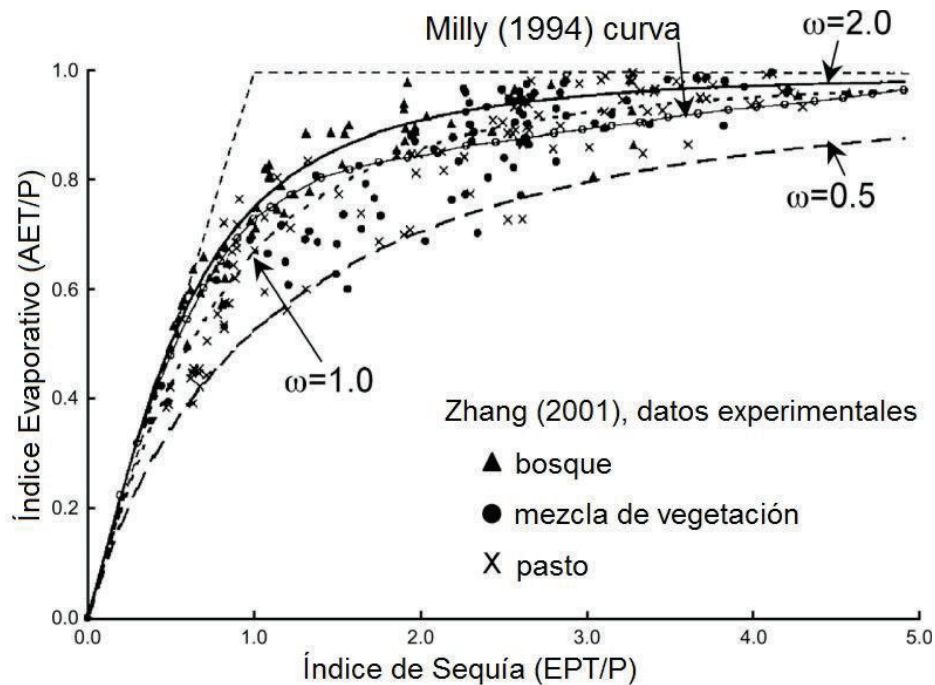
w : coeficiente de disponibilidad de agua para la planta.

Bajo este punto de vista esta hipótesis obtuvo buenos resultados para un w igual 0,5 o 2,0 se obtuvo un $r^2=0.90$ y $r^2=0.93$, respectivamente, esto a su vez determinó que las zonas boscosas poseen una mayor evapotranspiración y una menor escorrentía en comparación a suelos de pastos cortos, con lo cual se llegó a la

conclusión de que la evapotranspiración es mucho más sensible en condiciones climáticas intermedias.

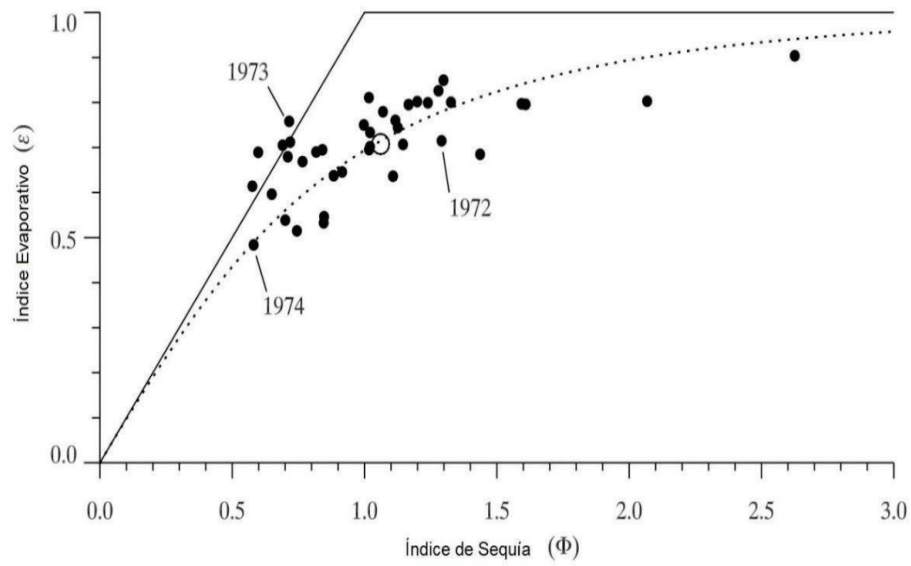
Finalmente, se puede apreciar en la Figura 3.11 la desviación inter anual de condiciones secas y lluviosas de diferentes años, donde, se ha considerado los años de 1972, 1973 y 1974; en cuyo caso el año 1972 muestra condiciones secas ($\bar{P}= 780$ [mm] y $\bar{Q}= 220$ [mm]), mientras que 1973 con ($\bar{P}= 1\,320$ [mm] y $\bar{Q}= 320$ [mm]) y ($\bar{P}= 1\,460$ [mm] y $\bar{Q}= 750$ [mm]) como las más lluviosas (Ecowise Service, 2007) (Ver Figuras 3.9 y 3.10).

FIGURA 3.10 COMPARACIÓN DE LA CURVA BUDYKO, CON RELACIÓN A OTROS TRABAJOS SIMILARES.



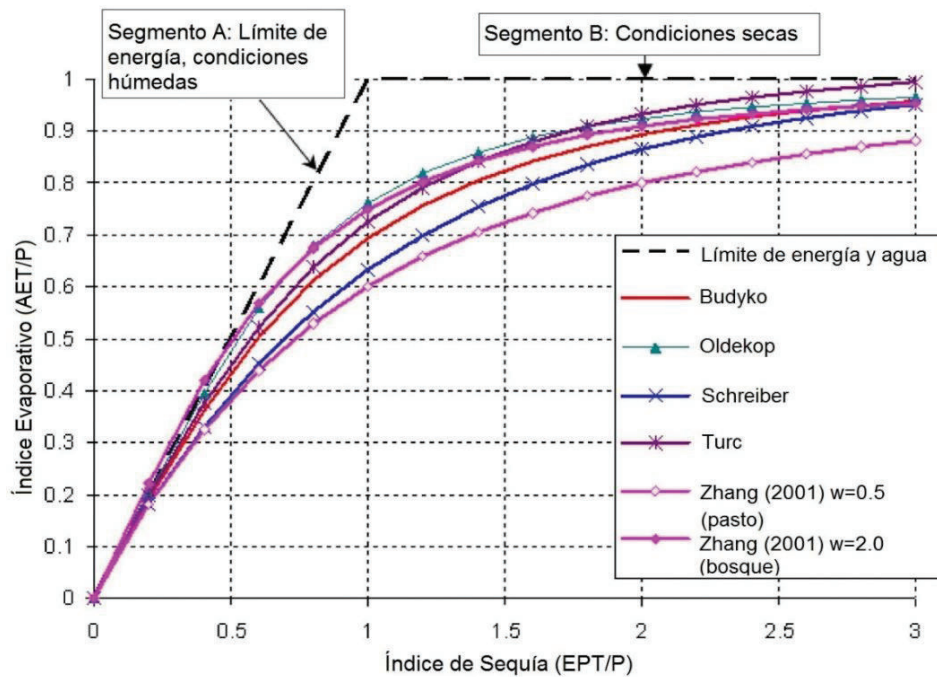
FUENTE: On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model (Donohue, 2007).

FIGURA 3.11 ANÁLISIS DE DESVIACIONES, DE ACUERDO A MILLY (1994) Y ZHANG (2001).



FUENTE: Ecowise Service (Australia, 2007)

FIGURA 3.12 BALANCE DE MASA, CON VALORES DE ÍNDICE EVAPORATIVO POR SOBRE EL LÍMITE DE ENERGÍA.



FUENTE: Ecowise Service (Australia, 2007)

3.8 RESERVORIO LINEAL

Considerado como un indicador busca conocer cuál es la respuesta hidrológica del caudal a la precipitación en la cuenca. Principalmente, tratando los flujos de agua predominantes: escorrentía superficial, flujo de agua entre la capa de suelo y el material parental o roca, además del flujo de agua en el suelo; los mismos que son representados como reservorios, cuya relación entre el almacenamiento y la descarga o caudal es lineal (Buytaert, 2004).

El concepto de reservorio lineal está basado en el análisis de las curvas de recesión de hidrogramas de drenaje, y ha sido usado ampliamente para la descripción de la respuesta de cuencas hidrográficas (Hornberger, 1991 y Dingman, 2002). Y que se sintetiza con la siguiente expresión:

$$Q = k \times S \quad (3.7)$$

$$\frac{dS}{dt} = -Q \quad (3.8)$$

donde:

- Q : caudal o descarga [$\frac{m^3}{s}$]
- S : cantidad de agua almacenada [m^3]
- T : tiempo [s]
- k : tasa constante [adimensional]

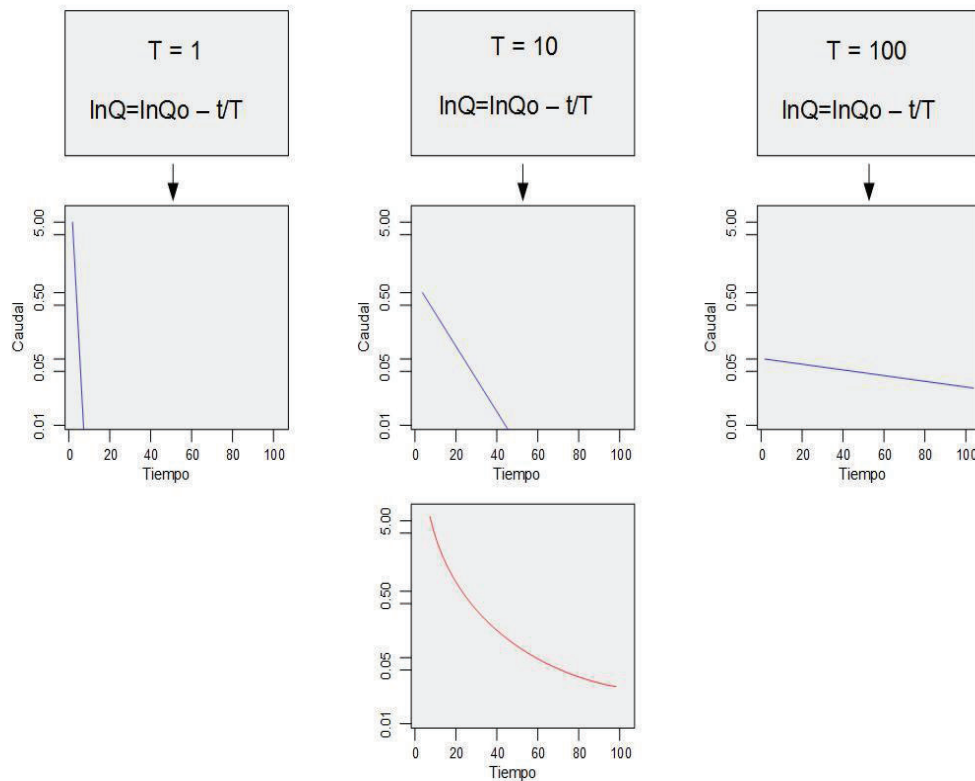
Con $k = \frac{1}{T}$, las ecuaciones anteriores pueden combinarse en:

$$Q = Q_0 \cdot \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (3.9)$$

con Q_0 es el caudal al $t = 0$. La ecuación 3.9 puede ser linealizada en un gráfico semi logarítmico:

$$\ln Q = \ln Q_0 \cdot \left[\frac{-t}{T}\right] \quad (3.10)$$

FIGURA 3.13 REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE RESERVOIRIO LINEAL.



FUENTE: The Use of the Linear Reservoir Concept to Quantify the Impact of Changes in Land Use on the Hydrology of Catchments in the Andes (Buytaert y De Bievre, 2004)

La tasa constante k , la cual es el inverso de la constante de tiempo T , es un índice de la velocidad a la cual un reservorio drena. Matemáticamente, T es el tiempo en el que el caudal Q cae a un valor de $0,37 \times Q_0$. Así, T indica la capacidad de amortiguamiento de un reservorio o la lentitud de liberación del agua. Por lo tanto, este es un buen estimador para la capacidad de amortiguamiento de un reservorio de almacenamiento (S) (Buytaert, 2004).

Las cuencas que pueden usar el modelo de reservorio lineal son muy pocas, debido a la diversidad de tipos de reservorios dentro de la cuenca, tales como almacenamiento de agua superficial, retención de agua en el suelo, intercepción por vegetación, lagos y agua subterránea. Todos tienen sus propias constantes de tiempo y algunos no cumplen completamente la hipótesis de linealidad, su

comportamiento en la recesión no es lineal, cuando se dibuja en escala semi logarítmica. Sin embargo, en pequeñas cuencas, algunos de estos reservorios son más importantes que otros (Buytaert, 2004).

Por lo tanto, el modelo combinado empleado asume que las cuencas pueden ser consideradas como una cadena paralela de reservorios con diferentes valores de T . Cuando estos valores difieren sustancialmente, las inferencias pueden ser despreciables, y el resultado de la regresión a la curva de recesión es una cadena temporal de descargas desde diferentes reservorios (Ver Figura 3.11). Estos sectores lineales pueden ser identificados en un gráfico semi logarítmico de las curvas de recesión, cada uno está representado por un reservorio teórico con una constante de tiempo particular T que puede ser determinada directamente desde la pendiente de la parte lineal (Buytaert, 2004).

3.9 CONTRIBUCIÓN POTENCIAL DE AGUA POR PARTE DE LOS GLACIARES, BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS

Este es un concepto a tener en cuenta dentro del modelo combinado, ya que permite entender cuando las aportaciones del glaciar cobran importancia.

Lo primero, que se debe considerar es que las condiciones climáticas han cambiado de manera alarmante en los últimos años de manera global y sin duda, también para los Andes ecuatorianos, es por ello que esta condición busca reflejar estos cambios dentro del modelo para poder ajustar aún más la disponibilidad de agua para la cuenca del Guayllabamba.

El modelo de contribución glaciar (Kaser, 2010), asume que la masa de glaciar está en equilibrio con las condiciones climáticas, lo que significa que al existir cambios en la precipitación, evapotranspiración y temperatura existirá o no aportes de agua por parte del glaciar.

Para entender este concepto se ha llevado a cabo un sin número de análisis en diferentes cuencas alrededor del mundo, con la finalidad de acuñar la hipótesis de que al existir una temperatura mayor a la de congelación ($T > 0^{\circ}\text{C}$), generalmente, bajo condiciones cálidas y secas, existe una zona de ablación, que se genera en la lengua de altitud más baja dentro de la zona de acumulación glaciar, lo que genera aportes de agua para la cuenca.

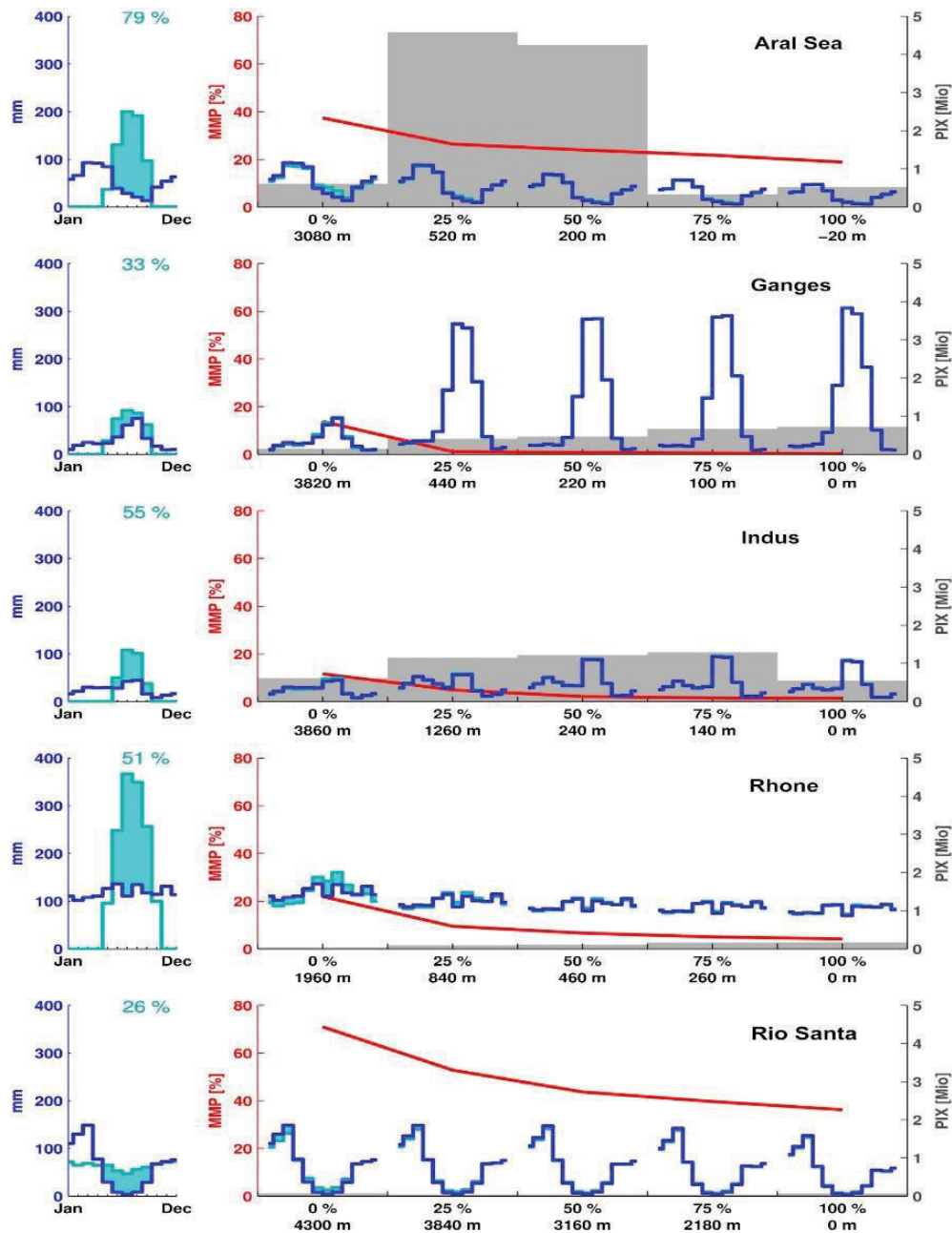
Los datos de entrada que toma el modelo combinado provienen de World Glacier Inventory (WGI, por sus siglas en inglés) para determinar la altura y elevación de las zonas de glaciar, mientras que la temperatura sobre la lengua o zona más baja del glaciar es obtenida del Climatic Research Unit (CRU, por sus siglas en inglés), es necesario además, un coeficiente de ajuste para la variación de temperatura con la altitud, el mismo que es aplicado asumiendo una tasa de $0,0065[\text{km}^{-1}]$ (GTOPO30), con ello se puede determinar la distribución de fusión o derretimiento mensual proporcional a la temperatura.

En el Figura 3.13 (izquierda) se puede apreciar cómo se lleva a cabo este proceso en el cual la línea azul representa a las zonas de acumulación glaciar a lo largo del año para diferentes cuencas alrededor del mundo, mientras que la línea celeste es la ablación mensual de dicha acumulación y donde se puede apreciar que la zona sombreada (celeste), entre las dos líneas representa la escorrentía glaciar que evidentemente es mayor en los meses más cálidos del año, además se puede observar el porcentaje de escurrimiento estacional derivado del retardo por fusión glaciar.

Para el mismo gráfico se considera el aporte glaciar y el retraso del mismo a lo largo de la cuenca y como este disminuye gradualmente desde las zonas altas (lengua del glaciar) hacia las zonas más bajas (estuario del río). Además, se incluye la relación entre el índice de impacto poblacional PIX con el aporte glaciar MMP, en el cual se considera que al existir un mayor número de individuos que aprovechan el agua de la cuenca estos a su vez serán los mayores consumidores del agua producto de la fusión glaciar, es así que la parte gris sombreada muestra una mayor demanda de agua en épocas de sequía, ya que como se ve se aprovecha incluso

todo lo aportado por el derretimiento glaciar como es el caso del Mar de Aral, Río Ganges o Indus, generando un desequilibrio dentro de la cuenca y un exceso de demanda (Kaser, 2010).

FIGURA 3.14 CONTRIBUCIÓN GLACIAR, PARA DIFERENTES CUENCAS HÍDRICAS.



FUENTE: Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes (Kaser, 2010)

3.10 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

La necesidad de agua para un cultivo se define como la cantidad de agua necesaria para satisfacer la pérdida de agua por evapotranspiración. En otras palabras, es la cantidad de agua necesaria para los diferentes cultivos, que les permita crecer de manera óptima. Cabe recalcar que al mencionar condiciones óptimas se refieren a: un cultivo uniforme, en crecimiento activo, sombreando completamente el suelo, libre de enfermedades y bajo condiciones del suelo favorables. Así, el cultivo puede alcanzar su potencial de producción completa en el entorno dado (FAO, 2006).

Por lo que, el agua necesaria para los cultivos depende principalmente de:

- **Clima:** en un clima soleado y cálido las necesidades hídricas incrementan día a día, a diferencia de un clima nublado y fresco.
- **Tipo de cultivo:** cultivos como el maíz o la caña de azúcar necesitan más agua que los cultivos como el mijo o sorgo.
- **Etapas de crecimiento de la cosecha:** los cultivos desarrollados totalmente demandan una mayor cantidad de agua a diferencia de los recién plantados.

Para relacionar cada una de estas características se debe recurrir a la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la cual a través del coeficiente de cultivo (K_c) asimila las condiciones del entorno a las cuales se encuentra sometido dicho cultivo. Ahora las características del cultivo deben ser relacionadas con la fracción de la precipitación que no ha escurrido y que llega a ocupar la capacidad de campo del suelo y que se denomina precipitación efectiva, dichos parámetros forman parte de la siguiente ecuación (FAO, 2006):

$$NH = ET_c - P_e \quad (3.11)$$

donde:

NH : necesidades hídricas de los cultivos $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$

ETc : Evapotranspiración de cultivo $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$

Pe : precipitación efectiva $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$

De lo expuesto en este capítulo, la base fundamental del modelo combinado se basa en la ecuación de Budyko, la misma que permite determinar una relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación, lo que permite conocer las condiciones que predominan en la cuenca dependiendo de si existe mayor energía o agua (FAO, 2006).

Por otro lado, se aclaran conceptos sobre el coeficiente de cultivo el mismo que se considera cambiante a lo largo del año, dependiendo de las condiciones ambientales como de la propia patología de la planta, lo que permitirá a su vez, calcular las necesidades hídricas de la misma .

Finalmente, se hace hincapié en el concepto de reservorio lineal, el cual, no es sino la distribución del agua a lo largo de la cuenca considerando etapas de retraso o almacenamiento durante un intervalo de tiempo determinado.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL MODELO

Este capítulo muestra el desarrollo metodológico y las etapas que involucran el modelo con la finalidad de entender sus procesos, los datos de entrada y los resultados, que permitan mostrar las alteraciones causadas por la sequía tanto en caudales como en las necesidades hídricas de los cultivos.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El presente modelo semi determinístico combina un balance hídrico con un modelo de fusión glaciario, el mismo que permite determinar la oferta y demanda para la cuenca del Río Guayllabamba, para una resolución espacial de 100 m y una temporal mensual.

Dentro de las entradas del modelo se cuenta con datos de precipitación mensual, obtenidos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), para el periodo de 1970 a 2010 y con estaciones que presentan más del 75% de disponibilidad de información, con lo cual se ha determinado el promedio mensual. Además, se ha considerado la precipitación mensual para el año más seco, que para la cuenca del Río Guayllabamba corresponde al año 2005. En lo referente a la calidad y falta de información, se ha llevado a cabo, un relleno de la misma a partir de la interpolación de los datos obtenidos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y la información de precipitación promedio mensual, disponible en el TRMM 25 (Tropical Rainfall Measuring Mission, NASA), por medio del procedimiento estadístico cokriging.

Mientras que, los datos de temperatura fueron obtenidos del WorldClim - Global Climate Data, de igual manera que para la precipitación se trabaja con datos promedio, tomando en cuenta además la información para el año más seco.

Una vez que se han depurado y rellenado los datos de entrada se ejecuta un algoritmo de programación, el cual permite determinar el balance hídrico y fusión glaciar (Modelo Combinado), a través del software GRASS GIS 6.4 Open Source, el mismo que genera diferentes capas como resultado de una serie de etapas, las cuales serán detalladas más adelante.

Por otro lado, una vez que se ha verificado la información, se ha planteado desarrollar dos escenarios, con la intención de ajustar los cambios que tiene el coeficiente de cultivo a lo largo del año y del tipo de cultivo de la zona para la época más seca, todo esto con la incorporación de una capa de cobertura vegetal más detallada.

- **Escenario 1**, se ha tomado la cobertura vegetal del proyecto satelital Globcover (Land cover) y se han ajustado coeficientes de acuerdo al tipo de cobertura vegetal, dichos coeficientes son uniformes para todo el año.
- **Escenario 2**, se ha tomado la capa de cobertura vegetal para la zona del Río Guayllabamba, desarrollada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca de Ecuador en colaboración con el Ministerio del Ambiente, para tener una mejor referencia tanto de áreas como de tipos de cultivos existentes en la zona para el año 2014, con lo cual se ha modificado el coeficiente de cultivo, tomando en cuenta, el tipo, época de siembra y fenología de la planta.

Como resultado de la ejecución del algoritmo se ha obtenido: zonas de acumulación, esorrentía y caudales, para estos últimos se ha procedido a calibrarlos a través de una ecuación empírica, obtenida por medio de una correlación llevada a cabo para 89 estaciones hidrológicas ubicadas en los andes y se ha incorporado la teoría de reservorio lineal.

En lo referente al modelo de fusión glaciar se ha trabajado con la información de Randolph Glacier Inventory, el cual es un suplemento de Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), el mismo que permite determinar los límites

de los diferentes glaciares que aportan dentro de la cuenca, además se ha considerado la elevación y topografía de la cuenca, de los datos que aporta Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Para la demanda se procedió a ubicar las zonas de concesión y puntos de captación (SENAGUA, 2013) para cada una de las subcuencas y se restó del caudal base modelado, tanto para el cauce principal (Río Guayllabamba) como para sus diferentes tributarios, para posteriormente, determinar el nivel de estrés hídrico (Milano, M., 2015) para cada subcuenca comparando ambos escenarios y la demanda en condiciones normales.

4.2 INFORMACIÓN DE ENTRADA

Gran parte de la información adquirida es de libre acceso y forma parte de portales de información científica y específica para cada campo de investigación. Dentro de los datos de entrada del modelo tenemos: precipitación, temperatura (máxima, media y mínima), radiación, topografía, cubierta vegetal y glaciares. Es así que a continuación se detalla cada parámetro y su respectiva procedencia.

4.2.1 PRECIPITACIÓN

Para la precipitación de la cuenca se han obtenido datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y que corresponden a una disponibilidad de información del 75%; que comprende un periodo de 40 años entre 1970 y 2010. Debido a la falta de datos, la calidad de los mismos o por no contar con estaciones meteorológicas en determinadas zonas de interés; se ha recurrido a información disponible en Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), obtenida por monitoreo satelital constante, la cual es una misión conjunta de la NASA y la Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA) para la investigación de precipitaciones y comportamiento climático mundial.

Ya que dicho satélite cuenta con sensores de medición tanto para lluvia como para relámpagos, ha sido posible obtener como resultado un conjunto de datos de lluvia

tropical mundial, relámpagos y el comportamiento de ciclones tropicales a lo largo de 17 años. Dada su trascendental importancia tiene múltiples aplicaciones operacionales tales como: el monitoreo de inundaciones, sequía y la predicción del tiempo (ver <http://trmm.gsfc.nasa.gov>). Oficialmente, la misión llegó a su fin el 15 de Abril de 2015, sin embargo, esto se debe a que se busca impulsar un nuevo proyecto dado que la vida útil del satélite ha terminado.

Una vez que se han obtenido los datos de precipitación tanto del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología como los de TRMM, se procede a realizar una interpolación conocida como cokriging y que es bastante común dentro de la Geoestadística y los Sistemas de Información Geográfica, la misma que consiste en estimar de mejor manera una variable a partir de dos muestras similares, si la muestra primaria en este caso la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología no cuenta con los datos suficientes para un periodo de tiempo determinado o a su vez no existe información referente a un área determinada se realiza una interpolación de dichos datos faltantes a partir de los una serie continua (ver https://www.gammadesign.com/GSWinHelp/kriging_and_cokriging/cokriging.htm), que para el caso es la que muestra el TRMM.

Finalmente, se pueden observar los datos de precipitación media mensual y la correspondiente para el año más seco en el anexo 2, así como su media mensual a nivel de subcuenca.

4.2.2 TEMPERATURA Y RADIACIÓN

En lo que tiene que ver a la información de temperatura (máxima, media y mínima) esta se obtuvo a través WorldClim - Global Climate Data, el cual es un conjunto de capas climáticas globales (rejillas climáticas) con una resolución espacial de aproximadamente 1 [km²]. Y en cuyo caso dichos datos pueden ser utilizados para el mapeo y modelado espacial (ver <http://www.worldclim.org>).

4.2.3 TOPOGRAFÍA

Dentro del modelo es importante trabajar con las características geomorfológicas del terreno ya que esto determina áreas de acumulación, pendientes y dirección de flujo, de acuerdo a la diferencia de cotas. Es por esto que el modelo incorpora una capa de elevación del terreno procedente de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el cual trabaja de forma similar al satélite antes mencionado (TRMM), pero que su misión es la de capturar imágenes que permitan generar capas raster altamente detalladas de la superficie de la Tierra utilizando una técnica llamada interferometría, la cual estudia patrones de interferencia causados por las señales de radar recibidas en dos antenas diferentes, dicho instrumento a su vez ha permitido generar capas raster topográficas de manera global y de alta resolución (ver <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

4.2.4 USO Y COBERTURA DEL SUELO

Para obtener la información referente a la cobertura y uso de suelo, se debe tener en cuenta que se han planteado dos escenarios, en los que, el escenario 1 implementa la capa de uso y cobertura del suelo del Globcover Project promovido por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), con la finalidad de levantar información pertinente para centros de investigación como: Food and Agriculture Organisation (FAO), United Nations Environment Programme (UNEP) entre otros. Y cuyo objetivo es desarrollar un servicio capaz de suministrar capas de cobertura terrestre (raster) usando observaciones de entrada desde el sensor MERIS 300 m a bordo de la misión del satélite ENVISAT y que pone a disposición capas de cobertura para periodos de enero a diciembre de 2010, esto como última actualización (ver http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php).

Mientras que para el escenario 2 se ha propuesto utilizar la última actualización del mapa de uso y cobertura de suelo propuesto por el Ministerio del Ambiente (MAE) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador (MAGAP) para el año 2014, el cual su vez cuenta con un mayor detalle de las zonas agrícolas, ecosistemas de páramo y bosque natural; lo que ha permitido tener una

mejor aproximación y ajuste de los coeficientes de cultivo (ver http://sinagap.agricultura.gob.ec/mapa_de_uso/index.php/en/uso-y-cobertura-nacional-2).

4.2.5 GLACIARES

Para determinar la contribución glaciar es necesario conocer las zonas de glaciar y los contornos de las mismas, además de la influencia que estos llegan a tener sobre los diferentes ríos de la cuenca, por dicho motivo se ha tomado en consideración el inventario mundial de contornos glaciares Randolph Glacier (RGI 5.0), cuyas mediciones son complementarias a las realizadas en campo y que se preocupan por monitorear los cambios en las zonas de glaciar debido al cambio climático, todo esto por medio, de instrumentos satelitales ópticos, tales como ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). De este análisis se ha logrado obtener contornos glaciares digitales y metadatos relacionados, líneas de nieve, líneas de flujo, centro de datos hipsométricos, campos de velocidad de superficie, y las referencias bibliográficas. Los resultados de los análisis realizados por los Centros Regionales son enviados para el archivo de National Snow and Ice Data Center (NSIDC) (ver <http://www.glims.org>).

4.2.6 CONCESIONES

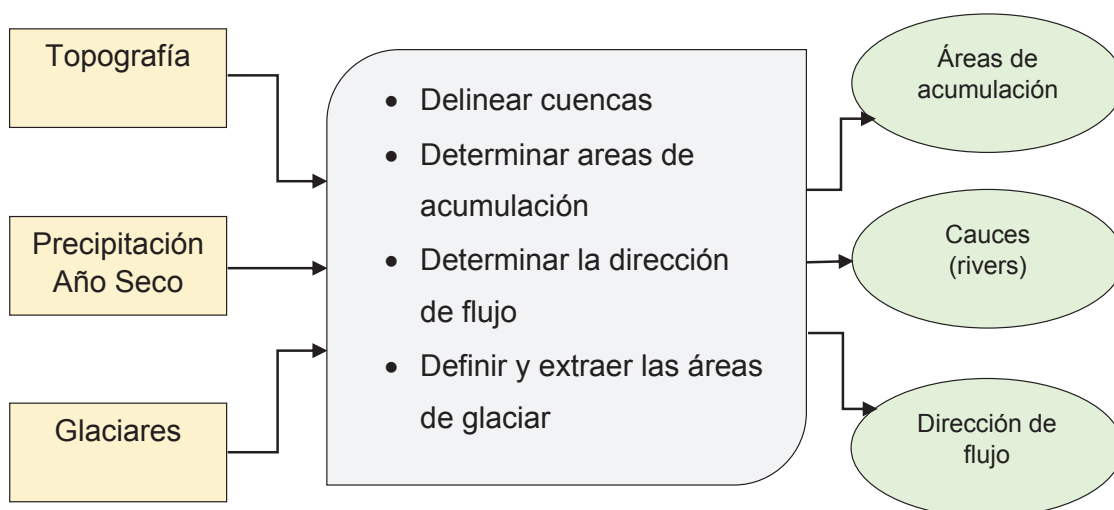
Originalmente el modelo no cuenta con un módulo para determinar la demanda, por lo cual se ha incorporado una capa adicional de concesiones, la misma que considera los diferentes usos a lo largo de la cuenca y para las provincias que la conforman: Pichincha, Napo e Imbabura. Esta información fue adquirida de la base de datos de la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA, 2010) y del Plan de Riego y Drenaje de la Provincia de Pichincha 2014-2029 y elaborado por Dirección de Gestión de Riego Provincial del Gobierno Autónomo de Pichincha.

4.3 ETAPAS DE DESARROLLO

Dentro del desarrollo del modelo se han identificado 5 etapas o procesos importantes los mismos que trabajan dentro del entorno de GRASS GIS 6.4 Open Source y que funcionan como una herramienta específica denominada Algebra de Mapas dentro de los Sistemas de Información Geográfica (Neteler M., Open Source GRASS GIS Approach, 2008). Dicha herramienta permite ejecutar cálculos entre capas (raster), las cuales contienen información por celdas que para el presente caso corresponde a una resolución de 100 m. Con esto se pueden incluir ecuaciones complejas pero que ejecuten cálculos entre los valores de cada una de las celdas correspondientes a cada una de las capas involucradas en el proceso, además de contar con comandos y funciones propias de este entorno que permiten modelar varios aspectos relacionados con el análisis hidrológico.

4.3.1 ETAPA 1: GENERACIÓN DE CAPAS

Esta etapa busca generar capas tales como: áreas de acumulación, delineación de cuencas hidrográficas, zonas de drenaje y cauces principales. Para lo cual, se trabaja con las capas de entrada como: topografía, glaciares y precipitación del año seco; y se busca determinar principalmente, las zonas bajas de la cuenca y en las cuales exista acumulación o flujos de drenaje y la dirección de los mismos. Para realizar dicho procedimiento se deben identificar las áreas y el volumen acumulado en las mismas, mientras que por diferencia de cotas (altitud) se puede determinar la dirección de los flujos hacia las partes bajas de la cuenca que posteriormente, serán direccionados por el cauce principal. A continuación se muestra una descripción del proceso para esta etapa (Ver Figura 4.14).

FIGURA 4.15 ETAPA 1: GENERACIÓN DE CAPAS.

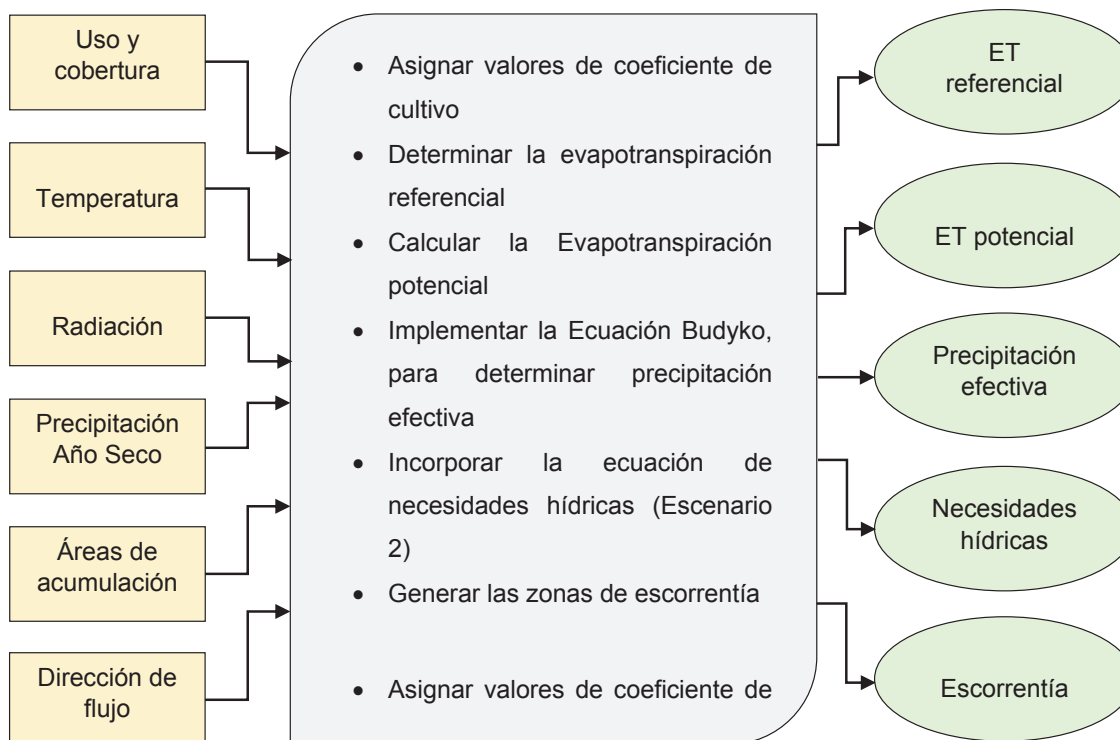
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.3.2 ETAPA 2: IMPLEMENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO BUDYKO

Para poder trabajar con la ecuación de Budyko, es necesario realizar un procedimiento que se detalla a continuación:

- Ajustar los valores de coeficiente de cultivo, asignados mediante algoritmo a la capa de uso y cobertura, para la capa Globocover (Escenario 1) y capa MAE – MAGAP (Escenario 2).
- Calcular la evapotranspiración potencial, para lo cual es necesario incorporar la ecuación de Hargreaves.
- Implementar la ecuación de Budyko, la misma que desarrolla el balance hídrico, sin considerar en este punto la contribución glaciar.

Finalmente, se incorpora la ecuación de necesidades hídricas para los cultivos (FAO, 2006) en el escenario 2, caso contrario se procede directamente a determinar el caudal de escurrimiento para cada una de las cuencas hidrográficas (Ver Figura 4.15).

FIGURA 4.16 ETAPA 2: IMPLEMENTACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.3.3 ETAPA 3: CALIBRACIÓN DE RESERVORIO LINEAL Y CAUDALES

Una vez que se ha desarrollado el balance hídrico y que como resultado se ha obtenido la escorrentía y zonas de acumulación de la misma, se procede a incorporar el concepto de reservorio lineal, el cual como ya se ha manifestado es la relación que existe entre la tasa de almacenamiento y escurrimiento generado en toda la cuenca para un periodo determinado y en donde existe un retraso del caudal de manera logarítmica, este procedimiento toma en consideración para su calibración una ecuación empírica que ha sido desarrollada a partir de datos proporcionados por 89 estaciones hidrológicas ubicadas en ríos de altura en los Andes Tropicales y que son una medida que permite determinar y ajustar este denominado “delay” (retraso) generado por las diferentes zonas de acumulación a lo largo de la cuenca, cabe indicar que T_{delay} está en función de la topografía, ya que las cuencas de mayor altura tiende a ser más pequeñas y el “delay” tiende a

ser más bajo. La ecuación empírica que relaciona dichos parámetros es la siguiente:

$$T_{\text{delay}} = [2,2 - 2,67e^{-4} \times \text{con_SAM}] \times \text{rivers} \quad (4.1)$$

donde;

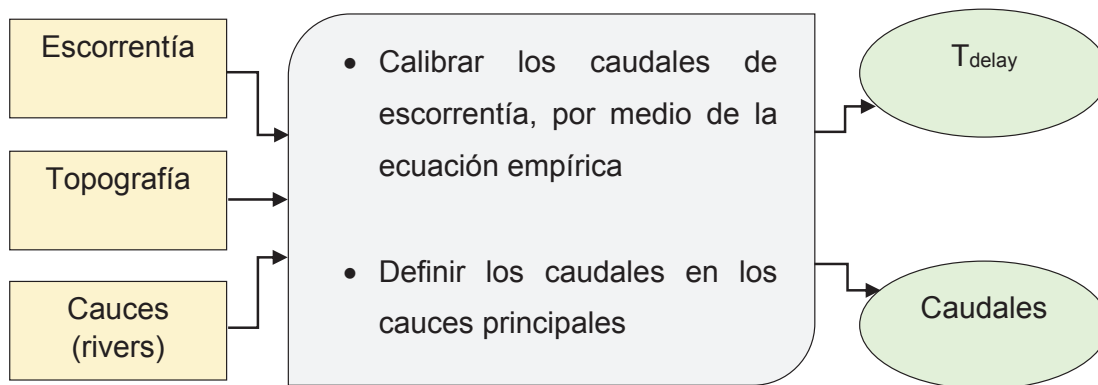
T_{delay} : tasa de distribución de la escorrentía para un tiempo determinado

con_Sam : topografía de la cuenca

rivers : zonas de mayor acumulación y dirección de flujo

Con esto se busca determinar la tasa de escurrimiento mensual dentro de la cuenca tomando en consideración de una manera teórica el almacenamiento subterráneo que se pueda dar en la cuenca (Ver Figura 4.16).

FIGURA 4.17 ETAPA 3: CALIBRACIÓN DE RESERVORIO LINEAL Y CAUDALES.



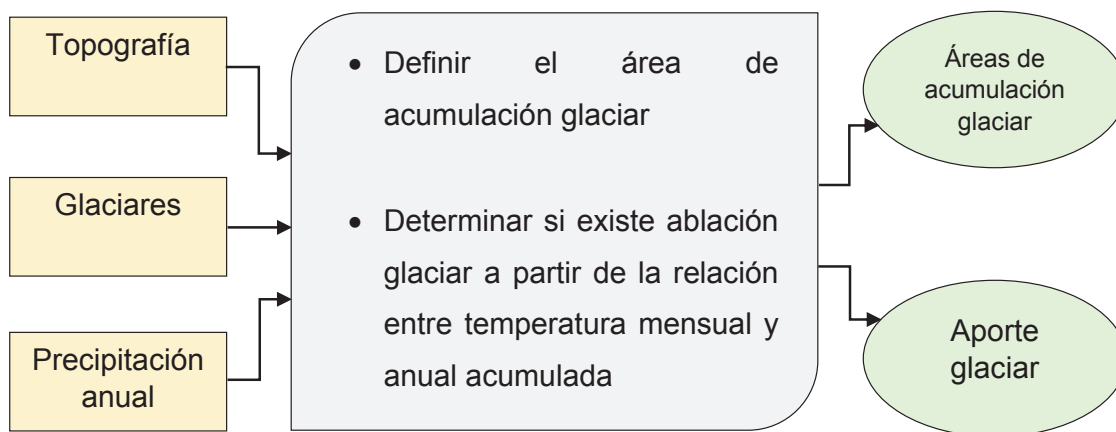
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.3.4 ETAPA 4: CONTRIBUCIÓN GLACIAR

Con la etapa anterior se define el caudal natural medio procedente de un régimen de precipitación para el año más seco. Sin embargo, no se ha considerado en el mismo el aporte glaciar para la cuenca, ya que lo que se busca, es determinar la cantidad y cuál es el incremento del mismo bajo condiciones de sequía. Es por esto que el análisis de contribución glaciar, se lo ejecuta en esta etapa y se incorpora el

modelo de contribución de Kaser (2010), el mismo que trabaja en condiciones de equilibrio climático y define una zona de ablación para el glaciar, dichas condiciones de equilibrio son: si la temperatura mensual en relación a la temperatura anual acumulada es mayor a cero, existe ablación en la zona ya definida, con el consecuente aporte dentro de la cuenca, mientras que, si la temperatura es menor o igual a cero dicho aporte es restringido, cabe considerar además que la tasa de sublimación para nuestro país es de 0,04 esto en base a estudios empíricos y mediciones que se pueden encontrar en el inventario de Randolph Glacier (RGI 5.0) para Ecuador (Ver Figura 4.17).

FIGURA 4.18 ETAPA 4: CONTRIBUCIÓN GLACIAR.



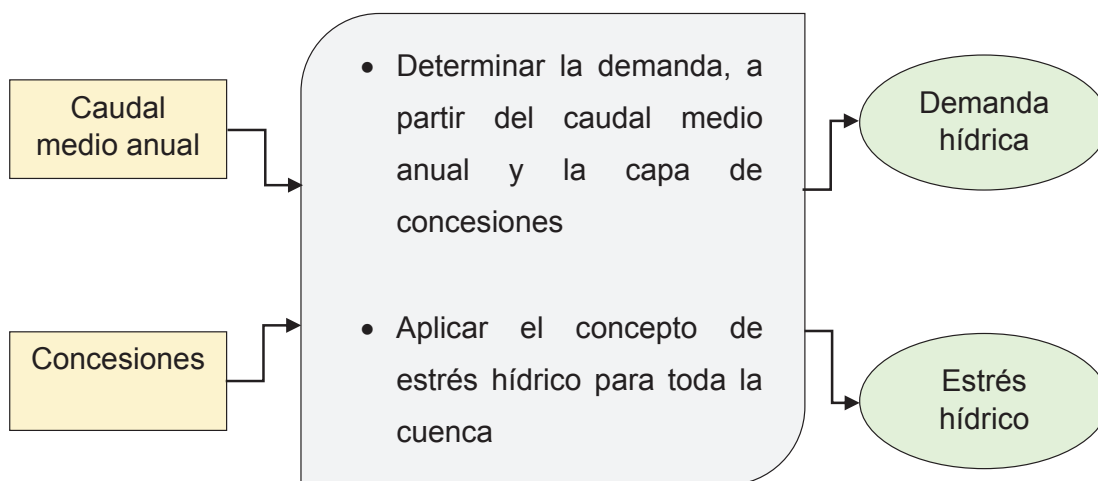
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.3.5 ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO

Al contar con el caudal base modelado y la contribución glaciar, el siguiente paso es determinar la demanda para la cuenca del río Guayllabamba, para lo cual se ha implementado una capa de concesiones.

Para dicho efecto se ha llevado a cabo una resta, a partir del caudal natural medio en los puntos y tramos de la cuenca donde se lo requiera, dicho procedimiento se lo ha realizado para ambos escenarios, para posteriormente determinar el estrés hídrico de la cuenca en base al índice de Estrés Hídrico, el mismo que está en función de los requerimientos y la esorrentía de cada subcuenca (Ver Figura 4.18).

FIGURA 4.19 ETAPA 5: DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.4. PRUEBAS DEL MODELO

Una vez que se han estudiado las características y la metodología utilizada en este modelo, se ha llevado a cabo 3 pruebas, las cuales muestran cambios ligeros tanto en su algoritmo, como en la información que se le ha suministrado.

4.4.1 PRUEBA 1: ERROR DEL ALGORITMO QUE ASIGNA EL COEFICIENTE DE CULTIVO

Al ejecutar el modelo, con los datos proporcionados y el algoritmo de origen se pudo establecer que existe un error dentro de la programación de dicho algoritmo, ya que en la etapa 2 (Implementación del Balance Hídrico de Budyko), es necesario ingresar la capa proporcionada por Globcover Project, la cual contiene los diferentes tipos de cultivo y cobertura vegetal de la región, pero dicha información esta codificada como se puede observar en la Tabla 4.20

Al momento de ejecutar esta etapa el algoritmo debe generar una capa de salida del coeficiente de cultivo (K_c), asignando los valores codificados en Globcover, es decir, si cultivos en seco es a 14, en K_c corresponde a 1,20. Sin embargo, esto

no se cumple más que para el primer término programado, lo cual genera valores sin sentido de evapotranspiración potencial y del resto de salidas. Por lo cual, fue infructuoso continuar con la determinación de resultados en este punto.

4.4.2 PRUEBA 2: AJUSTE DEL ALGORITMO Y GENERACIÓN DE RESULTADOS (ESCENARIO 1)

Una vez identificado el error se consultó bibliografía referente a la programación en GRASS GIS Open Source y se pidió consulta al Ing. Marlon Calispa, ya que cuenta con experiencia en el campo de los Sistemas de Información Geográfica, el cual propuso reajustar el algoritmo en esta etapa, añadiendo un “*if ()*” anidado (término utilizado en Programación), el cual funciona como una cadena de órdenes que permiten realizar el cambio o sustitución del término en cuestión. Lo que significa, que al momento de asignar el valor de 1,20 a cultivos en seco en la capa Kc la función ejecuta esa orden. A partir de ese ajuste se ha procedido a comprobar el resto de resultados y salidas del modelo.

Es así que se plantea, a esta segunda prueba como el Escenario 1, el cual permite representar de mejor manera las condiciones a modelar, permitiendo dar ciertas pistas de lo que ocurre con la oferta a lo largo de la cuenca, considerando además que el coeficiente de cultivo (Kc) para este escenario es constante durante todo el año.

TABLA 4.20 CODIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA CAPA GLOBCOVER PROJECT.

Cobertura	Código	Coefficiente de Cultivo (Kc)
Cultivos en secano	14	1,20
Mosaico de cultivos	20	1,10
Mosaico de vegetación	30	1,20
Bosque siempreverde latifoliado semideciduo	40	1,00
Bosque caducifolio de hoja ancha abierta	50	1,00
Bosque caducifolio de hoja ancha cerrada	60	1,00
Matorral	110	1,00
Pastizal	120	1,00
Matorral cerrado	130	0,80
Pastizal cerrado	140	0,90
Escasa vegetación	150	0,80
Bosque latifoliado semi húmedo	160	1,20
Bosque latifoliado siempre húmedo	170	1,20
Vegetación semi húmeda	180	1,20
Área artificial	190	0,70
Área erosionada	200	0,70
Cuerpos de agua	210	1,05
Glaciar	220	0,70

FUENTE: Globcover Project, Agencia Espacial Europea, 2010.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

4.4.3 PRUEBA 3: AJUSTE DEL COEFICIENTE DE CULTIVO Y GENERACIÓN DE RESULTADOS (ESCENARIO 2)

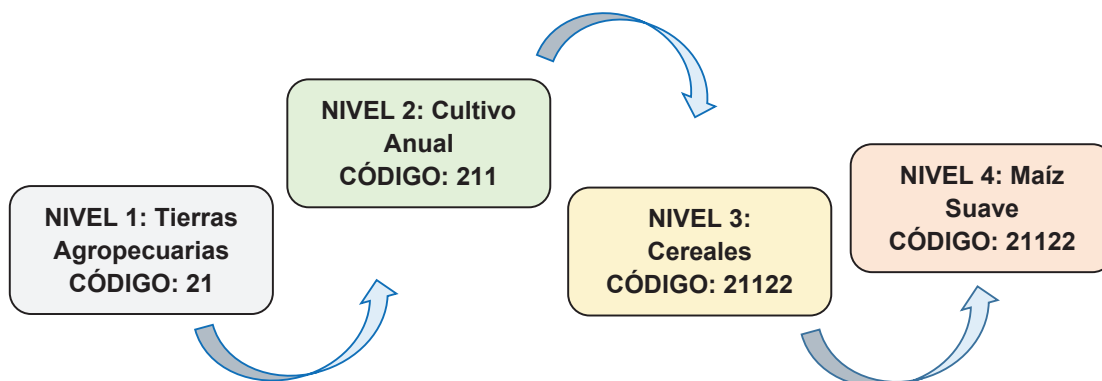
Para la presente prueba, a la cual se ha denominado Escenario 2, se ha realizado un procedimiento que busca afinar de mejor manera lo modelado anteriormente. Al incluir la capa de uso y cobertura del suelo realizada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, en colaboración con el Ministerio del Ambiente de

Ecuador, y a su vez diferenciar el coeficiente de cultivo en cada una de las etapas de desarrollo de los principales cultivos de la cuenca del río Guayllabamba.

La capa de uso y cobertura del suelo está disponible en la siguiente página web, http://sinagap.agricultura.gob.ec/mapa_de_uso/index.php/en/uso-y-cobertura-nacional-2, la misma que corresponde al Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, y en donde se puede encontrar la información necesaria (metadato) de este proyecto, por otro lado el ajuste de los coeficientes de cultivo y siembra fueron consultados en las Guías de Riego y Drenaje (FAO, 2006), los cuales si bien no reflejan las condiciones climáticas de la zona de estudio, acoplan perfectamente los cambios bajo condiciones secas, es así que se ha realizado el presente procedimiento para llevar a cabo dichos cambios:

- Obtener la capa de uso y cobertura del suelo (MAE – MAGAP, 2014), cuya escala es de 1: 100000 y que acopla perfectamente con la escala de estudio, dicha capa a su vez se encuentra dividida en diferentes grupos, que contienen subgrupos de información, además de codificación de los mismos, cabe indicar que el formato es (.shp).
- Dado que el modelo, como tal ejecuta información de capas raster, es necesario que la capa de uso y cobertura (cobertura.shp) sea transformada, para lo cual, se ha utilizado la herramienta Rasterizar del programa QGIS 2.10, la cual permite convertir los datos de formato shape (.shp) a raster (.tiff), para dicho proceso se ha tomado en consideración el nivel 4 de información para poder apreciar de mejor manera el tipo de cobertura de la zona (Ver Figura 4.19).

FIGURA 4.20 GRUPOS Y SUBGRUPOS PARA LA CAPA DE USO Y COBERTURA MAGAP - MAE.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

- Al tener la capa raster (cobertura.tiff) es necesario reclasificar dicha información. Motivo por el cual, se ha trabajado con el mismo código de la capa shape, además se incluye el coeficiente de cultivo ajustado al desarrollo de la planta, época de siembra y condiciones climáticas secas (FAO, 2006).
- Una vez reclasificada la capa, esta debe ser cargada en el árbol de archivos de GRASS GIS Open Source, donde se procederá a ejecutar el algoritmo, al cual ya se le han realizado los cambios pertinentes a la Etapa 2.

Al haber ejecutado las pruebas 1 y 2 respectivamente, se obtienen datos de: evapotranspiración potencial, escorrentía, contribución glaciar, precipitación efectiva y caudales mensuales, lo que representa la oferta para la cuenca del río Guayllabamba. Sin embargo, el modelo no permite identificar la demanda, para lo cual se ha procedido a generar un proceso anexo, que para el caso se ha denominado Etapa 5. Dicha etapa relaciona los resultados de caudales obtenidos anualmente, con la demanda dentro de la cuenca, representada a través de captaciones y concesiones a lo largo de la cuenca (Ver Tabla 4.21).

TABLA 4.21 CODIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA PARA MAGAP – MAE (2014).

Cobertura	Código	Coeficiente de Cultivo (Kc)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Cereales	211/261	0,30	0,44	0,80	1,08	1,15	0,98	0,60	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Leguminosas	212	0,50	0,73	1,05	1,15	1,14	1,11	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	0,50
Raíces y Tubérculos	213	0,50	0,78	1,05	0,78	0,68	0,95	1,00	0,70	0,70	0,70	0,75	0,93	1,05
Hortalizas	214/263	0,93	1,03	0,74	0,76	0,93	1,03	0,74	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,76
Frutales	221/231/265	0,69	0,80	0,85	0,85	0,85	0,85	0,83	0,78	0,70	0,70	0,70	0,70	0,61
Ciclo Corto	262	1,00	0,85	0,70	0,73	0,88	0,85	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,73	0,88
Flores	264	0,58	0,70	0,70	0,48	0,88	0,98	0,58	0,70	0,70	0,70	0,48	0,88	0,98
Indiferenciado	267	0,60	0,75	1,03	1,15	1,15	0,98	0,70	0,70	0,70	0,70	0,88	0,98	1,05
Papa	2131	0,83	1,15	1,08	0,88	0,50	0,83	1,15	1,08	0,88	0,70	0,70	0,70	0,50
Maíz Duro	21121	0,70	0,90	1,14	1,20	0,90	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,90	1,14
Maíz Suave	21122	1,10	0,70	0,70	0,78	1,00	1,15	1,10	0,70	0,70	0,70	0,78	1,00	1,15

FUENTE: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2014) y FAO, 2006.

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Nota: El ajuste del coeficiente de cultivo se lo realizó para los cultivos de la cuenca del río Guayllabamba. Sin embargo, para el resto de coberturas se mantuvo el coeficiente especificado anteriormente (Tabla 4.20), ya que no existen cambios a nivel mensual de muchas de ellas.

4.4.3.1 DEMANDA HÍDRICA

De igual manera que con la capa de uso y cobertura, se obtuvo información de la Secretaría Nacional del Agua, la misma que muestra a detalle las concesiones y captaciones de todo el país (SENAGUA, 2013), por lo que fue necesario filtrar la información para las provincias de Pichincha e Imbabura, donde se asienta la mayor parte de la cuenca. La información se hallaba en formato shape (.shp) y contiene diferentes caudales y usos, por lo que se ha desagregado dicha información para usos como: agua potable, uso doméstico, riego e hidroeléctricas.

Una vez depurada la información se convirtió de formato vectorial (.shp) a una capa raster. Seguidamente, fue necesario ejecutar una vez más la herramienta Algebra de Mapas de GRASS GIS Open Source, con la finalidad de restar el caudal de captación medio mensual del caudal medio mensual modelado (sequía) para cada una de las subcuencas, tanto para el Escenario 1 como para el Escenario 2. A su vez se incluyó el caudal medio mensual normal para tener un mejor acercamiento de la demanda dentro de la cuenca bajo condiciones secas.

Con esta información y para representar de mejor manera la demanda, y la alteración que se da bajo condiciones de sequía, dentro de la cuenca se introdujo el fundamento de Índice de Estrés Hídrico.

Al existir diferentes indicadores de escasez o estrés hídrico. Uno de los más usados, ya que considera los diferentes sectores de demanda dentro de la cuenca, es el elaborado por Shiklomanov (1991). Este indicador resulta de dividir la demanda hídrica dentro de la cuenca para la oferta disponible de agua.

$$WSI = \frac{\text{Necesidades hídricas totales}}{\text{Oferta disponible de agua}} \times 100\% \quad (4.2)$$

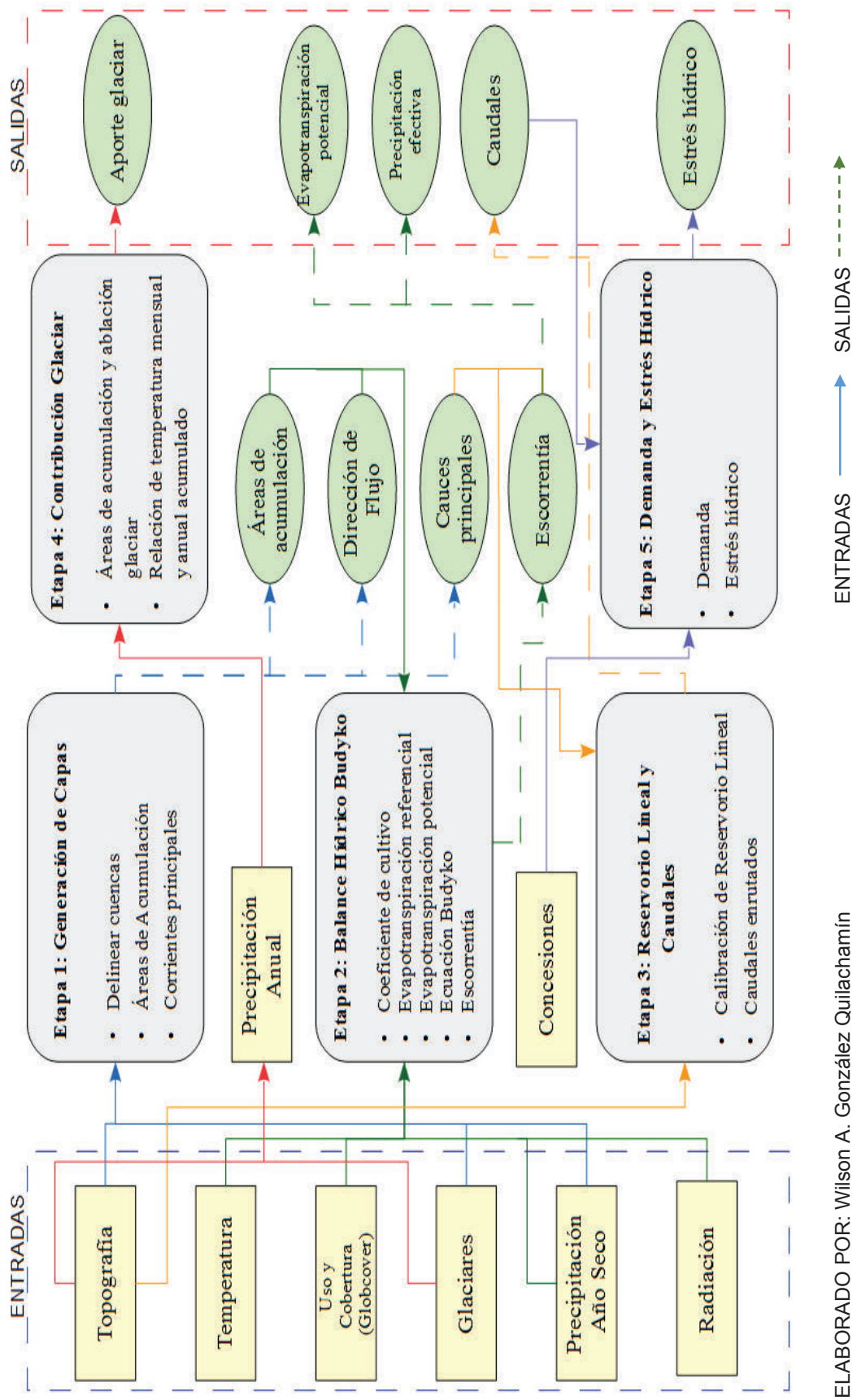
Donde se considera el caudal de descarga para cada una de las subcuencas de estudio y se asigna una ponderación, como la que se puede observar a continuación.

- Si $WSI > 80\%$, zona de estudio con un estrés severo,
- Si $40\% < WSI < 80\%$, zona de estudio con un alto estrés hídrico,
- Si $20\% < WSI < 40\%$, zona de estudio con un estrés hídrico moderado,
- Si $WSI < 20\%$, la zona de estudio no presenta un estrés hídrico.

Este índice expresa la intensidad de las presiones antropogénicas sobre los recursos hídricos, cuanto mayor es el índice, mayor es la presión. Lo que significa, que existe un estado de estrés hídrico en el momento en el cual, es requerido un consumo adicional, el mismo que no puede ser satisfecho por la oferta de agua en los ríos de la cuenca en ese momento. Para hablar de estrés hídrico dentro de este estudio es necesario conocer los cambios de la oferta y demanda de agua, sujetos a factores climáticos y antropogénicos. Con el fin de explorar los impactos de estos cambios e identificar qué factores tienen mayor influencia (Milano, M., 2015).

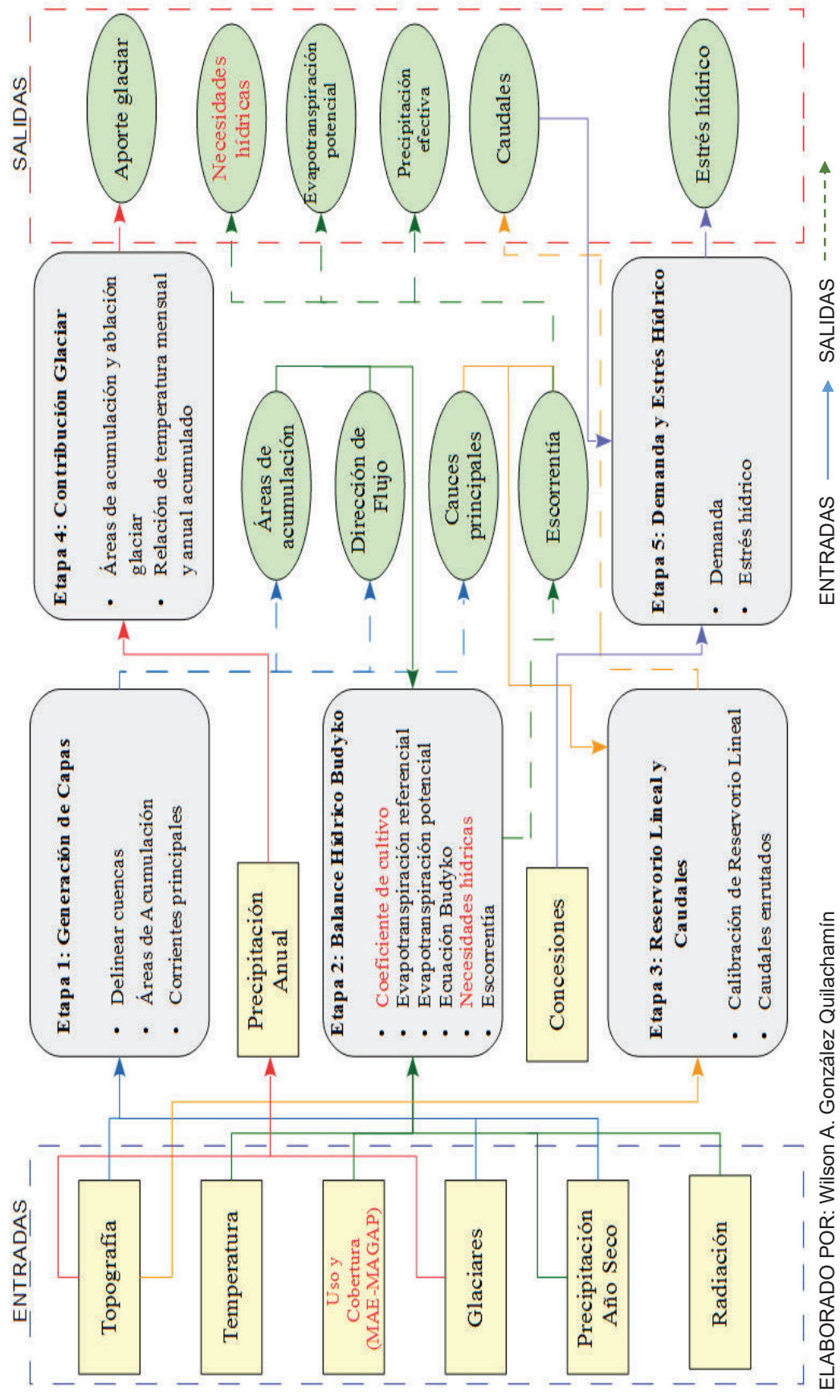
En resumen, el modelo está basado en cinco etapas de desarrollo cada una con procesos que ejecutan comandos en GRASS GIS sustentados en la base teórica anteriormente revisada y que permiten generar dos escenarios que involucran diferentes capas de cobertura vegetal, principalmente, en el escenario 2, donde existe un mejor detalle de los cultivos y en el cual se han calibrado diferentes tipos de coeficientes, con la finalidad de determinar las necesidades hídricas de cada uno de ellos

FIGURA 4.21 PROCESO DE MODELADO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA - ESCENARIO 1.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FIGURA 4.22 PROCESO DE MODELADO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA - ESCENARIO 2.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quillachamín

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Para este capítulo se busca interpretar y verificar los datos obtenidos para los escenarios propuestos de evapotranspiración de cultivo, precipitación efectiva, necesidades hídricas, caudales de escorrentía y contribución glaciar. Además de determinar la demanda a partir de los datos de captaciones y concesiones dentro de la cuenca del río Guayllabamba.

5.1 ESCENARIO 1

Los resultados obtenidos para este escenario, son productos del ajuste algorítmico realizado al código del modelo en la parte de coeficiente de cultivo, de dicho ajuste se han podido obtener los siguientes resultados.

5.1.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO

Dentro de este parámetro se ha determinado que las mayores zonas que presentan evapotranspiración están ubicadas en la subcuenca del Guayllabamba Alto (Ver Figura 5.22), esto debido a una cubierta de menor tamaño, en donde predomina la evaporación del tipo de suelo con una media de $140 \left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$, seguida de la zona boscosa y vegetación arbustiva con $120 \left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$, finalmente, se puede apreciar claramente una franja en la zona oriental de la cuenca, la cual corresponde a áreas de páramo de zonas como el Volcán Antisana, Papallacta y Oyacachi que presentan una evapotranspiración entre 40 a $50 \left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$ con un incremento de la misma en los meses más secos como lo son: Junio, Julio y Agosto.

Por otro lado, se ha determinado el nivel de evapotranspiración por subcuencas, lo cual ha dado como resultado:

- La menor evapotranspiración media mensual, corresponde a la subcuenca del Río Pita con un intervalo entre 80 a 85 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para los meses más lluviosos y con un intervalo de 65 a 70 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para los meses más secos.
- La evapotranspiración media mensual, que registra los valores más elevados es la subcuenca de la Quebrada San Andrés con intervalos entre 115 a 125 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ esto para los meses con mayor precipitación, mientras que para los meses más secos tenemos intervalos entre 111 a 116 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$.

5.1.2 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva, es la fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas, por lo cual, tiene relación con la evapotranspiración, e influye en el balance hídrico del sistema. Existe una particularidad en lo referente a este parámetro, ya que se puede observar que existen dos zonas claramente diferenciadas (Ver Figura 5.23). Para la época lluviosa, la zona de bosque natural y vegetación boscosa (izquierda) muestra una mayor precipitación efectiva, la cual fluctúa entre 3 a 3,5 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, en tanto que para condiciones secas, toma relevancia la zona de páramo (derecha) la cual alcanza valores entre 3,5 a 4,5 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$.

De igual manera se ha determinado la precipitación efectiva media para cada una de las subcuencas que conforman la cuenca del río Guayllabamba, obteniendo como resultado:

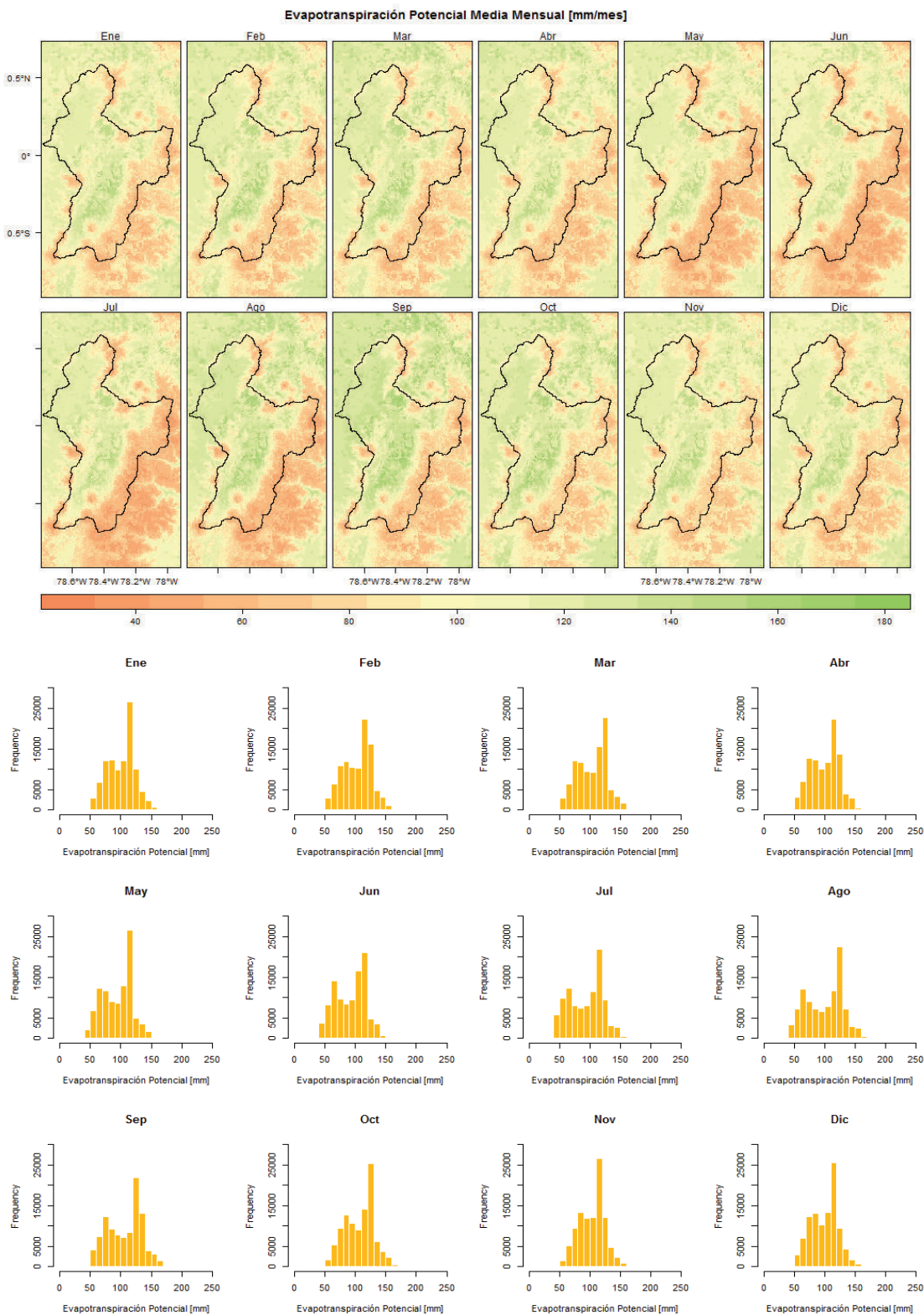
- La subcuenca con menor precipitación efectiva media mensual y menor variabilidad corresponden a Guayllabamba Alto con valores en condiciones húmedas de 1,35 a 1,45 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, en tanto que para condiciones secas disminuye entre 0,50 a 0,65 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$. Por otro lado, la subcuenca con mayor variabilidad debido a su tipo de cobertura y aridez es Guayllabamba Medio con valores de 2,20 a 2,25 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ (lluvioso) y de 0,30 a 0,40 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ (seco).

- En relación a la subcuenca que no presenta mayor variabilidad de precipitación efectiva media, debido a contar con una mayor superficie de páramo, corresponde a la subcuenca del Río Pita con intervalos de 1,60 a $1,75 \left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$ en época de lluvia y de 0,75 a $0,95 \left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$ en sequía.

Es importante mencionar que existe una mayor variabilidad y dispersión en los valores correspondientes a vegetación arbustiva y herbácea en zonas áridas, ya que presentan valores bastante altos en condiciones húmedas y bastante bajos en condiciones secas.

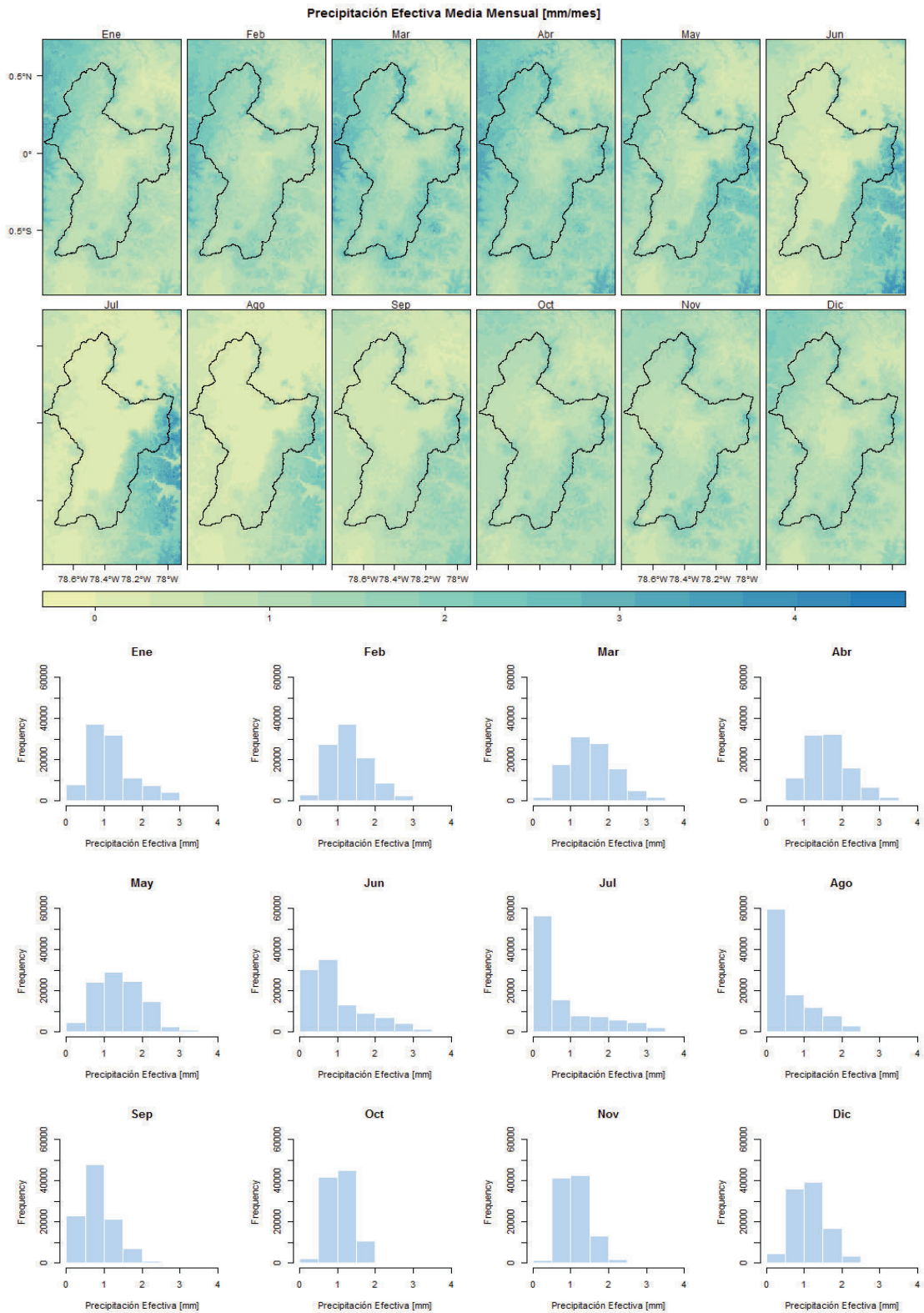
Dentro de este análisis se ha podido constatar, además que el páramo muestra condiciones más equilibradas, y que a su vez muestra un mejor y mayor almacenamiento de agua, lo que permite regular el recurso, principalmente en épocas de sequía.

FIGURA 5.23 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 1.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FIGURA 5.24 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 1.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

5.1.3 CAUDALES Y CONTRIBUCIÓN GLACIAR

Para el presente análisis se ha modelado el caudal de oferta natural a lo largo de la cuenca del río Guayllabamba, con su respectivo aporte glaciar, para cada una de las subcuencas, además de incluir las cuencas orientales, de donde proviene el aporte de agua potable para el D.M. Quito.

En la Tabla 5.22, se puede apreciar dos épocas del año bastante marcadas (seca y lluviosa), en donde los mayores caudales se presentan en los meses de abril y mayo, mientras que los menores están presentes en los meses de agosto y septiembre. De dicho análisis se desprende además, que al recoger la escorrentía de toda la cuenca y ser el punto de cierre de la misma la subcuenca Guayllabamba Medio presenta valores de $5 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ (lluvioso) y $3,30 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ (seco). Por otro lado, la contribución glaciar es mayor en el mes de octubre y se da en las subcuencas del río Pita, río Pisque y Papallacta, ya que cuentan con zonas de ablación glaciar.

5.1.4 DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO

Dentro del análisis de estrés hídrico es importante mencionar que se ha trabajado con los promedios anuales para agua potable, riego e hidroelectricidad; como principales usos dentro de la cuenca. A partir de los caudales de oferta media anual y el promedio de la demanda se ha determinado el nivel de estrés en cada una de las subcuencas del río Guayllabamba.

Para la Tabla 5.23, se pueden apreciar condiciones de sequía bastantes extremas en la mayor parte de la cuenca y que evidentemente no permiten abastecer los diferentes usos dentro de la misma, especialmente, para riego y agua potable. A su vez, la oferta de generación hidroeléctrica se puede ver muy disminuida y comprometida para el abastecimiento regional tanto industrial como de aprovechamiento dentro del D.M. Quito.

TABLA 5.22 OFERTA HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Caudales Mínimos			Contribución Glaciar			
	Época	↑↓	Q [$\frac{m^3}{s}$]	Intervalo	↑↓	Q [$\frac{m^3}{s}$]	Mes
Río Pita	Lluviosa	↑	0,59 - 0,60	Abr - May	↑	1,62e-07	Oct
	Seco	↓	0,39 - 0,41	Ago - Sep	↓	2,94e-08	Jul
Río San Pedro	Lluviosa	↑	0,64 - 0,65	Abr - May	↑	4,73e-08	Oct
	Seco	↓	0,30 - 0,33	Ago - Sep	↓	2,56e-08	May
Guayllabamba Alto	Lluviosa	↑	2,51 - 2,53	Abr - May	↑	7,76e-08	Oct
	Seco	↓	1,53 - 1,61	Ago - Sep	↓	2,40e-08	Jun
Río Pisque	Lluviosa	↑	1,06 - 1,07	May - Jun	↑	1,04e-07	Oct
	Seco	↓	0,80 - 0,82	Sep - Oct	↓	2,39e-08	Jul
Guayllabamba Medio	Lluviosa	↑	4,74 - 4,88	Abr - May	↑	6,54e-08	Oct
	Seco	↓	3,11 - 3,30	Sep - Oct	↓	2,16e-08	Jun
Río Intag	Lluvioso	↑	1,37 - 1,39	Abr - May	↑	6,64e-08	Oct
	Seco	↓	0,52 - 0,60	Ago - Sep	↓	2,20e-08	Jun
Río Alambi	Lluvioso	↑	0,74 - 0,75	Abr - May	↑	2,80e-08	Sep
	Seco	↓	0,30 - 0,33	Sep - Oct	↓	1,23e-08	May
Salve Facha	Lluvioso	↑	0,07 - 0,08	Jun - Jul	↑	2,14e-08	Feb
	Seco	↓	0,04 - 0,05	Dic - Ene	↓	1,42e-08	Jul
Papallacta	Lluvioso	↑	0,23 - 0,26	Jun - Jul	↑	1,61e-07	Oct
	Seco	↓	0,17 - 0,19	Dic - Ene	↓	1,96e-08	Jul
La Mica	Lluvioso	↑	0,10 - 0,11	Mar - Jul	↑	3,13e-07	Oct
	Seco	↓	0,08 - 0,09	Dic - Ene	↓	3,09e-08	Jul

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

TABLA 5.23 DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Uso	Demanda Q [$\frac{m^3}{s}$]	Oferta Natural Q [$\frac{m^3}{s}$]		Estrés Hídrico	
			Normal	Esc.1	Normal	Esc.1
Río San Pedro	Riego	4,15				
	Hidroeléctrica	7,26	14,12	0,50	Moderado	Severo
	Agua Potable	1,03				
Río Pita	Riego	3,11				
	Agua Potable	2,55	12,38	0,50	Alto	Severo
Guayllabamba Alto	Riego	5,58				
	Hidroeléctrica	6,51	48,77	2,03	Alto	Severo
	Agua Potable	0,60				
Río Pisque	Riego	10,15				
	Agua Potable	0,51	16,93	0,91	Alto	Severo
	Hidroeléctrica	2,23				
Río Intag	Riego	5,64				
	Hidroeléctrica	21,45	40,79	0,97	Sin Estrés	Severo
Río Alambi	Riego	0,52				
	Hidroeléctrica	37,00	16,45	0,50	Sin Estrés	Severo
Guayllabamba Medio	Riego	1,98				
	Hidroeléctrica	13,93	76,24	3,94	Moderado	Severo
	Agua Potable	0,14				

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

5.2 ESCENARIO 2

Los resultados obtenidos para este escenario, son producto de la incorporación de la capa de uso y cobertura del suelo, proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2014), en la cual se ha llevado a cabo el ajuste del coeficiente de cultivo mensual.

5.2.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO

Para este parámetro se ha determinado que las mayores zonas que presentan evapotranspiración potencial están ubicadas en la subcuenca del Guayllabamba Medio (Ver Figura 5.24), esto debido a una actividad agrícola creciente, además de zonas secas bastante marcadas que comprenden los 140 a 160 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, seguida de bosque natural o vegetación arbustiva con 120 a 130 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ al occidente de la cuenca, similar a la cobertura anterior la parte oriental y sur occidental de la cuenca presenta valores entre 30 a 40 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, esto por ser una extensa zona de páramo. Sin embargo, la evapotranspiración a lo largo del año presenta valores mínimos entre los meses de Mayo a Agosto.

Por otro lado, se ha determinado el nivel de evapotranspiración por subcuencas, lo cual ha dado como resultado:

- Los menores valores de evapotranspiración media mensual, corresponde a la subcuenca del Río Pita con un intervalo entre 68 a 73 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para los meses más lluviosos y con un intervalo de 57 a 60 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, para los meses más secos.
- Mientras tanto que la mayor evapotranspiración media mensual, corresponde a la subcuenca del río Alambi con intervalos entre 113 a 117 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para los meses con mayor precipitación, mientras que para los meses más secos se tiene intervalos entre 102 a 106 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$.

En base a este parámetro se puede afirmar que la evapotranspiración ha disminuido con relación a la cobertura anterior (Globcover) y al ajuste del coeficiente de cultivo (K_c).

5.2.2 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

A diferencia de lo anterior la precipitación efectiva muestra valores más altos para zonas con cultivos anuales y mosaicos agropecuarios que van entre 3,5 a 4,0 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, dichos cultivos se encuentran en las subcuencas del río Intag, Pisque y Guayllabamba Medio (Ver Figura 5.25). Por otro lado, a medida que termina la temporada lluviosa se pueden notar cambios aún más marcados dentro de la cuenca, ya que en general la precipitación efectiva disminuye a valores cercanos a 0,5 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, mientras que la zona de páramo incrementa de 1,2 a 3,5 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ en temporada seca, posteriormente la cuenca vuelve a tener una variabilidad entre 2 a 2,5 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ en los meses de octubre a diciembre.

En lo referente a la precipitación efectiva media para cada una de las subcuencas se ha obtenido como resultado que:

- La menor precipitación efectiva media mensual y menor variabilidad corresponden a la subcuenca del Guayllabamba Medio con valores en condiciones húmedas de 1,33 a 1,43 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, en tanto que para condiciones secas, disminuye entre 0,20 a 0,25 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$. Por otro lado, se ha encontrado que la Quebrada San Andrés, presenta una variabilidad alta registrando valores entre 1,95 a 2,05 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ (lluvioso) y de 0,35 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ (seco).
- La subcuenca que no presenta mayor variabilidad al igual que para el escenario anterior y en gran medida a la vasta superficie de páramo corresponde al Río Pita con intervalos de 1,40 a 1,45 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ en época de lluvia y de 0,38 a 0,41 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ en sequía.

El cambio de cobertura no ha hecho sino ratificar las condiciones anteriormente ya tratadas al existir una mayor variabilidad en zonas áridas y de vegetación pequeña; y zonas de mayor equilibrio y almacenamiento como el páramo, sin embargo existe un aumento de la precipitación efectiva para ciertos tipos de cultivos, que si bien no alteran significativamente las condiciones de la cuenca, muestran que las necesidades hídricas de ciertos cultivos son mayores bajo este punto de vista.

5.2.3 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

Para el presente escenario se han considerado las necesidades hídricas de los cultivos, debido a que se tiene un mejor detalle de los mismos y se cuenta con las características climáticas de evapotranspiración potencial y precipitación efectiva. Es así que, las zonas con mayores requerimientos de agua corresponden a las subcuencas del Guayllabamba Medio con 1294,59 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ y Río Alambi con 1292,18 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$, lo cual muestra que no solo las características fenológicas son determinantes, ya que si bien se tienen cultivos similares en otras cuencas las necesidades de los mismos, están supeditadas a las condiciones climáticas de las zonas de siembra, esto se puede observar, dado que tanto la cuenca del Guayllabamba Medio, como la del río Alambi, se encuentran en regiones áridas con vegetación boscosa y herbácea pequeña, denominada bosque seco (Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito, 2009) y que se asientan en valles interandinos (1400 a 2500 m.s.n.m.). Por lo cual, el nivel de evapotranspiración es elevado, además de sus bajos niveles de precipitación efectiva.

Dentro del análisis de las capas mensuales de necesidades hídricas se pueden observar dos zonas claramente diferenciadas, una de ellas corresponde a la parte central y noroccidental de la cuenca del Guayllabamba registrando valores entre 140 a 160 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ como los más altos de toda la región. Por otro lado, se puede notar una clara franja en la zona oriental, la cual representa al páramo y cuyas necesidades hídricas disminuyen en los meses más secos, con valores entre 60 a 70 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para condiciones húmedas y de 30 a 40 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$ para condiciones secas.

FIGURA 5.25 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 2.

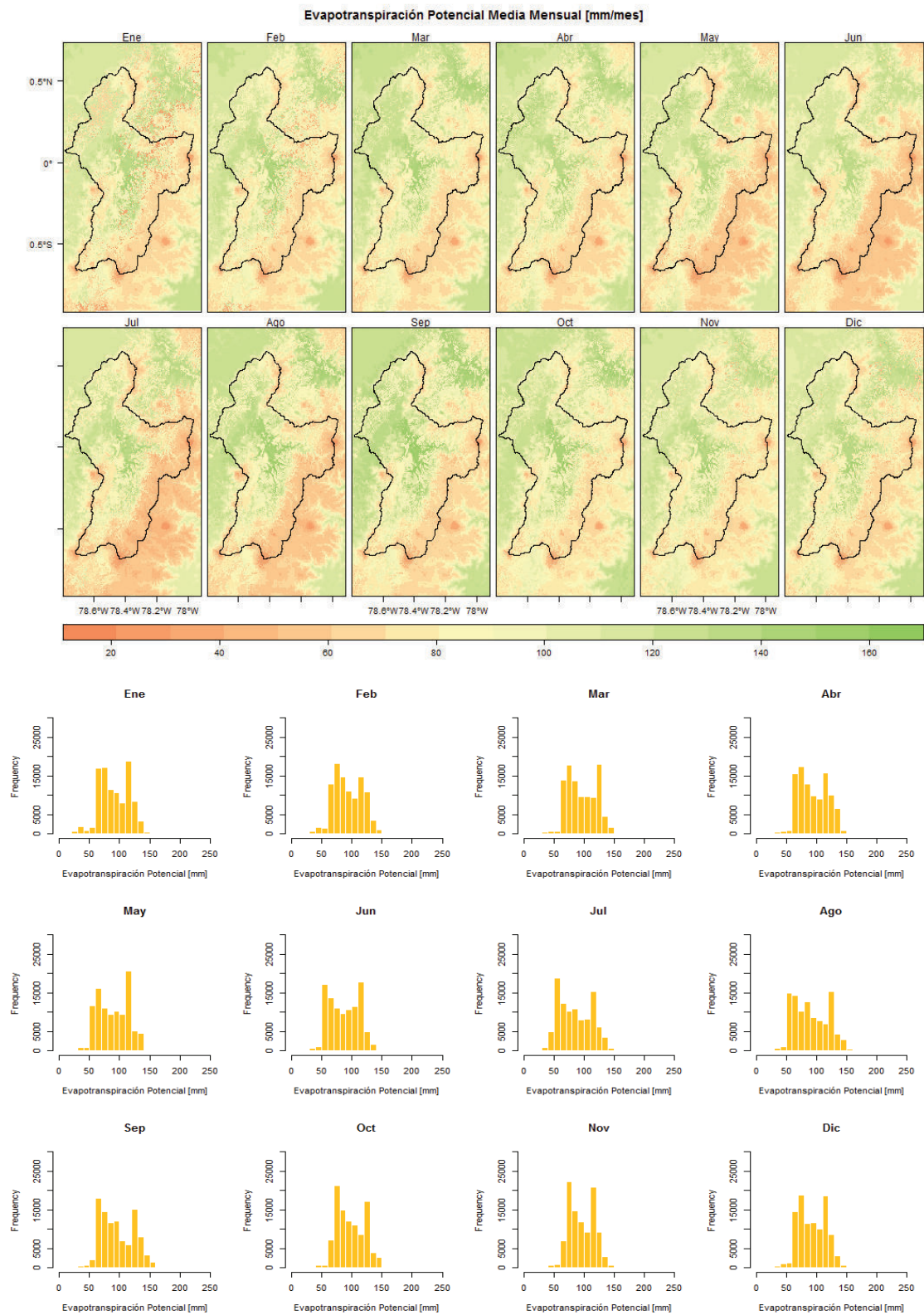
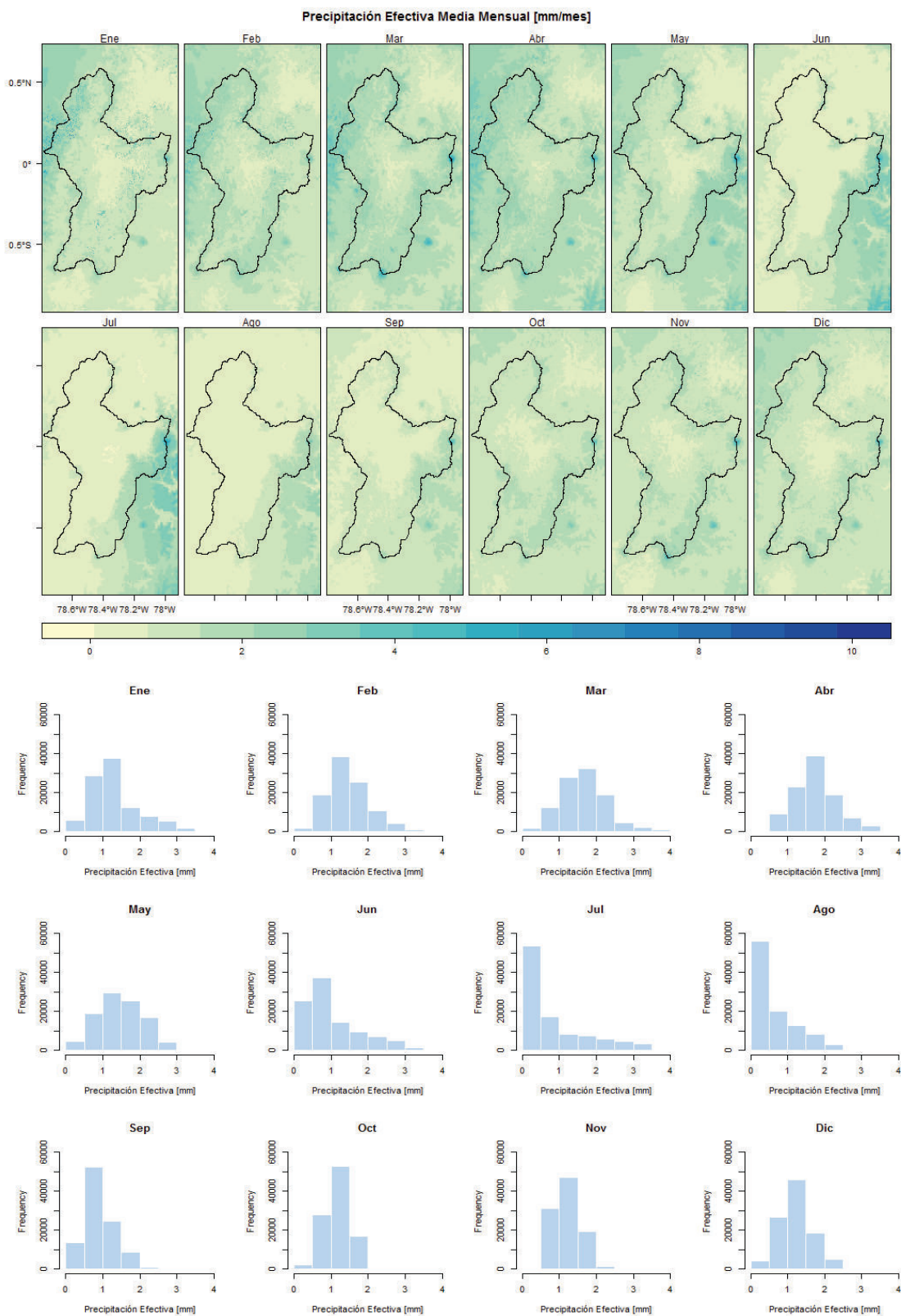
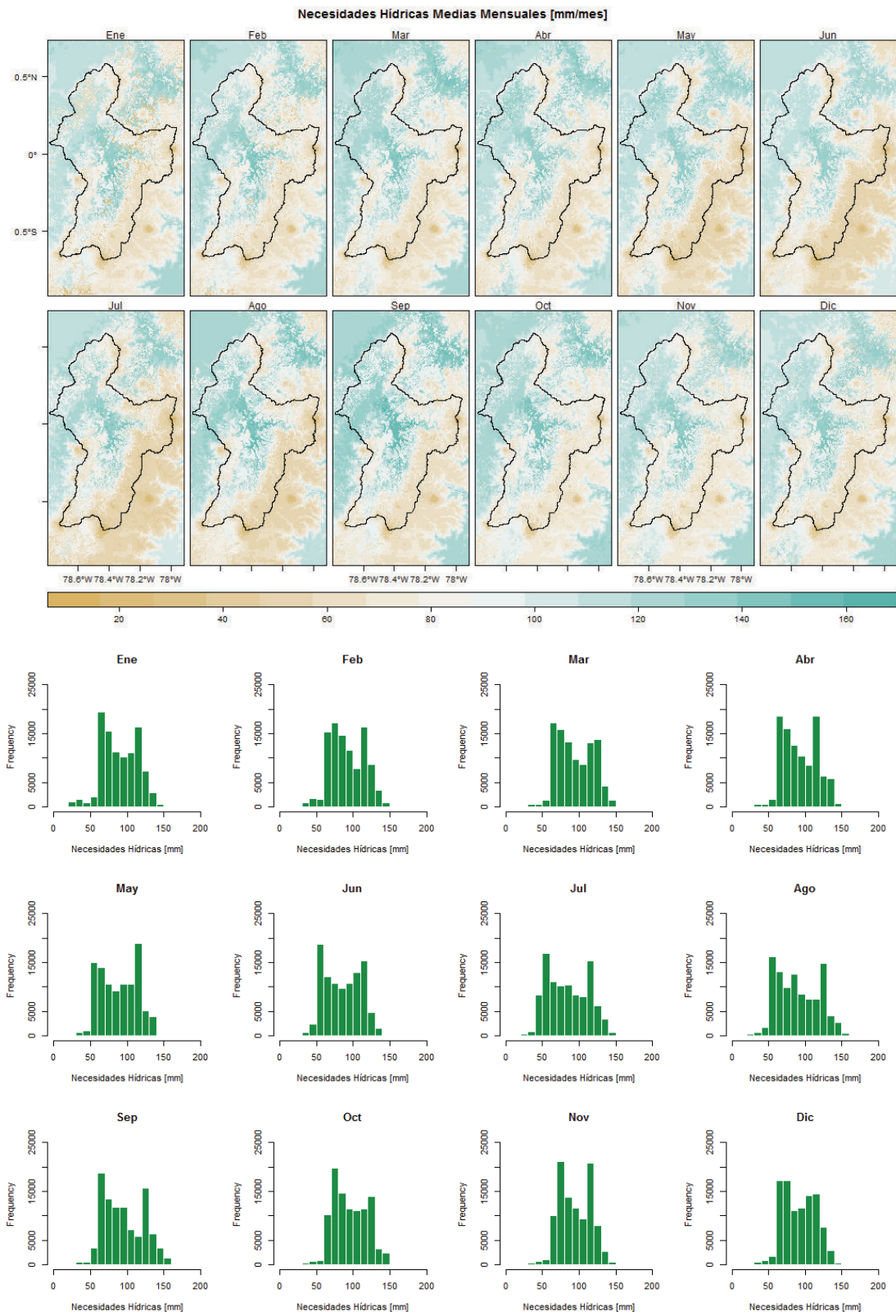


FIGURA 5.26 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL - ESCENARIO 2.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FIGURA 5.27 NECESIDADES HÍDRICAS MEDIAS MENSUALES - ESCENARIO 2.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

A partir de este análisis se han determinado los requerimientos hídricos para los diferentes tipos de cultivos a lo largo de toda la cuenca, considerando los más representativos de cada zona, así como sus etapas de siembra, que para ciclo corto están entre enero y octubre, mientras que para cultivos anuales a partir del mes de noviembre, dicho análisis se lo ha realizado a nivel de subcuenca.

La Tabla 5.24 muestra los valores de los parámetros más importantes de cada una de las subcuencas, con sus respectivos índices de sequía. Con la finalidad de conocer a nivel temporal y espacial las zonas que muestran mayor susceptibilidad ante posibles cambios climáticos y la severidad que estos pueden generar dentro de la cuenca.

Finalmente, la Tabla 5.25 determina las diferentes necesidades hídricas de los cultivos, entre las que se destacan los cereales y cultivos de ciclo corto, seguidos de frutales e industriales. Cabe indicar que existen variaciones de los mismos y dependen fundamentalmente, de la etapa de desarrollo de la planta y sus áreas de cultivo, ya que aun mayor tallo y hojas más grandes los requerimientos aumentan.

TABLA 5.24 PARÁMETROS HÍDRICOS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Parámetro	Mes											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Pita	P _{media}	91,52	108,99	131,00	121,38	100,06	71,15	56,76	48,93	75,71	108,59	115,98	100,19
	P _{media seca}	40,39	106,77	146,53	102,40	92,19	53,68	39,86	16,40	27,67	59,66	82,51	140,32
	PET	69,15	70,14	70,41	69,76	62,36	59,43	57,19	61,42	68,83	73,56	73,40	70,38
	PET/P	1,71	0,66	0,48	0,68	0,68	1,11	1,43	3,75	2,49	1,23	0,89	0,50
	Pe	1,39	1,61	1,93	1,79	1,68	1,26	1,07	0,84	1,14	1,52	1,64	1,47
	N.H.	67,76	68,53	68,48	67,97	60,68	58,17	56,12	60,58	67,69	72,04	71,76	68,91
Río San Pedro	P _{media}	105,41	125,20	153,60	149,90	107,35	62,37	34,57	41,35	78,04	115,87	110,75	110,80
	P _{media seca}	51,84	141,52	191,63	142,17	75,74	46,35	33,63	17,85	38,78	78,01	58,58	159,23
	PET	86,69	87,98	87,98	86,28	82,09	79,58	79,27	84,31	88,93	89,45	88,49	87,42
	PET/P	1,67	0,62	0,46	0,61	1,08	1,72	2,36	4,72	2,29	1,15	1,51	0,55
	Pe	1,28	1,46	1,79	1,77	1,36	0,82	0,47	0,51	0,90	1,32	1,28	1,31
	N.H.	85,41	86,52	86,19	84,51	80,73	78,76	78,80	83,80	88,03	88,13	87,21	86,11
Guayllabamba Alto	P _{media}	88,53	111,61	137,71	143,74	106,17	63,22	43,83	43,04	77,70	111,67	106,70	93,07
	P _{media seca}	46,20	103,96	123,33	93,38	55,17	30,23	16,40	10,04	35,74	65,93	49,14	118,49
	PET	90,91	92,10	93,09	91,28	87,91	85,05	84,34	89,81	95,25	94,78	93,19	92,00
	PET/P	1,97	0,89	0,75	0,98	1,59	2,81	5,14	8,95	2,67	1,44	1,90	0,78
	Pe	1,10	1,31	1,59	1,67	1,37	0,91	0,71	0,60	0,91	1,25	1,22	1,10
	N.H.	89,81	90,79	91,50	89,61	86,54	84,14	83,63	89,21	94,34	93,53	91,97	90,90

	P _{media}	80,41	96,86	124,09	124,54	109,37	83,69	71,43	55,99	76,42	99,42	98,86	86,87
	P _{media seca}	39,08	74,59	73,22	72,49	46,83	15,58	3,60	6,07	28,34	42,68	42,94	127,14
	PET	79,70	81,66	85,27	85,14	80,08	76,32	72,05	77,37	83,70	86,24	85,82	83,44
Río Pisque	PET/P	2,04	1,09	1,16	1,17	1,71	4,90	20,01	12,75	2,95	2,02	2,00	0,67
	Pe	1,17	1,29	1,57	1,57	1,57	1,32	1,26	0,88	1,04	1,23	1,22	1,13
	N.H.	78,53	80,37	83,70	83,57	78,51	75,00	70,79	76,49	82,66	85,01	84,60	82,31
	P _{media}	113,08	134,94	152,31	159,29	112,70	47,21	22,50	28,50	59,72	89,81	94,38	94,69
	P _{media seca}	60,00	133,39	129,61	112,34	37,40	15,15	15,97	6,47	32,14	45,74	36,78	118,42
Guayllabamba	PET	105,77	107,72	110,37	107,95	105,06	103,93	106,55	112,83	117,12	112,40	108,75	106,97
Medio	PET/P	1,76	0,81	0,85	0,96	2,81	6,86	6,67	17,44	3,64	2,46	2,96	0,90
	Pe	1,15	1,32	1,44	1,53	1,13	0,49	0,24	0,28	0,55	0,85	0,92	0,93
	N.H.	104,62	106,40	108,93	106,42	103,93	103,44	106,31	112,55	116,57	111,55	107,83	106,04
	P _{media}	183,22	202,78	234,37	237,40	163,13	67,32	39,43	41,21	74,08	101,50	99,42	131,66
	P _{media seca}	76,18	171,71	187,73	129,36	40,20	18,32	6,84	2,85	25,57	58,97	48,91	161,89
	PET	103,94	108,44	111,68	109,46	105,05	102,75	106,00	113,68	117,79	112,92	108,77	106,48
Río Alambi	PET/P	1,36	0,63	0,59	0,85	2,61	5,61	15,50	39,89	4,61	1,91	2,22	0,66
	Pe	1,82	1,90	2,11	2,18	1,57	0,67	0,39	0,38	0,65	0,92	0,94	1,25
	N.H.	102,12	106,54	109,57	107,28	103,48	102,08	105,61	113,30	117,14	112,00	107,83	105,23
	P _{media}	162,47	181,45	194,80	211,16	147,32	56,61	27,01	31,78	74,58	117,00	128,58	134,14
Río Intag	P _{media seca}	66,24	127,46	130,04	101,95	27,95	3,24	19,39	5,43	31,13	64,19	51,61	169,5
	PET	92,58	97,8	105,81	106,1	102,78	97,88	93,31	99,66	103,55	103,45	101,07	100,65

PET/P	1,40	0,77	0,81	1,04	3,68	30,21	4,81	18,35	3,33	1,61	1,96	0,59
Pe	1,84	1,89	1,88	2,04	1,47	0,60	0,32	0,34	0,76	1,17	1,32	1,35
N.H.	90,74	95,91	103,93	104,06	101,31	97,28	92,99	99,32	102,79	102,28	99,75	99,30
P_{media}	251,04	249,11	277,50	273,34	199,89	74,56	46,65	36,19	70,52	116,14	116,29	183,33
$P_{media\ seca}$	85,93	172,39	187,65	128,05	33,76	5,09	3,18	0,20	10,91	40,83	43,34	228,67
PET	102,62	104,53	106,9	108,17	108,1	100,39	94,2	100,79	104,32	102,39	100,71	104,22
PET/P	1,19	0,61	0,57	0,84	3,20	19,72	29,62	503,95	9,56	2,51	2,32	0,46
Pe	2,53	2,40	2,66	2,59	1,87	0,75	0,51	0,37	0,69	1,16	1,17	1,78
N.H.	100,09	102,13	104,24	105,58	106,23	99,64	93,69	100,42	103,63	101,23	99,54	102,44

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

P_{media} :	Precipitación media mensual $\left[\frac{mm}{mes}\right]$	PET/P:	Índice de Sequía
$P_{media\ seca}$:	Precipitación media mensual (Año Seco) $\left[\frac{mm}{mes}\right]$	Pe:	Precipitación efectiva $\left[\frac{mm}{mes}\right]$
PET:	Evapotranspiración media mensual $\left[\frac{mm}{mes}\right]$	N.H.:	Necesidades Hídricas $\left[\frac{mm}{mes}\right]$

Relación mayor a 1, predominan las condiciones secas, ya que existe una mayor evapotranspiración potencial.

Relación menor a 1, existen condiciones húmedas debidas a una mayor precipitación.

TABLA 5.25. NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Cultivo	Área Cultivada [ha]	Caudal Q [$\frac{m^3}{s}$]																
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic					
Río Pita	Leguminosas	53,19	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
	Frutales	14,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Ciclo Corto	472,05	0,20	0,17	0,14	0,14	0,14	0,14	0,16	0,15	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,17
	Cereales	2265,75	1,27	1,02	1,33	1,59	1,76	1,69	1,76	1,69	1,40	1,40	1,21	1,28	1,37	1,56	1,56	1,66	
	Raíces y Tubérculos	91,98	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	
	Hortalizas	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Flores	3,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Indiferenciado	354,24	0,08	0,10	0,14	0,15	0,14	0,12	0,14	0,12	0,09	0,09	0,09	0,10	0,13	0,14	0,14	0,14	
	TOTAL		3256,74	1,59	1,35	1,66	1,94	2,10	2,00	1,66	1,66	1,49	1,57	1,68	1,87	2,01	2,01	2,01	
	Río San Pedro	Leguminosas	94,68	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	
Frutales		36,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01		
Ciclo Corto		5336,40	2,06	1,76	1,42	1,44	1,67	1,57	1,67	1,57	1,34	1,34	1,43	1,51	1,49	1,52	1,80		
Cereales		2921,94	1,82	1,45	1,88	2,24	2,51	2,44	2,51	2,44	2,07	1,76	1,85	1,93	2,18	2,36	2,36		
Raíces y Tubérculos		2195,06	1,01	1,51	1,64	1,24	0,80	1,21	0,80	1,21	1,51	1,35	1,26	1,16	1,29	1,17	1,17		
Hortalizas		755,14	0,26	0,29	0,20	0,20	0,24	0,26	0,24	0,26	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21		
Flores		218,70	0,05	0,06	0,06	0,04	0,07	0,08	0,07	0,08	0,05	0,06	0,07	0,04	0,08	0,09	0,09		
Indiferenciado		3174,96	0,72	0,92	1,27	1,37	1,30	1,08	1,08	1,08	0,79	0,85	0,89	1,12	1,23	1,28	1,28		
TOTAL			14732,88	5,95	6,04	6,52	6,59	6,65	6,69	6,52	5,97	5,69	5,82	5,98	6,53	6,94	6,94		

Leguminosas	219,15	0,05	0,08	0,11	0,12	0,11	0,11	0,07	0,08	0,08	0,08	0,05	0,05
Frutales	2871,81	0,98	1,16	1,23	1,18	1,15	1,14	1,17	1,17	1,09	1,04	0,99	0,86
Ciclo Corto	5286,06	2,42	2,09	1,70	1,70	2,00	1,88	1,62	1,73	1,81	1,75	1,76	2,11
Cereales	7674,21	4,74	3,85	5,08	6,06	6,77	6,56	5,46	4,78	5,00	5,17	5,78	6,22
Raíces y Tubérculos	381,87	0,17	0,25	0,27	0,21	0,13	0,19	0,24	0,21	0,20	0,19	0,21	0,19
Hortalizas	697,32	0,32	0,36	0,25	0,25	0,30	0,32	0,24	0,25	0,26	0,25	0,24	0,25
Flores	870,21	0,25	0,30	0,30	0,19	0,36	0,39	0,24	0,31	0,32	0,21	0,37	0,41
Indiferenciado	1602,27	0,41	0,53	0,73	0,78	0,75	0,62	0,46	0,49	0,52	0,64	0,69	0,73
TOTAL	19602,90	9,33	8,61	9,68	10,49	11,57	11,21	9,50	9,01	9,28	9,32	10,09	10,83
Leguminosas	213,84	0,04	0,05	0,08	0,08	0,08	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
Frutales	513,86	0,17	0,20	0,21	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15
Ciclo Corto	3004,94	1,11	0,96	0,78	0,79	0,89	0,84	0,70	0,75	0,81	0,81	0,82	0,96
Cereales	12431,58	7,29	5,88	7,75	9,22	10,25	10,05	8,40	7,32	7,67	7,91	8,79	9,39
Raíces y Tubérculos	939,65	0,40	0,59	0,65	0,49	0,30	0,45	0,54	0,49	0,47	0,45	0,51	0,45
Hortalizas	50,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Flores	848,52	0,21	0,26	0,26	0,17	0,31	0,34	0,21	0,27	0,28	0,18	0,33	0,36
Indiferenciado	4469,64	0,94	1,20	1,67	1,81	1,66	1,38	0,98	1,06	1,14	1,46	1,60	1,64
Transición	47,43	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
TOTAL	22519,50	10,19	9,19	11,44	12,80	13,72	13,36	11,10	10,17	10,65	11,09	12,28	13,02
Leguminosas	252,74	0,06	0,09	0,12	0,13	0,13	0,12	0,08	0,09	0,09	0,09	0,06	0,06

Frutales	1014,28	0,33	0,39	0,42	0,40	0,39	0,39	0,40	0,41	0,38	0,35	0,34	0,29
Ciclo Corto	1132,92	0,46	0,39	0,32	0,32	0,38	0,37	0,31	0,34	0,35	0,34	0,34	0,40
Cereales	6661,39	6,12	6,16	8,21	9,22	8,78	8,03	7,14	6,71	6,93	6,83	7,79	8,74
Raíces y Tubérculos	123,96	0,06	0,09	0,10	0,08	0,05	0,08	0,10	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07
Hortalizas	107,46	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
Flores	200,25	0,05	0,07	0,07	0,04	0,08	0,09	0,06	0,07	0,07	0,05	0,08	0,09
Indiferenciado	2262,44	0,58	0,75	1,06	1,15	1,10	0,93	0,69	0,74	0,77	0,92	0,98	1,02
Transición	196,76	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Industriales	553,78	0,47	0,50	0,51	0,50	0,47	0,46	0,48	0,52	0,53	0,51	0,49	0,47
Aromáticas	2,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	12508,32	8,24	8,55	10,93	11,96	11,49	10,57	9,37	9,06	9,32	9,26	10,25	11,24
Leguminosas	3,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Frutales	300,17	0,09	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08
Ciclo Corto	394,28	0,16	0,14	0,11	0,12	0,13	0,13	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14
Cereales	149,22	0,09	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12
Raíces y Tubérculos	18,81	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Hortalizas	66,15	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Flores	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indiferenciado	3985,36	1,00	1,33	1,90	2,08	1,99	1,66	1,24	1,34	1,38	1,64	1,75	1,81
Industriales	226,80	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22	0,21	0,20	0,19
TOTAL	5145,83	1,55	1,88	2,46	2,65	2,58	2,24	1,79	1,90	1,94	2,18	2,29	2,36

	Leguminosas	493,34	0,10	0,16	0,24	0,26	0,25	0,24	0,16	0,17	0,17	0,16	0,11	0,10
	Frutales	379,71	0,11	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,10
	Ciclo Corto	9131,97	3,85	3,36	2,80	2,82	3,33	3,22	2,79	2,99	3,07	2,88	2,83	3,33
Río Intag	Cereales	1104,83	0,93	0,97	1,32	1,50	1,41	1,27	1,12	1,07	1,10	1,08	1,22	1,36
	Indiferenciado	22407,32	5,60	7,35	10,46	11,34	10,99	9,31	7,00	7,49	7,70	9,11	9,57	9,96
	Transición	17,38	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Industriales	3903,16	3,34	3,47	3,55	3,45	3,34	3,29	3,47	3,71	3,83	3,60	3,40	3,30
	TOTAL	37437,71	13,95	15,46	18,53	19,52	19,47	17,48	14,69	15,58	16,02	16,96	17,26	18,16
	Leguminosas	2,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Frutales	36,10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Quebrada San Andrés	Ciclo Corto	1470,19	0,64	0,57	0,48	0,49	0,56	0,53	0,46	0,49	0,51	0,48	0,48	0,55
	Cereales	14,80	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
	Indiferenciado	992,86	0,25	0,33	0,48	0,52	0,50	0,42	0,31	0,33	0,34	0,41	0,43	0,45
	Industriales	69,87	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
	TOTAL	2586,73	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19	0,17	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,18

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

5.2.4 CAUDALES Y CONTRIBUCIÓN GLACIAR

De igual manera que para el escenario anterior, se ha modelado el caudal de oferta natural para la cuenca del río Guayllabamba, con su respectivo aporte glaciar, principalmente, para las zonas altas de la cuenca, que dentro del presente estudio se ha considerado: subcuenca del río Pita (Volcán Cotopaxi), subcuenca del río Pisque (Volcán Cayambe) y las cuencas orientales que abastecen a la ciudad de Quito.

5.2.5 DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO

Debido a que, a lo largo de la cuenca existe un estrés hídrico severo es necesario identificar cuáles son los sectores que inciden en este impacto, considerando que el uso hidroeléctrico no representa un uso consuntivo.

De igual manera que para el escenario 1, se llevó a cabo el análisis y determinación de los caudales de oferta natural bajo condiciones secas, para el escenario 2, del cual la zona de mayor escurrimiento del mismo modo corresponde a la subcuenca del Guayllabamba Medio de la cual se ha obtenido caudales de $7,15 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ para los meses de abril y mayo (lluvioso), y de $4,50 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$ para agosto y septiembre (seco), con una variación para las cuencas orientales en las cuales los meses más lluviosos son junio y julio. Además existe una disminución de la contribución glaciar en el escenario 2, ya que para la subcuenca del río Pita es del 6,17%, subcuenca del río Pisque de 8,26% y para el Embalse La Mica de 2,56%; todo esto para el mes de mayor contribución (octubre).

Finalmente, si bien existe un incremento en la escorrentía y caudales en cada una de las subcuencas este no permite la recuperación de las condiciones del río Guayllabamba, lo que mantiene el severo estrés hídrico en toda la región y evidentemente, limita la posibilidad de aprovechamiento del recurso.

TABLA 5.26 OFERTA HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Caudales Mínimos			Contribución Glaciar			
	Época	↑↓	Q [$\frac{m^3}{s}$]	Intervalo	↑↓	Q [$\frac{m^3}{s}$]	Mes
Río Pita	Lluviosa	↑	0,65 - 0,67	Abr - May	↑	1,52e-07	Oct
	Seco	↓	0,44 - 0,46	Ago - Sep	↓	2,69e-08	Jul
Río San Pedro	Lluviosa	↑	0,78- 0,80	Abr - May	↑	4,00e-08	Sep
	Seco	↓	0,38 - 0,40	Ago - Sep	↓	2,13e-08	May
Guayllabamba Alto	Lluviosa	↑	2,91 - 2,93	Abr - May	↑	6,91e-08	Oct
	Seco	↓	1,74 - 1,82	Ago - Sep	↓	2,11e-08	May
Río Pisque	Lluviosa	↑	1,16 - 1,19	May - Jun	↑	9,54e-08	Oct
	Seco	↓	0,91 - 0,92	Sep - Oct	↓	2,19e-08	Jul
Guayllabamba Medio	Lluviosa	↑	7,02 - 7,12	Abr - May	↑	5,94e-08	Oct
	Seco	↓	4,20 - 4,52	Sep - Oct	↓	1,97e-08	Jun
Río Intag	Lluvioso	↑	1,45 - 1,47	Abr - May	↑	6,03e-08	Oct
	Seco	↓	0,76 - 0,78	Sep - Oct	↓	2,00e-08	Jun
Río Alambi	Lluvioso	↑	0,79 - 0,81	Abr - May	↑	2,61e-08	Sep
	Seco	↓	0,40 - 0,42	Sep - Oct	↓	1,15e-08	May
Salve Facha	Lluvioso	↑	0,08 - 0,09	Jun - Jul	↑	1,95e-08	Feb
	Seco	↓	0,05 - 0,06	Dic - Ene	↓	1,28e-08	Jul
Papallacta	Lluvioso	↑	0,25 - 0,27	Jun - Jul	↑	1,59e-07	Oct
	Seco	↓	0,19 - 0,20	Dic - Ene	↓	1,91e-08	Jul
La Mica	Lluvioso	↑	0,11 - 0,12	Mar - Jul	↑	3,05e-07	Oct
	Seco	↓	0,09 - 0,10	Dic - Ene	↓	2,76e-08	Jul

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

TABLA 5.27. DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA.

Subcuenca	Uso	Demanda Q [$\frac{m^3}{s}$]	Oferta Natural Q [$\frac{m^3}{s}$]		Estrés Hídrico	
			Normal	Esc.2	Normal	Esc.2
Río San Pedro	Riego	4,15				
	Hidroeléctrica	7,26	14,12	0,60	Moderado	Severo
	Agua Potable	1,03				
Río Pita	Riego	3,11				
	Agua Potable	2,55	12,38	0,56	Alto	Severo
Guayllabamba Alto	Riego	5,58				
	Hidroeléctrica	6,51	48,77	2,35	Alto	Severo
	Agua Potable	0,60				
Río Pisque	Riego	10,15				
	Agua Potable	0,51	16,93	1,02	Alto	Severo
	Hidroeléctrica	2,23				
Río Intag	Riego	5,64				
	Hidroeléctrica	21,45	40,79	1,08	Sin Estrés	Severo
Río Alambi	Riego	0,52				
	Hidroeléctrica	37,00	16,45	0,58	Sin Estrés	Severo
Guayllabamba Medio	Riego	1,98				
	Hidroeléctrica	13,93	76,24	5,64	Moderado	Severo
	Agua Potable	0,14				

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

5.3 COMPARACIÓN DE CAUDALES DE SEQUÍA Y CONDICIONES NORMALES

Para llevar a cabo la comparación de los caudales de sequía y las condiciones normales promedio, se ha tomado como referencia las estaciones hidrológicas que se pueden apreciar en el Anexo 1, para el periodo de 1971 – 2010, de donde se concluye.

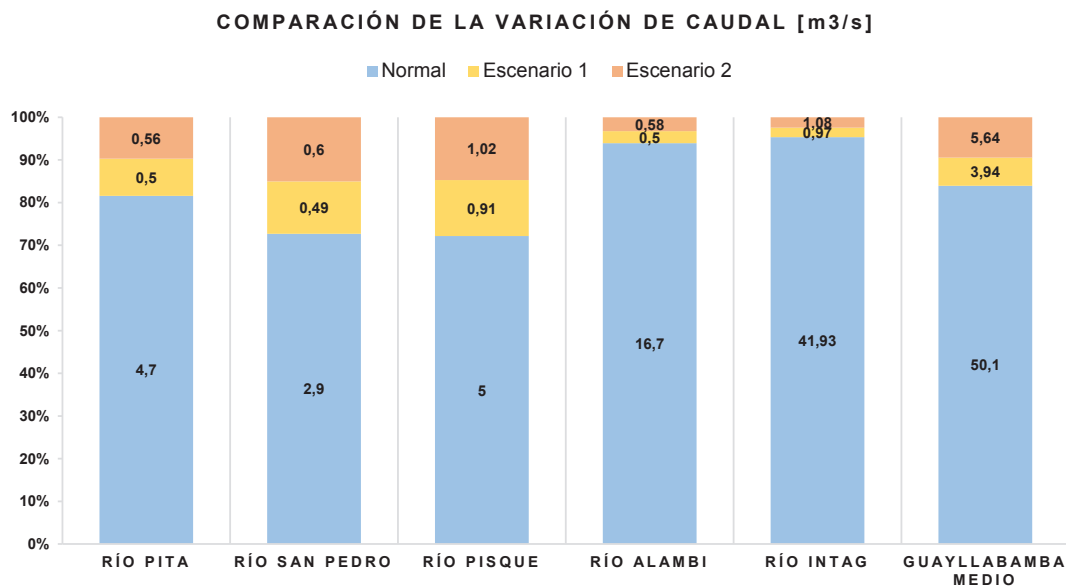
De acuerdo, a la Tabla 5.28, las cuencas del río Pisque y San Pedro, muestran la menor variación promedio de los caudales bajo condiciones de sequía, ya que los mismos están entre los 18% y 20% de los valores de caudal base medidos. Mientras que, para las cuencas del río Alambi e Intag, el efecto es representativo al ser el 2% y 3% del caudal base.

TABLA 5.28 COMPARACIÓN DE CAUDALES DE SEQUÍA Y CONDICIONES NORMALES.

Subcuenca	Caudal [$\frac{m^3}{s}$]			Porcentaje [%]	
	Normal	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Río Pita	4,70	0,50	0,56	10,63	11,91
Río San Pedro	2,90	0,49	0,60	16,90	20,70
Río Pisque	5,00	0,91	1,02	18,20	20,40
Río Alambi	16,70	0,50	0,58	3,43	3,47
Río Intag	41,93	0,97	1,08	2,31	2,58
Guayllabamba Medio	50,10	3,94	5,64	7,86	11,26

ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

FIGURA 5.28 COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE CAUDAL.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

Esto en gran medida se atribuye a un incremento del área y del tipo de cultivo de la zona, ya que la primera en comparación con las demás áreas de cultivo es de 38000 [ha], siendo la mayor de toda la cuenca del río Guayllabamba, lo que significa que los cultivos en secano requieren una mayor cantidad de agua.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se ha modificado la información de cobertura vegetal para la cuenca del río Guayllabamba, en base a la información de Globcover Project (ENVISAT, 2010) para el escenario 1 y la capa de uso y cobertura (MAGAP, 2014) para el escenario 2, con la finalidad de observar los cambios en cada uno de los parámetros hidrológicos asociados al coeficiente de cultivo, los mismos que están supeditados a cambios en las etapas de siembra y desarrollo de las plantas, pero fundamentalmente, al área que cada uno de ellos ocupa. Situación que no es evidente en la capa Globcover, ya que se ha tratado la información con un coeficiente constante a lo largo de todo el año y dada la naturaleza y precisión de la información satelital, no se pueden determinar las áreas de los cultivos individualmente, sin embargo; para la cobertura de MAGAP, a una misma resolución de 100 m, se han obtenido las áreas para toda la cuenca, tipo de cultivo y las necesidades hídricas de los mismos asociados a este escenario, ajustando el coeficiente de cultivo a nivel mensual.
- Con relación a la evapotranspiración potencial, se ha determinado que la misma es mayor para el escenario 1 en un 11,60%, en relación al escenario 2. Esto debido, al ajuste de los coeficientes de cultivo y considerando además que la mayor evapotranspiración se da en la última etapa de desarrollo de la planta, mientras que su menor evapotranspiración es al inicio, en donde se considera que la misma proviene principalmente, del suelo de cultivo.

- En lo referente a la precipitación efectiva, está es mayor para el escenario 2 con un 13,10%, en relación al escenario 1, lo cual se debe al tipo de cultivo y su etapa de desarrollo, ya que los requerimientos son mayores cuando las plantas presentan un mayor tallo, hojas más grandes y extensión del área de cultivo.
- En base a los parámetros de evapotranspiración potencial y precipitación efectiva, se han obtenido las necesidades hídricas de los cultivos; tanto para subcuencas, como por tipo de cultivo. Es así que la subcuenca con mayor extensión cultivada corresponde al río Intag con 37440 [ha], con un caudal necesario promedio mensual de $17 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ para cultivos en secano, entre los cuales los mayores requerimientos están destinados a cultivos de ciclo corto, industriales e indiferenciados.
- De los resultados obtenidos para el caudal de oferta modelado, el escenario 2, bajo condiciones de sequía, experimenta un aumento al cierre de la cuenca del río Guayllabamba (Guayllabamba Medio), el cual corresponde a 30,14%, con respecto al escenario 1, esto debido a un aumento en la escorrentía, posiblemente asociado al cambio de la capa de cobertura vegetal y al ajuste de los coeficientes de cultivo. A su vez, la variación entre los escenarios de sequía y las condiciones promedio normales es de 7,86% (Escenario 1) y 11,26% (Escenario 2). Cabe indicar que estos porcentajes son producto de promediar la precipitación para el año más seco.
- Dentro de la contribución glaciar, las subcuencas de los ríos Pita, Pisque y las cuencas orientales, muestran glaciares que corresponden al Volcán Cotopaxi, Cayambe y Antisana respectivamente, para dichos escenarios existen variaciones a lo largo del año, con el mayor aporte para el mes de octubre y junio como el menor, dicho cambio corresponde al 82% del caudal entre estos dos meses. Por otro lado, existe un mayor aporte por parte del escenario 1, ya que cuenta con una mayor área de ablación y acumulación glaciar y en cuyo caso es del 6%.

- Del análisis aquí planteado la cuenca del río Guayllabamba, presenta serias condiciones de sequía extrema, debido principalmente, a condiciones climáticas adversas, que se hacen aun más evidentes gracias al desmedido número de captaciones y concesiones tanto para riego, agua potable y generación hidroeléctrica; que bajo condiciones normales presentan un estrés hídrico moderado (época lluviosa) a alto y severo (época seca). Mientras que bajo condiciones de sequía, es claro que existe un estrés hídrico severo en toda la cuenca, lo cual, plantea una seria problemática en la gestión de los recursos hídricos.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para un mejor acercamiento del modelo es importante implementar una etapa que contenga información referente a la contribución de cuencas aledañas, lo cual permita conocer de mejor manera los aportes hacia la cuenca del río Guayllabamba, y la disminución de caudales en dichas cuencas con la consecuente afectación que se pueda presentar, considerando el marco referencial de sequía.
- De los resultados del análisis de este modelo es necesario rever la gestión de los recursos hídricos a lo largo de la cuenca del río Guayllabamba, debido a que existe un sin número de industrias y sectores de uso consuntivo que limitan la cantidad y calidad del agua, lo cual hace que pequeños sectores agrícolas, así como caudales ecológicos se vean afectados por el desmedido uso del recurso.
- Existe un aumento de la frontera agrícola, ya que las zonas más vulnerables de páramo y bosque nativo han ido perdiendo su cobertura, lo cual a su vez incrementa la erosión y escorrentía en las diferentes cuencas. Es por ello que se hace necesario contribuir con la protección y buen manejo de las zonas de alta montaña, además de la contribución por parte de las entidades públicas.

BIBLIOGRAFÍA

Andrade, L., 2012. Diseño de la Red Metropolitana Ambiental de la Calidad del Recurso Hídrico. Quito: EPN - FONDO AMBIENTAL DMQ.

Allen, R. G., Pereira L. S., Raes D., y Smith M., 1998, Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrig. Drain. Pap. 56, Food and Agric. Organ of the U. N., Rome.

Baquero, F., Sierra, R., Ordoñez, L., Tipán, M., Espinoza, L., Ribera, M., Soria, P. 2004. La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación potencial y remanente de los Andes del Ecuador a escala 1:250.000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras. EcoCiencia / CESLA / EcoPar / MAG / SIGAGRO / CDC-JATUN SACHA / División Geográfica - IGM. Quito.

Buytaert, W., y De Bièvre B., 2012, Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes, Water Resour. Res., 48, W08503, doi: 10.1029/2011WR011755.

Buytaert W., De Bievre B., Wyseure G. y Deckers J., 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrological of catchments in the Andes. Hydrology and Earth System Sciences, 8 (1), 108-114.

Chow V. T., Maidment D. R., L. W. Mays, Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana, S.A., Bogotá, Colombia, 1994.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), 2014. Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura en la región Andina de Ecuador. CIAT Políticas en Síntesis No. 15. CIAT, Cali, Colombia. 6 p.

De Bievre B., Coello X., 2008. Diagnóstico del balance entre oferta y demanda hídrica, Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Hoya de Quito. UICN-Sur, Ecuador, 2008, 55 p.

Dirección de Gestión de Riego Provincial, Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha, 2014, Plan de Riego y Drenaje de la Provincia de Pichincha 2014-2029, Edicuatorial

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O., 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 179 p.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24 (Rev. 1), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 144 p.

Jensen, M.E., Burman, R.D., y Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, Estados Unidos de América, 360 p.

Ministerio de Agricultura, Acuicultura, Ganadería y Pesca, 2014. Documento Metodológico para la Generación del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental 2013 – 2014, Escala 1:100000 MAE.

Oudin L., Moulin L., Bendjoudi H. y Ribstein P., 2010. Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. Hydrological Sciences Journal, 55:2, 209-222, DOI: 10.1080/02626660903546118

Pereira, L.S. y Allen, R.G., 1998. Crop water requirements. Volúmen I del Handbook of Agricultural Engineering, CIGR y ASAE (en prensa).

Pouget J.C., Calvez R., Le Goulven P., Lloret P., Villacis M., 2008. Challenges of water resources planning in the Andes - The case of Quito in Ecuador. XIIIth World Water Congress (IWRA), (Ed. by O. Varis, C. Tortajada, P. Chevallier, B.Pouyaud, E. Servat), (Montpellier, France, 1-4 September 2008), 14 p.

Proaño D., 2010. Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrolladas - Cuenca alta del Guayllabamba y cuencas de abastecimiento de Quito, con la ayuda de la herramienta WEAP. Tesis de Ingeniero Civil Escuela Politécnica Nacional (EPN) Quito, 2010, 159 p.

SENAGUA. Base de Datos de las concesiones. 2010. Informe ejecución del Plan Operativo Anual. Primer cuatrimestre del 2010. Informe de gestión 2008 – 2010. Una gestión diferente de los recursos hídricos. Quito, 2010. 118 p

Serrano J., 2010. Regionalización espacial de series climáticas mensuales – Caso de estudio: Cuenca del Rio Guayllabamba. Tesis de Ingeniero Civil Escuela Politécnica Nacional (EPN) Quito, 2010, 250 p.

Shiklomanov, I.A., 1991. The world's water resources. Proc. Int. Symp. To Commemorates 25 Years of the IHP. UNESCO/IHP, Paris, France, pp. 93–126.

Sierra, R. 1999. Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN / GEF-BIRF y EcoCiencia. Quito, Ecuador.

Yáñez, P., Romero H., Cabrera A., Altamirano C., Patiño G. y Robalino C., 2012. Composición y dinámica de los agrosistemas del Distrito Metropolitano de Quito en los últimos treinta años y posibles interrelaciones con los efectos del cambio climático global. La Granja. Vol. 16(2): 48-68. ISSN: 1390-3799.

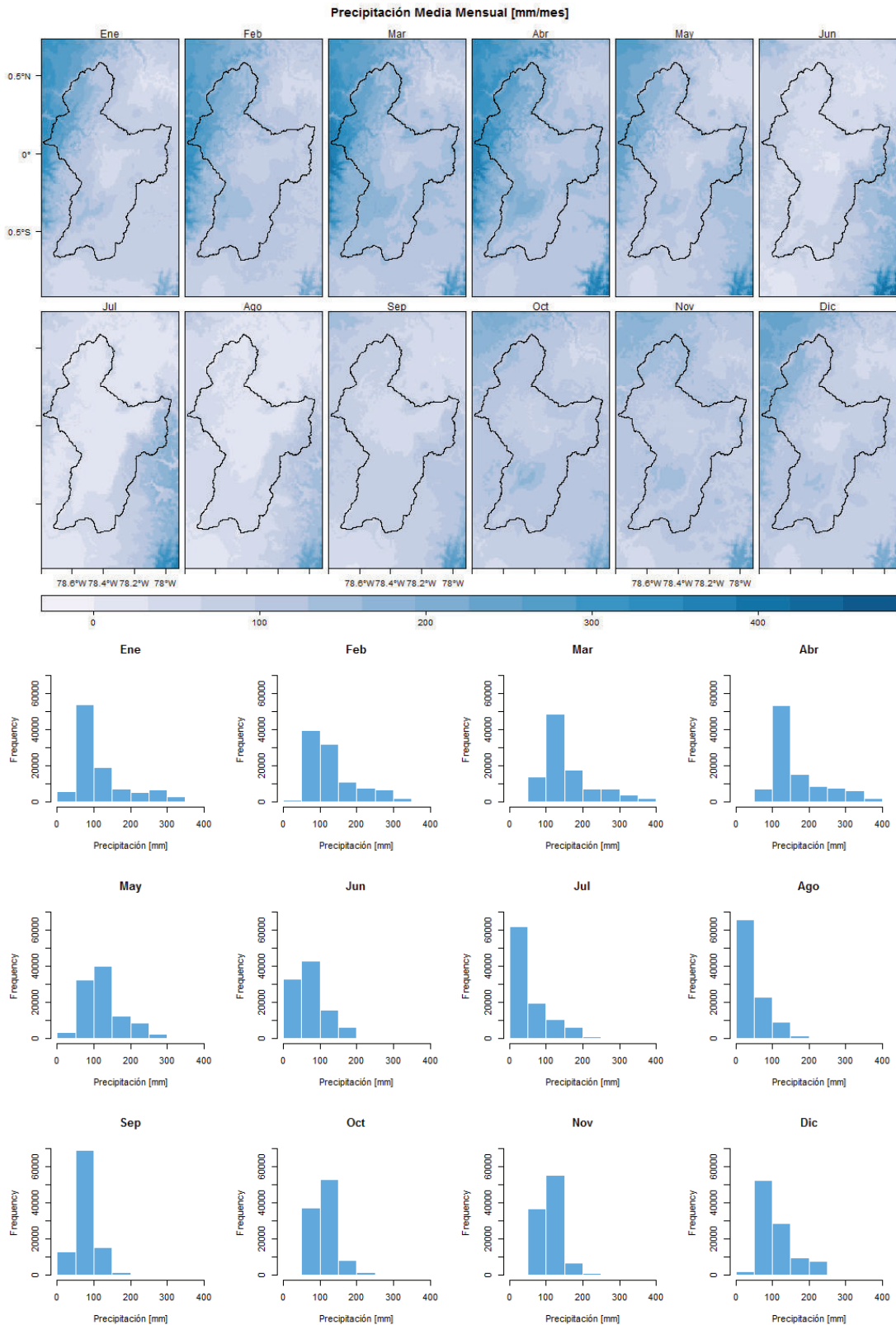
Zhang, L., Potter N., Hickel K., Zhang Y., y Shao Q., 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-Model development and testing, J. Hydrol., 360, 117–131, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.021.

ANEXOS

**ANEXO 1 ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS
REPRESENTATIVAS PARA LACUENCA DEL RÍO
GUAYLLABAMBA**

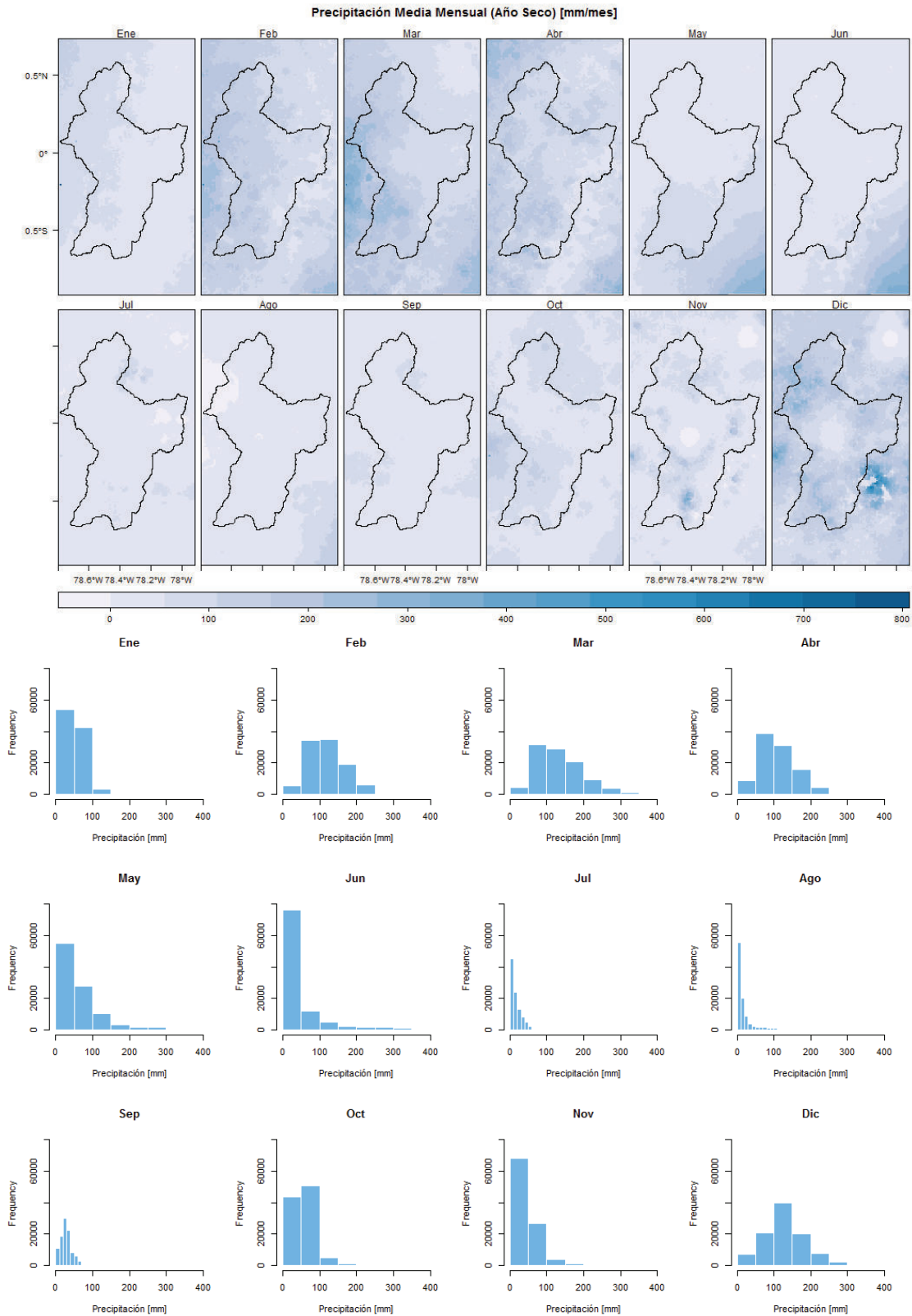
**ANEXO 2 DATOS CLIMATOLÓGICOS DE ENTRADA DEL
MODELO**

ANEXO 2.1 DATOS DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (1970 – 2010) E HISTOGRAMA.



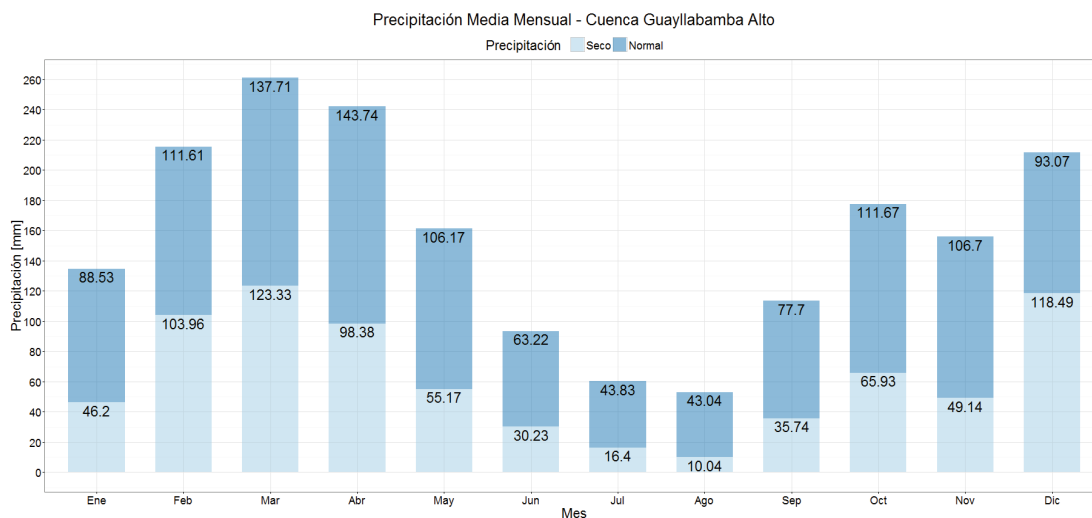
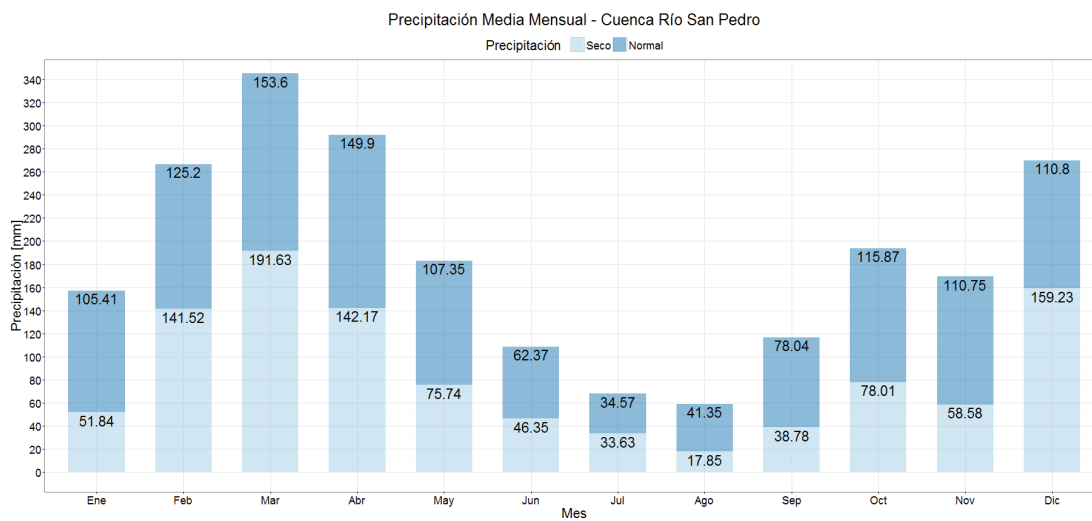
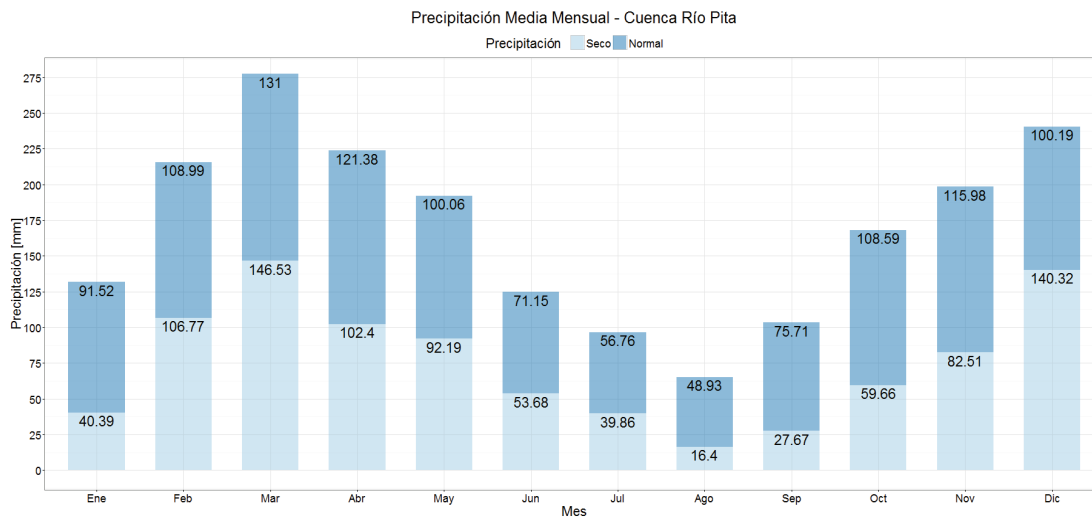
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.2 DATOS DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL AÑO SECO (2005) E HISTOGRAMA.



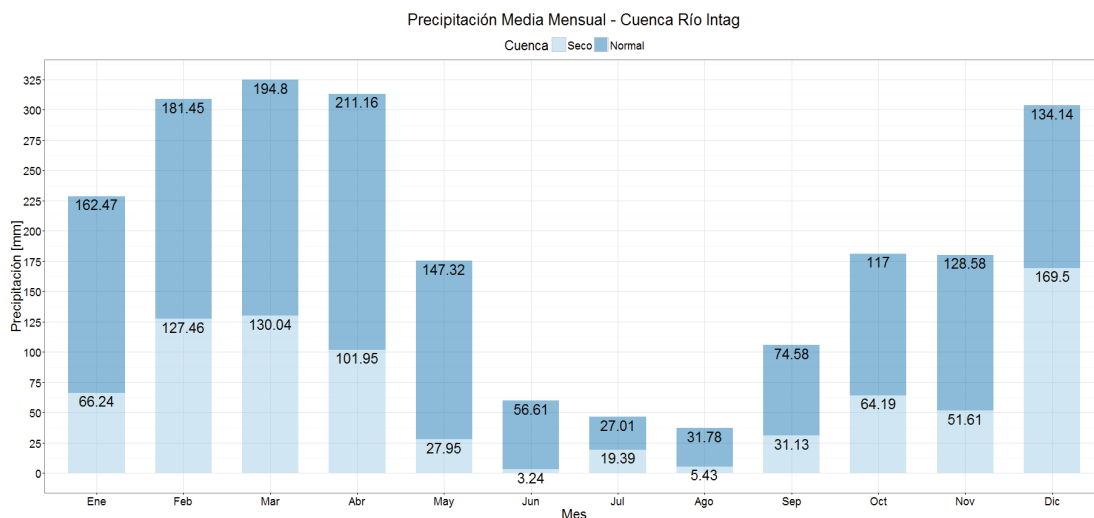
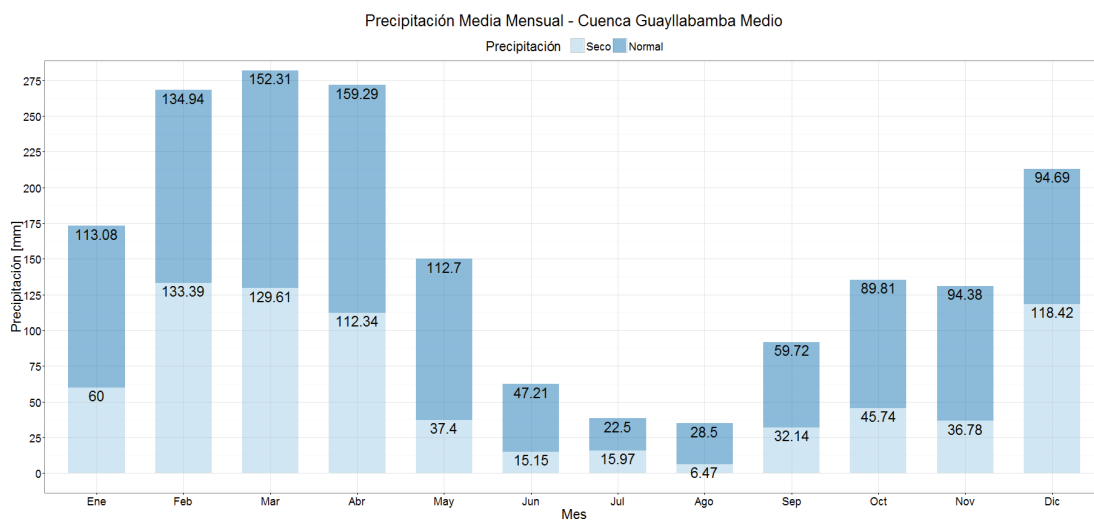
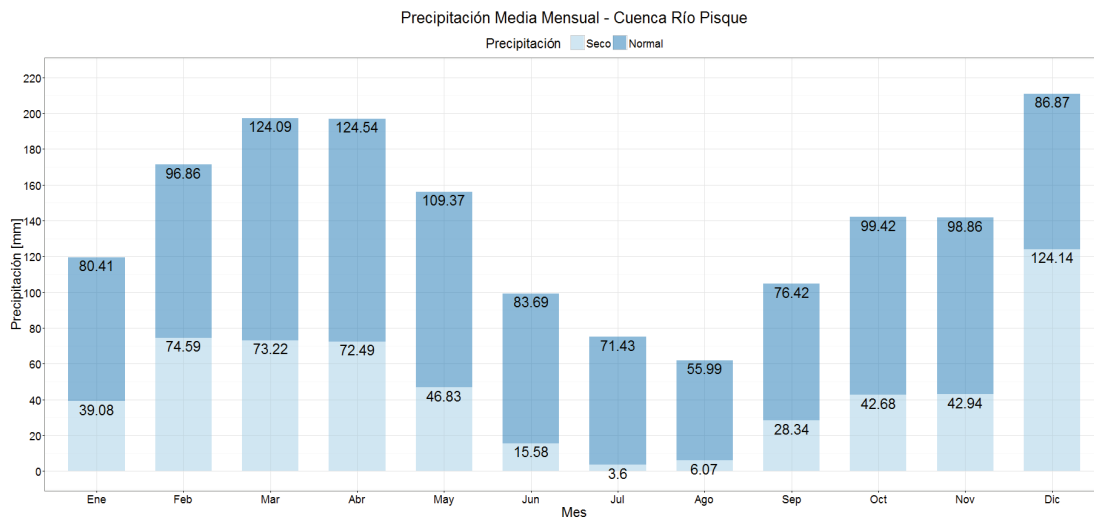
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.3 DATOS DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (1970-2010) Y AÑO SECO (2005) - CUENCA RÍO PITA, RÍO SAN PEDRO Y GUAYLLABAMBA ALTO.



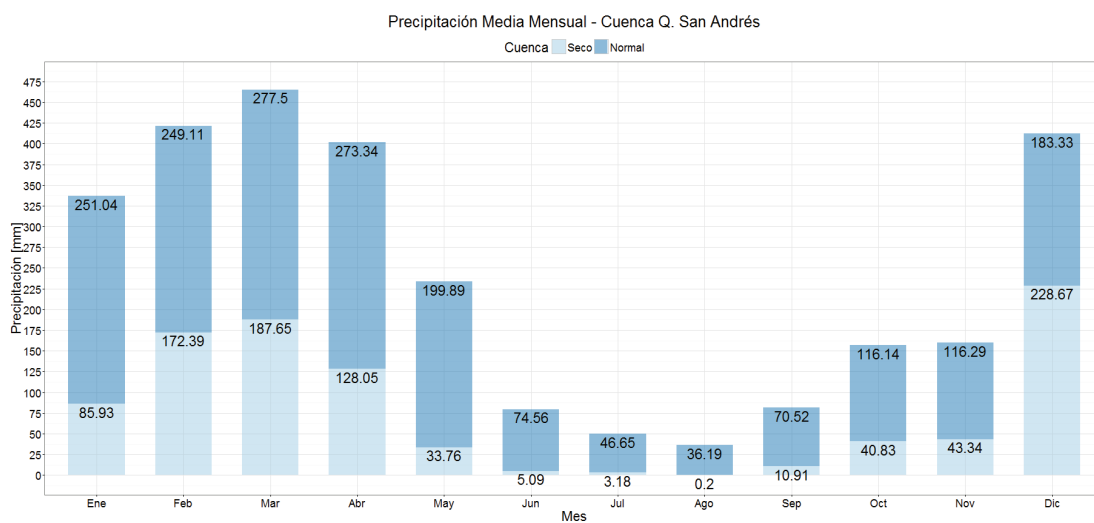
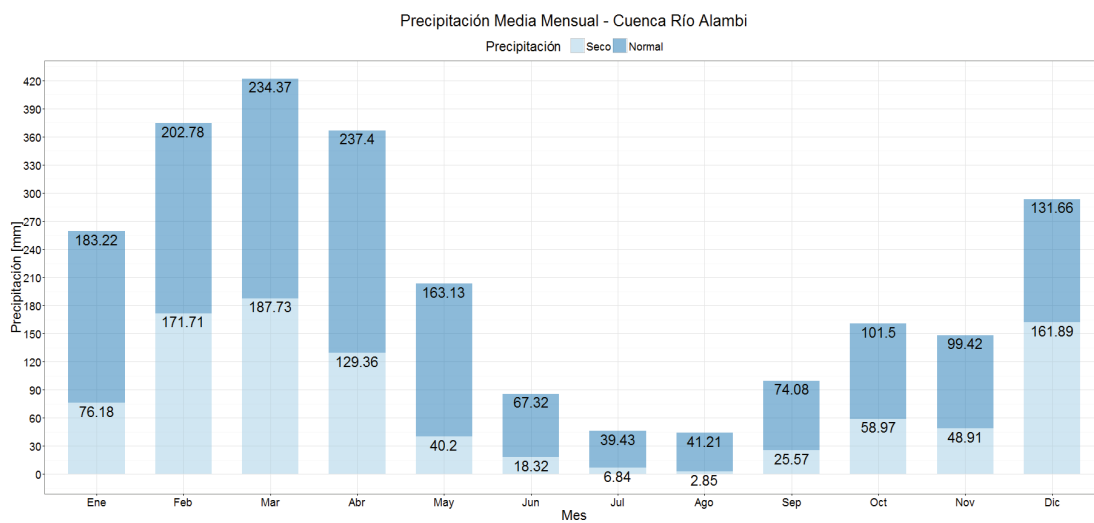
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.4 DATOS DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (1970-2010) Y AÑO SECO (2005) - CUENCA RÍO PISQUE, GUAYLLABAMBA MEDIO Y RÍO INTAG.



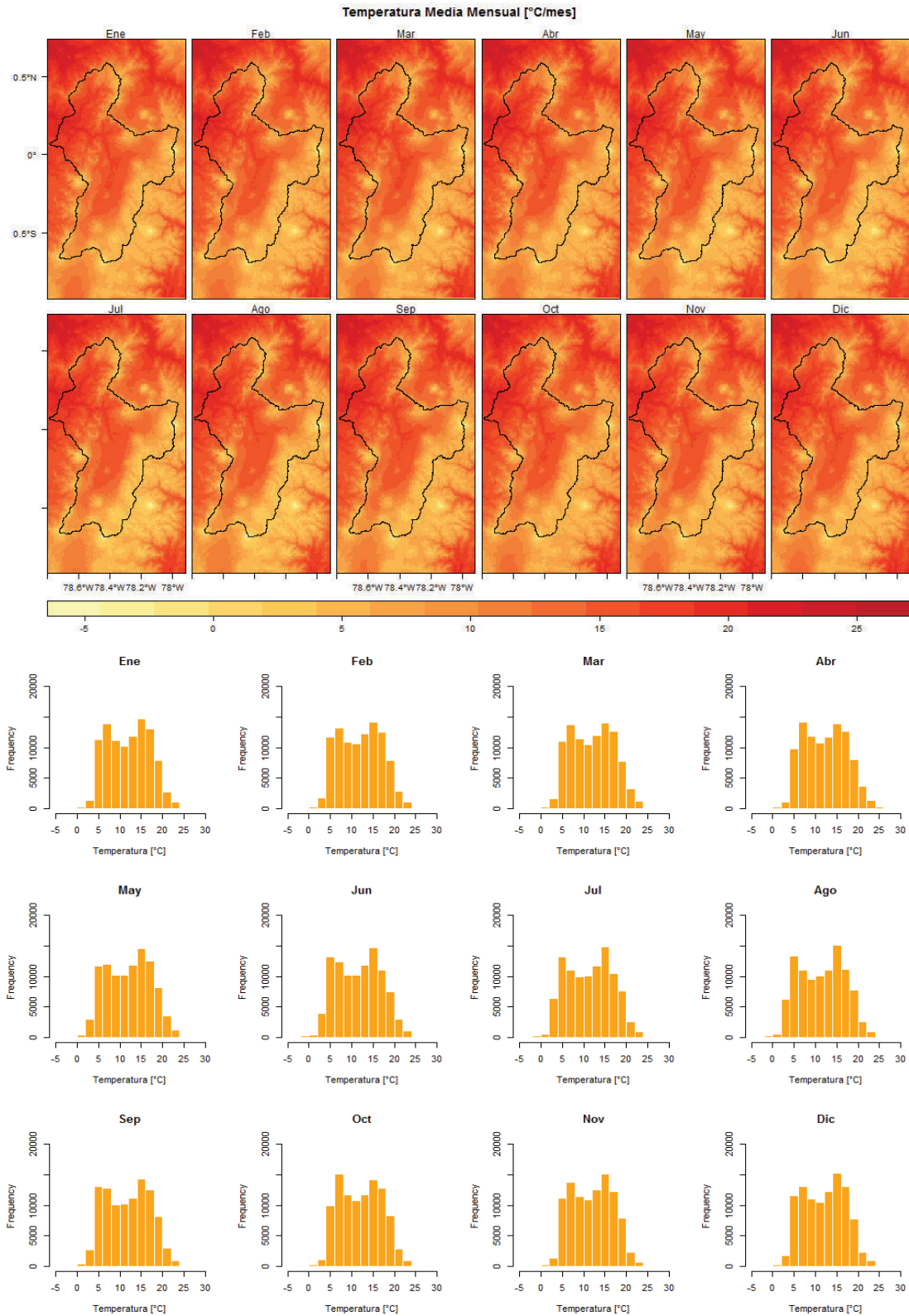
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.5 DATOS DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (1970-2010) Y AÑO SECO (2005) - CUENCA RÍO ALAMBI Y QUEBRADA SAN ANDRÉS.



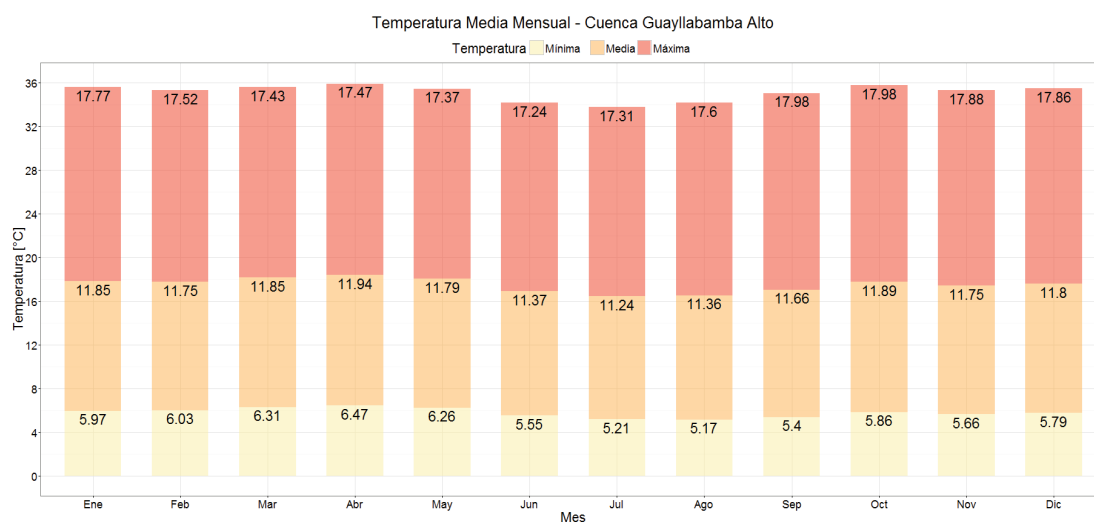
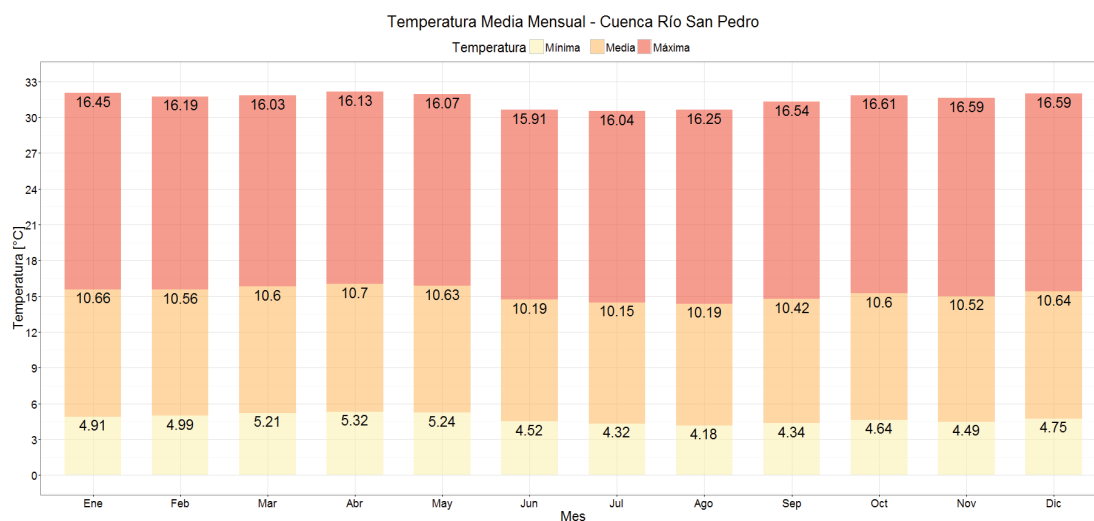
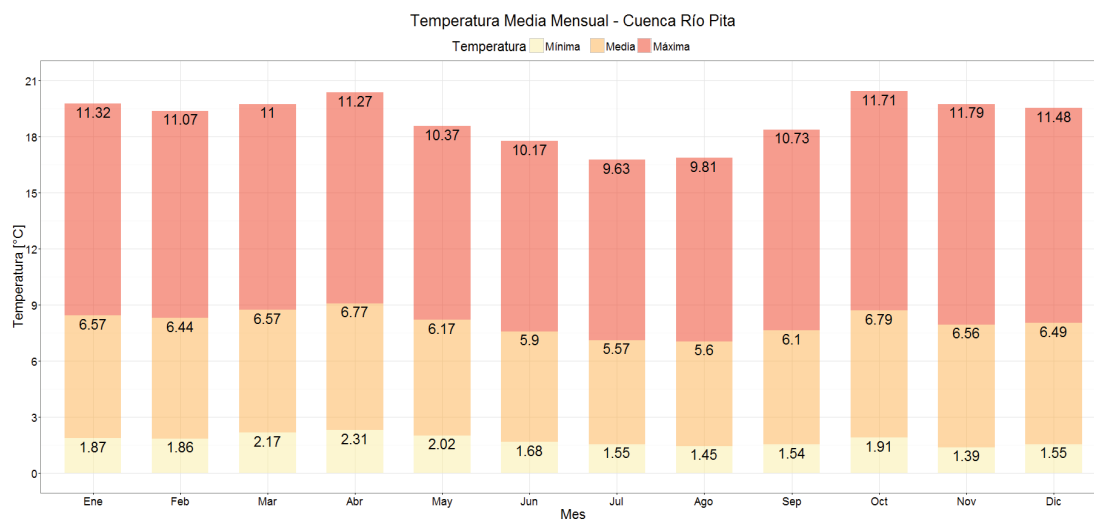
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.6 DATOS DE ENTRADA: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (1970-2010)) E HISTOGRAMA.



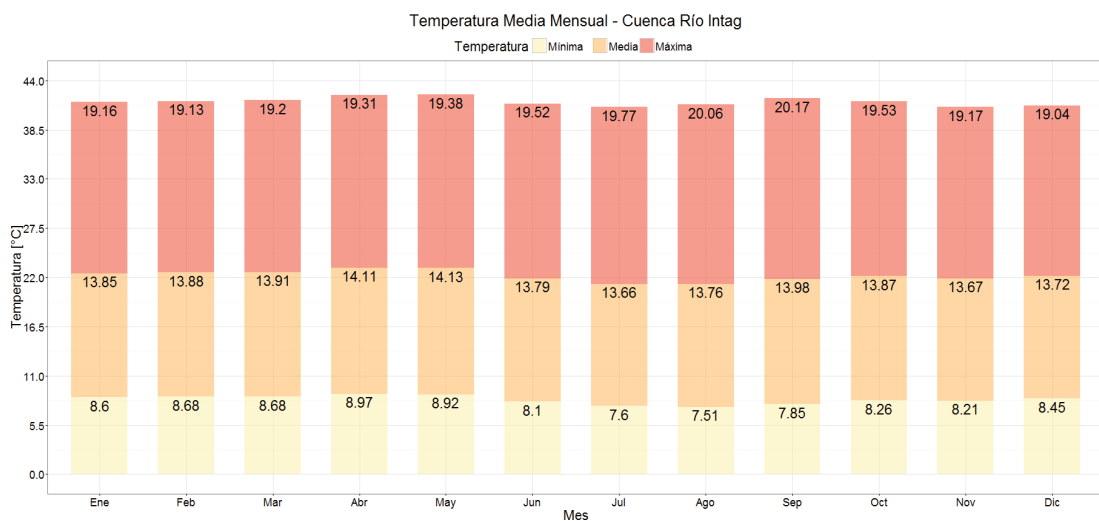
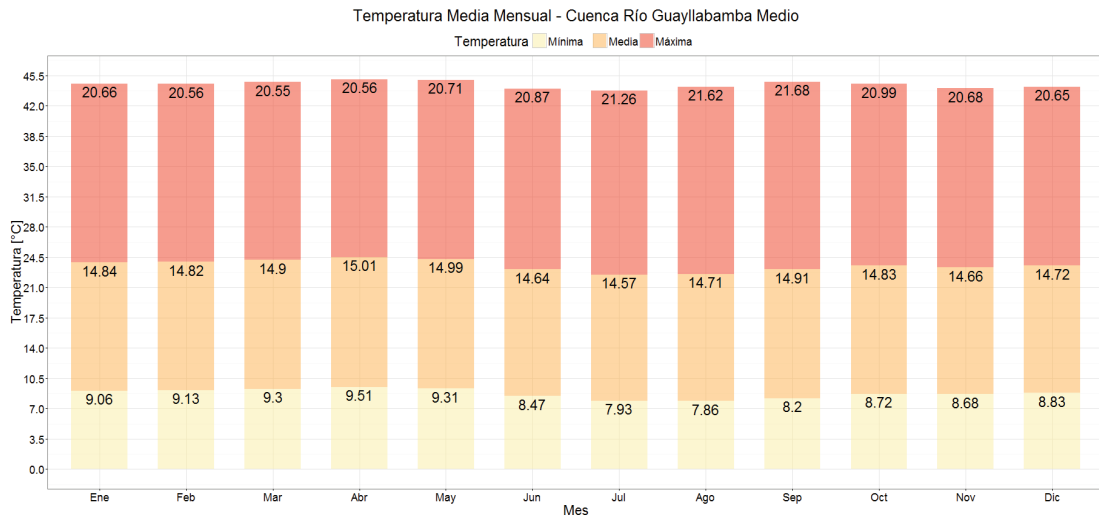
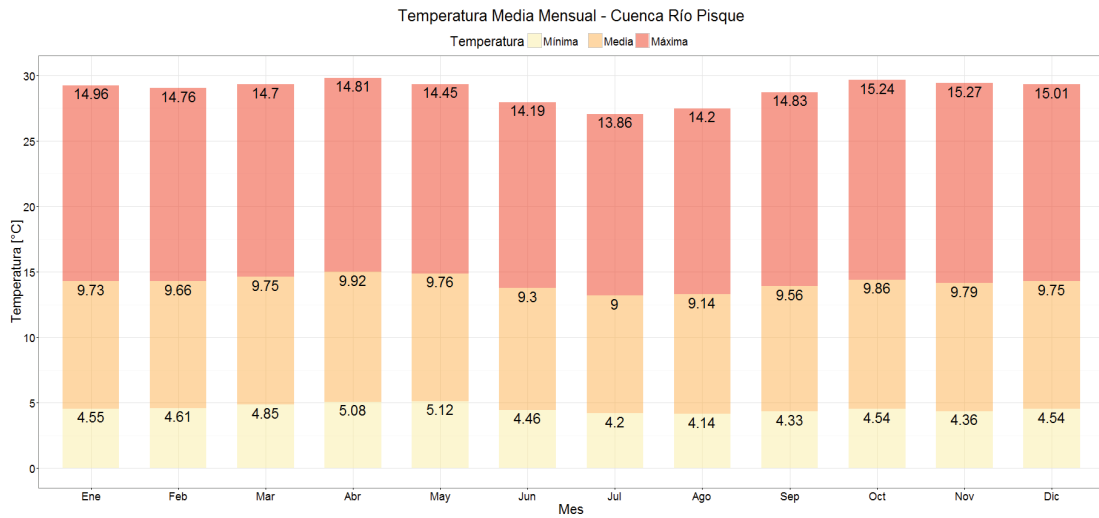
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.7 DATOS DE ENTRADA: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (1970-2010), CUENCA RÍO PITA, SAN PEDRO Y GUAYLLABAMBA ALTO.



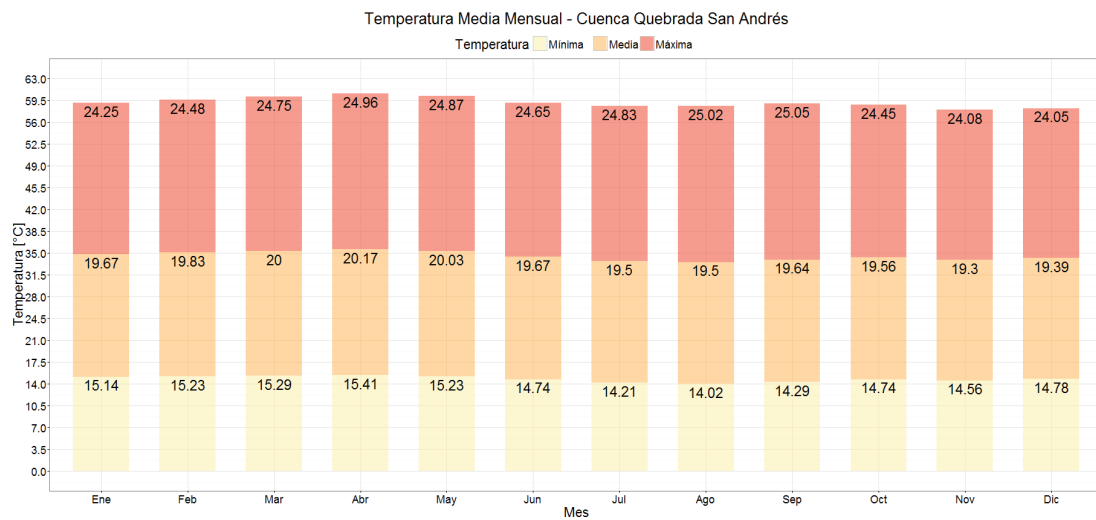
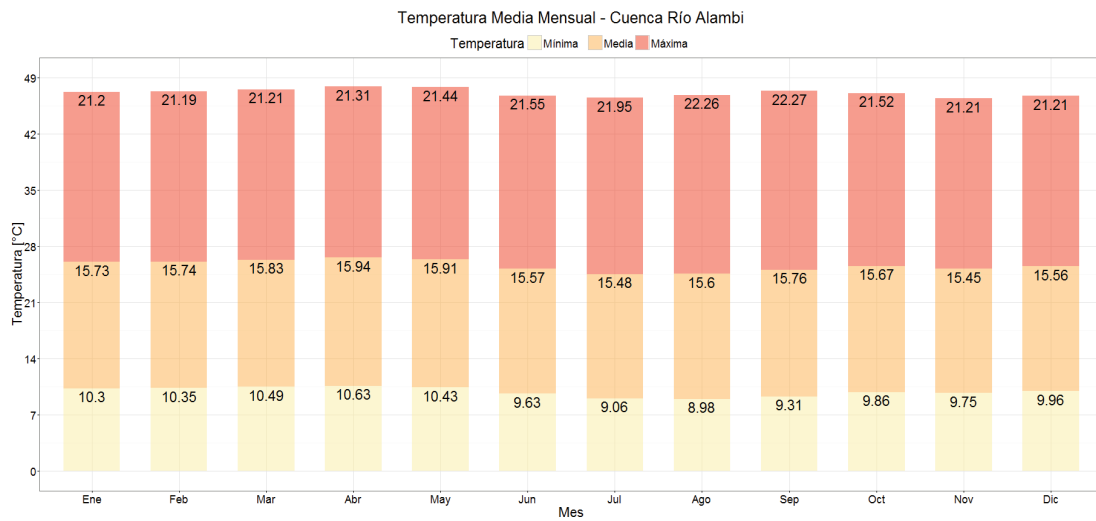
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 2.8 DATOS DE ENTRADA: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (1970-2010), CUENCA RÍO PISQUE, GUAYLLABAMBA MEDIO Y RÍO INTAG.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

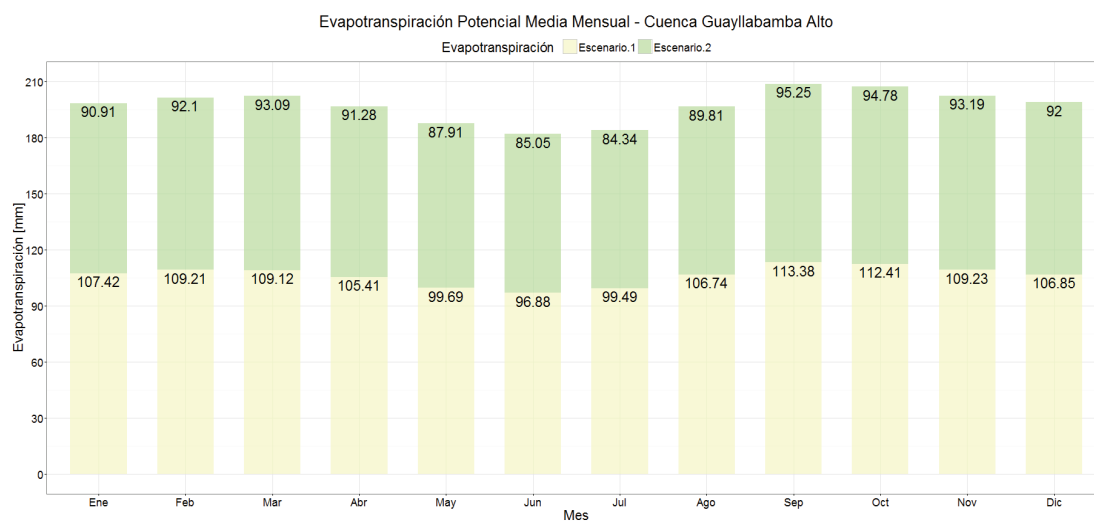
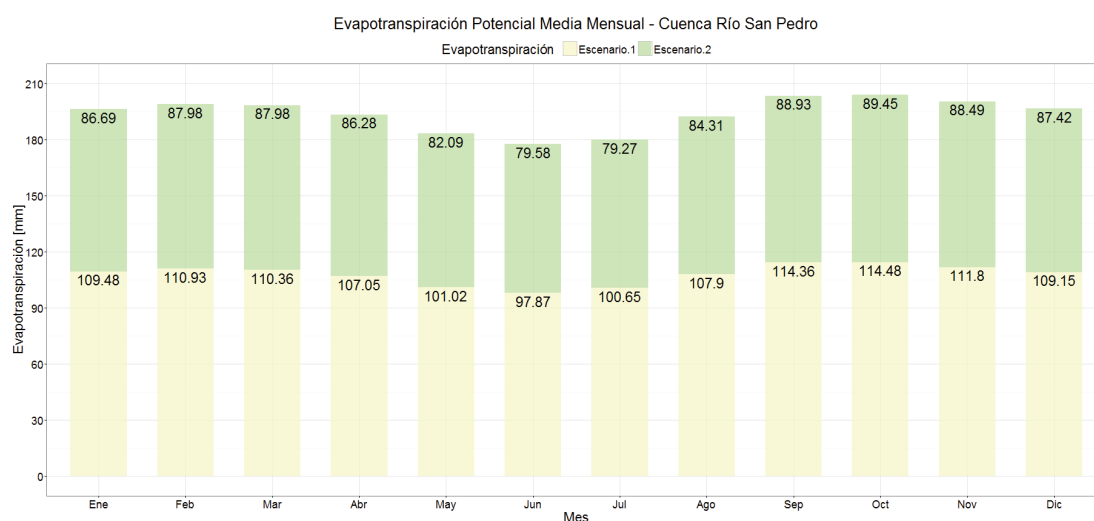
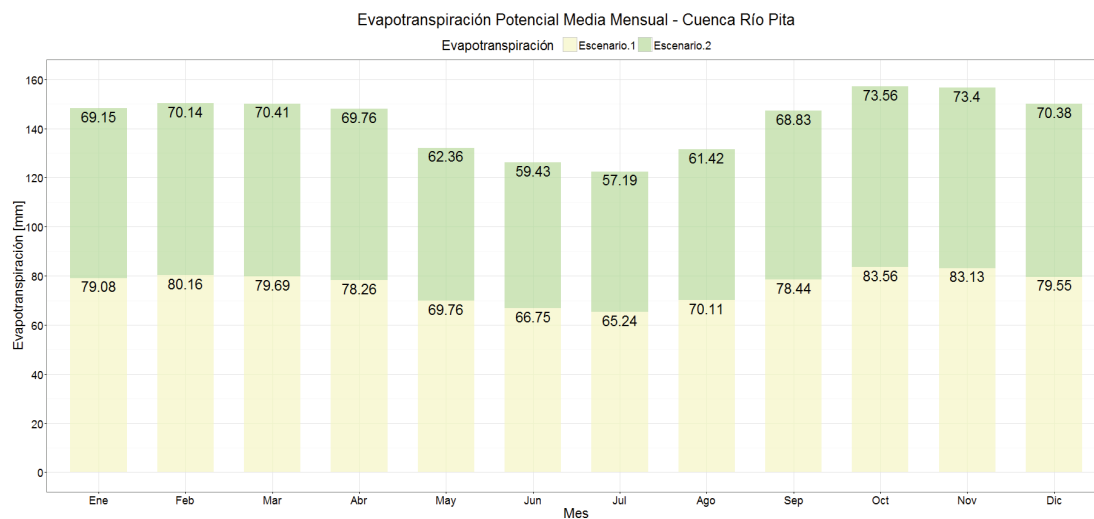
ANEXO 2.9 DATOS DE ENTRADA: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (1970-2010), CUENCA RÍO ALAMBI Y QUEBRADA SAN ANDRÉS.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

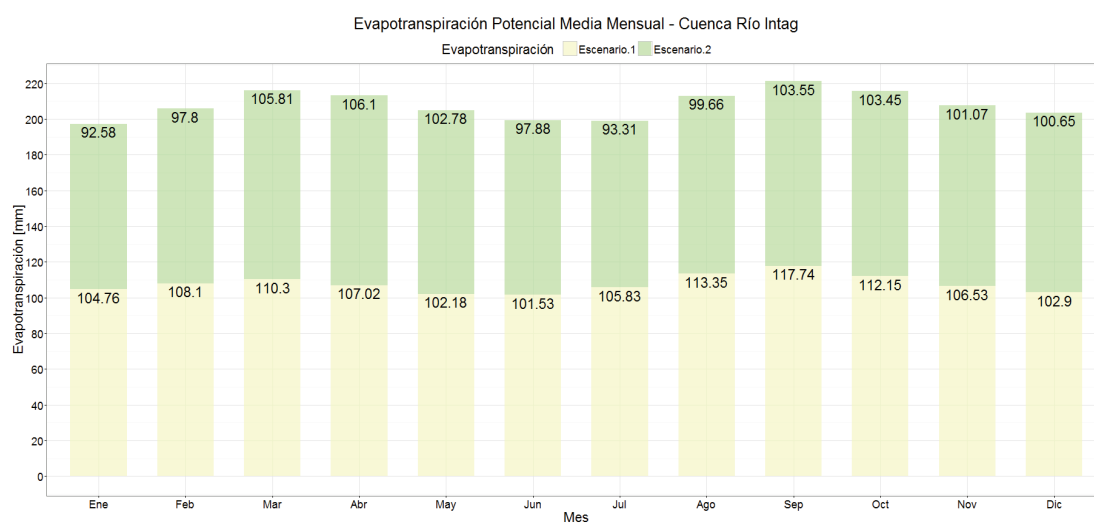
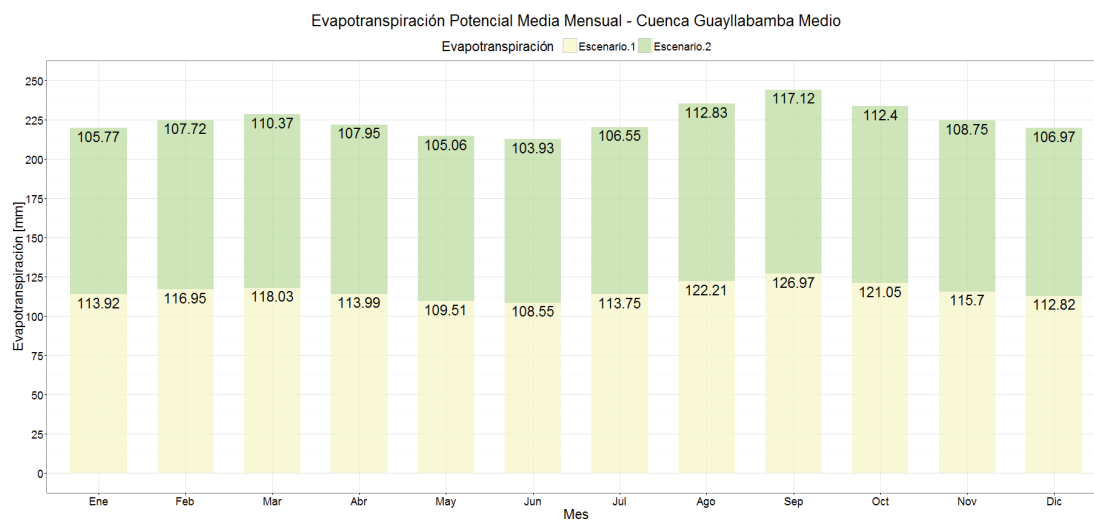
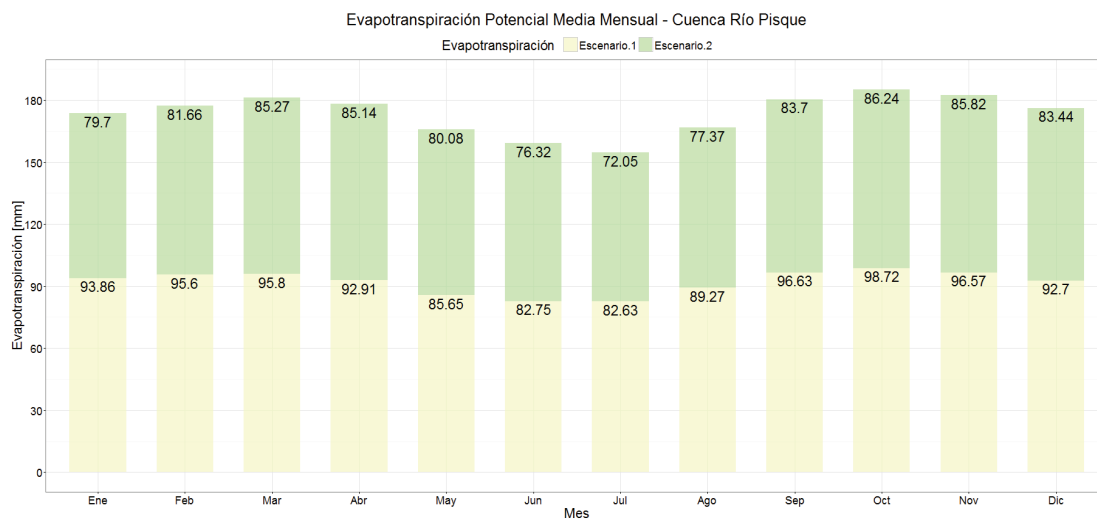
**ANEXO 3 RESULTADOS PARA PRUEBAS DEL MODELO
(ESCENARIO 1 Y ESCENARIO 2)**

ANEXO 3.10 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, CUENCA RÍO PITA, RÍO SAN PEDRO Y GUAYLLABAMBA ALTO.



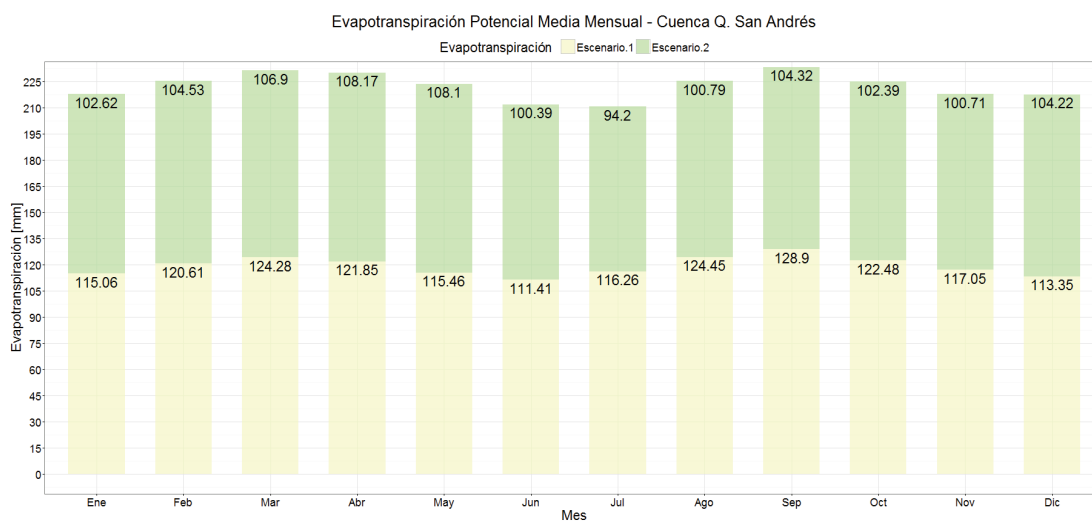
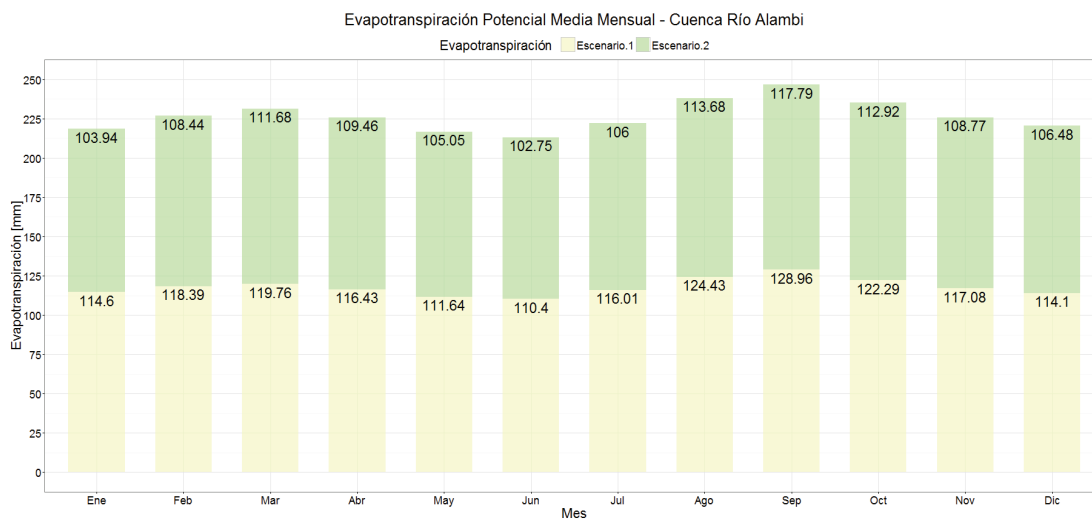
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.11 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, CUENCA RÍO PISQUE, GUAYLLABAMBA MEDIO, RÍO INTAG.



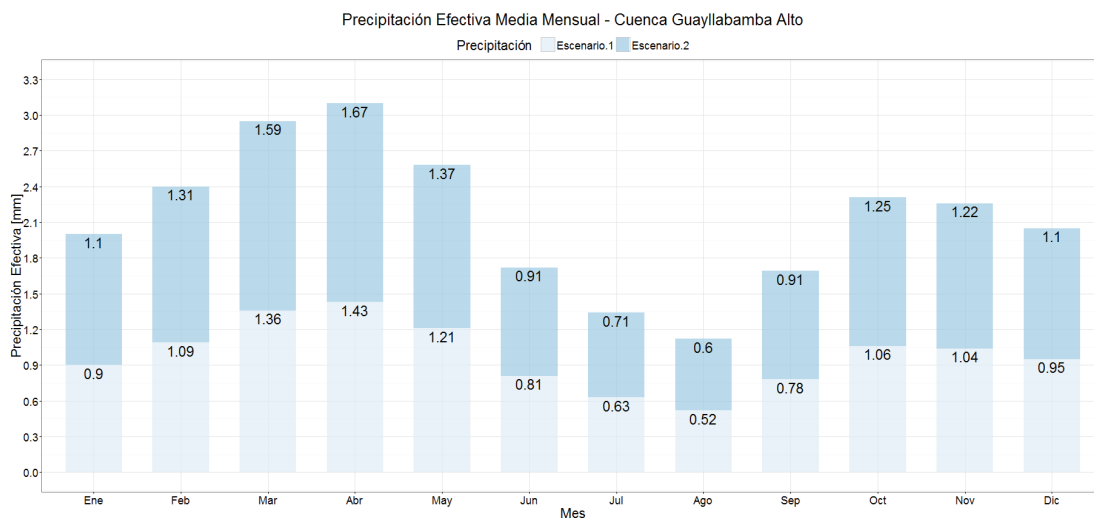
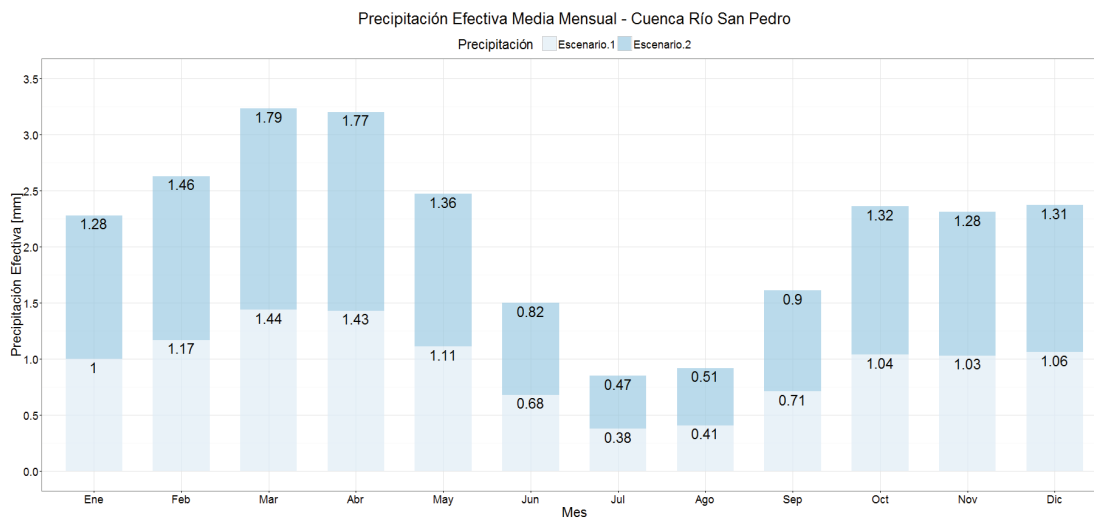
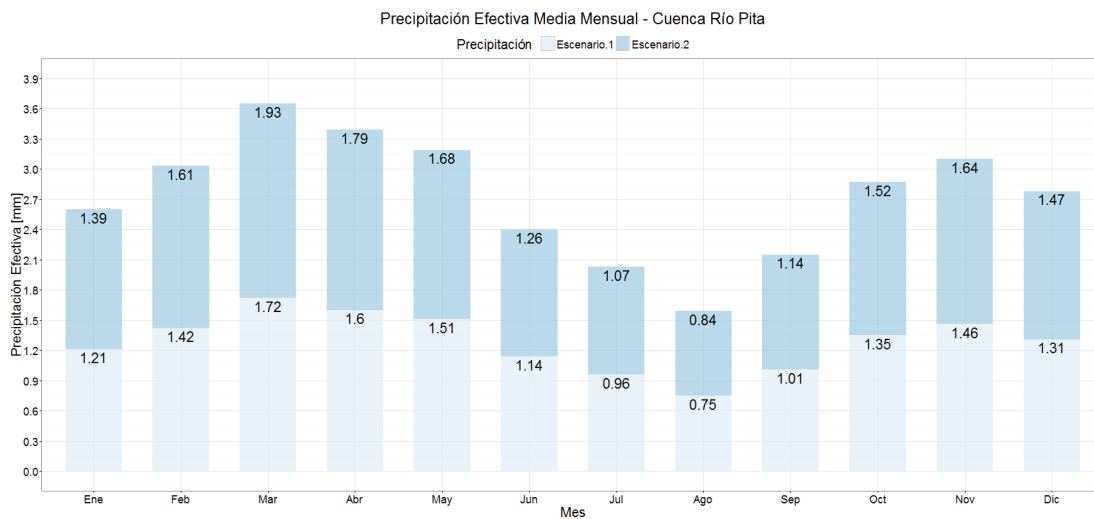
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.12 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, CUENCA RÍO ALAMBI Y QUEBRADA SAN ANDRÉS.



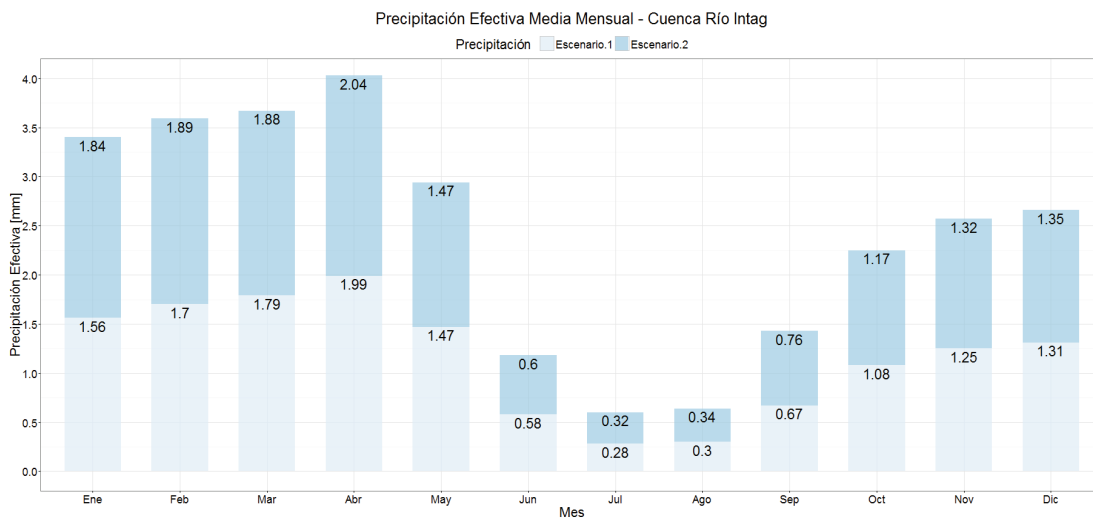
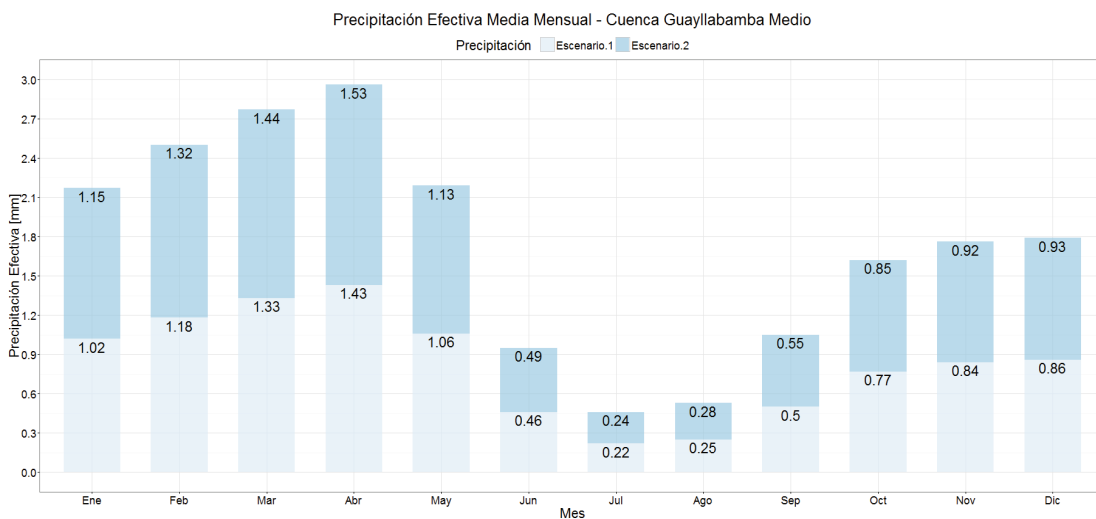
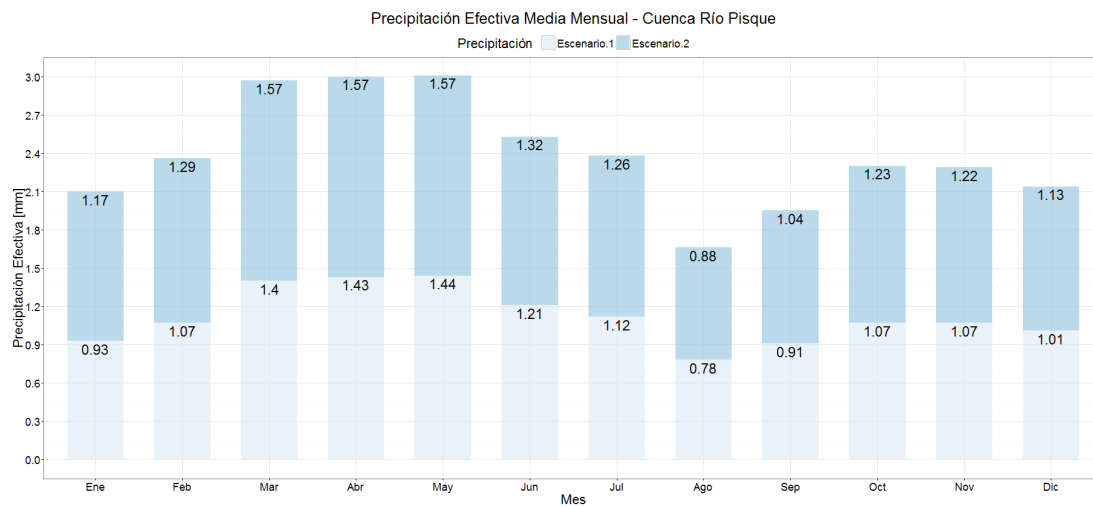
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.13 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL, CUENCA RÍO PITA, RÍO SAN PEDRO Y GUAYLLABAMBA ALTO.



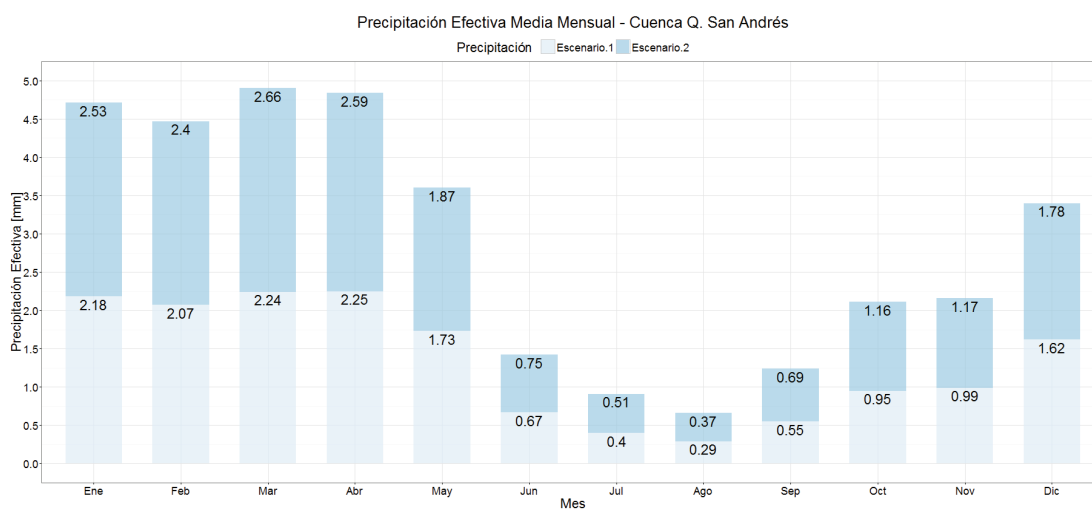
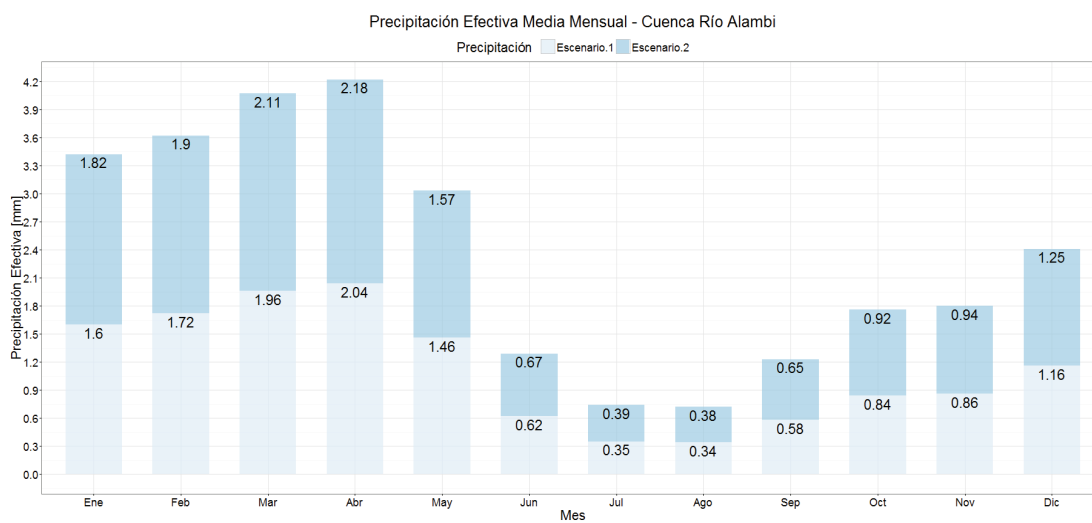
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.14 PRECIPITACIÓN EFECTIVA, CUENCA RÍO PISQUE, GUAYLLABAMBA MEDIO, RÍO INTAG.



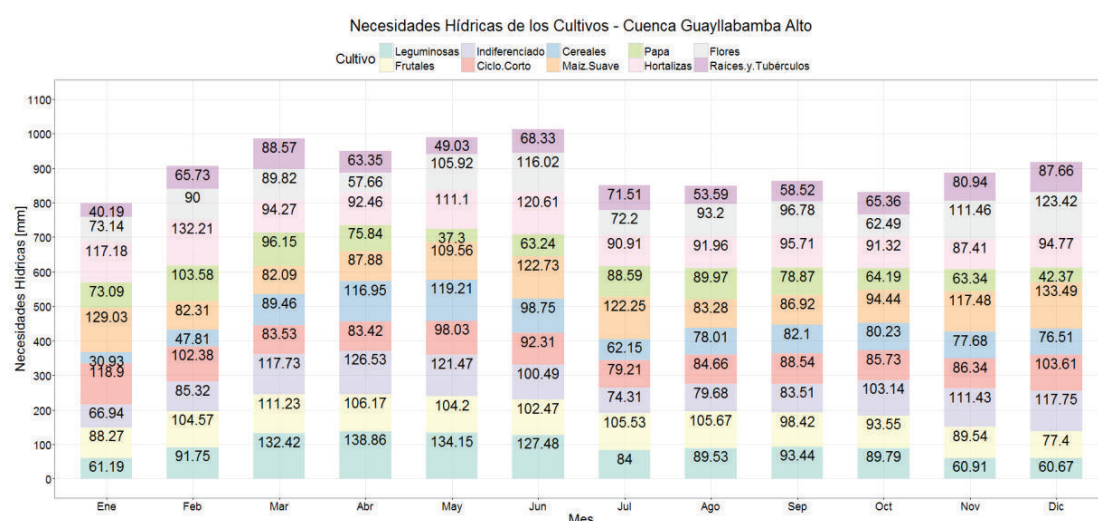
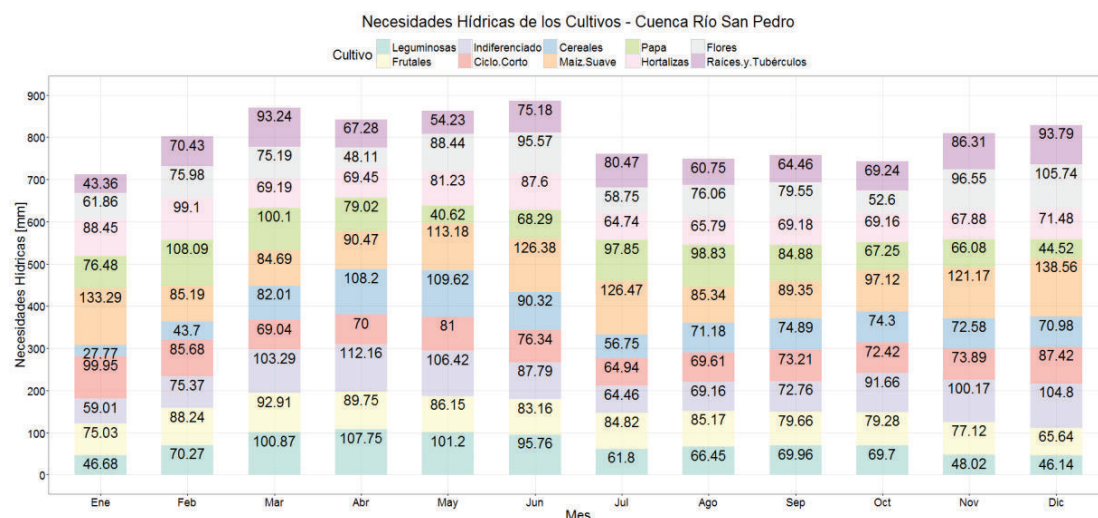
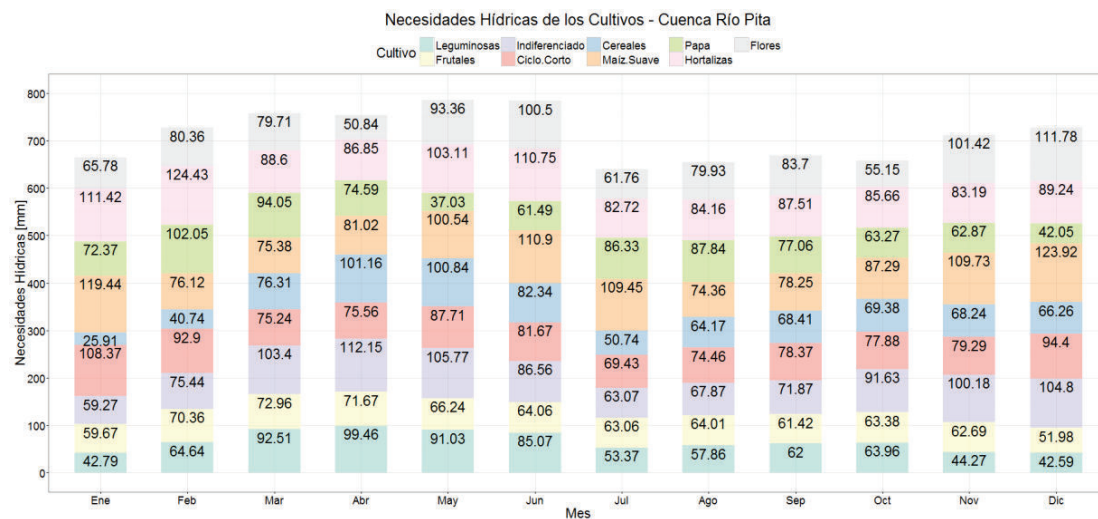
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.15 PRECIPITACIÓN EFECTIVA MEDIA MENSUAL, CUENCA RÍO ALAMBI Y QUEBRADA SAN ANDRÉS.



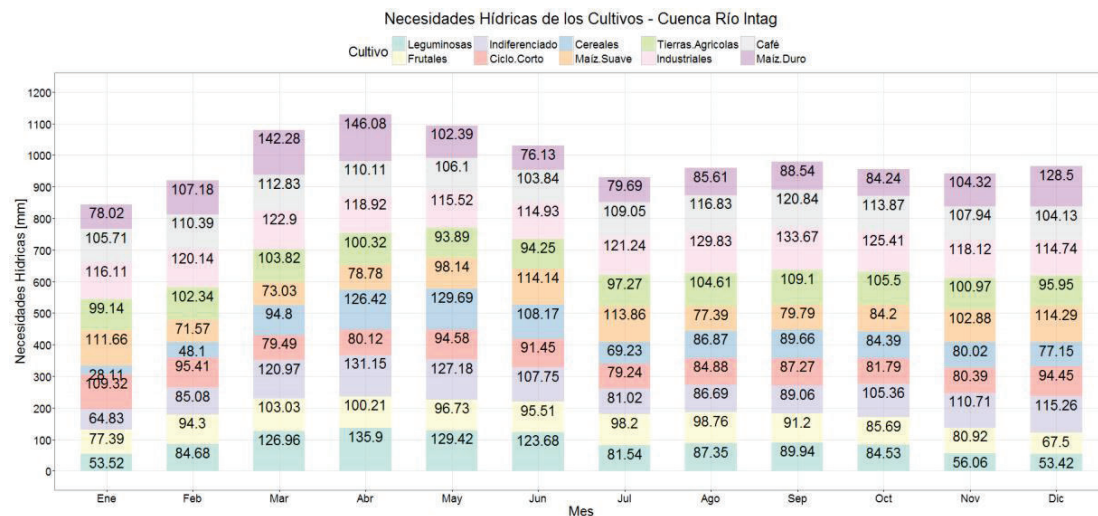
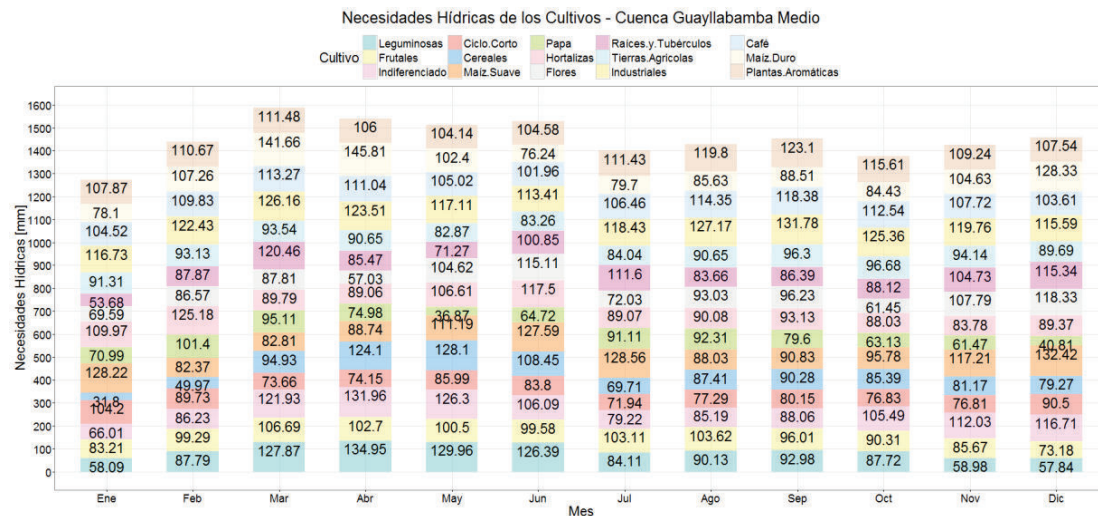
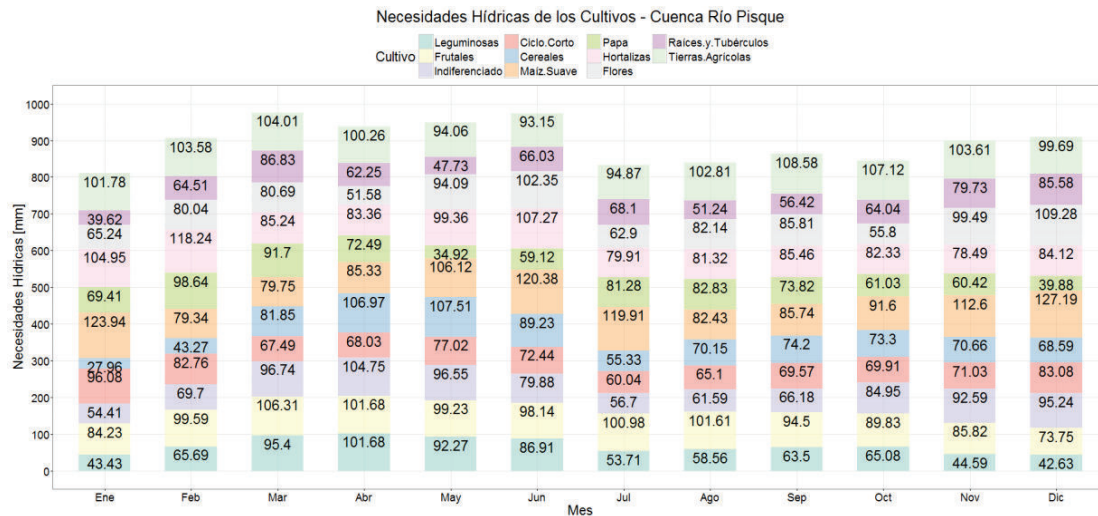
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.16 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS, CUENCA RÍO PITA, RÍO SAN PEDRO Y GUAYLLABAMBA ALTO.



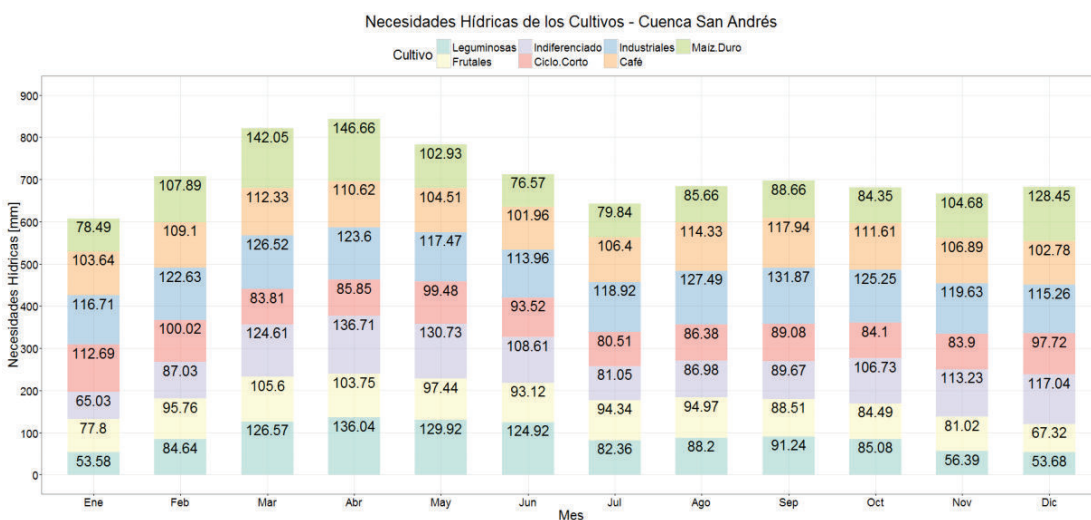
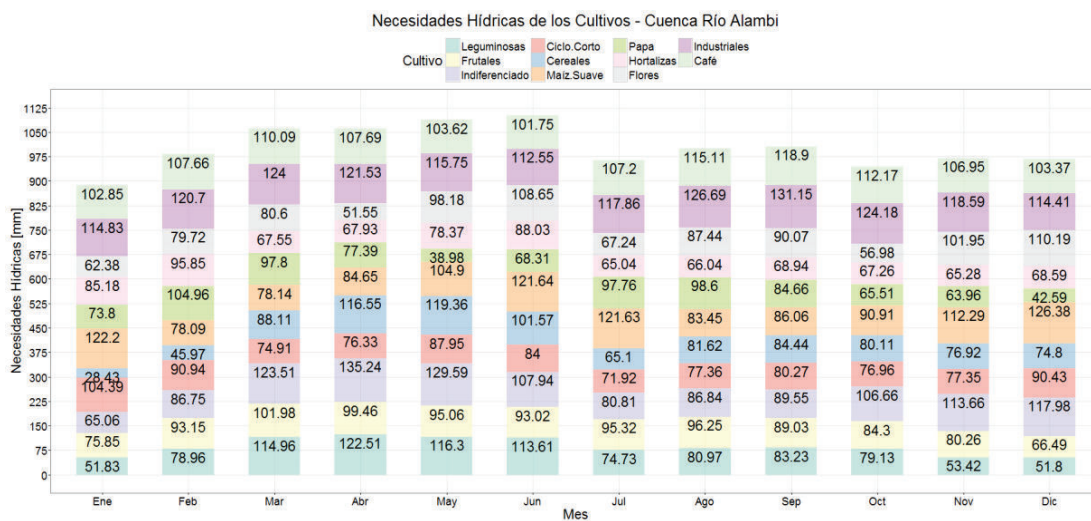
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.17 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS, CUENCA RÍO PISQUE, GUAYLLABAMBA MEDIO Y RÍO INTAG.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 3.18 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS, CUENCA RÍO ALAMBI Y QUEBRADA SAN ANDRÉS.

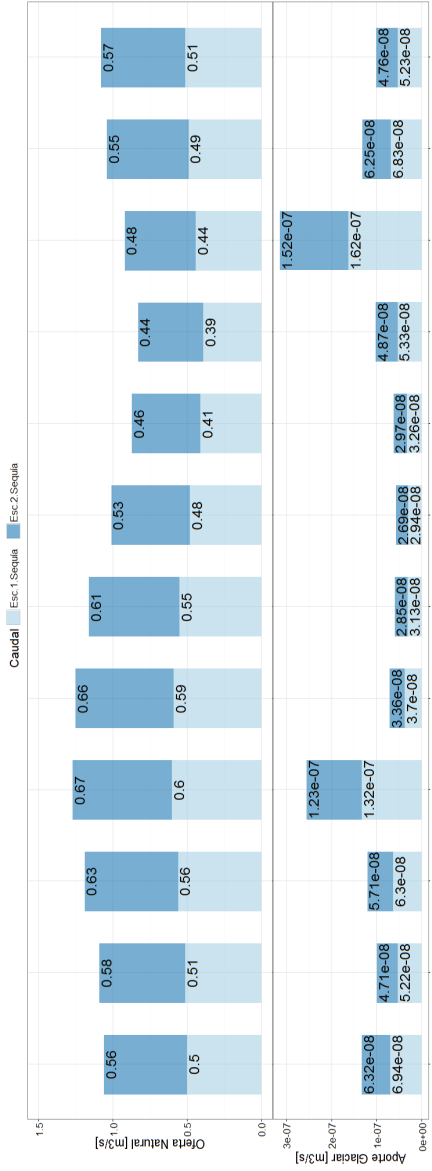


ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

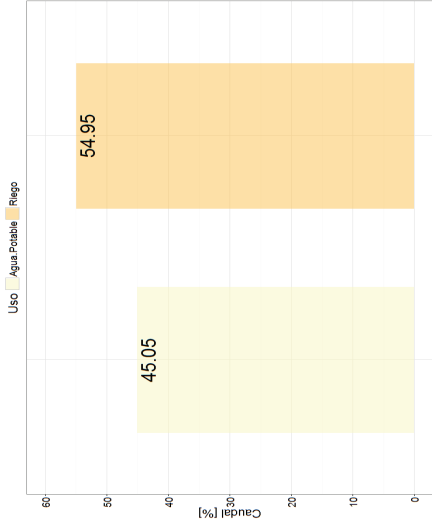
**ANEXO 4 OFERTA, DEMANDA Y ESTRÉS HÍDRICO PARA LA
CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA (ESCENARIO 1 Y
ESCENARIO 2)**

ANEXO 4.19 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA, CUENCA RÍO PITA Y RÍO SAN PEDRO.

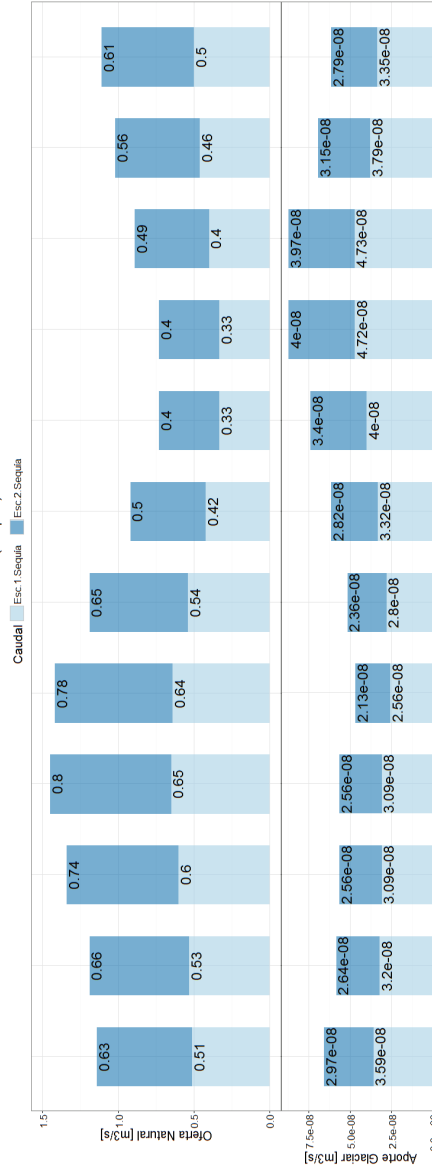
Caudal de Oferta Natural (Sequia) - Río Pita



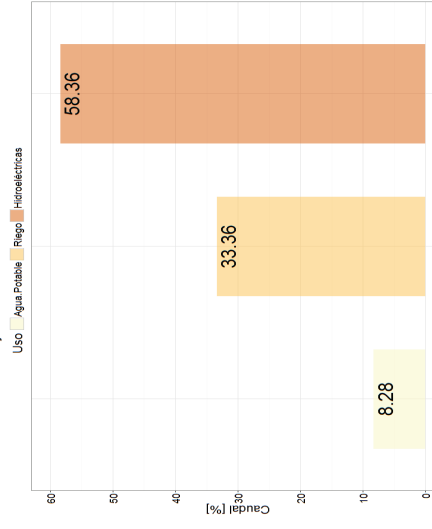
Porcentaje de Demanda - Cuenca Río Pita



Caudal de Oferta Natural (Sequia) - Río San Pedro

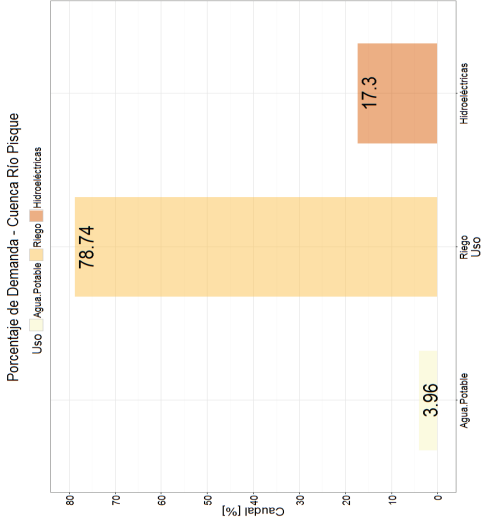
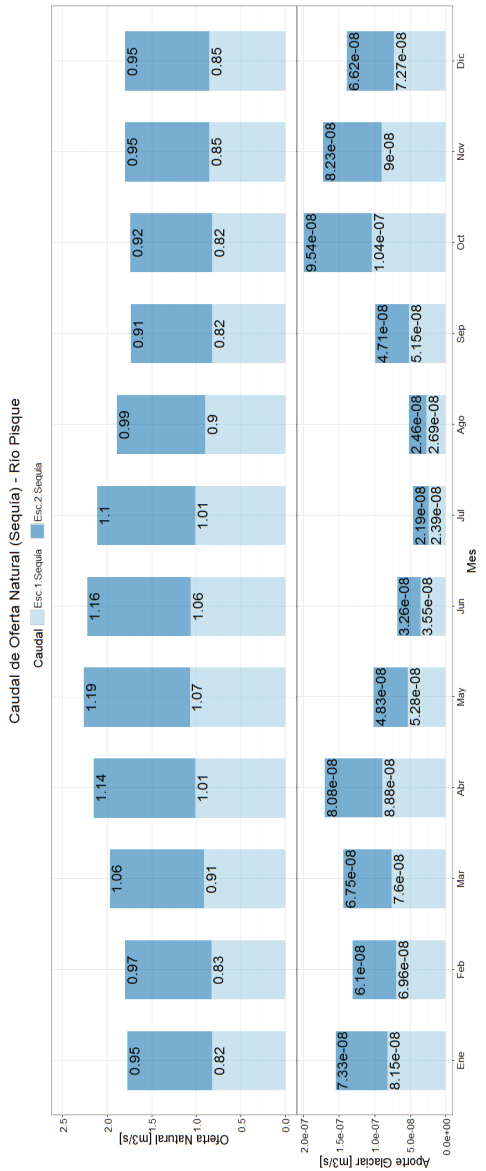
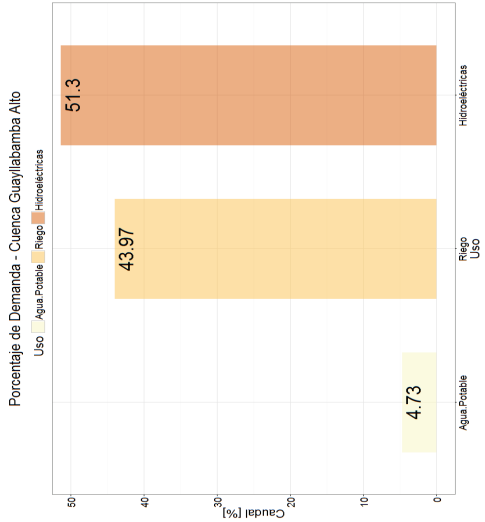
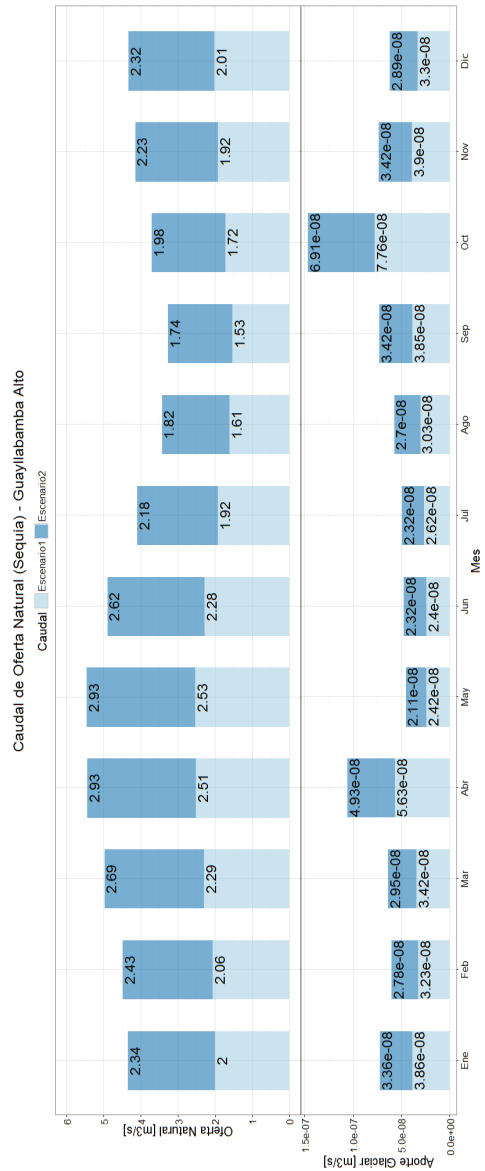


Porcentaje de Demanda - Cuenca Río San Pedro



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

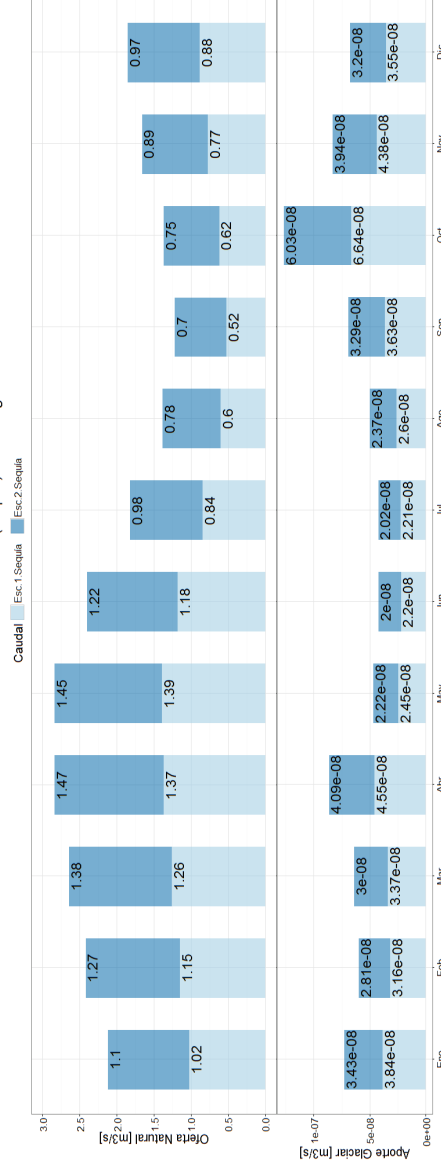
ANEXO 4.20 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA, CUENCA GUAYLLABAMBA ALTO Y RÍO PISQUE.



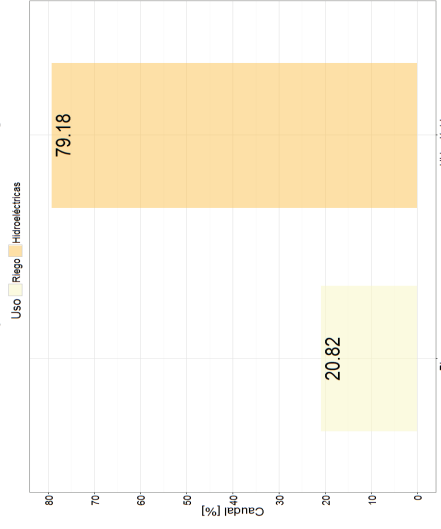
ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 4.21 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA, CUENCA RÍO INTAG Y RÍO ALAMBI.

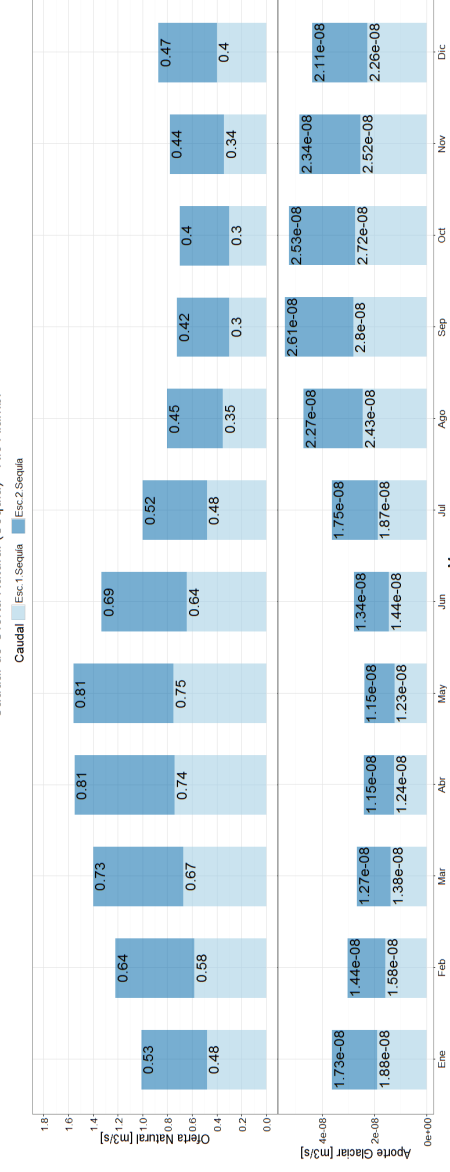
Caudal de Oferta Natural (Sequia) - Río Intag



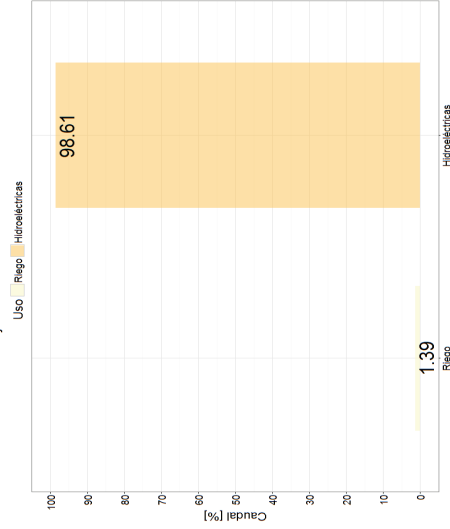
Porcentaje de Demanda - Cuenca Río Intag



Caudal de Oferta Natural (Sequia) - Río Alambi

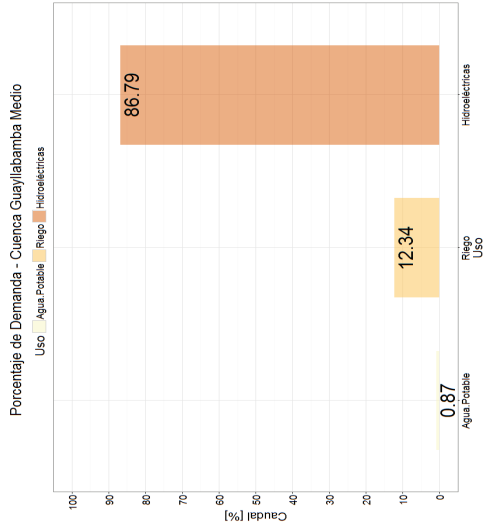
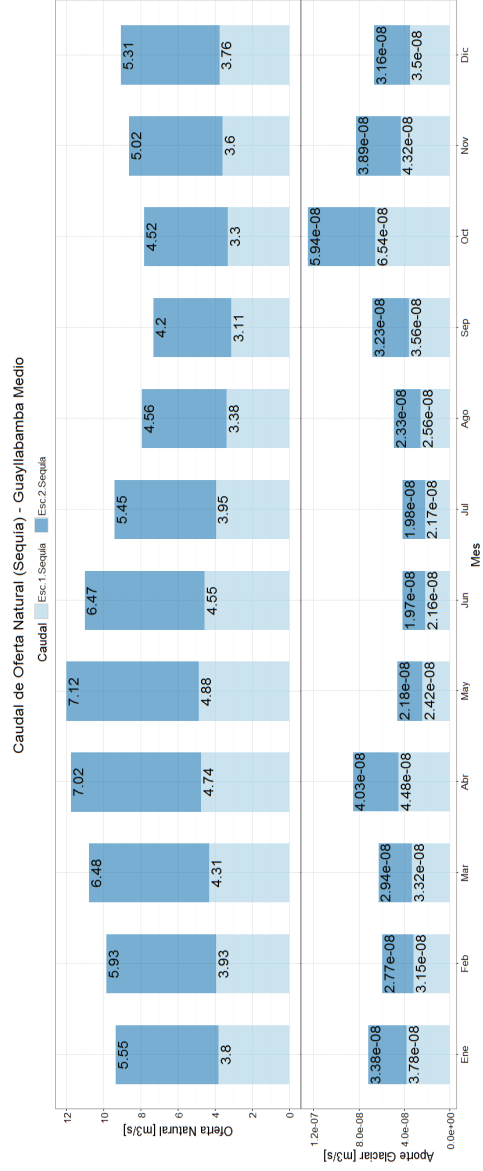


Porcentaje de Demanda - Cuenca Río Alambi



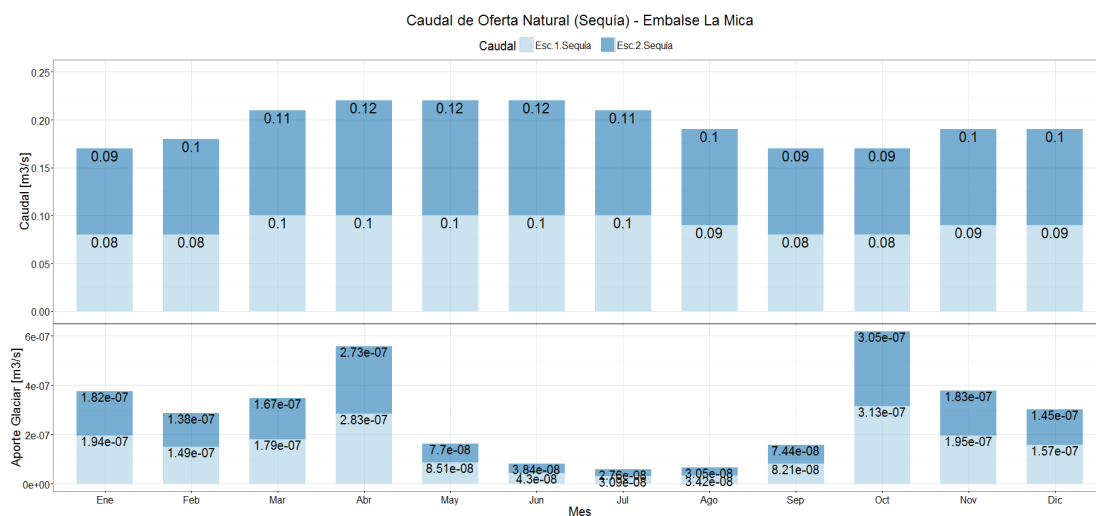
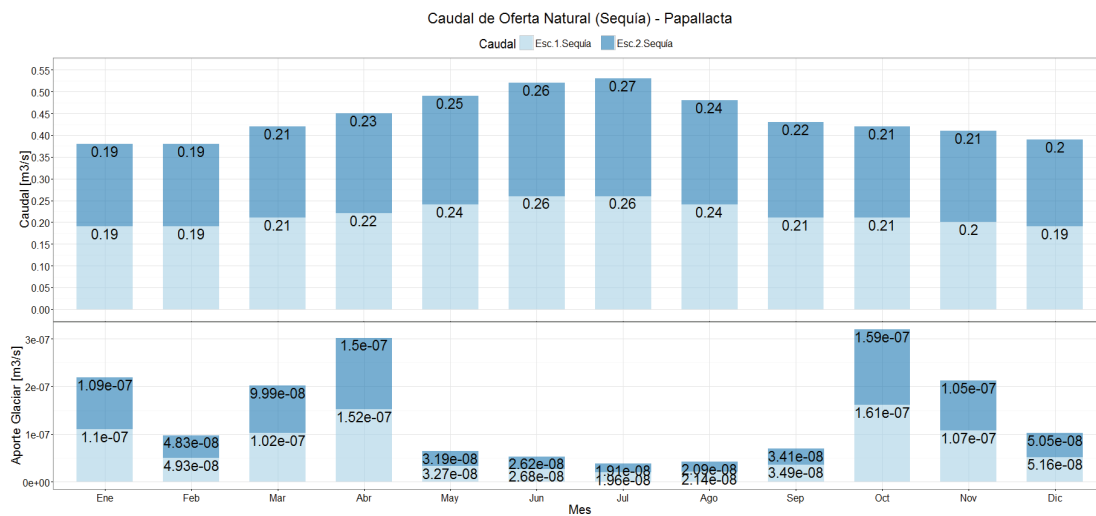
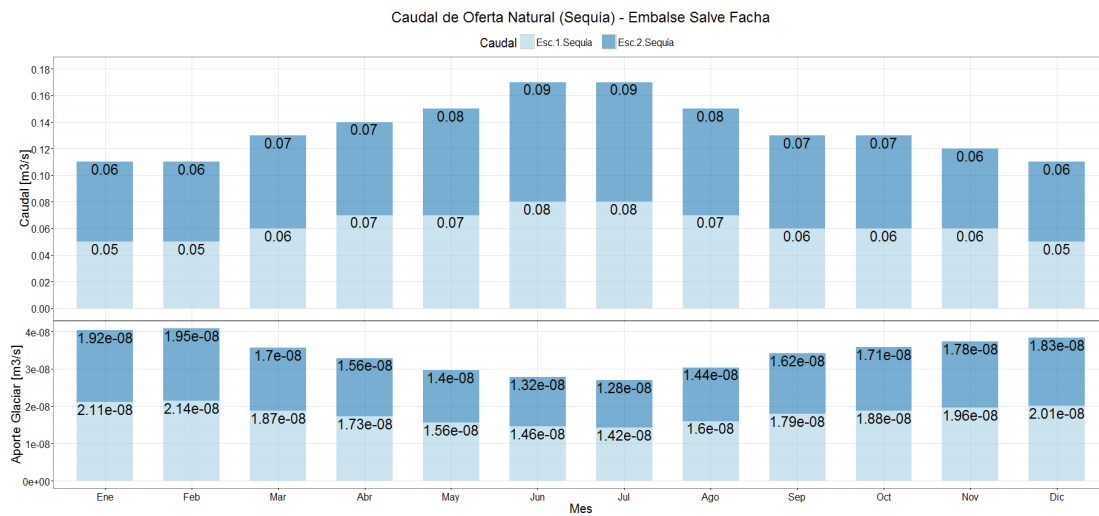
ELABORADO POR: Wilson A. González Quitachamín

ANEXO 4.22. OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA, CUENCA GUAYLLABAMBA MEDIO.



LABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín

ANEXO 4.23 OFERTA HÍDRICA PARA SUMINISTRO DE AGUA POTABLE: EMBALSE SALVE FACHA FACHA, PAPALLACTA Y EMBALSE LA MICA.



ELABORADO POR: Wilson A. González Quilachamín