



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

MODELACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO (OFERTA-DEMANDA) EN
LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA, TOMANDO EN CUENTA
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS Y METEOROLÓGICOS, UTILIZANDO LA
HERRAMIENTA WEAP

Autora

Katty Pamela Rodríguez Bermeo

Año
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

MODELACIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO (OFERTA-DEMANDA) EN
LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA, TOMANDO EN CUENTA
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS Y METEOROLÓGICOS, UTILIZANDO LA
HERRAMIENTA WEAP

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía
MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora
Katty Pamela Rodríguez Bermeo

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Modelación del balance hidrológico (oferta-demanda) en la cuenca del Río Guayllabamba, tomando en cuenta parámetros hidrológicos y meteorológicos, utilizando la herramienta WEAP, a través de reuniones periódicas con la estudiante Katty Pamela Rodríguez Bermeo, en el semestre 2019-10, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Santiago Daniel Piedra Burgos
Máster en Hidrociencias e Ingeniería.
C.I: 1715384150

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Modelación del balance hidrológico (oferta-demanda) en la cuenca del Río Guayllabamba, tomando en cuenta parámetros hidrológicos y meteorológicos, utilizando la herramienta WEAP, de Katty Pamela Rodríguez Bermeo, en el semestre 2019-10, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Marco Vinicio Briceño León
Máster en Energías Renovables.
C.I: 1715967319

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Katty Pamela Rodríguez Bermeo

C.I: 1721296331

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi hija, a mi esposo y a mi familia que han sido el motor fundamental que me ha permitido alcanzar esta meta académica.

A mi universidad, sus autoridades y docentes que de una u otra manera me facilitaron las herramientas y conocimientos que a lo largo de esta carrera nutrieron para mi formación académica y en especial a mi profesor guía y a mi profesor corrector por su constante ayuda en el desarrollo y culminación de este proyecto.

RESUMEN

El presente estudio busca analizar y simular el comportamiento de los cuerpos hídricos de la cuenca del Río Guayllabamba con la ayuda del programa de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP) por medio de la construcción, verificación y calibración de un modelo hidrológico distribuido, usando el método racional simple y tomando en cuenta parámetros hidrológicos, meteorológicos y antrópicos.

La calibración (validación) de los datos ingresados, que no pueden ser medidos, demostró resultados dentro del rango esperado con un error cuadrático medio (RMSE) global de: 5.256 y: 1.849, 1.670 y 1.737 para las cuencas alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146). Los mejores resultados de calibración fueron obtenidos en la cuenca media.

Los resultados reflejaron como la cantidad y calidad de los afluentes hídricos en la parte media y alta de la zona se han visto afectados por el cambio de uso y cobertura de suelo del DMQ.

Los caudales máximos se presentaron en los meses de abril, febrero y marzo, y en julio, agosto y septiembre los caudales mínimos. Este mismo comportamiento se ve reflejado en los caudales afluentes de la cuenca y del acuífero.

El balance oferta-demanda de agua reflejó que la cantidad de agua necesaria para abastecer la demanda del cantón Mejía, es mínima en relación a la capacidad de los caudales ofertados por la cuenca del Río Guayllabamba, sin comprometer su futuro abastecimiento.

ABSTRACT

This research analyzes and simulate Guayllabamba river basin applying the program of Water Evaluation and Planning (WEAP) through the construction, verification and calibration of a distributed model, using the simplified method. Including hydrological, meteorological and anthropogenic parameters.

Once the calibration was realized the results were in the expected range with a mean squared error global of: 5.256 and: 1.849,1.672 and 1.737 for the high (H0148), mean (H0149) and down (H0146) of the watershed. Better calibration results were obtained in mean basin.

The results reflect how the quality of rivers in high and mean part of the basin have been altered by the use and cover of DMQ.

The highest streamflows simulation were in april, february and march, and the lowest in july, august and september. This continued in the groundwater storage capacity, and stream flows of the watershed and groundwater.

According to supply and demand, the demand water of the population of Mejía in the DMQ, is low in relation to the supply of the Guayllabamba River, guaranteeing a future satisfaction water needs.

ÍNDICE

1.Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Problemática	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
2.Marco Teórico	6
2.1 Cuencas	6
2.2 Ciclo hidrológico.....	7
2.2.1 Actividades Humanas y su influencia sobre los componentes del ciclo hidrológico	7
2.2.2 Influencias del cambio del uso y cobertura del suelo.....	8
2.2.3 Influencias Geomorfológicas sobre el ciclo hidrológico	8
2.3 Modelos hidrológicos	9
2.3.1 Representación espacial del modelo.....	10
2.3.2 Resolución temporal del modelo.....	10
2.3.3 Base conceptual del modelo.....	10
2.4 WEAP (Water Evaluation and Planning)	11

2.4.1 Modelo WEAP	12
2.4.2 Método del coeficiente simple aplicado por WEAP	12
2.4.2.1 Área de la cuenca.....	12
2.4.2.2 Variables climáticas consideradas por WEAP	13
2.5 Sistemas de Información Geográfica	18
2.6 Error del modelo.....	18
2.6.1 RMSD	18
3. Metodología.....	19
3.1 Recolección de la información	19
3.2 Delimitación temporal.....	19
3.3 Tratamiento de los datos recolectados	20
3.4 Delimitación de la cuenca (ArcMap).....	21
3.5 Cálculo de la evapotranspiración	22
3.6 Estimación del afluente mensual de aguas subterráneas, partiendo de mediciones pluviométricas.	22
3.7 Creación del modelo hidrológico	23
3.8 Determinación de la oferta y demanda	24
3.9 Correr y calibrar el programa	25
4. Descripción de la zona de estudio	26
4.1 Localización Geográfica.....	26
4.2 División hidrográfica de la zona de estudio.....	26

4.3 Delimitación de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba en subunidades hidrográficas	27
4.4 Características Generales de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba	28
4.4.1 Características físico-geográficas de la unidad hidrográfica Río Guayllabamba	28
4.4.1.1 Características del relieve del área de estudio	28
4.4.1.2 Clase de suelo	28
4.4.2 Climatología.....	31
4.4.2.1 Precipitación	31
4.4.2.2 Temperatura	31
4.4.2.3 Humedad Relativa	32
5. Descripción del modelo	32
5.1 Periodo de modelación	32
5.2 Datos de entrada.....	32
5.2.1 Variables Climáticas	32
5.2.2 Red hidrográfica	34
5.3 Características de la Cuenca	34
5.3.1 Área para modelar	34
5.3.2 Uso de suelo de las cuencas modeladas	35
5.3.3 Agua subterránea	37
5.3.3.1 Capacidad de almacenamiento y recarga inicial de las aguas subterráneas.....	37

5.3.3.2 Afluente de agua subterráneo (Caudal máximo subterráneo mensual).....	37
5.4 Agua Potable Distrito Metropolitano de Quito	40
5.5 Calibración, análisis y verificación del modelo	41
5.5.1 Calibración almacenamiento de agua subterránea.....	41
5.5.2 Calibración precipitación efectiva.	41
5.5.3 Calibración afluente de agua subterránea-calibración fracción de escorrentía infiltración.....	42
6. RESULTADOS	42
6.1 Resultados primera corrida	42
6.2 Resultados calibración	44
6.3 Resultados almacenamiento de agua subterránea.....	45
6.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica.....	46
6.5 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos.....	47
6.5.1 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca alta (H0148)	47
6.5.2 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149)	48
6.5.3 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca baja (H0146).	49

6.5.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149), vs la cuenca alta (H0148).....	50
6.5.6 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149), vs la cuenca media (H0149).....	51
6.6 Resultados del caudal afluente de infiltración-escorrentía desde el acuífero hasta los cuerpos hídricos	52
6.6.1 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de cuenca alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146).....	53
6.6.2 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca alta (H0148).....	54
6.6.3 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca media (H0149).....	54
6.6.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca baja (H0146).....	55
6.6.5 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de cuenca alta (H0148) en relación con la cuenca media (H0149).....	56
6.6.6 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca media (H0149), en relación con la cuenca baja (H0146).	57
6.7 Resultados oferta-demanda.....	58

7. Análisis de los resultados obtenidos.....	59
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
8.1 Conclusiones.....	62
8.2 Recomendaciones	63
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS	70

1.Introducción

1.1 Antecedentes

WEAP es una herramienta amigable que provee información para la planificación y administración de los sistemas hídricos. Fue usada en las zonas costeras de China para garantizar el manejo estratégico de los sistemas hídricos, donde se creó un modelo exitoso para la gestión científica del recurso hídrico local. WEAP fue considerada como un factor importante para el desarrollo económico, social y ecológico de esa región (Song, Kong, & Zhan, 2011).

En Grecia WEAP fue usada para diseñar medidas que permitan el uso eficiente del agua, y, en comparación con SWAT (software para la simulación de cuencas hidrográficas). WEAP fue reconocida como un programa que sigue un enfoque completo para la planeación y gestión de los recursos hídricos, presentando una estructura mucho más flexible que permite simular escenarios específicos y más reales (Psomas, Panagopoulo, Konsta, & Mimikou, 2016).

Otro estudio fue realizado en la capital de Lesoto, en el sur de África, ciudad en la que, a pesar de contar con abundantes recursos hídricos, sus factores climáticos afectan la disponibilidad de agua para sus usuarios. WEAP facilitó la realización de un modelo para legislar e implementar políticas de aprovechamiento y suministro de agua con planes para la administración de los sistemas hídricos aun cuando el estudio reveló tendencias al aumento de la demanda de agua para la ciudad debido a la rápida urbanización y a la alta tasa de crecimiento industrial. Además, el análisis completo e integral de los sistemas hídricos en la zona ayudaron a pronosticar la demanda de agua en los sectores doméstico e industrial en los años 2006 a 2020 (Motlatsi & Deogratias , 2017).

El éxito de este software ha sido probado en varios países: Estados Unidos, Rusia, Egipto, Sudáfrica, India, y algunos de Sudamérica.

Al comienzo del siglo XXI WEAP se utilizó para estudiar el efecto del cambio climático sobre los cuerpos hídricos enfocados en su gestión y por medio de la

ubicación óptima de los sitios y puntos de demanda en una unidad hidrográfica de Estados Unidos (Strzepek, et al., 2005), lo que llevó a su promoción y difusión en muchos países de África y Asia, relacionado a WEAP con la capacidad de ser un instrumento para un apropiado manejo y gestión de los cuerpos hídricos y que permite el desarrollo local de las comunidades con una limitada cantidad de recursos hídricos.

La cuenca del Río Guayllabamba es un lugar complicado porque existen intereses de todo tipo, dificultando el manejo adecuado de sus cuerpos hídricos. Además de ser el lugar donde se ubica el Distrito Metropolitano de Quito una de las ciudades con mayor población del Ecuador y de mayor extensión. La creciente tasa poblacional de Quito conlleva al incremento de la demanda de agua generando estrés hídrico sobre la unidad hidrológica del Río Guayllabamba.

1.2 Alcance

La presente investigación está dirigida a la cuenca del Río Guayllabamba, con un área de 8194,9 km², donde se encuentra la ciudad de Quito con aproximadamente 2'239191 habitantes, que provocan una gran afectación sobre las características físicas de una hoya hidrográfica. La unidad hidrográfica del Río Guayllabamba representa una importante fuente de recursos para la zona rural del DMQ para distintos fines como: agua de abastecimiento, riego y para la generación de energía hidroeléctrica. Algunos factores como el incremento demográfico y por ende la contaminación de los recursos, que se han evidenciado en el DMQ, han provocado una mayor demanda de agua en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba y en las cuencas próximas al área.

Por tal motivo se realizará una relación oferta-demanda entre la cantidad de agua que es abastecida por la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba y el agua necesaria para suplir la demanda del cantón Mejía garantizando una adecuada

gestión de los sistemas hídricos dentro de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba.

1.3 Justificación

Actualmente el agua es parte vital de la economía local y nacional, y es esencial en la creación y conservación de los puestos de trabajo en todos los sectores de la economía. Este recurso es el epicentro para el desarrollo económico y social, para la producción de energía y el abastecimiento de alimentos (Naciones Unidas, 2013).

La gestión integrada de los sistemas hídricos es uno de los principales pasos para alcanzar el desarrollo sostenible de la sociedad, logrando satisfacer las necesidades de consumo de los habitantes y al mismo tiempo conservar los recursos. Es decir, que además de ayudar a conservar el agua, promueve la preservación de la tierra y sus bienes, maximizando el progreso económico, social y bienestar de la población de manera equitativa (Global Water Partnership, 2002).

Ganancias significativas se han obtenido a través de inversiones para optimizar el manejo de los recursos hídricos generando beneficios anuales directos de 60 000 millones de dólares; es decir, por cada dólar que se invierte en la preservación, amparo y manejo de las cuencas hidrográficas se logra ahorrar entre 7,5 y 200 dólares (SIWI, 2005). Las inversiones adecuadas en gestión, infraestructura y servicios relacionados con el agua supondrían un gran ahorro económico al evitar los costos causados por la contaminación y los desastres naturales (Naciones Unidas , 2016). Las inversiones en la gestión de los sistemas hídricos son las principales responsables de liberar todo el potencial de crecimiento económico en las etapas iniciales del desarrollo de un país.

En el Ecuador la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba es una de las áreas más pobladas de los Andes con un alto desarrollo económico y social, actualmente la cuenca sufre estrés hídrico en cuanto a oferta y demanda. Hace una década atrás, la demanda de agua de la ciudad de Quito superó la oferta lo

que produjo la construcción excesiva de trasvases de agua alterando su cauce natural.

Para alcanzar la gestión adecuada de la zona de interés es necesario un manejo integrado de los recursos hídricos (MIRH) y gestionar de mejor manera su balance hídrico, pero esto dependerá de la información y conocimiento que se tenga acerca de esta cuenca, motivo por el cual el presente documento busca ser una herramienta para presentar información acerca de la unidad hidrográfica de Río Guayllabamba, a través un modelo hidrológico oferta-demanda tomando en cuenta parámetros hidrológicos, meteorológicos y antrópicos.

1.4 Problemática

A pesar de que las tres cuartas partes del planeta están conformadas de agua, el 97% es salada, y apenas el 1% del agua disponible en todo el mundo es apta para el consumo humano, y esta se encuentra en ríos, lagos, lagunas y lluvias (FUNCAGUA, 2018). La contaminación de los sistemas hídricos por residuos industriales y aguas residuales causan que estos recursos se vuelvan a un más inutilizables para el consumo.

El agua es un importante recurso natural, alterado por la rápida industrialización, crecimiento poblacional, urbanización y cambio climático, afectando el ciclo natural de agua, causando conflictos entre el abastecimiento y demanda (Bao, Chao, Fang, & Chuang-lin, 2006). Adicionalmente, debido al crecimiento demográfico, el uso y aprovechamiento de agua dulce está en niveles insostenibles; son los principales responsables de perturbar los recursos hídricos (OMS, 2017). Además, la creciente demanda de energía (ya sea para calefacción, luz, electricidad y transporte) conllevan a un gran impacto sobre la disponibilidad y calidad del agua (UNESCO, 2010). Estas son las razones del actual estrés hídrico y se estima que para el 2030, aproximadamente el 47% de

la población mundial, se encontrará viviendo en zonas con estrés hídrico (UNESCO, 2017).

El acceso al agua también representa un grave problema a nivel mundial, por cada 10 habitantes 3 no tienen acceso al recurso agua, es decir 2.100 millones de personas en todo el mundo, y 1800 millones de personas viven en regiones con escases absoluta de agua.

Alrededor de 1.200 millones de personas, lo que equivale casi el 20% de la población mundial, se encuentran viviendo en zonas con déficit físico de agua, mientras que 500 millones de personas se acercan a la misma situación. Además 1.600 millones, el 25% de la población se encuentran en situación de escasez económica del agua, es decir no tienen la infraestructura necesaria para el transporte de agua desde los ríos y acuíferos (Naciones Unidas, 2015). La escasez del agua podría restringir la industrialización, el desarrollo social y económico de un país, es decir, la disponibilidad del agua puede algún día limitar el desarrollo del mundo (Toshiharu et al.,2008). Todos los continentes se ven afectados por la escasez del agua. Todo esto desencadena en la actual crisis del agua que, al parecer y según todas las señales, está rápidamente empeorando y de no hacer nada, para el año 2030 el mundo se enfrentará a un déficit del 40% de escasez de agua (Water Resources Management, 2012).

El planeta tiene la cantidad de agua suficiente para abastecer a 7000 millones de seres humanos que se encuentran en él, pero, en la actualidad, está distribuida de forma irregular, se mal gasta, pero sobre todo se gestiona de forma insostenible.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Guayllabamba, tomando en cuenta parámetros hidrológicos, meteorológicos y antrópicos, y como estos afectan a la relación oferta-demanda del DMQ.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Determinar cómo los procesos climáticos e hidrológicos influyen en las variaciones del balance hidrológico de la cuenca del Río Guayllabamba en la sección delimitada, en el transcurso del tiempo.
2. Verificar y calibrar el modelo WEAP para los periodos de información meteorológica, hidrológica y antrópica recolectada.
3. Construir un modelo hidrológico de oferta y la demanda de agua para la cuenca del Río Guayllabamba; con la herramienta WEAP.

2.Marco Teórico

2.1 Cuencas

Una modelación hidrológica es la representación simplificada de las cuencas. Las cuencas son sistemas biofísicos que definen la superficie de la tierra que drena agua, sedimentos, nutrientes y constituyentes químicos a un punto en un canal de corriente o a un río definido por sus límites topográficos. Las cuencas hidrográficas son sistemas de la superficie del paisaje que transforman precipitación en flujos de agua a caudales y cuerpos hídricos, muchos de los cuales llegan al océano. Las cuencas son sistemas utilizados para entender el ciclo hidrológico, y como las actividades humanas influyen en sus componentes (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014).

2.2 Ciclo hidrológico

La circulación del agua en la tierra es conocida como ciclo hidrológico, implica los procesos y las vías por las cuales el agua se evapora de la superficie de la tierra a la atmósfera y regresa a la superficie como precipitación o condensación (Ver figura 1). Con la superficie de la tierra siendo 70 % agua, la mayoría de agua atmosférica se origina en los océanos y los otros cuerpos de agua. Con algunas excepciones, una gran cantidad de precipitación que alcanza la superficie no llega a los océanos, afluentes, o acuíferos, sino se evapora de nuevo a la atmósfera. Esta división del agua entre evaporación, almacenamiento y flujos de agua de una cuenca implica numerosos procesos hidrológicos (Monsalve, 1995).

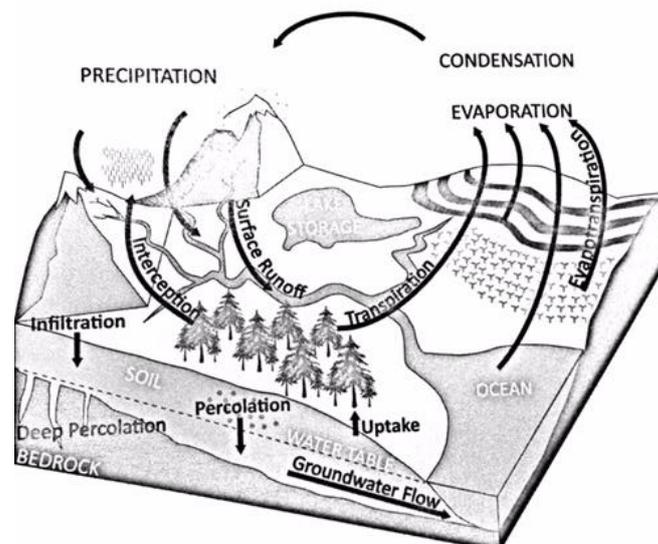


Figura 1. Esquema del ciclo hidrológico.

Tomada de, Ffolliott, & Magner, 2014.

2.2.1 Actividades Humanas y su influencia sobre los componentes del ciclo hidrológico

El crecimiento demográfico y la construcción de viviendas, ha generado el aumento de la deforestación, lo que implica que los bosques considerados como captadores de agua atmosférica, ya sea de lluvia, nieve, granizo, etc., se pierdan. Dando como consecuencia una menor cantidad de agua que va al suelo y que los ríos superficiales y subterráneos disminuyan sus reservas de agua. En este caso, la necesidad que tenemos los seres humanos de agua desencadena en el uso y modificación de las cuencas (Organización Panamericana de la Salud, 1991).

2.2.2 Influencias del cambio del uso y cobertura del suelo

El cambio del uso y cobertura del suelo afecta significativamente la respuesta hidrológica (Achenafi, Yihun, Shimelis , Solomon , & Dereje, 2017). Los sistemas ecológicos y los procesos climáticos también se ven afectados. La evapotranspiración varía significativamente debido al cambio de uso y cobertura del suelo (Jingjing , Per , & Wei , 2017).

2.2.3 Influencias Geomorfológicas sobre el ciclo hidrológico

La geomorfología de una unidad hidrográfica tiene influencia directa sobre su escurrimiento superficial, lo que incide sobre su entrada, almacenamiento y salida de agua. Un estudio metódico de los parámetros geográficos y físicos de la unidad hidrológica, del Río Guayllabamba es de gran utilidad, para determinar el comportamiento de la cuenca (Almeida, 2010).

Pendiente media de la cuenca (Ver anexo 3): la pendiente media de la cuenca determina la velocidad con la que se produce la escorrentía superficial, por lo tanto, influye en el tiempo en que se demora el agua de lluvia para llegar a los cuerpos hídricos, expresa por la siguiente fórmula:

$$S_c = \frac{D \times LL}{A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

S_c = pendiente media de la unidad hidrográfica;

D = diferencia de cotas entre las líneas de nivel de la cuenca (km);

LL = distancia total de todas las curvas de nivel en la unidad hidrográfica (km);

A = área total de la unidad hidrográfica, (km²).

2.3 Modelos hidrológicos

Se les atribuye asuntos relacionados al análisis del pasado, presente y futuro de los caudales, cambios en el proceso hidrológico, y problemas de diseño hidrológico, también conocidos como simulaciones hidrológicas. Estos modelos son útiles para ampliar la información acerca de la hidrología y los datos de las cuencas hidrográficas y otra información que ayuda a la predicción de lo que podría suceder cuando se modifica el paisaje de la cuenca. Además de representar un marco de referencia que permite la priorización de los problemas. Todos generan una respuesta que tiene una estrecha correlación con las diversas variables climáticas ingresadas.

La apropiada simulación requiere del entendimiento de su representación espacial, resolución temporal y base conceptual (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014).

Su utilidad radica en su capacidad de generar predicciones razonablemente precisas dentro del contexto de los datos de entrada disponibles. Los modelos determinísticos se enfocan aquí porque son los más adecuados para predecir los efectos hidrológicos del cambio en la vegetación, uso de suelo o clima que los modelos estocásticos. El criterio de clasificación incluye su representación

espacial, resolución temporal y base conceptual (Chengguang , et al., 2018).

Los modelos deben cumplir ciertas condiciones, las cuales son:

- a. Deben contar con los datos necesarios para su calibración y validación.
- b. La calibración debe ser sencilla.

2.3.1 Representación espacial del modelo

Los modelos hidrológicos pueden ser agrupados o espacialmente distribuidos en su formulación. Los agrupados asumen que no existen ninguna heterogeneidad en el dominio simulado y no aceptan variables que contengan entradas espacialmente inestables. Los modelos espacialmente distribuidos permiten al usuario ingresar datos de precipitación, temperatura y otras variables climáticas fluctuantes, así como la ocurrencia espacial de los tipos de vegetación, suelos y pendientes (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014).

Los procesos hidrológicos como: infiltración, escorrentía, contenido de humedad en el suelo, flujos superficiales y subterráneos están representados en el paisaje y espacialmente distribuidos en función de la variación de la topografía (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014).

2.3.2 Resolución temporal del modelo

2.3.3 Base conceptual del modelo

En su estructura varían desde físicos hasta empíricos. Los modelos empíricos relacionan los flujos de salida a los datos de entrada, sin simulación de los procesos hidrológicos que intervienen, también llamados modelos de caja negra.

En los modelos empíricos los parámetros a menudo se desarrollan a partir de una síntesis de resultados de los experimentos de campo, datos de información pública o privada y resultados de modelos anteriores. Estos parámetros son ajustados cuando es necesario por medio de la comparación de los datos simulados y observados con ajustes hechos hasta alcanzar el mejor ajuste posible (Pagliero, Fayçal , Jan , Willems, & Neil , 2019).

Se podría llamar “conceptualmente correctos” a los modelos físicos, modelos que en sus relaciones matemáticas representan las características del suelo, vegetación y topografía y los datos de entrada como precipitación, temperatura entre otros son obtenidos de las mediciones *in situ*.

Debido a que hay limitaciones en todas las representaciones matemáticas de los procesos hidrológicos de una cuenca, es posible que los modelos físicos contengan relaciones empíricas que requieren un ajuste o agrupamiento de las características a alguna escala. La mayoría de los modelos que son utilizados operativamente por agencias y firmas consultoras son más empíricos que físicos (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014).

2.4 WEAP (Water Evaluation and Planning)

Sus siglas se traducen al español en Sistema de Evaluación y Planificación del Agua y fue un programa desarrollado por “Stockholm Environment Institute's U.S. Center” para dar un apoyo computacional a la planificación, análisis de políticas y gestión de los recursos hídricos (Stockholm Environment Institute, 1988).Influye también en las decisiones sobre el suministro del agua y su incidencia en el medio ambiente, teniendo como objetivo incorporar estos argumentos en un instrumento práctico y consistente para la proyección integrada de los recursos hídricos. Debido a que la asignación de dichos recursos es limitada por la preocupación que existe sobre la inestabilidad e imprecisión climática, lo que obliga al usuario a desarrollar e implementar

estrategias sustentables para el uso del agua y su afectación a la calidad ambiental.

2.4.1 Modelo WEAP

La principal meta de un modelo es ayudar a la adecuada gestión de los recursos hídricos equilibrando la oferta de agua, generada por las cuencas, con el consumo de agua. Esto es logrado a través de la generación de un modelo WEAP que aplica una gran cantidad de elementos y operaciones a través de una interfaz gráfica basada en los sistemas de información geográfica. Es por esta razón, que WEAP enfoca las condiciones de la demanda del agua, en condiciones de igualdad con temas relacionados al suministro, como son los caudales y aguas subterráneas (Proaño, 2010).

2.4.2 Método del coeficiente simple aplicado por WEAP

Los siguientes conceptos giran entorno al método del coeficiente simple: área de la cuenca, evapotranspiración potencial, escurrimiento de la precipitación, factor del suelo, infiltración, precipitación, precipitación observada y precipitación efectiva (SEI, 1988).

2.4.2.1 Área de la cuenca

Es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica, clasificada en función del uso y aprovechamiento del suelo (SEI, 1988).

2.4.2.2 Variables climáticas consideradas por WEAP

2.4.2.2.1 Precipitación

La precipitación afecta la cantidad, sincronización, distribución espacial y la calidad del agua agregada a una cuenca de la atmósfera. Es reconocida por los hidrólogos como la principal clave que ayuda a la producción de agua de la unidad hidrográfica. Los ecologistas ven el rol que juega en la determinación de los tipos de suelo y vegetación que ocurren en una cuenca. Granjeros, agricultores y pastores la consideran el ingrediente principal para la producción vegetal de la tierra. La cantidad anual de precipitación, sus picos máximos y mínimos afectan a la población y al agua. El no saber cuándo ocurrirá una inundación se convierte en algo previsible, al examinar la variabilidad climática del pasado. El cambio climático y la variabilidad se suman a esta incertidumbre. En consecuencia, el entendimiento de la precipitación es fundamental en el estudio de la hidrología y en la gestión integrada de cuencas hidrográficas (SEI, 1988).

2.4.2.2.1.1 Precipitación efectiva

Porcentaje de la precipitación que puede ser usada para la evapotranspiración (SEI, 1988).

2.4.2.2.1.2 Precipitación disponible

Precipitación disponible para la evapotranspiración (SEI, 1988).

$$PrecipAvailableForET_{LC} = Precip_{Hu} * Area_{LC} * 10^{-5} * PrecipEffective_{LC} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$PrecipAvailableForET_{LC}$ = precipitación disponible para la evapotranspiración

$Area_{LC}$ = área de la cuenca o subcuencas

$PrecipEffective_{LC}$ = precipitación efectiva

2.4.2.1.3 Métodos para medir la precipitación

La construcción de un modelo hidrológico depende principalmente de las medidas de precipitación. La predicción meteorológica requiere de las estimaciones de lluvia ocurridas en tiempo real (apenas topen la superficie terrestre), o poco tiempo después. Los radares proveen estimaciones cualitativas de la intensidad y cantidad de lluvia sobre largas áreas. El método más común para medir la precipitación es por medio de una serie de recipientes cilíndricos, conocidos como medidores. Estos pueden ser: medidores estándar, de almacenamiento y de grabación. La veracidad de los medidores de lluvia se ve afectada por las características del sitio de ubicación. Como una regla general, un medidor de lluvia debe ser ubicado en una zona relativamente plana y con el embudo de apertura en un plano horizontal (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014) .

2.4.1.2.2 Evapotranspiración

La evaporación del suelo, los cuerpos de agua y transpiración de las plantas son considerados colectivamente como evapotranspiración (ET). La evapotranspiración afecta a la producción del agua, determina en gran medida que proporción de precipitación ingresa a la cuenca hidrográfica y se ve influenciada por actividades de uso de la tierra que alteran el paisaje, la vegetación y los cuerpos de agua (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014). La evapotranspiración

puede ser calculada durante un periodo de tiempo utilizando la siguiente ecuación (Hargreaves & Samani, 1985):

$$ET = 0,0135(t_{med} + 17,78)R_s \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

ET = evapotranspiración en mm/día

t_{med} = temperatura media en °C

R_s = radiación solar incidente en mm/día

Cambios en la vegetación que reducen la evapotranspiración incrementen la escorrentía o la recarga de las aguas subterráneas, mientras que al aumentar la evapotranspiración se tiene el efecto opuesto (Sánchez, 2018).

2.4.1.2.3 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial es la cantidad de agua transpirada por un cultivo en una unidad de tiempo, por un cultivo corto, sombreado y sin necesidades hídricas. Esta definición es la suposición de la máxima transpiración de los cultivos que puede ocurrir, y que está limitado únicamente por la energía proporcionada por la radiación solar (Gassmann, Tonti, Burek, & Pérez, 2018).

$$ET_{potential_{LC}} = ET_{reference_{HU}} * K_{c_{LC}} * Area_{LC} * 10^{-5} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$ET_{potential_{LC}}$ = evapotranspiración potencial de la de superficie del suelo

$Area_{LC}$ = área de la cuenca o subcuencas

$ET_{reference_{HU}}$ = evapotranspiración de referencia de la unidad hidrológica

K_{LC} = es el coeficiente del suelo

2.4.1.2.4 Factor del suelo

Define el potencial del suelo en relación a la ocurrencia de la evapotranspiración (SEI, 1988).

$$ActualYield = PotentialYeild * \left(1 - YeildResponseFactor * \left(1 - \left(\frac{ET_{Actual}}{ET_{Potential}} \right) \right) \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

ActualYield = factor actual de suelo.

YeildResponseFactor = factor de respuesta del suelo.

ETActual = evapotranspiración actual.

ETPotential = evapotranspiración potencial.

2.4.1.2.5 Infiltración

Es el proceso por el cual el agua entra a la superficie del suelo, que resulta de la combinación de las fuerzas de capilaridad y gravedad que actúan sobre el agua y la superficie del suelo (SEI, 1988).

2.4.1.2.6 Escorrentía

Se entiende por escorrentía al agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de la tierra. Es el proceso que describe el agua cuando se inicia la lluvia depende de las características del terreno: la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. Siendo así, la segunda parte de la precipitación que llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca (Chereque Morán, 1989). Dependiendo de su ubicación final se puede dividir en dos categorías, que son: escorrentía de aguas subterráneas, escorrentía superficial (SEI, 1988).

$$Runoff_{LC} = \text{Max}(0, \text{PrecipAvailableForET}_{LC} - \text{ETPotential}_{LC}) + (\text{Precip}_{LC} \times (1 - \text{PrecipEffective}_{LC}) + (1 - \text{IrrFrac}_{LC}) * \text{Supply}_{LC}) \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$RunofftoGw_{HU} = \sum_{LC} (\text{Runoff}_{LC} * \text{RunoffGWFraction}_{LC}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$RunofftoSurfaceWater_{HU} = \sum_{LC} (\text{Runoff}_{LC} * (1 - \text{RunoffGWFraction}_{LC})) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$Runoff_{LC}$ = escorrentía superficial,

$RunofftoGw_{HU}$ = escorrentía de los suministros de agua subterránea

$RunofftoSurfaceWater_{HU}$ = escorrentía de los suministros del agua superficial,

$PrecipAvailableForET$ = precipitación disponible para la evapotranspiración,

$Precip_{LC}$ = precipitación,

$PrecipEffective_{LC}$ = precipitación efectiva,

$ETPotential_{LC}$ = evapotranspiración potencial,

$IrrFrac_{LC}$ = porcentaje de agua suministrada para la evapotranspiración,

$RunoffGWFraction_{LC}$ = fracción de escorrentía de aguas subterráneas en el área de cuenca.

2.5 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a menudo son aplicados en los modelos de simulación por computadora. Son herramientas capaces de capturar, almacenar analizar y proyectar geográficamente datos de acuerdo al formato que satisfaga las necesidades de los hidrológicos o de los administradores de las cuencas hidrográficas (Star & Estes, 1990). Los datos SIG representan objetos incluyendo vías de agua, uso de suelo, arboles, caminos, y elevaciones con datos digitales almacenados tradicionalmente en forma raster o vectorial. Los datos de la capa son representados por una matriz cuadrada o rectangular donde a cada celda se le ha asignado un valor en el sistema raster (basado en celdas) mientras que un vector se base en un sistema lineal que es representado por una serie de puntos concertados en un segmento lineal, el espacio entre cada punto es considerado un vector. La elección entre ambos varía de acuerdo con las necesidades del usuario (Miller, Guertin, & Goodrich , 2000).

2.6 Error del modelo

El error del modelo permite reconocer la diferencia entre las variables medidas y las variables observadas (Li, Ma, & Li, 2000).

2.6.1 RMSD

Root-mean-square deviation, o estimación del promedio de los errores cuadrados de los parámetros simulados (RMSD). Es la diferencia entre los parámetros observados y los parámetros simulados. El RMSD, permite representar de las diferencias entre los parámetros modelados y los parámetros

medidos (reales). Estas diferencias son conocidas como residuales (Bao, Chao, Fang, & Chuang-lin, 2006).

3. Metodología

3.1 Recolección de la información

La recopilación de los datos para el programa WEAP se realizó en dos etapas: la primera tiene como finalidad dar soporte a la aplicación inicial del modelo WEAP mediante la recopilación de la información disponible en agencias gubernamentales, información satelital e información de estudios previos. La segunda etapa generalmente se refiere a identificar que datos adicionales deben recopilarse para que el programa no arroje resultados incorrectos y que el modelo sea más preciso (Brooks , Ffolliott, & Magner, 2014). Para la creación del modelo, hay que recolectar una serie de datos meteorológicos e hidrológicos requeridos por el programa WEAP. En cuanto a la información hidro-meteorológica necesaria se procedió a recopilar los datos de caudales medios mensuales, medidos por las estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

3.2 Delimitación temporal

Se debe establecer el período de simulación, mínimo de 10 años, en función de la información hidrográfica y meteorológica disponible para la hoya hidrográfica de estudio. Por lo general, se trata de que exista coincidencia temporal entre las series de datos meteorológicos e hidrológicos con el fin de que posteriormente se pueda realizar la calibración.

Se determinará el paso de tiempo del modelo dependiendo de la precisión que se necesitará. El modelo de WEAP, por sus características semi-distribuidas y cuasi-físicas, en la caracterización de los procesos hidrológicos, hace que las

aplicaciones del modelo sean válidas para un lapso de tiempo diario, semanal y mensual, pero en la mayoría de los casos el paso del tiempo mensual es adecuado para los presentes propósitos de aplicación (Institute Stockholm Environment, 2009).

3.3 Tratamiento de los datos recolectados

Una vez que se cuenta con todos los datos que requiere el modelo, se procede a su tratamiento previo a la utilización de la herramienta WEAP. Los datos hidrometeorológicos, tienen que estar en el formato adecuado para ser ingresados de forma automática, para lo cual tienen que ser guardados en archivos Excel como archivos de valores separados por comas (.csv).

Después se ingresará los datos de todas las estaciones y sus variables meteorológicas al programa WEAP, por medio de columnas, en forma cronológica, indicando el mes y año en los cuales la estación tomo los datos (Calispa Aguilar, 2010).

Para el modelo es necesario trabajar con series continuas de tiempo por lo que en caso de datos faltantes, por la negligencia del operador o a la usencia del aparato durante un determinado tiempo se completarían los mismos utilizando siguiente fórmula, siempre y cuando se cuente, con datos durante ese periodo en estaciones pluviométrica cercanas (Monsalve Sáenz, Hidrología en la ingeniería, 1999).

$$P_X = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_X}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_X}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_X}{N_n} \right) P_n \right] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

n: Número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanas a la estación "X", la cual va a ser completada en su registro,

P_X : Precipitación de la estación "X" durante un periodo de tiempo por completar,
 $P_1 a P_n$: Precipitación de las estaciones 1 a n durante el periodo de tiempo por completar,

N_X : Precipitación media anual a nivel multianual de la estación "X".

$N_1 a N_n$: Precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones de 1 a n.

3.4 Delimitación de la cuenca (ArcMap)

Se usó una imagen satelital, tipo ráster dentro de la cual se encuentre el área de interés, y con la ayuda del programa ArcMap, que es una aplicación primaria que proporciona las herramientas básicas para visualizar, explorar, consultar, analizar información geográfica y crear mapas (Llopis, 2008). Se procedió a generar los ríos en función de las curvas de nivel (Pradhan, Hagemann, Shafapour Tehrany, & Prechtel, 2014).

Por medio de las diferencias de cotas se puede establecer la dirección del agua hacia la zona baja de la cuenca. Lo que posteriormente servirá para determinar la dirección del río principal.

Una vez que se obtuvieron los ríos, curvas de nivel y que se estableció la dirección del flujo, se procedió a ubicar el punto por donde sale el agua en la cuenca de acuerdo con parámetros hidrológicos y morfológicos, ArcMap lo reconoce como un punto de pixel, definido por un par de coordenadas y desde el punto establecido anteriormente ArcMap genera un área y contorno para la Cuenca del Río Guayllabamba.

Este mismo procedimiento se siguió para la creación de las subcuentas, utilizadas en el modelo, en este caso, el punto de salida fue la ubicación exacta de las estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

3.5 Cálculo de la evapotranspiración

La evapotranspiración fue calculada utilizando, la siguiente ecuación (Hargreaves & Samani, 1985):

$$ET = 0,0135(t_{med} + 17,78)R_s \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

ET es la evapotranspiración en mm/día,

tmed es la temperatura media en °C,

Rs es la radiación solar incidente en mm/día (Sánchez , 2018).

La temperatura media que se utilizó fue obtenida de los datos de temperatura media mensual de los registros de las estaciones meteorológicas del (INAMHI) y la radiación solar incidente de la investigación realizada en la investigación titulada “Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves” (Ver anexo 18).

3.6 Estimación del afluente mensual de aguas subterráneas, partiendo de mediciones pluviométricas.

Para la realización del modelo fue necesario conocer la escorrentía superficial resultante de los datos de lluvia recolectados a partir de los cuales se calculó la cantidad de agua del acuífero, usando la formula racional.

Al utilizar la formula racional, se supone que el caudal Q_E toma un valor de caudal máximo (pico) Q_p , cuando, debido a una cierta intensidad de lluvia sobre un área de drenaje, es producido por esa precipitación que mantiene por un tiempo igual al periodo de concentración del caudal en el punto en consideración. Teóricamente, éste es el tiempo igual al periodo de concentración, que es el tiempo requerido para que la escorrentía superficial desde la parte más remota

de la hoya alcance el punto de interés. Entonces, el caudal Q_p correspondiente a una lluvia de intensidad i sobre un área de drenaje A , lluvia esta que dure un tiempo tal que toda el área de drenaje contribuya a la escorrentía superficial, siendo Q_p el caudal máximo de escorrentía superficial que está dado por:

$$Q_p = 0.278 CiA \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

Q_p , es el caudal máximo del acuífero,

C , es el coeficiente de escorrentía utilizado fue la diferencia entre el número uno y el coeficiente de escorrentía superficial determinado en función del uso, pendiente y clase textural de la superficie,

I , es la intensidad de lluvia, que en este caso fue la mínima precipitación mensual para cada mes del año, para el periodo modelado,

A , el área de la cuenca.

3.7 Creación del modelo hidrológico

Una vez que se cuenta con todos los datos necesarios, se procederá a cargar los datos de entrada al modelo, como precipitación, temperatura, la evapotranspiración calculada como se presentó anteriormente y los datos de caudal medio (Sieber, Swartz, & Huber-Lee, 2005).

Las características geomorfológicas como la topografía, pendiente, textura, uso y aprovechamiento del suelo también fueron ingresadas al modelo.

El uso de suelo del área de estudio también fue cargado dentro del modelo ya que influye en el fenómeno de escorrentía de la cuenca, mientras más impermeable es un suelo más rápido es su escorrentía (Monsalve Sáenz,

Hidrología en la ingeniería, 1999). Esto fue posible gracias a la utilización de un mapa de uso y cobertura del suelo propuesto por el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador y el Ministerio del Ambiente (MAE), desarrollado en el año 2014, que a su vez tiene un mayor detalle de los ecosistemas de páramo, bosques naturales y áreas agrícolas. Con la ayuda de la herramienta ArcMap se realizó un análisis de la vegetación en la cuenca con el que se obtuvo el porcentaje específico para cada uso de suelo en el área de interés, este porcentaje específico fue el que ingresó a WEAP.

En determinadas zonas de la cuenca no se contó con la información meteorológica necesaria, ya que las estaciones no cubrían toda el área de interés. Por este motivo los datos meteorológicos utilizados en la zona baja de la cuenca fueron descargados de la interface web de meteorología (Giovanni), servicio web proporcionado por la nasa, del satélite *NLDAS_FORA0125_M_002*.

3.8 Determinación de la oferta y demanda

Para el modelo hay que tomar en cuenta la demanda de agua de las poblaciones cercanas a la zona e identificar sus necesidades hídricas; una vez tomados estos datos se logró establecer el estrés hídrico de la cuenca y para lo cual se requirió la ubicación geográfica de los sitios de demanda usando la herramienta informática ArcMap. Para el consumo doméstico de agua es necesario considerar una proyección en cuanto a cambios futuros de la población (tasa de crecimiento), consumo per cápita y número actual de habitantes, (Savoskul, y otros, 2003) y para esto se utilizó y recolectó la información disponible en Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). La parte de oferta se procedió a determinar a través de los datos de precipitación.

Finalmente se utilizó una metodología basada en la diferencia entre la oferta natural de agua de la unidad hidrológica del Río Guayllabamba y la demanda hídrica neta de los habitantes del DQM (González, 2016).

3.9 Correr y calibrar el programa

Se realizó la calibración del modelo con el objetivo de que las representaciones gráficas de los parámetros meteorológicos o hidrológicos simulados se asemejen a las representaciones gráficas de los datos históricos observados. A partir de estas representaciones se realizó medidas estadísticas para valorar la exactitud del modelo, lo que permitió ajustar los parámetros hasta perfeccionar la respuesta de las variables estadísticas.

A pesar de que el programa WEAP suspende el modelo y no lo corre hasta que todos los datos del modelo este completos, y no exista errores, es de suma importancia hacer una comparación visual entre los parámetros simulados y los parámetros elaborados de manera convencional (Proaño, 2010).

Para esto se utilizó la metodología del (RMSE) del modelo WEAP. Las diferencias residuales, finalmente se agregaron a todas las magnitudes de los errores de los parámetros simulados en una sola medida de poder predictivo (Bao, Chao, Fang, & Chuang-lin, 2006).

Para medir la diferencia entre dos series de tiempo se utilizará la fórmula:

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{obs(i)} - L_{mod(i)})}{\sum_{i=1}^n L_{obs(i)}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Esta fórmula aplicó de manera que se obtuvo un error para los valores totales, mensuales, anuales y temporales. En donde $L_{obs(i)}$ son los valores observados y $L_{mod(i)}$ los valores modelados.

La comparación de los parámetros simulados versus los observados también se realizó usando el coeficiente de correlación de Pearson que indica la relación entre dos muestras, mediante la letra r y cuantificado con un valor numérico, que varía entre -1 a +1. En donde el cero significa no correlación y 1 significa una completa o perfecta correlación (Akoglu, 2018). Utilizando la siguiente fórmula:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n (L_{obs(i)} - \overline{L_{obs(i)}}) * (L_{mod(i)} - \overline{L_{mod(i)}}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (L_{obs(i)} - \overline{L_{obs(i)}})^2 * \sum_{i=1}^n (L_{mod(i)} - \overline{L_{mod(i)}})^2} \right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

13)

En donde $L_{obs(i)}$ son los valores observados y $L_{mod(i)}$ los valores modelados.

4. Descripción de la situación actual de la zona de estudio

4.1 Localización Geográfica

La cuenca del Río Guayllabamba está localizada en la región sierra norte del Ecuador, específicamente entre las provincias de Esmeraldas, Pichincha, Imbabura y Napo, (González, 2016). Formada por 9 subcuencas ubicadas entre $78^{\circ}47'14"O$, $77^{\circ}57'53"O$ y entre $0^{\circ}35'15N$, $0^{\circ}48'08S$.

4.2 División hidrográfica de la zona de estudio

La presente investigación está dirigida a la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba, en la que podemos encontrar los siguientes afluentes hídricos: Monjas, Machángara, San Pedro; antes de unirse con el Río Blanco son: el Río Guambí, Chiche, Coyaago, Uravia, Pisque, Intag, Cubi, Naranjal, Intag, San Dimas, Alambí, Chirapia, San Dimas, Pachijal y Magdalena.

Las cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas del Ecuador están divididas en cinco niveles 5, para la cual se tomó en cuenta el área total del Ecuador, obteniendo un total de 72 cuencas, 137 subcuencas y alrededor de 890 microcuencas (SENAGUA, 2009).

4.3 Delimitación de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba en subunidades hidrográficas

La delimitación hidrográfica cuenca del Río Guayllabamba forma parte del nivel 4, que a su vez está conformado por 123 y 734 hoyas geográficas respectivamente como se muestra en el Anexo 1. Con un área total 8194,9 km².

Esta, a su vez, ha sido dividida y codificada según la SENAGUA en otras hoyas hidrográficas pertenecientes al nivel 5, con su respectiva área como se muestra en la Tabla 1 y en el Anexo 1.

Tabla 1.

División de la cuenca del Río Guayllabamba en subcuencas (nivel 5):

Nivel: 4 1524	Cuenca del Río Guayllabamba	
Nivel: 5		
Código	Nombre	Área (km ²)
15241	Guayllabamba Bajo	1860
15242	Cuenca del Río Alambi	540
15243	Unidad Hidrográfica 15243	28,9
15244	Cuenca del Río Intag	1040
15245	Unidad Hidrográfica 15245	891
15246	Cuenca del Río Pisque	1140
15247	Guayllabamba Alto	1350
15248	Cuenca del Río Pita	592
15249	Cuenca del San Pedro	753
Área total (km ²)		8194,9

Adaptado de SENAGUA e INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR, 2014.

4.4 Características Generales de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba

4.4.1 Características físico-geográficas de la unidad hidrográfica Río Guayllabamba

En el Anexo 3 se puede observar la distribución de la pendiente media en el área de interés. Que en su gran mayoría es un tramo escarpado con más del 70% de inclinación (Instituto Geográfico Militar, 2014).

4.4.1.1 Características del relieve del área de estudio

El principal parámetro para determinar las características físicas y geológicas de la zona de estudio es la topografía. En el Anexo 4, se pueden observar las curvas de nivel para el área de interés en escala 1: 50 000 (Instituto Geográfico Militar, 2014).

4.4.1.2 Clase de suelo

4.4.1.2.1 Clasificación Taxonómica de los suelos en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba

La visión general acerca del uso del suelo en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba fue consecuencia de la cartografía de clase y aprovechamiento del suelo que se encuentra disponible en las bases de datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Obteniendo como resultado la clasificación taxonómica del área de estudio en: entisol con un 12.2%, histosol con 0.5%, inceptisol con un 46.8%, una mezcla entre entisol y inceptisol con un 15.3, molisol 19.9, inceptisol-molisol con un 0.02% y un área no identifica del 5.3%. Como se

observa a en el Anexo 5, y en la Tabla 2, la zona de estudio con su respectiva área y distribución.

Tabla 2.

Clasificación taxonómica del área de estudio.

Taxonomía	Área (km ²)	%
Molisol	1630,8	19,9
Inceptisol	5087,4	62,08
Molisol+ Inceptisol	1,6	0,02
Entisol	999,8	12,2
Histosol	40,9	0,5
No identifica	434,3	5,3
Total	8194,9	100

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

4.4.1.2.2 Clasificación textural de la zona de estudio

En la cuenca del Río Guayllabamba la velocidad de infiltración depende de la clase textural del suelo. La velocidad de infiltración es mayor cuando las propiedades mecánicas del suelo presentan una alta porosidad porque la mayoría de los elementos que lo componen son gruesos (piedras). Por otro lado, cuando la tierra es fina (arcilla, limo o arena), las velocidades de infiltración son bajas (U.S. Soil Conservation Service., 1984). La distribución textural del suelo en la zona de interés es la siguiente: gruesa con un 6.4%, moderadamente gruesa con un 20.2%, media en un 64.7%, fina con un 3.4 % y un 5.3% no identificable. A continuación, se presenta la Tabla 3, que muestran la clase textural de la zona de interés con sus respectivas áreas y porcentajes.

Tabla 3.

Clasificación textural de la zona de estudio.

Taxonomía	Área (km ²)	%
Fina	278,6	3,4
Media	5302,1	64,7
Gruesa	524,5	6,4
Moderadamente Gruesa	1655,4	20,2
No identifica	434,3	5,3
Total	8194,9	100

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

4.4.1.2.3 Uso de suelo de la en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba

De los 8194,9 km² que conforman la cuenca de río Guayllabamba, el 48,4 % es uso agropecuario, el 3,1 % es asentamientos poblados (Distrito Metropolitano de Quito), el 22,8 % bosques, el 0,3% cuerpos de agua, el 3,6% eriales, y el 21,7% vegetación arbustiva y herbácea. Como se indica a continuación, en el Anexo 7 y la Tabla 4, la distribución del uso de suelo para la unidad hidrográfica del río Guayllabamba con sus respectivas áreas y porcentajes.

Tabla 4.

Uso de suelo de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba.

Uso de suelo	Área (km ²)	%

Agropecuario	1630,8	19,9
Antrópico	5087,4	62,08
Entisol	999,8	12,2
Histosol	41	0,52
No identifica	435,9	5,3
Total	8194,9	100

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

4.4.2 Climatología la cordillera de los Andes tiene una influencia directa sobre unidad hidrográfica del Río Guayllabamba.

Para entender el comportamiento de los cuerpos hídricos de la unidad hidrográfica del río Guayllabamba, es de suma importancia describir sus principales características climáticas.

4.4.2.1 Precipitación

Según el Plan Integral de Aprovechamiento Hidroeléctrico de la Cuenca del Río Guayllabamba (2013), la cuenca del Río Guayllabamba tiene una precipitación máxima de 3345.2 mm/mes, una precipitación media de 1747.59 mm/mes y una mínima de 83.4 mm/ mes.

4.4.2.2 Temperatura

En cuanto a la temperatura de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba, la máxima temperatura del área de estudio es de 31.5 °C, con una temperatura mínima de -4.3 °C y una media de 14.9 °C (Tucci, Cisneros, & Lloret, 2009).

4.4.2.3 Humedad Relativa

La humedad relativa, reflejo valores mínimos de 72.1%, una media de 79.7% y un valor máximo de 93.1% (Tucci, Cisneros, & Lloret, 2009) en la zona de interés.

5. Descripción del modelo

La presente investigación se basó en un modelo tipo conceptual fundamentado en las observaciones ejecutadas sobre la cuenca y constituido a través de ecuaciones físicas semiempíricas, debido a que algunas de las variables que necesita WEAP como datos de entrada son imposibles de ser medidas físicamente, deben ser estimadas y validadas, por medio de calibraciones.

5.1 Periodo de modelación

En relación con la disponibilidad de datos meteorológicos e hidrológicos, y como la bibliografía lo indica, se realizó el modelo tomando un periodo mínimo de 10 años seguidos, para los años 2005 al 2015.

5.2 Datos de entrada

5.2.1 Variables Climáticas

Las variables de entrada que se utilizaron para el modelo fueron los datos de precipitación y caudales medios ubicados dentro de la unidad hidrográfica del Rio Guayllabamba, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología a (INAMHI). Por otro lado, partiendo de las mediciones de temperatura también obtenidos de la base de datos del INAMHI, se procedió a calcular el

valor de la Evapotranspiración potencial de referencia mediante la fórmula de Hargreaves, la cual relaciona la temperatura media y la radiación solar incidente de acuerdo con su ubicación geográfica. A continuación, se muestra la tabla 5 y en el Anexo 8.0 en donde se puede observar las estaciones meteorológicas seleccionadas para el modelo y su ubicación respecto al área de interés. De igual manera en la tabla 6 y Anexo 9.0 que representan las estaciones hidrométricas seleccionadas para el modelo y su ubicación geográfica respecto a las subcuencas del área de estudio.

Tabla 5.

Estaciones meteorológicas consideradas para la generación del modelo.

Estación		Coordenadas		Elevación
Código	Nombre	Latitud	Longitud	(m.s.n.m)
M1094	TOMALON-TABACUNDO	0G 0' 40.16" N	78G 15' 18.19"W	2790
M0009	LA VICTORIA INERHI	0G 3' 36" S	78G 19' 23" W	2262

Adaptado de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2018.

Tabla 6.

Estaciones hidrométricas consideradas para la generación del modelo.

Estación		Coordenadas		Elevación
Código	Nombre	Latitud	Longitud	(m.s.n.m)
H0149	GUAYLLA BAMBAMBA EN	0G 10' 50" N	78G 38' 17" W	860

	PTE.CHA CAPATA			
H0148	GUAYLLA BAMBA DJ PISQUE	0G 0' 48" N	78G 24' 18" W	1690
H0146	GUAYLLA BAMBA DJ ALAMBI	0G 14' 10" N	78G 44' 30" W	625

Adaptado de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2018.

A pesar de que, en la unidad hidrológica del Río de Guayllabamba, se encuentran 5 estaciones hidrométricas, por la disponibilidad e inexistencia de datos para el periodo en el cual se va a modelar, se decidió solo utilizar las estaciones H0148, H0146 y H0149.

5.2.2 Red hidrográfica

Los ríos generados anteriormente en el programa ArcMap, fueron ingresados a WEAP, para ser utilizados como base sobre la cual se dibujarán los ríos del área de interés.

5.3 Características de la Cuenca

5.3.1 Área para modelar

A partir de la ubicación de las estaciones hidrométricas se generaron 3 nuevas microcuencas en función de la topografía. Con ayuda del programa ArcMap y usando una imagen satelital, tipo raster con las coordenadas de área de interés, esta imagen fue descargada de la base de datos de NASA Earth (Ver anexo 10).

Al programa WEAP, para cada cuenca se ingresó sus respectivas áreas (Ver tabla 7).

Tabla 7.

Áreas de las cuencas modeladas, de acuerdo a los puntos hidrométricos de interés, en relación a la cuenca del Río Guayllabamba.

Estación		Área
Código	Nombre	(km ²)
H0149	Cuenca_H0149	824.85
H0148	Cuenca_H0148	3853.04
H0146	Cuenca_H0146	1898.11

5.3.2 Uso de suelo de las cuencas modeladas

El uso y cobertura de suelo de cada una de las tres cuencas generadas con sus respectivos porcentajes fueron ingresados en el programa para el presente modelo (ver Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10), (Ver Anexo 11).

Tabla 8.

Uso y cobertura de suelo cuenca alta (H0148).

Cuenca_H0148		
Uso del suelo	%	Área (km ²)
Cultivos	36,8	1417,92
Paramo	5,00	192,65
Asentamiento Poblado	3,2	123,30

Bosques	41	1579,75
Frutales	14	539,43
Área Total		3853,04

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

Tabla 9.

Uso y cobertura de suelo cuenca media (H0149).

Cuenca_H0149		
Uso del suelo	%	Área (km2)
Cultivos	31,07	256,28
Asfalto	2,96	24,42
Bosques	56,48	465,88
Pastizales	9,49	78,28
Área Total		824,85

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

Tabla 10.

Uso y cobertura de suelo cuenca baja (H0146).

Cuenca_H0146		
Uso del suelo	%	Área (km2)
Cultivos	37	702,30
Paramo	3,00	56,94
Bosques	60	1138,87
Área Total		1898,11

Adaptado de Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2014.

5.3.3 Agua subterránea

La capacidad de almacenamiento, almacenamiento inicial del acuífero y el volumen de agua subterráneas son datos de entrada que pide el programa para correr el modelo, mismo que no pueden ser medidos físicamente. Por esta razón y como se explica más adelante, estas variables tienen que ser sometidas a un proceso de calibración.

5.3.3.1 Capacidad de almacenamiento y recarga inicial de las aguas subterráneas

Para determinar la capacidad de almacenamiento y almacenamiento inicial del acuífero, se procedió a determinar la textura de las cuencas modeladas mediante cartografía de textura (ver Anexo 12.0). Para después determinar el coeficiente del suelo según su clase textural (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO, 2018). Este coeficiente fue multiplicado por un altura estima del acuífero, y el área de cada una de las cuencas (Water Resources Management, 2012).

5.3.3.2 Afluente de agua subterráneo (Caudal máximo subterráneo mensual)

Como se explicó previamente, el afluente de agua subterránea fue estimado utilizando el método racional, para establecer el caudal máximo de descarga para una hoyo hidrográfica, pero con algunas modificaciones. De tal manera que la expresión i fue la intensidad de precipitación concentrada en m/s, que fue el resultado de determinar los mínimos mensuales de enero a diciembre para los 10 años modelos y el coeficiente de escurrimiento fue escogido por medio del análisis del uso y cobertura de suelo en relación a la textura y pendiente (ver Anexo 13) (Conservation Service, 2010). Al ser los valores calculados una

estimación después fueron sometidos al proceso de calibración (Ver Tabla 11, Tabla 12, y Tabla 13).

Tabla 11.

Afluente de agua subterráneo cuenca H0148.

Cuenca_H0148		
Mes	Precipitación mínima (m)	Afluente de agua subterráneo (m3)
Enero	0.0121	30303845
Febrero	0.0266	66618370
Marzo	0.0244	61108580
Abril	0.0357	89408865
Mayo	0.0081	20286045
Junio	0.0019	4758455
Julio	0.0003	751335
Agosto	0.0003	751335
Septiembre	0.0012	3005340
Octubre	0.0211	52843895
Noviembre	0.0042	10518690
Diciembre	0.0014	3506230

Tabla 12.

Afluente de agua subterráneo cuenca H0149.

Cuenca_H0149		
Mes	Precipitación mínima (m)	Afluente de agua subterráneo (m3)
Enero	0.0188	30303845
Febrero	0.0185	73618370
Marzo	0.0233	73108580

Abril	0.0377	80251627
Mayo	0.0067	45251627
Junio	0.0025	31251627
Julio	0.0017	9051627
Agosto	0.0007	17075306.7
Septiembre	0.0046	18270096.5
Octubre	0.0426	22270096.5
Noviembre	0.0238	17360429.5
Diciembre	0.001	33251627

Tabla 13.

Afluente de agua subterráneo cuenca H0146.

Cuenca_H0146		
Mes	Precipitación mínima (m)	Afluente de agua subterráneo (m3)
Enero	0.092371429	113987452.3
Febrero	0.108024445	133276779.4
Marzo	0.1176231	145119264
Abril	0.119143219	146994733.6
Mayo	0.059818985	73802570.03
Junio	0.021698591	26770962.37
Julio	0.015111612	18644178.35
Agosto	0.02015797	24870198.35
Septiembre	0.02376243	29317254.7
Octubre	0.058568798	72260133.19
Noviembre	0.059898834	73901085.18
Diciembre	0.055983452	69070423.41

5.4 Agua Potable Distrito Metropolitano de Quito

La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), es la responsable de garantizar el suministro de agua para Quito.

De acuerdo la EPMAPS, son cuatro los principales sistemas de captación de agua:

- El Sistema Papallacta Integrado: El agua producida en la reserva Antisana, es captada, conducida y almacenada en este sistema, a través de tres estaciones de bombeo y de embalses, una central hidroeléctrica y 85 km de conducción con una capacidad de tres mil litros por segundo.
- La Mica-Quito Sur: Este sistema recoge las aguas de la zona del Volcán Antisana y las cuales son conducidas por medio de 54 km de canal abierto hasta la planta de El Troje, seguido de las plantas de Conocoto, Puengasí y el Placer, con una capacidad de mil cientos cincuenta litros de agua por segundo.
- El Sistema de Conducciones Orientales: el Río Pita es la principal fuente de abastecimiento de este sistema, dotando de agua a las Plantas Puengasí, El Placer y Conocoto. El sistema cuenta con una conducción de 40,8 km de canal abierto y un sifón invertido de tubería de acero. Con una capacidad de 3000 litros de agua por segundo.
- El sistema conducciones occidentales: La principal fuente de captación de este sistema son las aguas producidas por los subsistemas Atacazo, Lloa y Pichincha que sirven para dotar de agua cruda a las plantas El Placer, Chilibulo y Toctiuco. Tiene un canal de conducción de aproximadamente 90 km de canal abierto, con una capacidad de 700 litros de agua por segundo.

5.5 Calibración, análisis y verificación del modelo

Una vez que se han ingresado todos los datos necesarios para que WEAP, genere un modelo. Hay que calibrar las variables que no han podido ser medidas directamente, para eso hay que ajustar los parámetros, en función de consideraciones físicas o por medio de optimizaciones matemáticas, de forma que exista correlación entre los valores modelados (caudales mensuales simulados por el programa WEAP), en relación de las variables observadas (caudales medidos por el INAMHI) (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Deckers, 2003).

La calibración se basó en calibrar manualmente cada una de las variables climáticas y geomorfológicas mencionadas a continuación con el objetivo de llegar a un error menor a 2 en cada una de las cuencas modeladas. Para esto fue necesario ejecutar comparaciones entre series de datos registrados por los medidores de caudal de cada una de las unidades hidrográficas. En función del RMSE, con el cual se evaluó el promedio de magnitud del error, la diferencia entre valores simulados y observados. Entre más cercano a 0 será el RMSE indica mejores resultados.

5.5.1 Calibración almacenamiento de agua subterránea

La calibración del almacenamiento de agua subterránea se realizó de dos maneras: la primera fue utilizando el rango de porosidad, según la textura de suelo identificada de los mapas de uso y cobertura de suelo generados, hasta que se presente el menor valor de RMSE. Para la segunda parte se repitió este procedimiento, pero esta vez modificando la altura del espesor del acuífero.

5.5.2 Calibración precipitación efectiva.

Los valores de precipitación efectiva se calibraron con valores de 0 a 100%, subiendo de 10 en 10, modificando este rango, hasta encontrar el valor que presente un menor valor de RMSE.

5.5.3 Calibración afluente de agua subterránea y calibración fracción de escorrentía infiltración.

Las dos variables se calibraron simultáneamente, en relación con los valores mensuales de caudal simulados y observados. Modificando matemáticamente el afluente de agua subterránea y los porcentajes de infiltración y escorrentía en un rango de 0 a 100 %, en el que sumandos deben dar el 100%.

Hasta que RMSE de un valor lo más cercano a 0 posible, en las dos primeras cuenca dichos valores fueron iguales para todos los meses, pero para la cuenca baja (H0146) en julio, agosto y septiembre se presentaron diferencias insignificantes.

6. Resultados

6.1 Resultados primera corrida

En la primera corrida del modelo el RMSE global es de 143.85%, con un RMSE 89.79% para la cuenca alta, 47.69% para la cuenca media y de 33.89% para la cuenca baja (Ver tabla 14).

El mejor resultado se obtuvo en la cuenca baja con un RMSE más cercano a cero. Lo mismo ocurrió con el rMAE total, anual, temporal y mensual, mientras que la cuenca alta (H0148) fue la que manifestó los resultados más alejados de cero.

El coeficiente determinación también tuvo los mejores resultados anuales y mensuales, en la cuenca media llegando a presentar un valor de 0.999, un valor casi de 1 al que se interpreta como la mejor correlación de las observaciones (Lema & Plaza, 2009). Aunque no sucedió lo mismo con el R^2 temporal ya que el mejor resultado de R^2 fue en la cuenca alta (H0148), como se muestra a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14.

Resultados obtenidos en la primera corrida.

Cuencas	H0149	H0148	H0146	
Total				
rME	-0.719	1.375	-0.568	
rMAE	0.719	1.375	0.568	
Anual				
rMAE	0.859	1.375	0.568	
R^2	0.841	0.526	0.704	
Temporal				
rMAE	0.719	1.375	0.568	
R^2	0.409	0.693	0.300	
Mensual				
rMAE	0.942	1.479	0.569	
R^2	0.999	0.779	0.680	
	4.769	8.979	3.389	14.385

6.2 Resultados calibración

Para las cuencas H0148 y H0149 el rME y rMAE total es 0. Para la última cuenca (H0146), el rME y el rMAE total es de -0.027 y 0.027 respectivamente.

El rMAE anual más bajo es el de la cuenca alta (H0148) y la correlación más cercana a 1, por tanto los mejores resultados son los de la cuenca alta, lo que no sucede en la cuenca baja (H0146) donde se observó el R^2 anual más cercano a 0.

El rMAE y el R^2 temporal tienen un comportamiento parecido al total con un valor de 0 para la cuenca alta (H0148), y de 0.045 y 0.038 para la cuenca baja (H0146) y para la cuenca media (H0149) respectivamente.

El en rMAE mensual al igual que el anual, en la cuenca alta (H0148) presentó los mejores resultados y el coeficiente de correlación más cercano a 1. Se realizó las calibraciones manualmente con el objetivo de que los caudales modelados usando la herramienta WEAP se asemejen a los caudales observados en las subcuencas generadas para la calibración (Ver anexo 15).

En la tabla 15, se puede observar el mínimo, máximo, la media, y la mediana de los caudales mensuales simulados y observados.

Tabla 15.

Caudales mensuales simulados y observados en m³/s.

Meses	Min	Max	Mean	Median
Enero	20.41	182.08	68.81	39.02
Febrero	9.34	270.46	78.94	40.23
Marzo	19.55	239.65	83.4	49.36
Abril	24.36	282.66	91.97	52.4
May	21.96	192.49	70.65	48.8
Junio	8.44	101.98	51.91	45.29
Julio	7.98	139.86	48.23	40.96

Agosto	1.12	66.7	30.35	27.42
Sept	7.84	57.77	31.07	25.64
Oct	9.19	56.96	34.69	32.81
Nov	15.06	72.09	44.7	41.18
Diciembre	27.41	119.17	65.85	47.54

El caudal mínimo mensual en los 10 años de modelación fue en el mes de agosto con un valor de 1.12 m³/s en la cuenca alta (H0148). El caudal máximo observado fue en la cuenca baja (H0146), en el mes de abril con un valor de 282.66 m³/s, la media fue de 58.88 m³/s y la mediana tuvo un valor de 41.07 m³/s para el mes de julio.

El punto de control más representativo es el medidor de caudal de cuenca baja (H0146), ya que representa el caudal final modelado que nace de las cuencas media (H0149) y alta (H0148). A continuación, se presenta el promedio mensual en m³/s, de los datos observados versus simulados ya calibrados (Ver anexo 16).

6.3 Resultados almacenamiento de agua subterránea

El acuífero presenta la máxima capacidad de almacenamiento en el mes de abril con un valor de 13 461 369 115.24 m³ en la cuenca alta (H0148). En los meses de septiembre y agosto es cuando el comportamiento del acuífero cambia y almacena la menor cantidad de agua con un valor de 1 061 507 428.23 m³ y 1 073 278 456.83 m³ respectivamente (Ver figura 2) en la cuenca media (H0149). El valor medio fue de 5894053313.91 m³ de agua y la mediana de 3 159 518 784.67 m³.

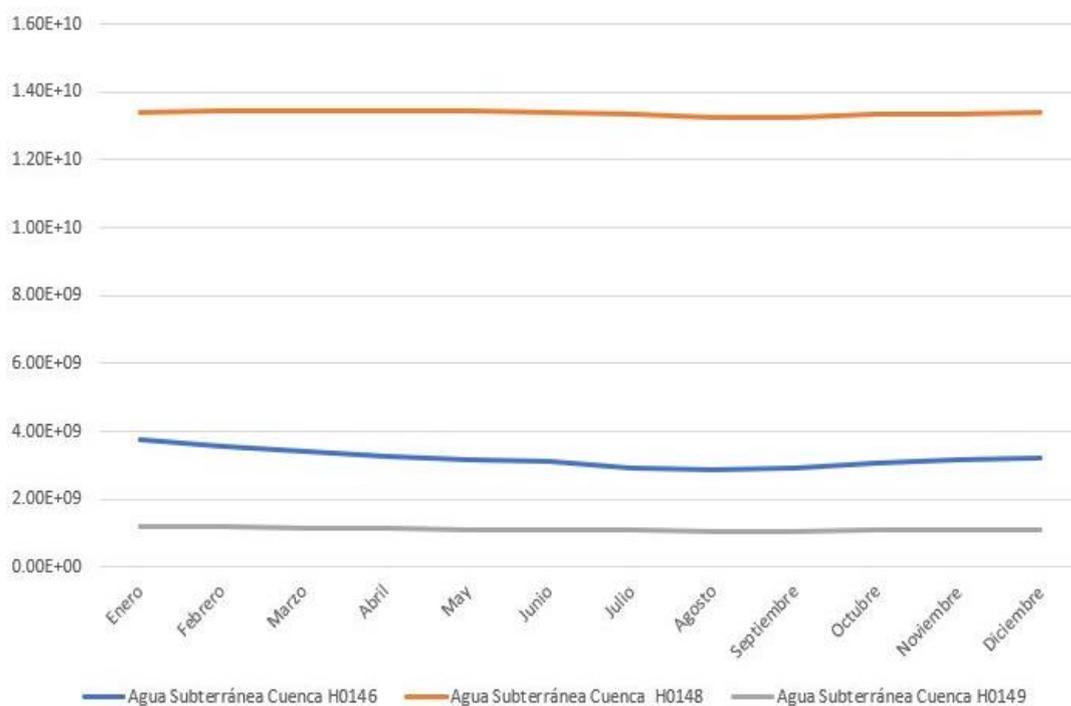


Figura 2. Almacenamiento mensual de agua subterránea de la cuenca alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146), de la cuenca de Río Guayllabamba en m³.

6.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos y caudal afluente de infiltración-escorrentía desde las aguas subterráneas hasta los cuerpos hídricos.

En esta sección se pretende analizar los caudales mínimos y máximos mensuales para las cuenca alta, media y baja en relación al origen de sus aportaciones. Después de calibrar la fracción de agua que se convierte en escorrentía y la que se infiltra por el suelo hasta llegar al agua subterránea en función de los promedios mensuales. Se obtuvieron los siguientes resultados para el caudal de escorrentía infiltración (Ver anexo 17).

Los caudales mínimos se presentaron en los meses de julio, agosto y septiembre. Con el menor caudal observado correspondiente al mes de agosto de 0.60 m³/s, aportado por la unidad hidrológica hacia la cuenca media (H0149).

Desde otro ángulo, el caudal máximo fue en mes de abril, resultado de las contribuciones escorrentía en infiltración de las aguas subterráneas hacia la cuenca baja (H0146) con un valor de 101.90 m³/s.

6.5 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos

En esta sección se pretende analizar los caudales mínimos y máximos mensuales para las cuencas alta, media y baja provenientes de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos.

De tal forma que los siguientes puntos desarrollan de manera caracterizada y con gráficos específicos cada uno de los resultados.

6.5.1 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca alta (H0148)

1.12 m³/s, fue el valor del caudal mínimo que se presentó en el mes de agosto, seguidos en orden ascendente por los meses de septiembre, julio y junio (Ver figura 3).

El caudal más alto fue de 27.41 m³/s, en el mes de diciembre, seguido por los meses de abril, mayo y marzo (Ver figura 3). La media fue 14.39 m³/s y una mediana de 12.2 m³/s.

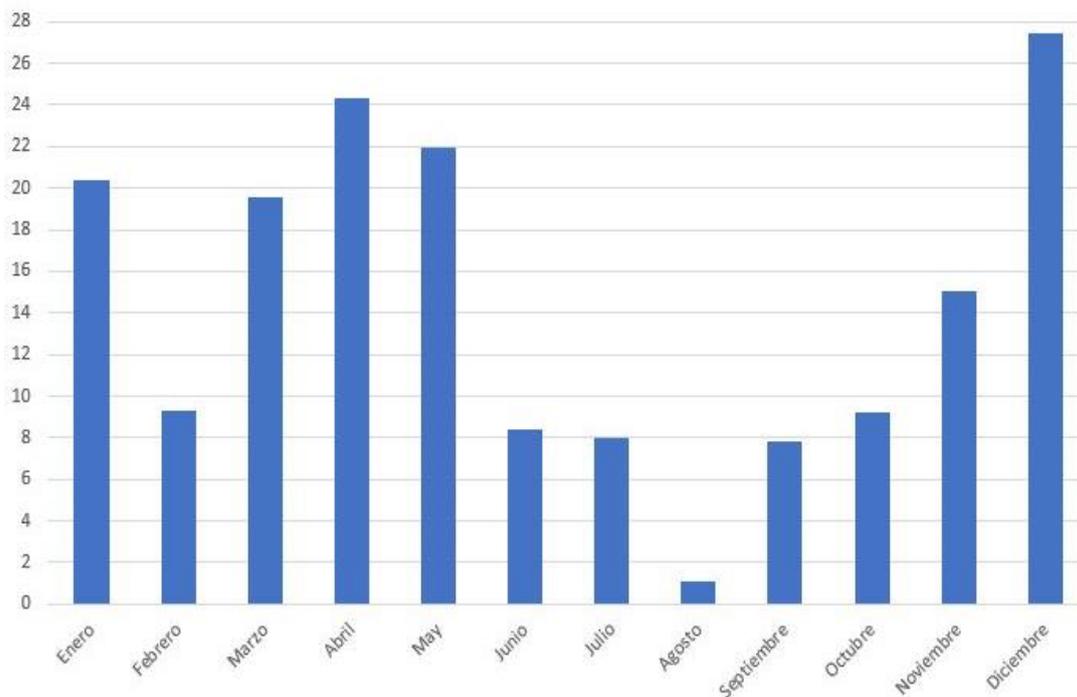


Figura 3. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por la unidad hidrológica a la cuenca alta (H0148).

6.5.2 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149)

En la cuenca media el caudal, mínimo observado fue de 0.60 m³/s en el mes de agosto, continuado con un caudal de 2.65 m³/s en julio, 2.70 m³/s en junio y 2.82 m³/s en septiembre (Ver figura 4). El caudal máximo observado fue de 12.69 m³/s en diciembre, continuando 7.30 m³/s en enero, 6.99 m³/s en marzo y 5.17 m³/s en abril. Una media de 4.91 m³/s y una mediana de 3.94 m³/s (Ver figura 4).

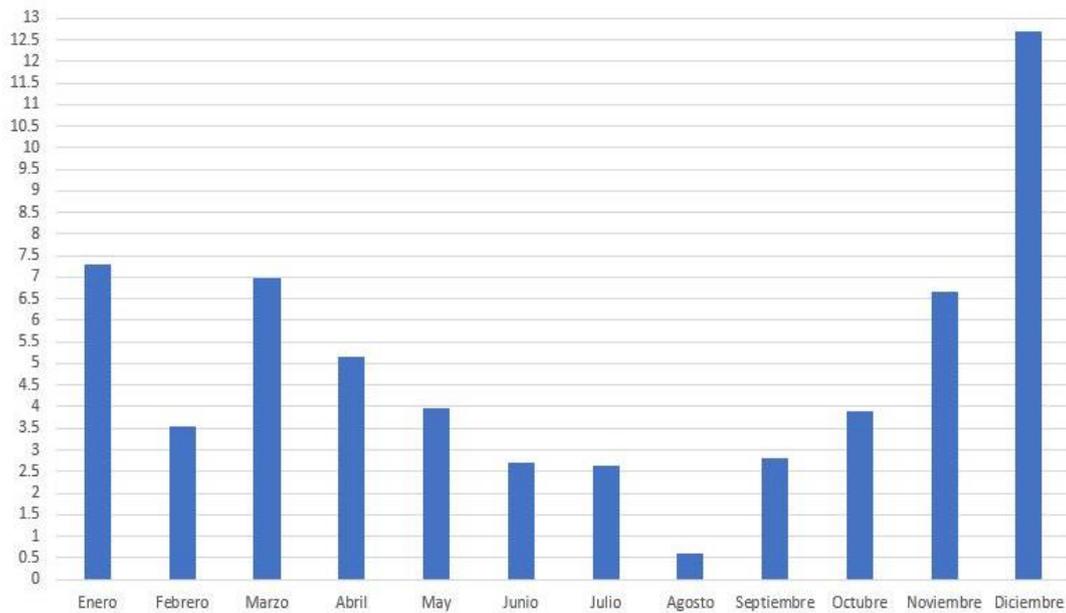


Figura 4. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por la unidad hidrológica a la cuenca H0149.

6.5.3 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca baja (H0146).

El mínimo caudal observado fue de 5.65 m³/s para el mes de octubre, seguido por el mes de agosto, junio y julio, con valores de 6.05, 13.85 y 18.56, respectivamente. (Ver figura 5).

El caudal máximo fue de 58.21 m³/s en el mes de enero, seguido de los meses de diciembre con 51.72 m³/s, marzo 32.50, abril 26.86 m³/s y febrero 24.64 m³/s (Ver figura 5). La media obtuvo un valor de 23.71 m³/s y la media 17.48 m³/s.

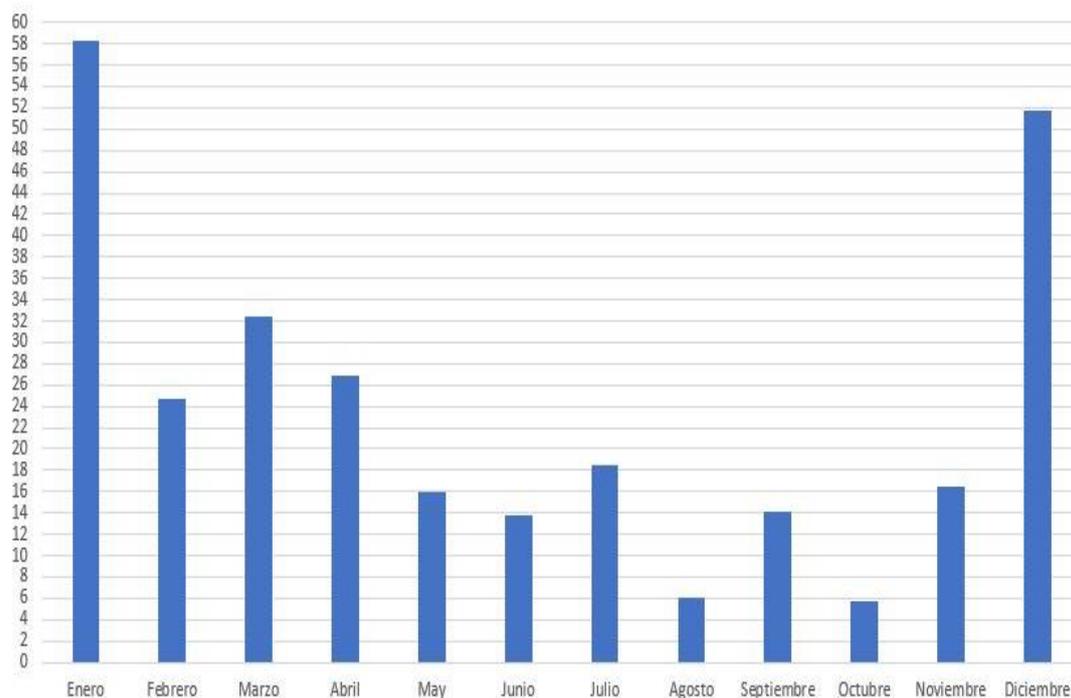


Figura 5. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por la unidad hidrológica a la cuenca baja (H0146).

6.5.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149), vs la cuenca alta (H0148).

En correspondencia a la cuenca alta (H0148), la cuenca media presenta valores de caudal más cercanos al 0 (Ver figura 6). Con un caudal mínimo de 0.60 m³/s en la cuenca media (H0149) y un valor máximo de la cuenca 27.41 m³/s en la cuenca alta (H0148).

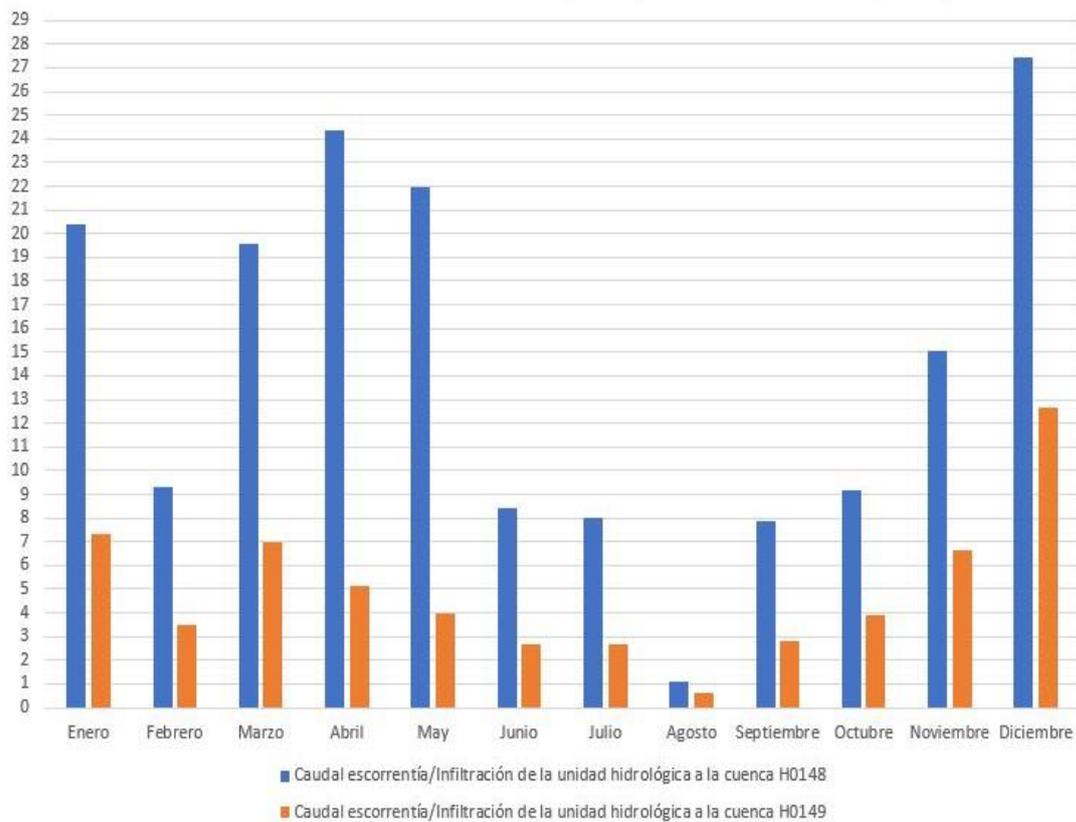


Figura 6. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por la unidad hidrológica a la cuenca alta (H0148) y a la cuenca media (H0149).

6.5.6 Resultados caudal de infiltración-escorrentía de la unidad hidrológica a los cuerpos hídricos cuenca media (H0149), vs la cuenca media (H0149).

La cuenca baja (H0146) y la cuenca media presentan valores de caudal más cercanos al 0 (Ver figura 7).

El caudal mínimo es de 0.60 m³/s en la cuenca media (H0149) y un valor máximo de 58.21 m³/s en la cuenca alta (H0148).

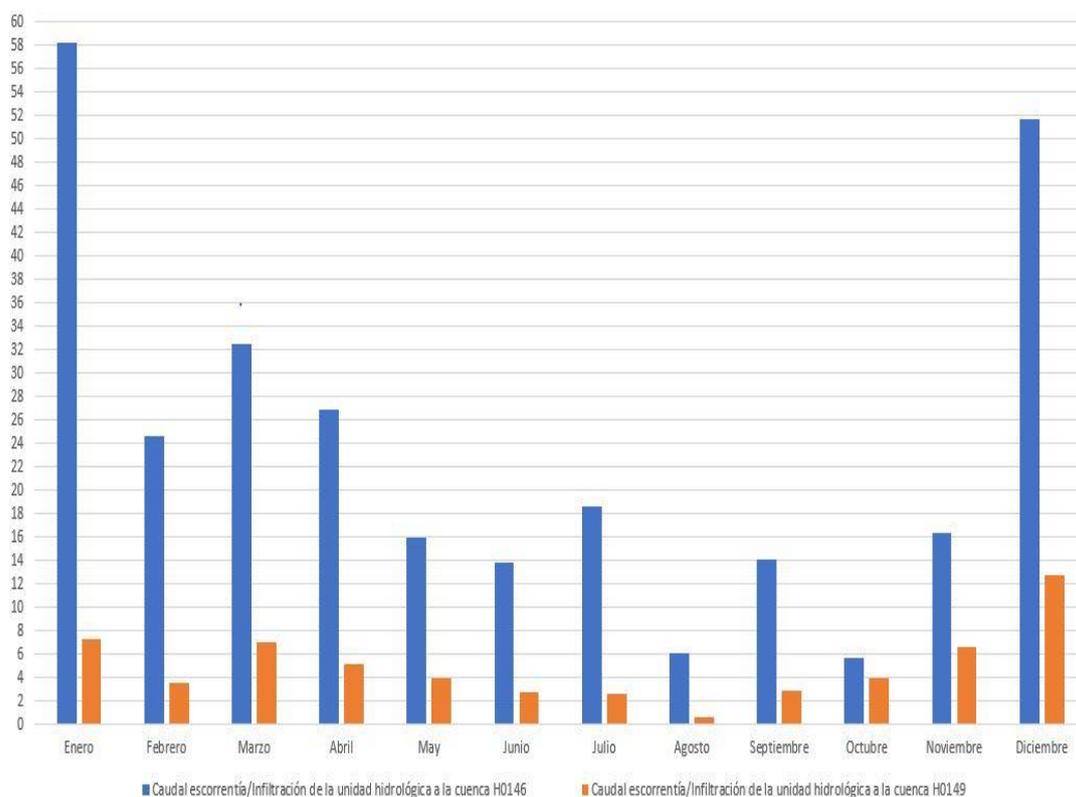


Figura 7. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por la unidad hidrológica a la cuenca baja (H0146) y a la cuenca media (H0149).

6.6 Resultados del caudal afluente de infiltración-escorrentía desde el acuífero hasta los cuerpos hídricos.

En esta sección se analizan los caudales mínimos y máximos mensuales para la cuenca alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146) provenientes del acuífero a los cuerpos hídricos.

6.6.1 Resultados del caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de cuenca alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146).

1.0 m³/s, fue el valor del caudal mínimo que se presentó en el mes de julio, seguidos en orden ascendente por los meses de agosto, septiembre y junio (Ver figura 8), con un valor de 1.29, 2.51 y 4.70 m³/s respectivamente.

El caudal más alto fue de 101.90 m³/s, en el mes de abril, seguido por, 93.09 m³/s en el mes de febrero, 84.41 m³/s en marzo y 60.92 m³/s en mayo (Ver figura 8). Con una media de 32.14 m³/s y una mediana de 33.52 m³/s.

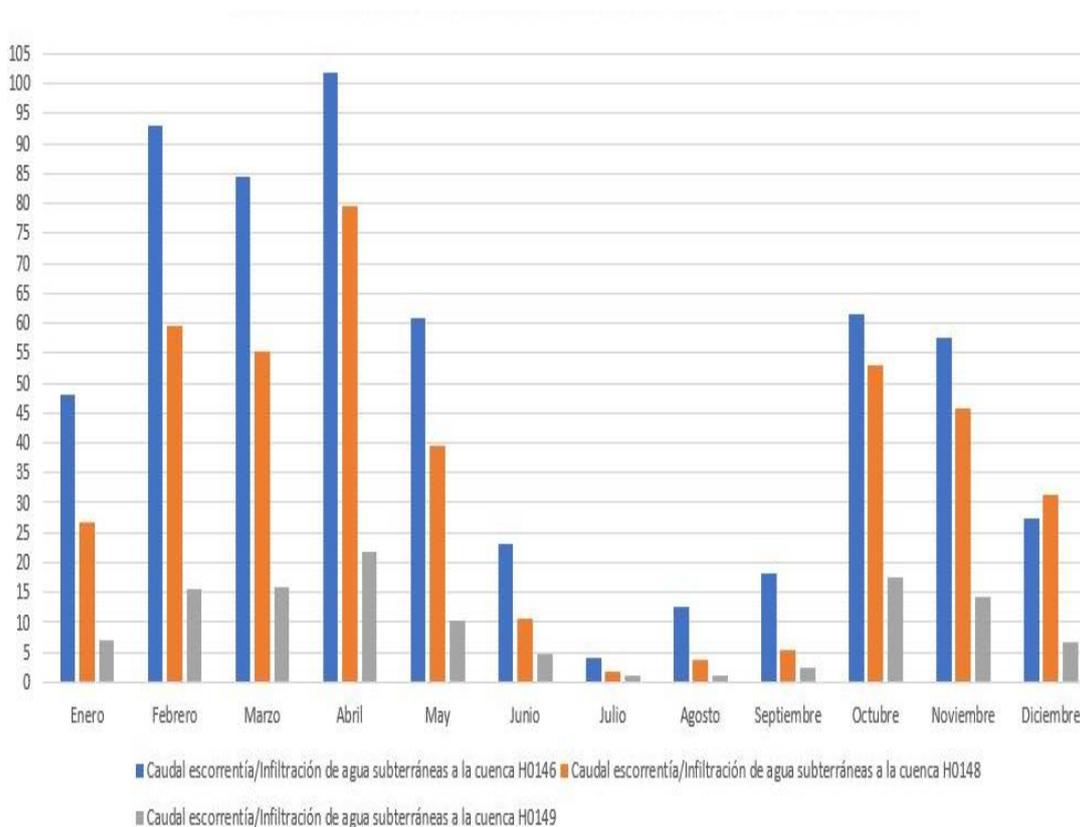


Figura 8. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero a la cuenca alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146), de la cuenca de Río Guayllabamba.

6.6.2 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca alta (H0148).

1.75m³/s fue el caudal mínimo de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos desde la cuenca alta (H0148) para el mes de julio. Seguido por el mes de agosto con un valor de 3.64 m³/s, septiembre 5.47 m³/s y junio con un valor de 10.53 m³/s (Ver figura 9).

Por otro lado, el caudal máximo promedio en la cuenca alta fue de 79.51 m³/s para el mes abril, seguido por el mes de febrero con un valor de 59.66 m³/s, marzo con 55.35 m³/s y octubre 52.89 m³/s. La media tuvo un valor de 34.33 m³/s y la mediana 35.38 m³/s (Ver figura 9).

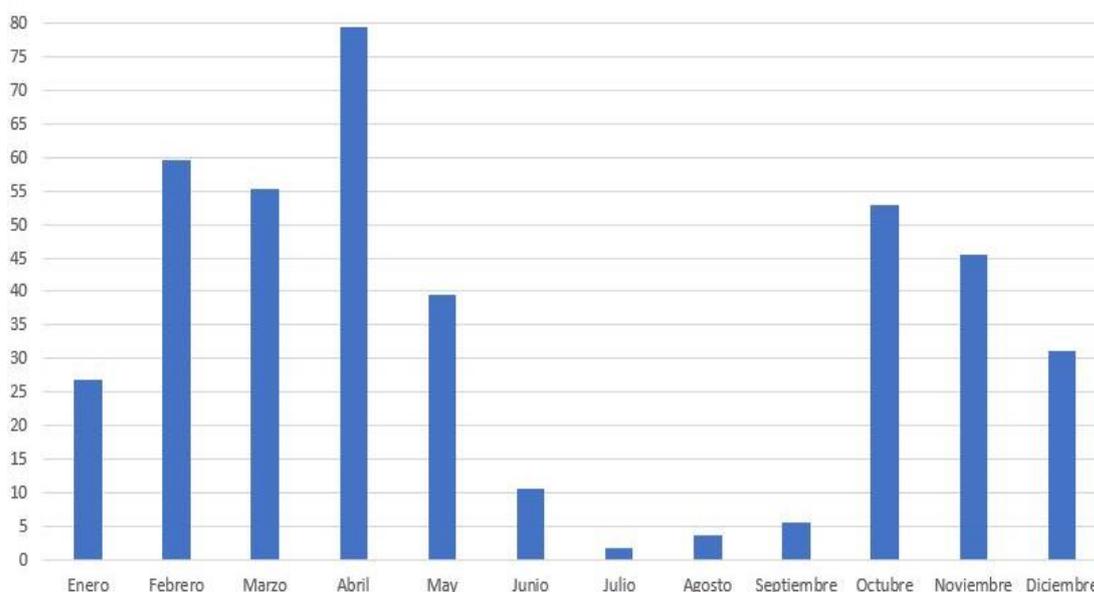


Figura 9. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero a la cuenca alta (H0148).

6.6.3 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca media (H0149).

Para la cuenca media del Río de Guayllabamba los caudales mínimos se presentaron en los meses de julio, agosto, septiembre y junio (en orden

ascendente), con un valor de 1.00 m³/s, 1.29 m³/s, 2.51 m³/s y 4.70 m³/s respectivamente (Ver figura 10).

21.96 m³/s fue el caudal máximo promedio observado en abril, continuando con el mes de octubre con un valor de 17.62 m³/s, marzo con 15.97 m³/s y febrero con 15.48 m³/s. La media tuvo un valor de 9.87 m³/s y la mediana 8.71 m³/s (Ver figura 10).

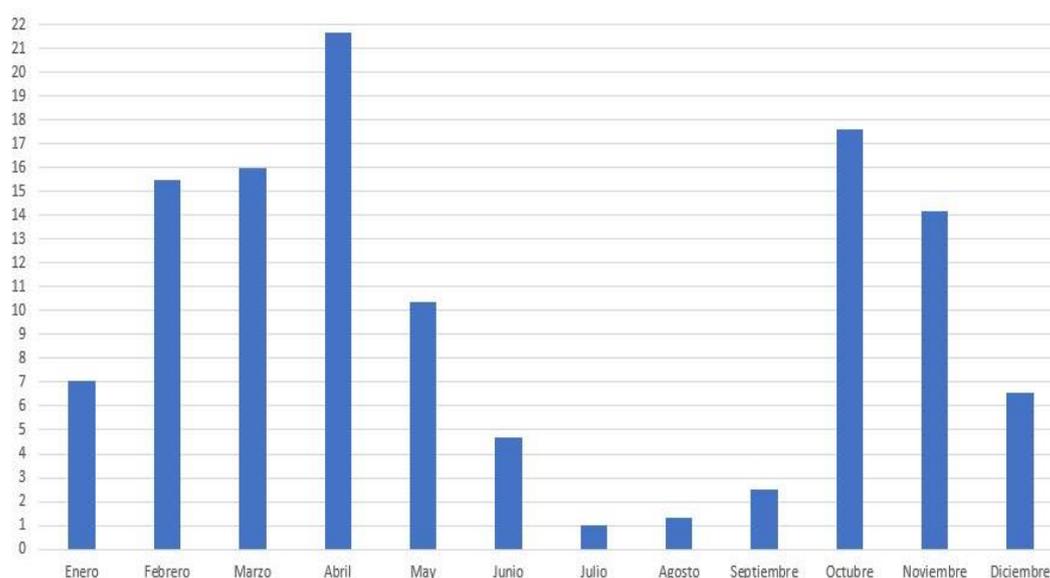


Figura 10. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero a la cuenca media (H0149).

6.6.4 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca baja (H0146).

El caudal máximo se presentó en abril con un valor de 101.90 m³/s, 93.09 m³/s en febrero, 84.41 m³/s en el mes de marzo y 61.34 m³/s en octubre (Ver figura 11).

4.21 m³/s fue el valor del caudal mínimo observado para el mes de julio, siguiendo con el mes de agosto, septiembre y junio con valores de 12.50 m³/s, 18.20 m³/s y 23.27 m³/s respectivamente. Una media de 49.40 m³/s y una mediana 52.75 m³/s (Ver figura 11).

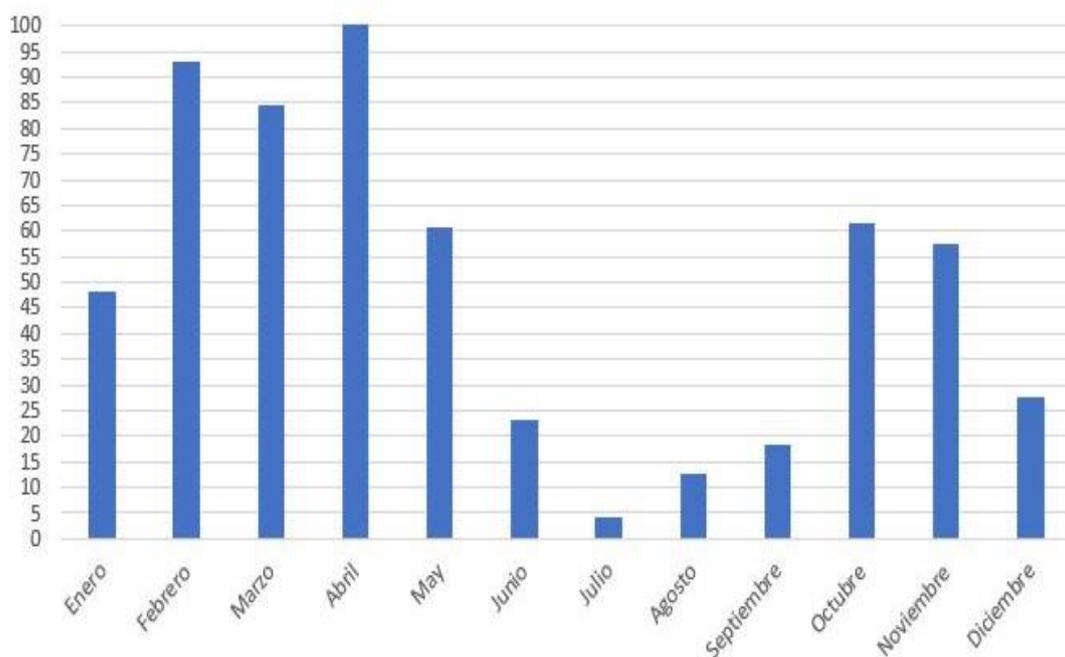


Figura 11. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero a la cuenca baja (H0146).

6.6.5 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de cuenca alta (H0148) en relación con la cuenca media (H0149)

En relación a la cuenca alta (H0148), los valores de la cuenca media son más cercanos al 0 (Ver Figura 12). Con un caudal mínimo de 1.00 m³/s en la cuenca media (H0149), en julio, y en la cuenca alta se observó el caudal máximo con un valor de 27.41 m³/s para el mes de abril.

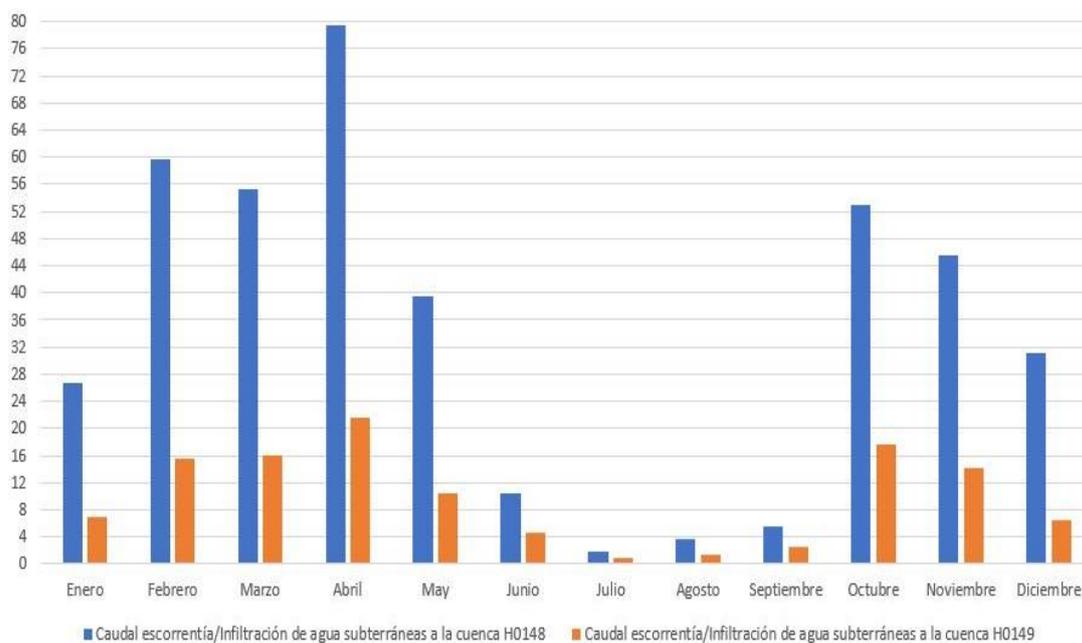


Figura 12. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero al alta (H0148) en relación con la cuenca media(H0149).

6.6.6 Resultados caudal de infiltración-escorrentía desde el acuífero a los cuerpos hídricos de la cuenca media (H0149), en relación con la cuenca baja (H0146).

El caudal mínimo observado fue en la cuenca media con un valor de 1.0 m³/s, para el mes de septiembre en relación con la parte baja. Y un máximo de 101.90 m³/s en el mes de abril, proveniente de la cuenca baja (Ver figura 13).

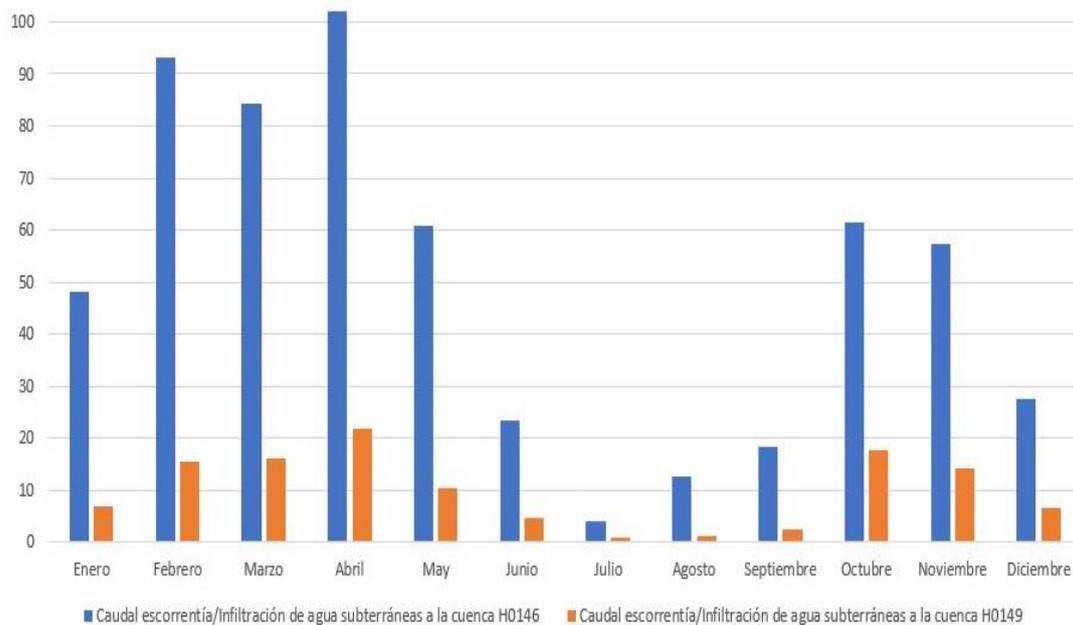


Figura 13. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s aportado por el acuífero a la cuenca media (H0149), en relación con la cuenca baja (H0146).

6.7 Resultados oferta-demanda en relación al cantón Mejía.

A continuación, se puede observar la relación oferta-demanda en m³/s de la cuenca de Río Guayllabamba y el cantón Mejía (Ver figura 14) con una población de 81 335 habitantes y una tasa de crecimiento del 4.51% (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010). Además de la tendencia de crecimiento poblacional para el periodo de modelación.

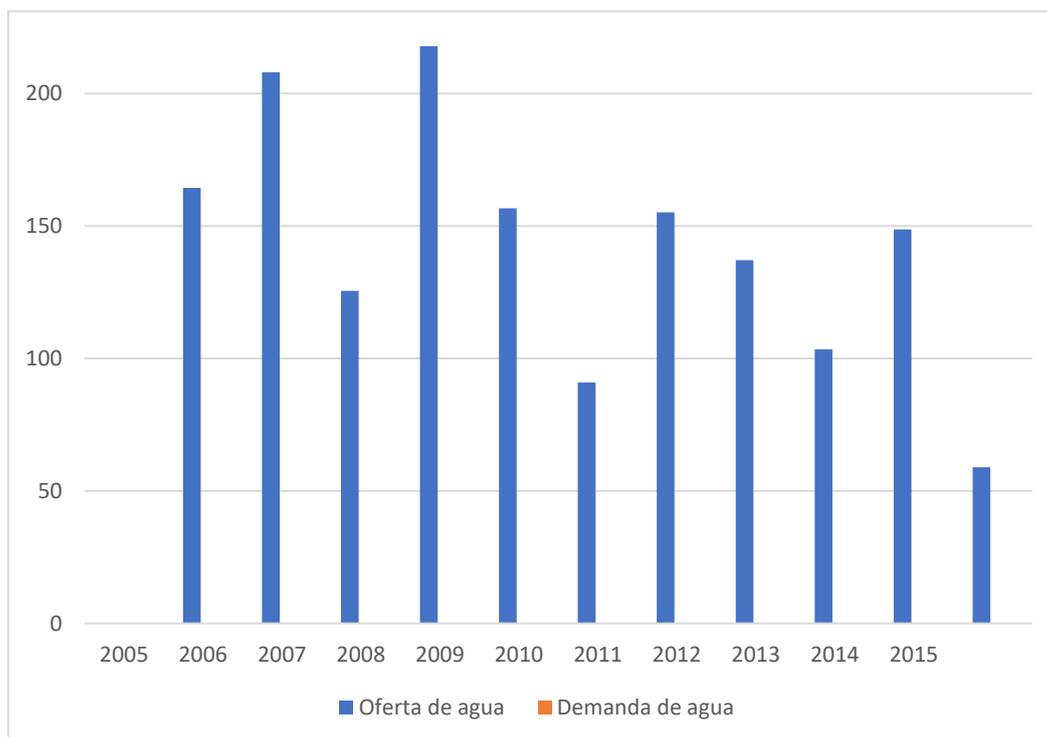


Figura 14. Relación oferta-demanda cuenca de Río Guayllabamba-cantón Mejía.

7. Análisis de los resultados obtenidos

Por la disponibilidad de información y la ubicación de las estaciones hidrométricas se logró modelar un 80.21 % del total de la cuenca del Río Guayllabamba. A partir de los medidores de caudales ubicados en la parte alta, media y baja de la cuenca con áreas de 3853.04, 824.85 y 1898.11 km² respectivamente. El error cuadrático medio (RMSE) del modelo, una vez calibrado, fue de 18.49%, 16.70% y 17.37% para las cuencas alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146) (Ver tabla 14). Porcentajes similares fueron obtenidos en el trabajo de titulación “MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE GLACIARES Y PÁRAMOS EN RELACIÓN CON OFERTA DE QUITO.PRUEBAS DE SIMULACIÓN EN LAS CUENCAS DEL SISTEMA MICA DEL VOLCÁN ANTISANA”, con un RMSE de los valores modelos versus observados ya calibrados de 16%,20% y 25%.

Las calibraciones más significativas, y que mostraron el más bajo error fueron las obtenidas a partir de la calibración de la fracción de escorrentía e infiltración, seguido de la calibración del afluente de agua subterránea, precipitación efectiva, almacenamiento inicial del acuífero y evapotranspiración potencial, este patrón se presentó en las tres cuencas modeladas.

El coeficiente de correlación anual y mensual el modelo mostró buenos resultados con valores mayores a 0.5 (Ver tabla 14), valores que se consideran dentro de un rango aceptable (Lema & Plaza, 2009).

Los máximos caudales simulados de los cuerpos hídricos y de los acuíferos fueron observados en la cuenca H0146 (Ver anexo 17), con una área que ocupa apenas el 23.15 % de todo el territorio de la cuenca del Río Guayllabamba. A pesar de que la cuenca H0148 que ocupa el 47% del territorio de la cuenca del Río Guayllabamba, aquí se observaron los caudales mínimos de los acuíferos y de los cuerpos hídricos (Ver anexo 17). Esto puede deberse a que la mayor parte del territorio urbano del DMQ se encuentra en la cuenca alta (H0148), y una pequeña proporción de los territorios del norte en cuenca media (H0149). Reflejando el impacto que la urbanización y el cambio del uso de suelo puede causar sobre la superficie de la unidad hidrográfica y sus recursos, al reducir considerablemente el volumen de los acuíferos (Kifle, Mengistu , Hendrik , & Tadesse, 2017). El aprovechamiento y cambio del uso de suelo en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba es un claro resultado de como las actividades humanas tienen un impacto directo sobre los caudales de los afluentes hídricos (Valdivieso , 2011). La urbanización altera significativamente la hidrología de las cuencas, existe una fuerte relación entre el uso del suelo y el comportamiento hidrológico de una cuenca (Sheldon, et al., 2018). Este proceso altera las propiedades del suelo en la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba, favoreciendo al proceso de escorrentía, disminuye la recarga de aguas subterráneas y finalmente reduce el caudal de los afluentes de agua a los sistemas hídricos (K. Dovie & Abudu, 2018). La cuenca del Río Guayllabamba ha experimentado una rápida expansión por décadas, el cambio de uso de suelo ha invadido la vegetación natural, y afectado sus servicios ecosistémicos (Xu, y

otros, 2018). Por lo que se puede inferir que, en la parte alta y media de la unidad hidrográfica del Río Guayllabamba, el crecimiento poblacional y desarrollo industrial han provocado una rápida urbanización convirtiendo estas cuencas en zonas insostenibles (Sahoo, y otros, 2018).

En los meses de agosto, julio y septiembre se presentaron los valores más bajos de caudal de escorrentía e infiltración, desde la unidad hidrológica hasta los afluentes de agua, este comportamiento puede ser causado porque el caudal está directamente afectado por la variable climática precipitación. Es así que en estos meses para el área de estudio también se presentó la precipitación más baja. Por ende, los caudales mínimos, además de la presencia de evaporaciones altas y temperaturas altas, la aparición conjunta de estas variables, ayudan a la aparición de caudales cercanos a 0. Es decir, las precipitaciones menores, temperaturas y evaporaciones mayores inciden en la generación de caudales mínimos. Como lo analiza Christian Orellana en su trabajo de titulación "ESCENARIOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA: MODELACIÓN DE CAUDALES MÍNIMOS".

En estos meses el acuífero es el responsable de suministrar agua a los cuerpos hídricos, por lo que, en los meses de agosto, julio y septiembre, la calibración de fracción escorrentía infiltración fue mayor para las aguas subterráneas. Lo que produce una disminución del nivel freático de los acuíferos hasta, que las condiciones climáticas mejoren y se presenten nuevas lluvias (Simonovic, 1992).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Este estudio analizó el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Guayllabamba. Con el modelo hidrológico empírico construido se obtuvieron los resultados esperados en relación con los objetivos planteados. Es así que el RMSE para las tres subcuenas modeladas y los valores del coeficiente de correlación estuvieron dentro del rango admisible.

La simulación hidrológica con WEAP demostró la influencia que tiene la urbanización y el cambio de uso de suelo en la superficie de la unidad hidrográfica y sus recursos. Las actividades que se ejercen en la cuenca alteran sus propiedades, disminuyen la recarga de agua al acuífero y reducen los caudales de los cuerpos hídricos y como consecuencia deteriora la calidad que los servicios que la unidad hidrográfica de Río Guayllabamba puede brindar a la ciudad. A menos de que se apliquen las medidas pertinentes, este comportamiento seguirá a través del tiempo, alterando su superficie de la cuenca del Río Guayllabamba y aumentando el estrés hídrico.

Usando el método racional se afirmó la relación directamente proporcional que existe entre el caudal y la variable climática de precipitación en la cuenca del Río Guayllabamba, confirmándose en los meses de agosto, septiembre y julio donde se presentaron los caudales mínimos, y en el mes de abril donde se presentaron los caudales máximos.

La cantidad de agua demandada para suplir las necesidades domésticas del cantón Mejía es mínima en relación a la oferta de agua de la cuenca del Río Guayllabamba, sin comprometer su futuro abastecimiento.

8.2 Recomendaciones

Los resultados del presente estudio demuestran la necesidad de crear modelos hidrológicos, usando la herramienta WEAP, enfocados en el manejo y conservación de los sistemas hídricos y con los cuales se pueda planificar y aplicar políticas que resguarden los recursos hídricos y permitan progreso económico, político y social de la población.

Realizar calibraciones manuales de las variables que no pueden medirse directamente toma una gran cantidad de tiempo y el número de calibraciones realizadas pueden ser demasiadas. Por esto es de suma importancia asignar un rango a las variables que se van a calibrar antes de realizarlas. Una vez que se cuenta con el rango por el que van a fluctuar todas las variables, se pueden realizar más calibraciones de tal manera que el caudal simulado versus el caudal medido sean lo más parecidos posibles.

El éxito del modelo utilizando la herramienta WEAP dependerá de la calidad de los datos ingresados. Es necesario aplicar métodos para verificar la homogeneidad de los datos de precipitación, estos métodos pueden ser el análisis de dobles masas con el objetivo de comprobar si existe alguna anomalía en la estación durante el periodo de tiempo modelado.

REFERENCIAS

- Abrar , M. F., Liu, D., Fu, Q., Li, M., Baig, F., Ahmad , Cui, S. (2018). *Performance evaluation of hydrological models using ensemble of General Circulation Models in the northeastern*. Recuperado el 6 de Enero de 2019 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941830653X?via%3Dihub>
- Achenafi, T., Yihun, D. T., Shimelis , S. G., Solomon , D. S., & Dereje, A. H. (2017). *Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2018 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816218303370>
- Almeida, M. R. (2010). Instructivos de procesamiento de información hidrometeorológica. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2527/1/CD-3221.pdf>
- Bao, Chao, Fang, & Chuang-lin. (2006). *Water resources constraint force on urbanization deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China*. Recuperado el 12 de Abril de 2018 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800906003466>
- Brooks , K. N., Ffolliott, F. P., & Magner, J. A. (2014). *Hydrology and the management watersheds*. Iowa State University Press.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2003). Modelando el comportamiento hidrológico de micro cuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOPMODEL. Recuperado el 12 de Abril de 2018 de: <http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/topmodel.pdf>
- Calispa Aguilar, M. F. (2010). Modelación hidrológica de glaciares y páramos en relación con la oferta de agua de Quito. Pruebas de simulación en las cuencas del sistema La Mica del volcán Antisana. Recuperado el 6 de Junio de 2018 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2577>
- Chengguang , L., Ruida , Z., Zhaoli , W., Xiaoqing , W., Xiaohong , C., Peng, W., & Yanqing , L. (2018). *Monitoring hydrological drought using long-term*

- satellite-based precipitation data*. Recuperado el 12 de Febrero de 2018 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718332091>
- Conservation Service. (2010). Coeficientes de escurrimiento para ser usados en el método racional. Recuperado el 10 de Diciembre de 2018 de: <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00245/doc00245-seccion%20h%203.pdf>
- FUNCAGUA. (2018). Situación actual del agua. Recuperado el 25 de Mayo de 2018 de: <http://funcagua.org.gt/situacion-actual-del-agua/>
- Gassmann, M., Tonti, N., Burek, A., & Pérez, C. (2018). *Estimation of evapotranspiration of a salt marsh in southern South America with coupled Penman-Monteith and surface resistance models*. Recuperado el 10 de Abril de 2018 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192318303964>
- González, W. A. (2016). Análisis de la oferta y demanda para la cuenca del río Guayllabamba, bajo condiciones de sequía. Recuperado el 21 de Mayo de 2018 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15140>
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2018 de: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e04.htm>.
- Institute, S. E. (2018). Recuperado el 5 de Diciembre de 2018 de: <https://www.weap21.org/>
- Jingjing , G., Per , C., & Wei , L. (2017). *Application of the WEAP model in strategic environmental assessment: Experiences from a case study in an arid/semi-arid area in China*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2018 de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28494425>
- K. Dovie, D., & Abudu, R. K. (2018). *Hydro-climatic stress, shallow groundwater wells and coping in Ghana's White Volta basin. Science of The Total Environment*. Vol. 636, pp.1268-1278. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.416
- Kifle, B. A., Mengistu , G. T., Hendrik , G. S., & Tadesse, T. (2017). *Climate change and population growth impacts on surface water supply and demand of Addis Ababa, Ethiopia. Climate Risk Management*. Vol. 18, pp. 21 -23. doi: 10.1007/s00267-013-0072-2
- Lema, M., & Plaza, V. (2009). Modelación hidrológica de la cuenca (alta y media) del río Pastaza aplicando el modelo de simulación WEAP (Water

- Evaluation and Plannig System). Recuperado el 20 de Junio de 2018, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1780>
- Li, M., Ma, Y., & Li, R. (2000). *Semiparametric Regression for Measurement Error Model with Heteroscedastic Error*. Pennsylvania: Penn State University.
- Llopis, J. P. (2008). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. San Vicente : Editorial Club Universitario .
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (Vol. 2 ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Motlatsi , M., & Deogratias , M. (2017). *Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. Vol. 100, pp. 305-316. doi: 10.1016/j.pce.2017.02.014
- Naciones Unidas. (2013). Agua,Asuntos que nos importan.Recuperado el 17 de diciembre de 2018 de:<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- Naciones Unidas. (2015). Decenio Internacional para la Acción "El Agua fuente de vida". Recuperado el 17 de diciembre de 2018 de: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- Naciones Unidas. (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.Recuperado el 30 de Abril de 2018 de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- OMS (*Organización Mundial de la Salud*). (2017).Obtenido de OMS informa que 60% de la población mundial carece de saneamiento seguro. Recuperado el 17 de diciembre de 2018 de: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2017/07/12/oms-informa-que-60-de-la-poblacion-mundial-carece-de-saneamiento-seguro/#.WvAdxlgvzIU>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación). (2018). *Textura del suelo*. Recuperado el 17 de diciembre de 2018 de: http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- Pagliero, L., Fayçal , B., Jan , D., Willems, P., & Neil , M. (2019). *Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological*. Journal of Hydrology. Vol. 570, pp. 220 -235. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.071
- Peña, M. G., Vicente, S. S., Hannaford, J., Lorenzo, J. L., Svoboda, M., Domínguez, F. C.,Tomas, M. B. (2018). *Complex influences of*

meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous United States. Journal of Hydrology. Vol. 568, pp. 611 - 625. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.026

Porta , J. C., López, M. A., & Poch, R. (2011). Introducción a la edafología: uso y protección de suelos. Madrid: Mundi Prensa.

Pradhan, B., Hagemann, U., Shafapour Tehrany, M., & Prechtel, N. (2014). *An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image*. Computers & Geosciences. Vol. 63, pp.34 - 43. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.011

Proaño, D. E. (2010). Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrolladas-cuenca alta del Guayllabamba y cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con ayuda de la herramienta WEAP. Recuperado el 17 de diciembre de 2018 de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2601> Journal of Water Resources Planning and Management

Psomas, A., Panagopoulo, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). *Designing water efficiency measures in a catchment in Greece using WEAP and SWAT models*. Recuperado el 30 de Abril de 2018 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816333653>

Sahoo, S., Sil, I., Dhar, A., Debsarkar , A., Das, P., & Kar , A. (2018). *Future scenarios of land-use suitability modeling for agricultural sustainability in a river basin*. Journal of Cleaner Production. Vol. 205, pp 313 - 328. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.099

Sánchez , J. (2018). Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. Recuperado el 27 de Septiembre de 2018 de: http://hidrologia.usal.es/practicas/ET/ET_Hargreaves.pdf

SEI (Institute Stockholm Environment). (2009). Guía metodológica, modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP.

Sheldon, F., Leigh, C., Neilan, W., Newham, M., Polson, C., & Hadwen, W. (2018). *Urbanization: Hydrology, Water Quality, and Influences on Ecosystem Health*. Approaches to Water Sensitive Urban Design. Vol. 105, pp 229 - 248. doi: 10.1016/B978-0-12-812843-5.00011-3

SIWI. (10 de 2005). *Making Water a Part of Economic Development: The Economic Benefits of Improved Water Management and Services*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2018 de: <http://www.siwi.org/publications/making-water-a-part-of-economic->

development-the-economic-benefits-of-improved-water-management-and-services/

- Song, X., Kong, F., & Zhan, C. (2011). *Assessment of Water Resources Carrying Capacity in Tianjin City of China*. *Water Resour. Manage.* Vol. 25, pp 857 - 873. doi: 10.1007/s11269-010-9730-9
- Star, J., & Estes, J. (1990). *Geographic Information Systems*. National Research Council (U.S.).
- Strzepek, K. M., Major, D., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yates, D., Holt, A., & Hillel, D. (2005). *New Methods of Modeling Water Availability for Agriculture Under Climate Change*. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 35, pp 30-35. doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb04242.x
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2002). *Los Suelos y su Fertilidad*. Barcelona: Reverté.
- Tucci, C., Cisneros, J., & Lloret, P. (2009). BID Banco Interamericano de Desarrollo Económico y FONAG Fondo para la Protección del Agua. Recuperado el 27 de Marzo de 2018 de: <https://docplayer.es/38084543-Plan-de-manejo-integrado-de-los-recursos-hidricos-en-la-cuenca-alta-del-rio-guayllabamba-v-cg.html>
- U.S. Soil Conservation Service. (1984). *Engineering field manual for conservation practices*. U.S. Dept. of Commerce, National Technical Information Service .
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2010). 3er Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio. Recuperado el 27 de Marzo de 2018 de :http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR3_Facts_and_Figures_SP.pdf
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Recuperado el 27 de Marzo de 2018 de: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact1-demographics-consumption/>
- Valdivieso , P. R. (2011). Incidencia del cambio en el uso del suelo en los caudales; casos de estudio: Cuencas de los ríos Alambi, Intag y Quijos.

Recuperado el 1 de Octubre de 2018 de:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4214/4/CD-3839.pdf>

Water Resources Management. (2012). *Catalysts for action*. Obtenido de annual report. Recuperado el 15 de octubre de 2018 de:
<http://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2014/08/2030-WRG-Annual-Report-English.pdf>

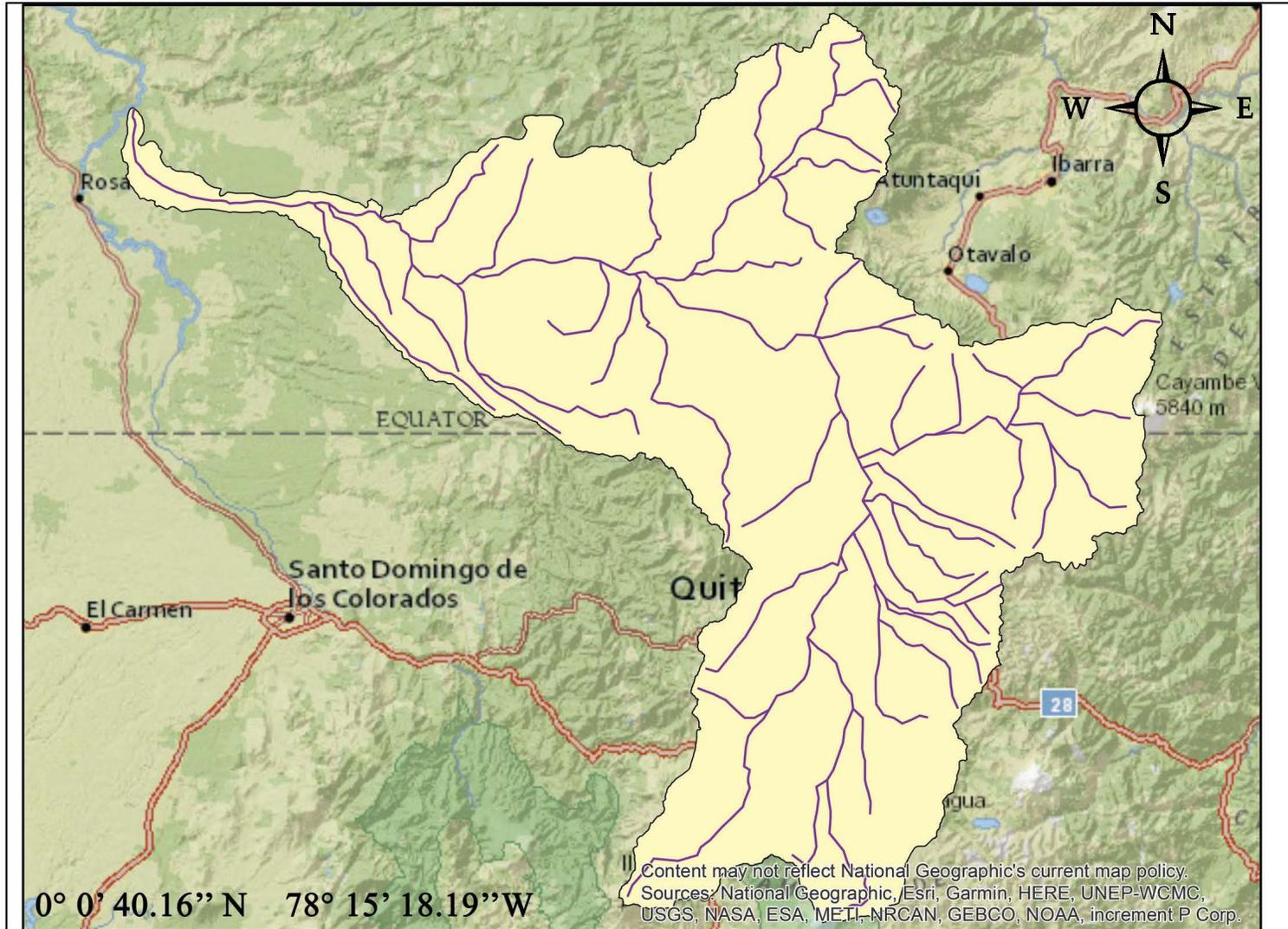
Wilcox, C., Vischel, T., Panthou, G., Bodian, A., Blanchet, J., Descroix, L., & Kone, S. (2018). Journal of Hydrology. Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. Vol. 566, pp 531 - 545. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.063

Xu, Z., Weiguo, F., Wei, H., Zhang, P., Ren, J., Gao, Z., & Dong, X. (2018). Evaluation and simulation of the impact of land use change on ecosystem services based on a carbon flow model: A case study of the Manas River of Xinjiang, China. Science of The Total Environment. Vol 652, pp 117-133. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.206

ANEXOS

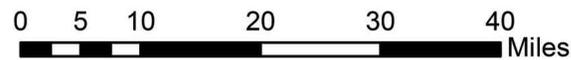
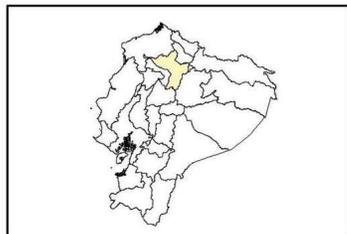
Anexo 1, RED HIDROGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

-  Red hidrográfica de la cuenca del Río Guayllabamba
-  Cuenca del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

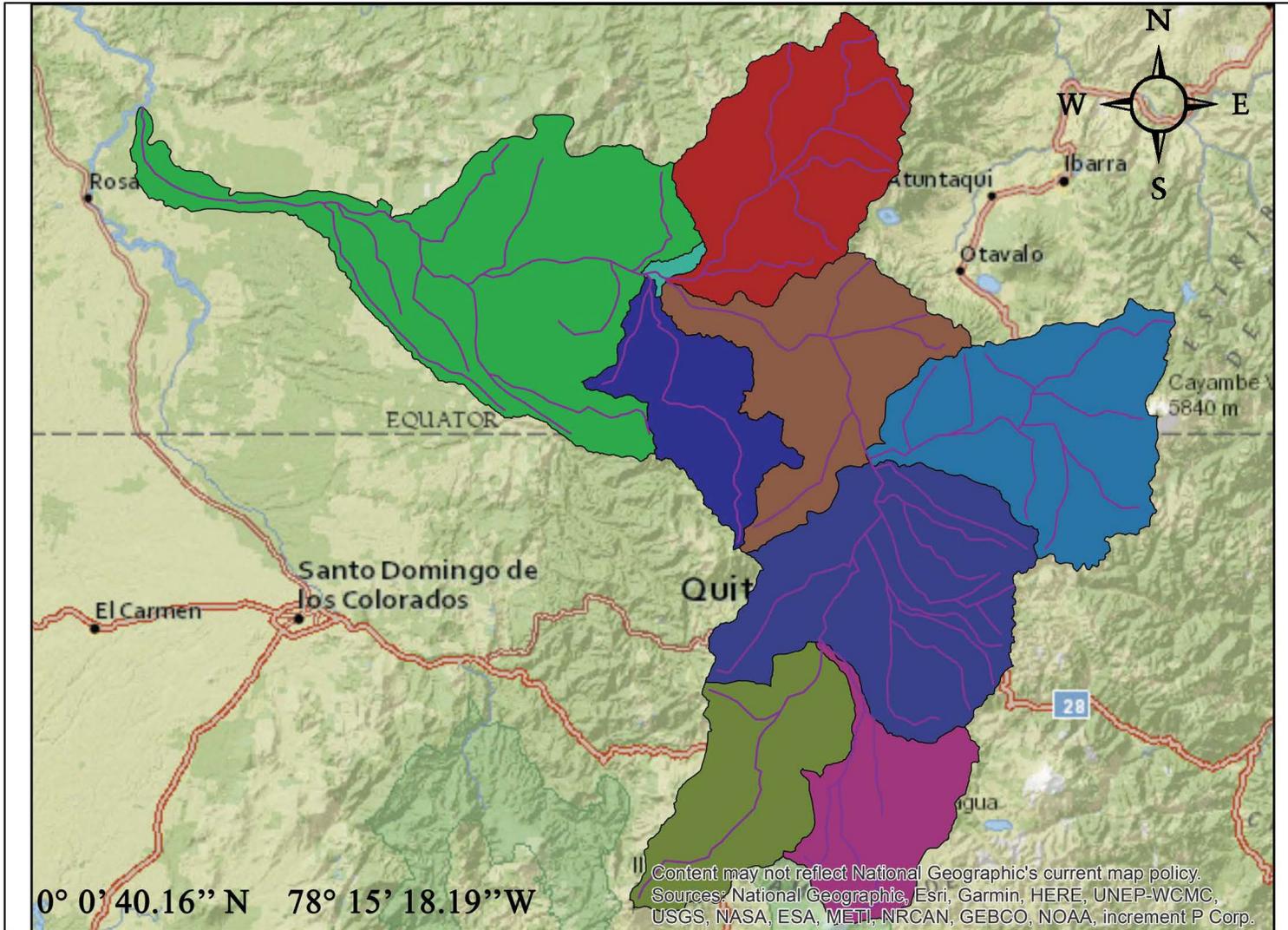
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 1

Anexo 2, DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DEL ÁREA DE INTERÉS

ECUADOR
ESC: INDICADA

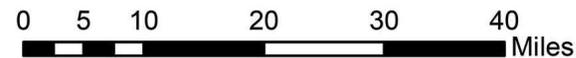
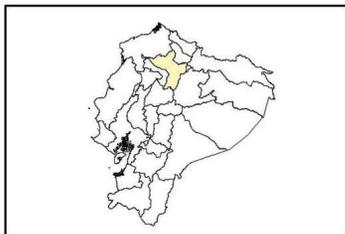


LEYENDA

— Red hidrográfica de la cuenca del Río Guayllabamba

Sub cuencas del Río Guayllabamba

- Unidad Hidrográfica 15249
- Cuenca Río Alambi
- Cuenca Río Intag
- Cuenca Río Pisque
- Cuenca Río Pita
- Unidad Hidrográfica 15241
- Unidad Hidrográfica 15243
- Unidad Hidrográfica 15245
- Unidad Hidrográfica 15247



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

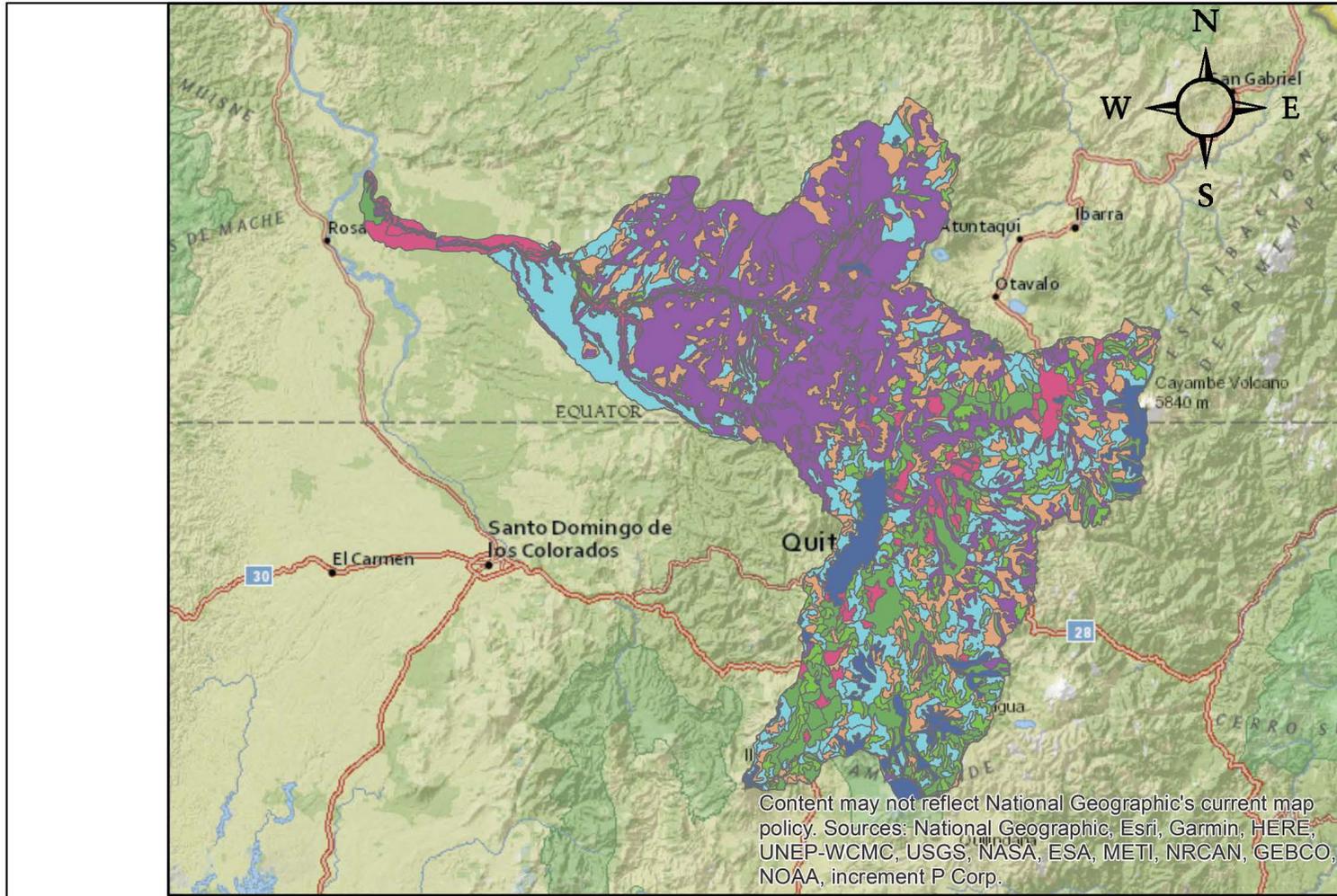
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 2

Anexo 3, PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA

ECUADOR
ESC: INDICADA



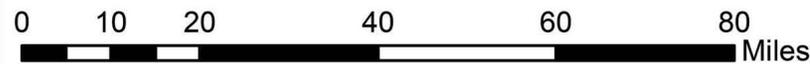
0° 0' 40.16" N 78° 15' 18.19" W

LEYENDA

— Red hidrográfica de la cuenca del Río Guayllabamba

Pediente en la cuenca del Río Guayllabamba

- COLINADO
- ESCARPADO
- LIGERAMENTE ONDULADO (MICRO RELIEVE)
- MODERADAMENTE ONDULADO
- NO APLICABLE
- PLANO A CASI PLANO
- SUAVE A LIGERAMENTE INCLINADO
- Cuenca del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 3

Anexo 4, TOPOGRAFÍA EN LA UNIDAD HIDROLÓGICA DE RÍO GUAYLLABAMBA

ECUADOR
ESC: INDICADA



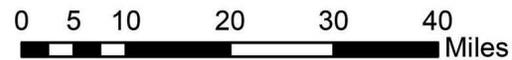
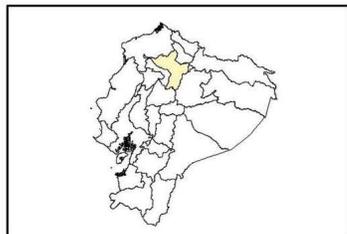
LEYENDA

Curvas de nivel en msnm

- 200
- 400
- 600
- 800
- 1000
- 1400
- 1800
- 2200
- 2600
- 3000
- 3400
- 3800
- 4200
- 4600

Cuenca del Río Guayllabamba

0° 0' 40.16" N 78° 15' 18.19" W



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

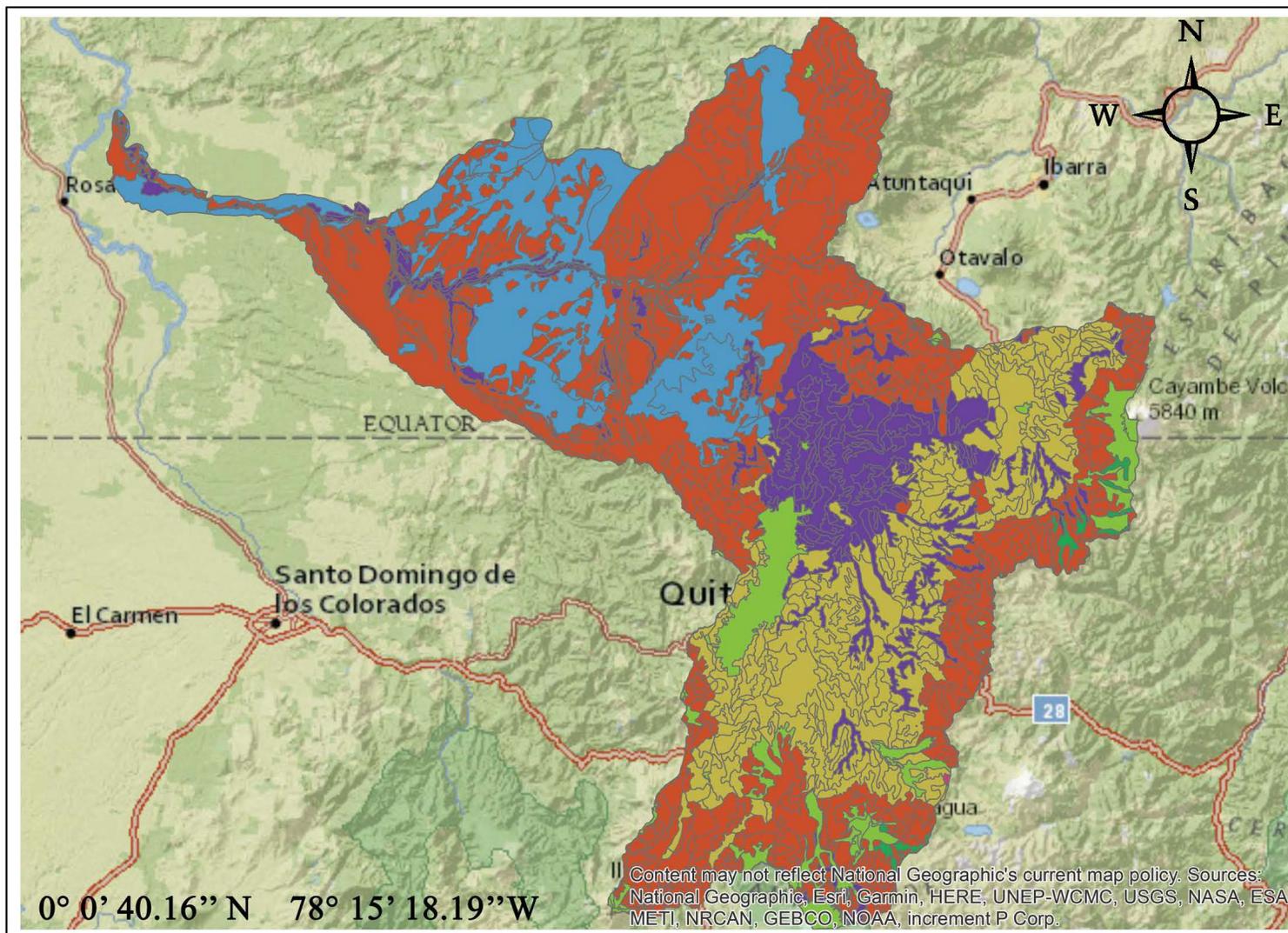
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 4

Anexo 5, DISTRIBUCIÓN TAXONÓMICA DE LOS SUELOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

ECUADOR
ESC: INDICADA

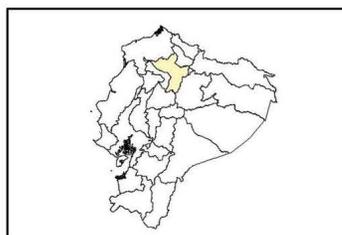


LEYENDA

Clase Taxonómica

orden

- ENTISOL
- HISTOSOL
- INCEPTISOL
- INCEPTISOL+ENTISOL
- MOLLISOL
- MOLLISOL+INCEPTISOL
- NO APLICABLE
- Unidad hidrológica del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

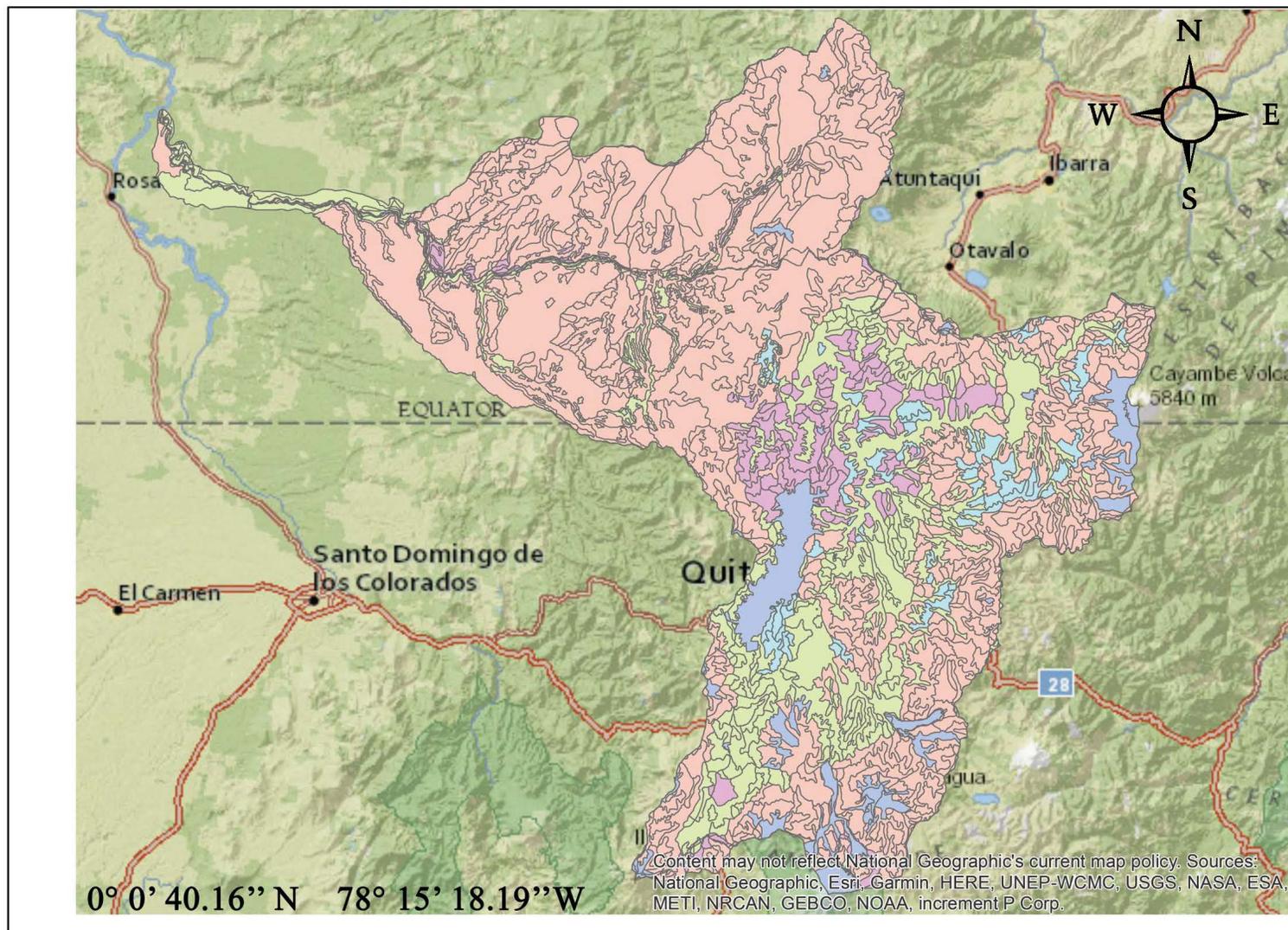
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 5

Anexo 6, DISTRIBUCIÓN TEXTURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

Clase Textural

- FINA
- GRUESA
- MEDIA
- MODERADAMENTE GRUESA
- NO APLICABLE
- Unidad hidrológica del Rio Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

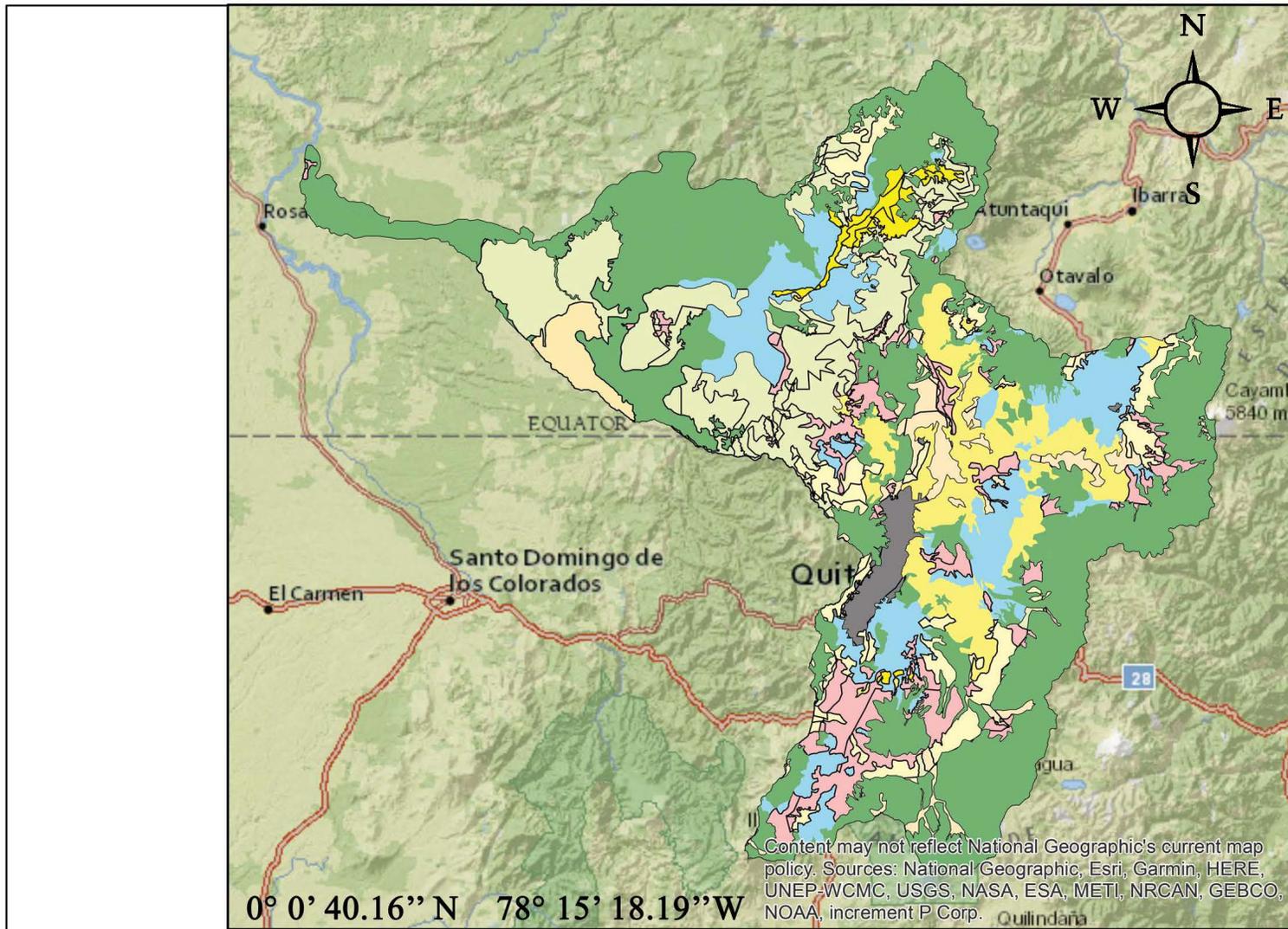
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 6

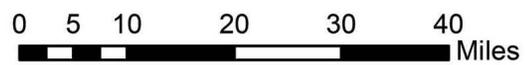
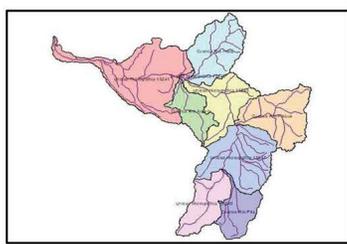
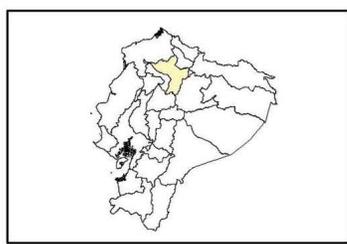
Anexo7, USO DE SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

- Arboricultura
- Arboricultura - Pastos plantados
- Areas erosionadas
- Asentamiento poblado
- Bosque natural - Arboricultura
- Bosque natural - Cultivos de ciclo corto
- Bosque natural - Pastos plantados
- Bosque natural intervenido
- Cultivos bajo invernadero
- Cultivos bajo invernadero - Pastos plantados
- Cultivos de ciclo corto
- Cultivos de ciclo corto - Areas erosionadas
- Cultivos de ciclo corto - Cultivos bajo invernadero
- Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados
- Frutales
- Frutales - Cultivos de ciclo corto
- Maíz
- Maíz - Caña de azúcar
- Maíz - Cultivos de ciclo corto
- Maíz - Pastos plantados
- Maíz - Vegetación arbustiva
- Natural
- Palma africana - Pastos plantados
- Pastos plantados
- Pastos plantados - Areas erosionadas
- Plantaciones forestales
- Plantaciones forestales - Cultivos de ciclo corto
- Páramo intervenido
- Vegetación arbustiva - Cultivos de ciclo corto
- Vegetación arbustiva - Pastos plantados
- Cuenca del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

NOMBRE: **Pamela Rodríguez**

Enero 2019 Lámina 7

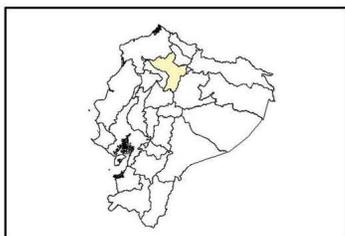
Anexo 8, ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

- Estación Meteorológica M0009
- Estación Meteorológica M1094
- Unidad Hidrográfica 15249
- Cuenca Río Alambi
- Cuenca Río Intag
- Cuenca Río Pisque
- Cuenca Río Pita
- Unidad Hidrográfica 15241
- Unidad Hidrográfica 15243
- Unidad Hidrográfica 15245
- Unidad Hidrográfica 15247



0 5 10 20 30 40 Miles

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

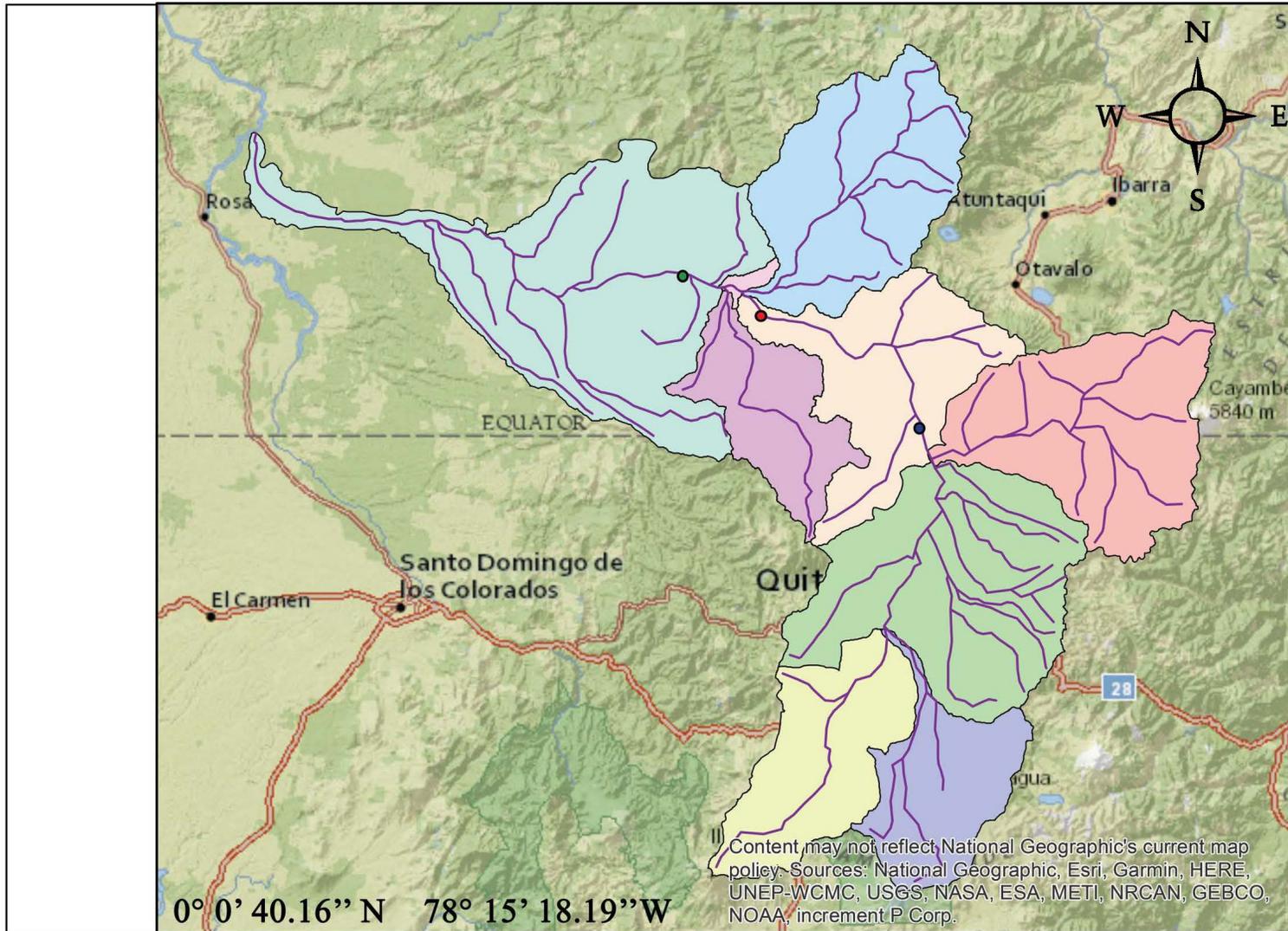
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 8

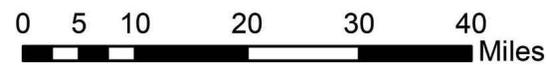
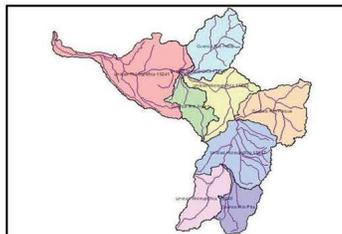
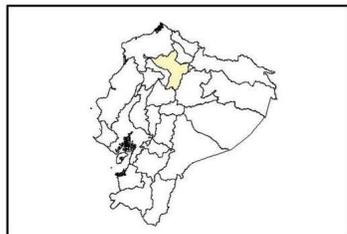
Anexo 9, ESTACIONES HIDROMETRICAS CONSIDERAS PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

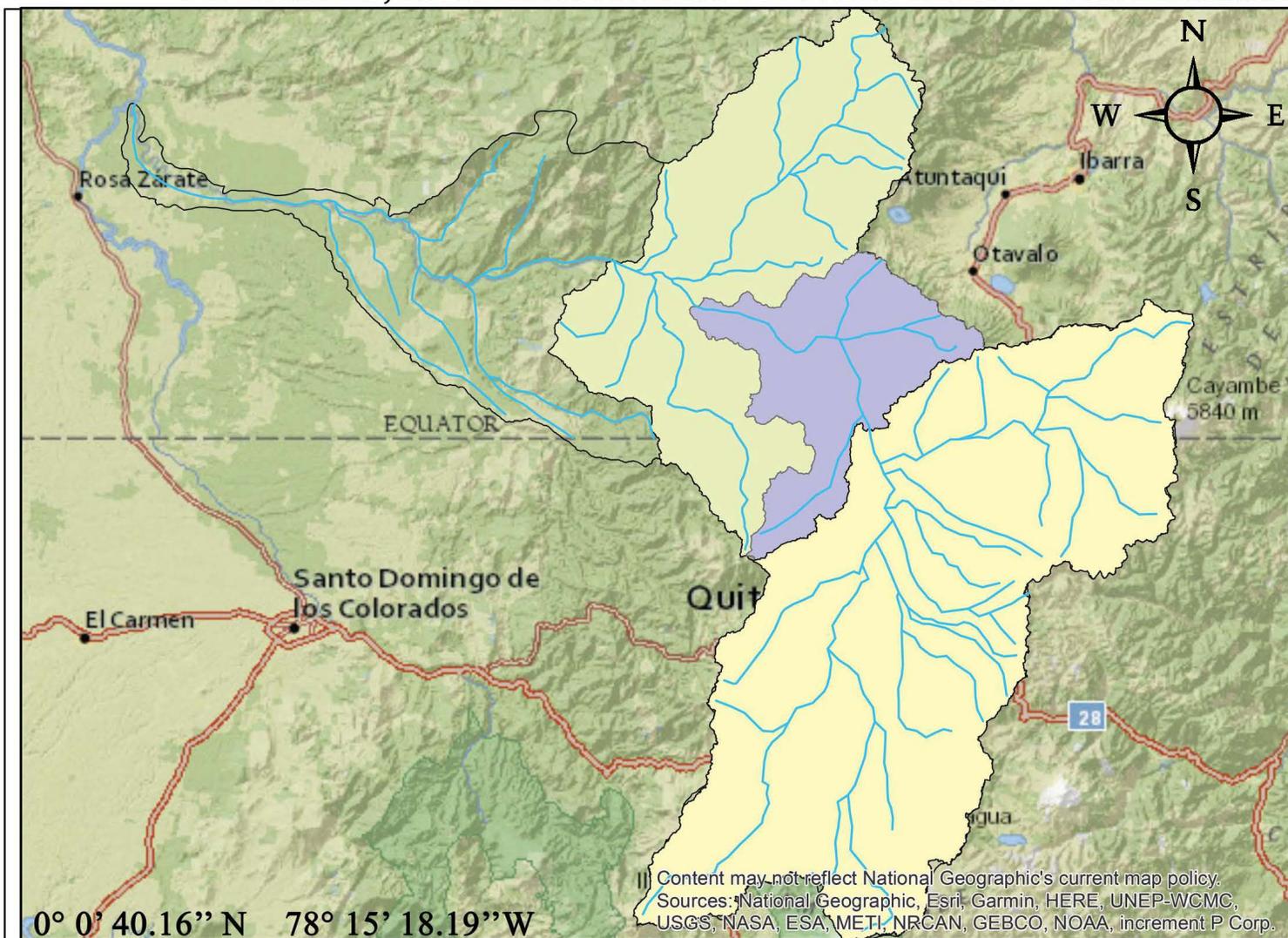
- Estación hidrográfica H0146
- Estación hidrográfica H0148
- Estación hidrográfica H0149
- Red hidrográfica de la cuenca del Río Guayllabamba
- Unidad Hidrográfica 15249
- Cuenca Río Alambi
- Cuenca Río Intag
- Cuenca Río Pisque
- Cuenca Río Pita
- Unidad Hidrográfica 15241
- Unidad Hidrográfica 15243
- Unidad Hidrográfica 15245
- Unidad Hidrográfica 15247



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS	
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas	
NOMBRE: Pamela Rodríguez	
Enero 2019	Lámina 9

Anexo 10, CUENCAS MODELADAS, DE ACUERDO A LOS PUNTOS HIDROMÉTRICOS DE INTERÉS, EN RELACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA

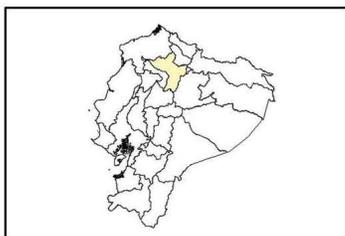
ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

-  Red hidrográfica de la cuenca del Río Guayllabamba
-  Cuenca hidrográfica H0148
-  Cuenca hidrográfica H0149
-  Cuenca hidrográfica H0146
-  Cuenca del Río Guayllabamba

Content may not reflect National Geographic's current map policy.
Sources: National Geographic, Esri, Garmin, HERE, UNEP-WCMC, USGS, NASA, ESA, METI, NRCAN, GEBCO, NOAA, increment P Corp.



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

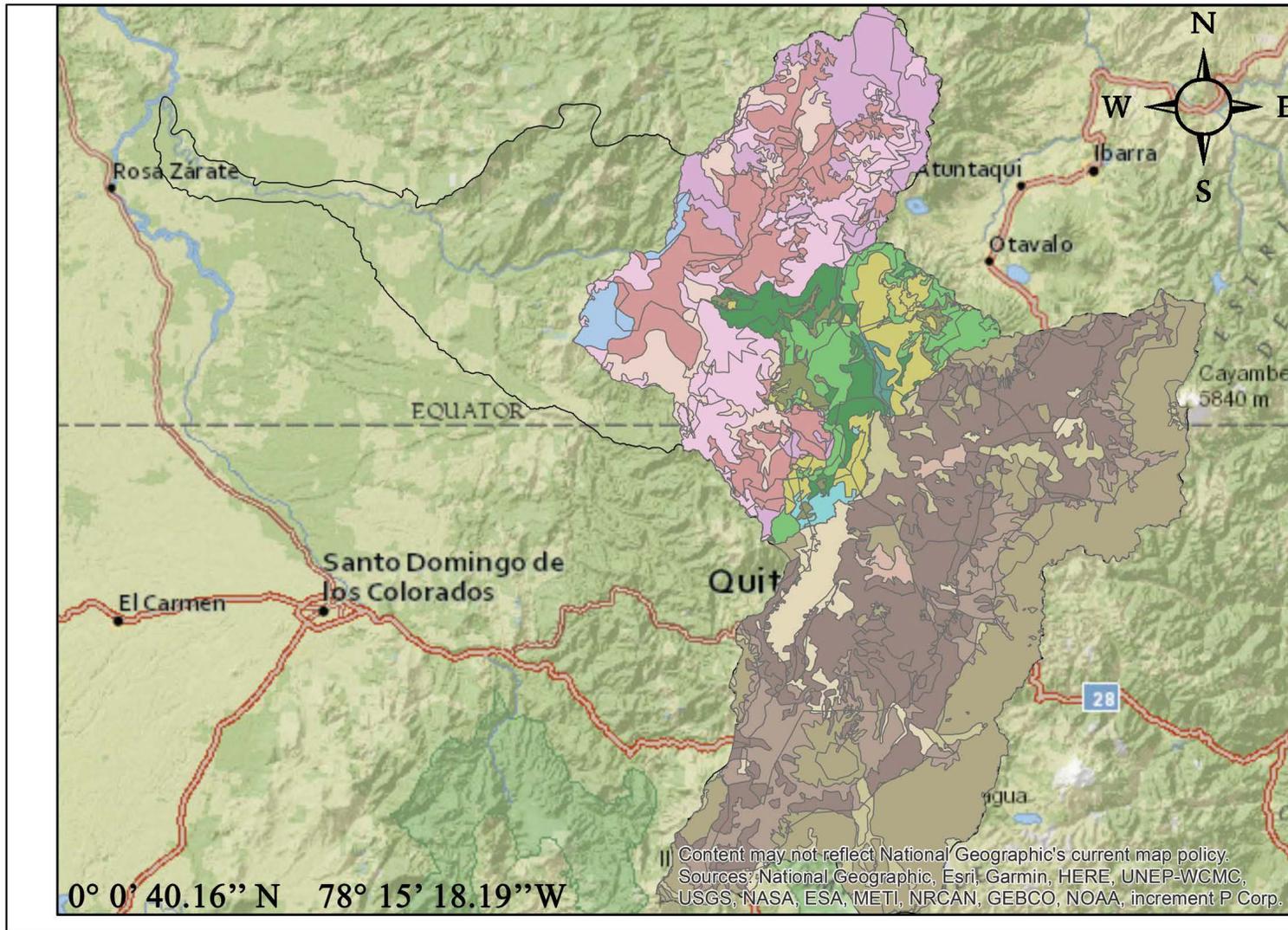
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 10

Anexo 11, USO Y COBERTURA DE SUELO DEL LAS CUENCAS MODELADAS

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

Uso de suelo en la cuenca hidrográfica H0148

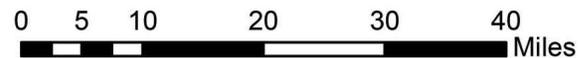
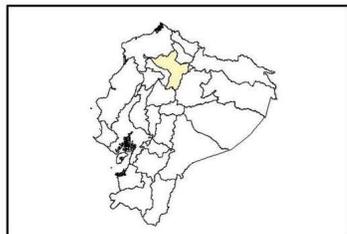
- Arboricultura
- Cultivos de ciclo corto
- Natural
- Otros
- Pastos plantados
- Área erosionada o intervenida

Uso de suelo en la cuenca hidrográfica H0149

- Arboricultura
- Cultivos de ciclo corto
- Natural
- Otros
- Pastos plantados
- Área erosionada o intervenida

Uso de suelo en la cuenca hidrográfica H0146

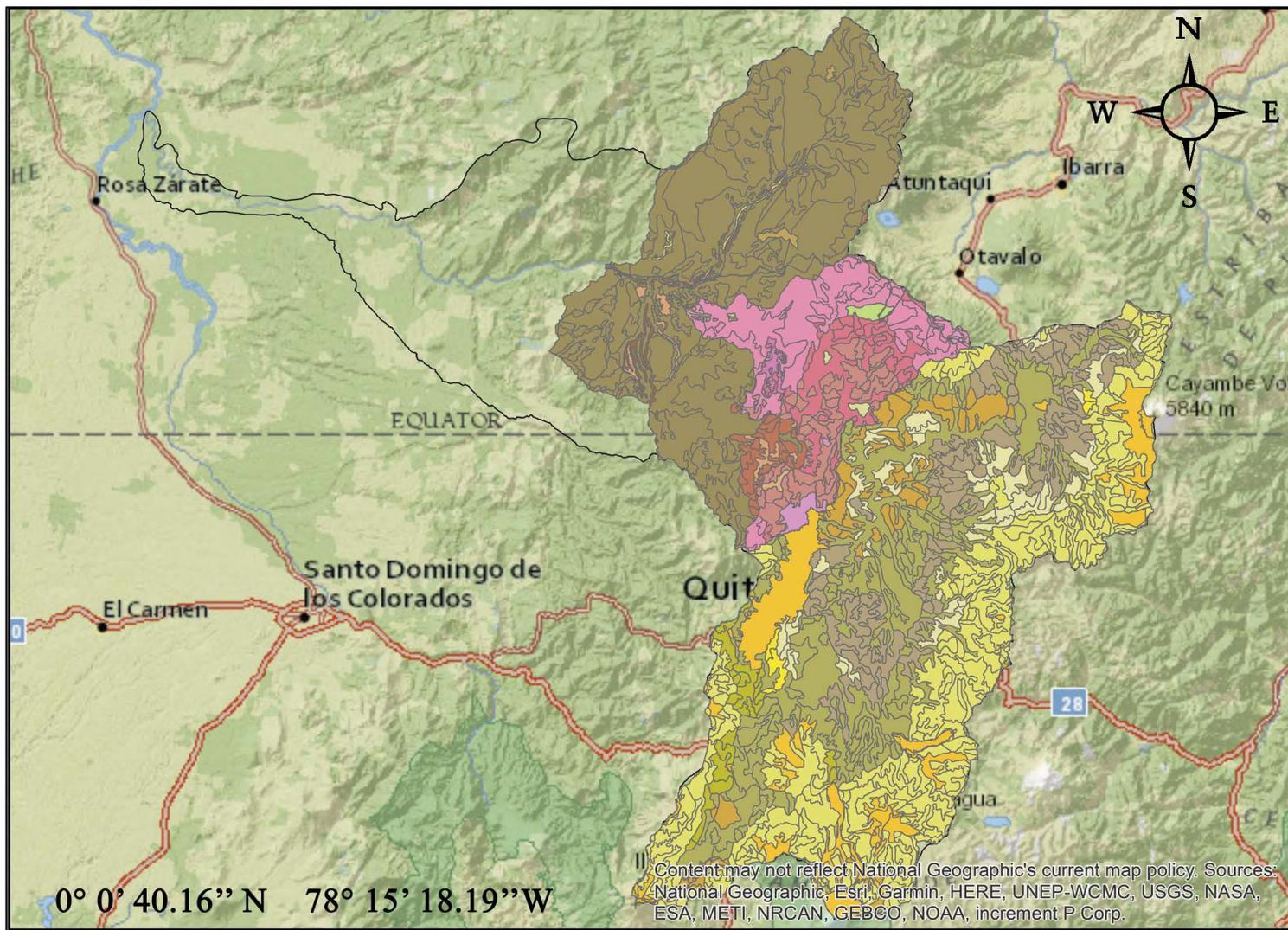
- Arboricultura
- Cultivos de ciclo corto
- Natural
- Pastos plantados
- Área erosionada o intervenida
- Cuenca del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS	
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas	
NOMBRE: Pamela Rodríguez	
Enero 2019	Lámina 11

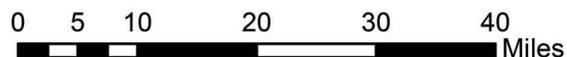
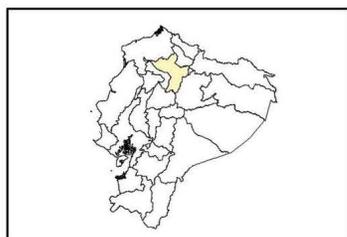
Anexo 12, TEXTURA DEL LAS CUENCAS MODELADAS

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

- Textura cuenca H0146**
- ARENOSA (FINA, MEDIA, GRUESA)
 - ARENOSO FRANCO
 - FRANCO
 - FRANCO ARENOSO (FINO A GRUESO)
 - FRANCO LIMOSO
 - NO APLICABLE
- Textura cuenca H0148**
- ARCILLO ARENOSO
 - ARCILLOSO
 - ARENOSA (FINA, MEDIA, GRUESA)
 - FRANCO
 - FRANCO ARCILLO ARENOSO
 - FRANCO ARENOSO (FINO A GRUESO)
 - FRANCO LIMOSO
 - NO APLICABLE
- Textura cuenca H0149**
- ARCILLO ARENOSO
 - ARCILLOSO
 - ARENOSA (FINA, MEDIA, GRUESA)
 - FRANCO
 - FRANCO ARCILLO ARENOSO
 - FRANCO ARENOSO (FINO A GRUESO)
 - FRANCO LIMOSO
 - NO APLICABLE
 - Cuenca del Río Guayllabamba



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

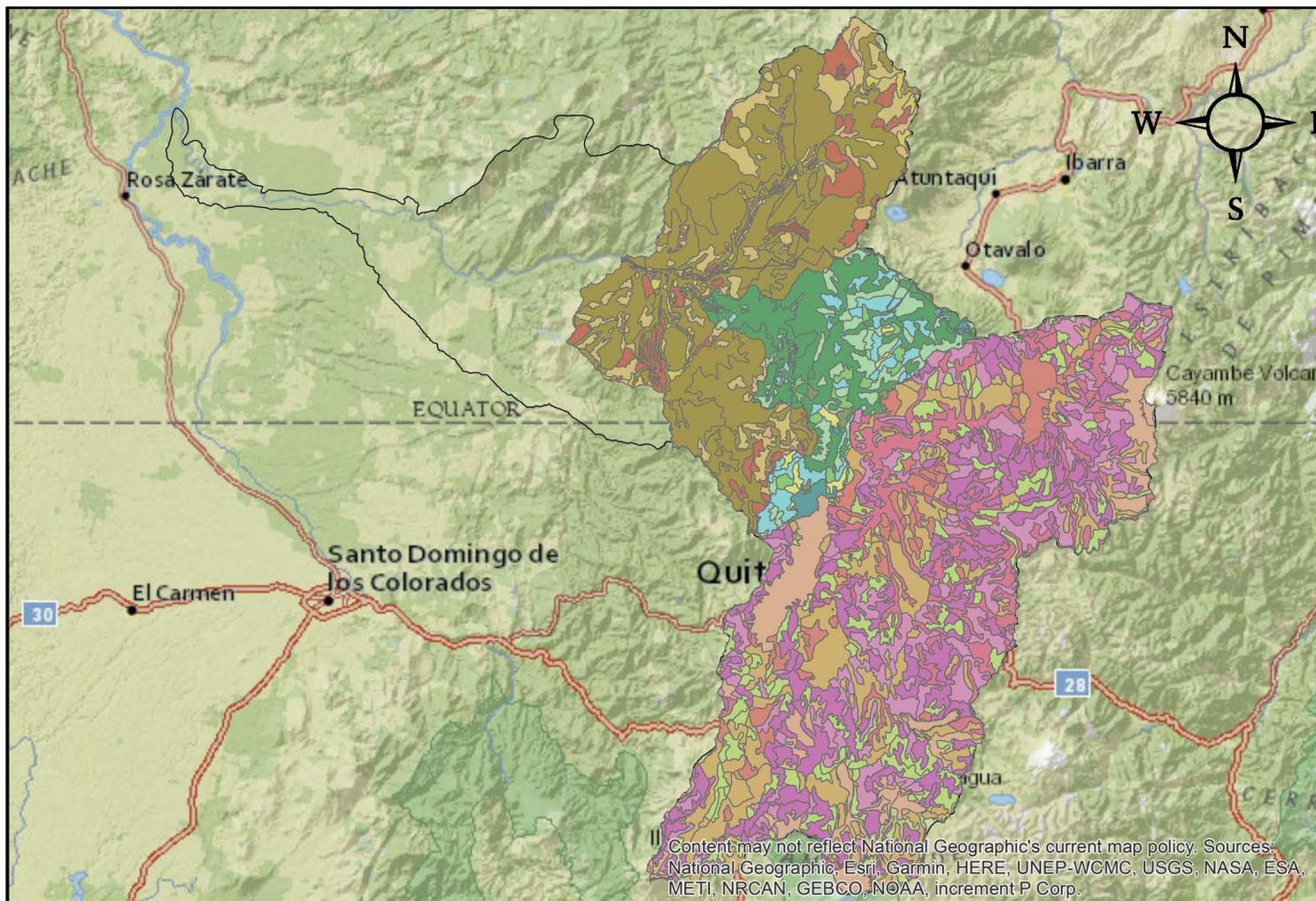
NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

Lámina 12

Anexo 13, PENDIENTE DE LAS CUENCAS MODELADAS

ECUADOR
ESC: INDICADA



LEYENDA

Pendiente cuenca H0146

- 0 - 5%
- > 12 - 25%
- > 25 - 50%
- > 5 - 12%
- > 50 - 70%
- > 70%
- NA

Pendiente cuenca H0149

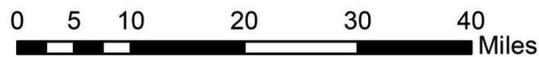
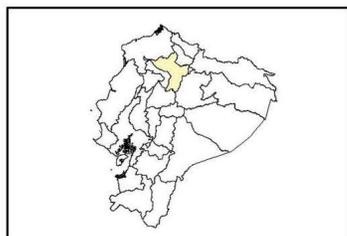
- 0 - 5%
- > 12 - 25%
- > 25 - 50%
- > 5 - 12%
- > 50 - 70%
- > 70%
- NA

Pendiente cuenca H0148

- 0 - 5%
- > 12 - 25%
- > 25 - 50%
- > 5 - 12%
- > 50 - 70%
- > 70%
- NA

□ Cuenca del Río Guayllabamba

0° 0' 40.16" N 78° 15' 18.19" W



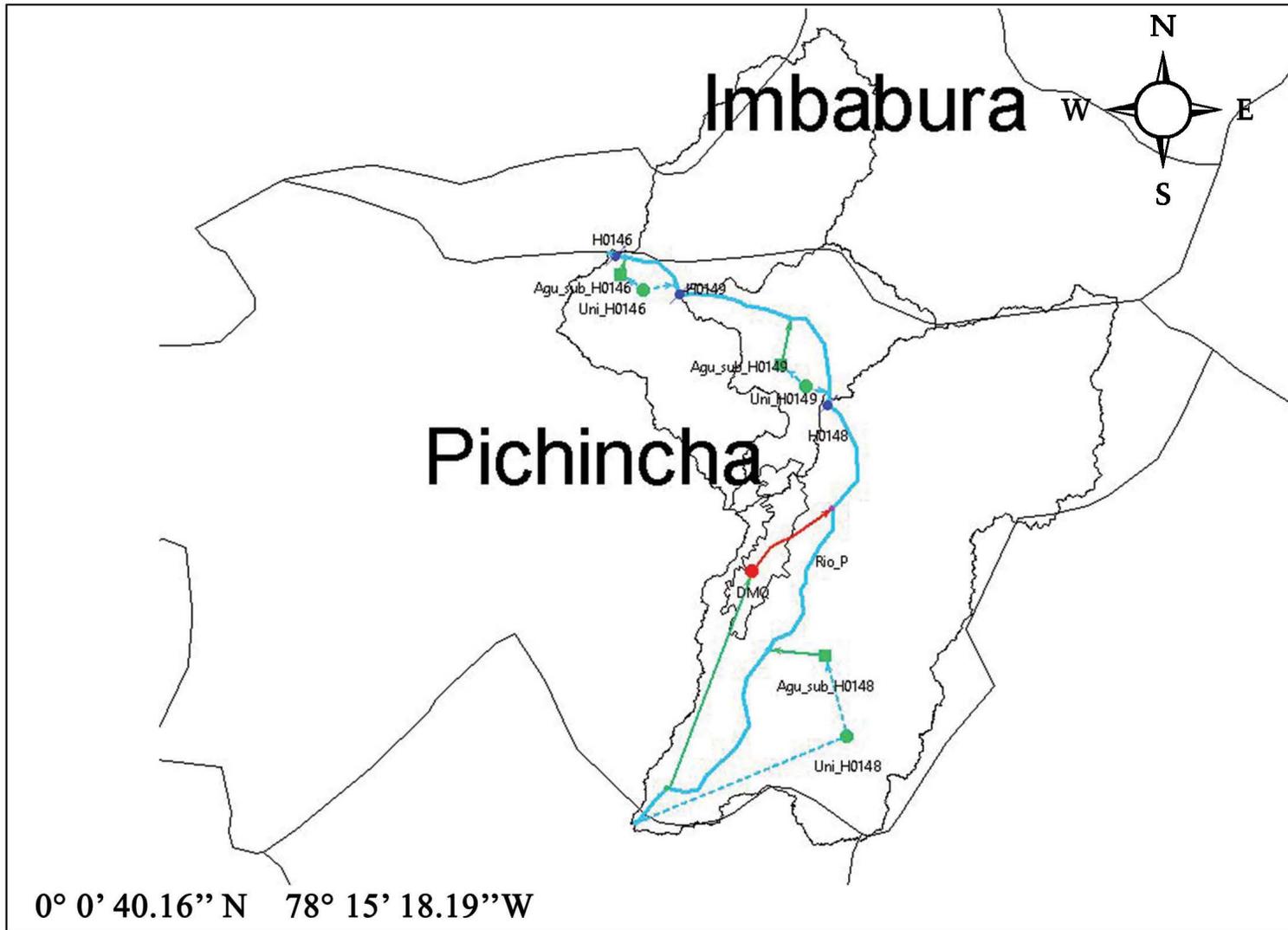
UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

NOMBRE: Pamela Rodríguez

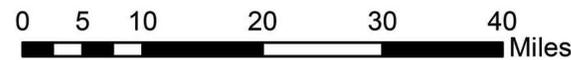
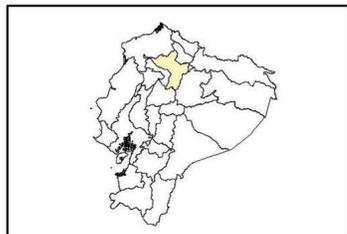
Enero 2019 Lámina 13

Content may not reflect National Geographic's current map policy. Sources: National Geographic, Esri, Garmin, HERE, UNEP-WCMC, USGS, NASA, ESA, METI, NRCAN, GEBCO, NOAA, increment P Corp.



LEYENDA

- Río
- Agua Subterránea
- ◆ Otras Fuentes
- Sitio de Demanda
- Unidad Hidrológica
- - - Escorrentía/Infiltración
- Conducción
- Flujo de Retorno



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

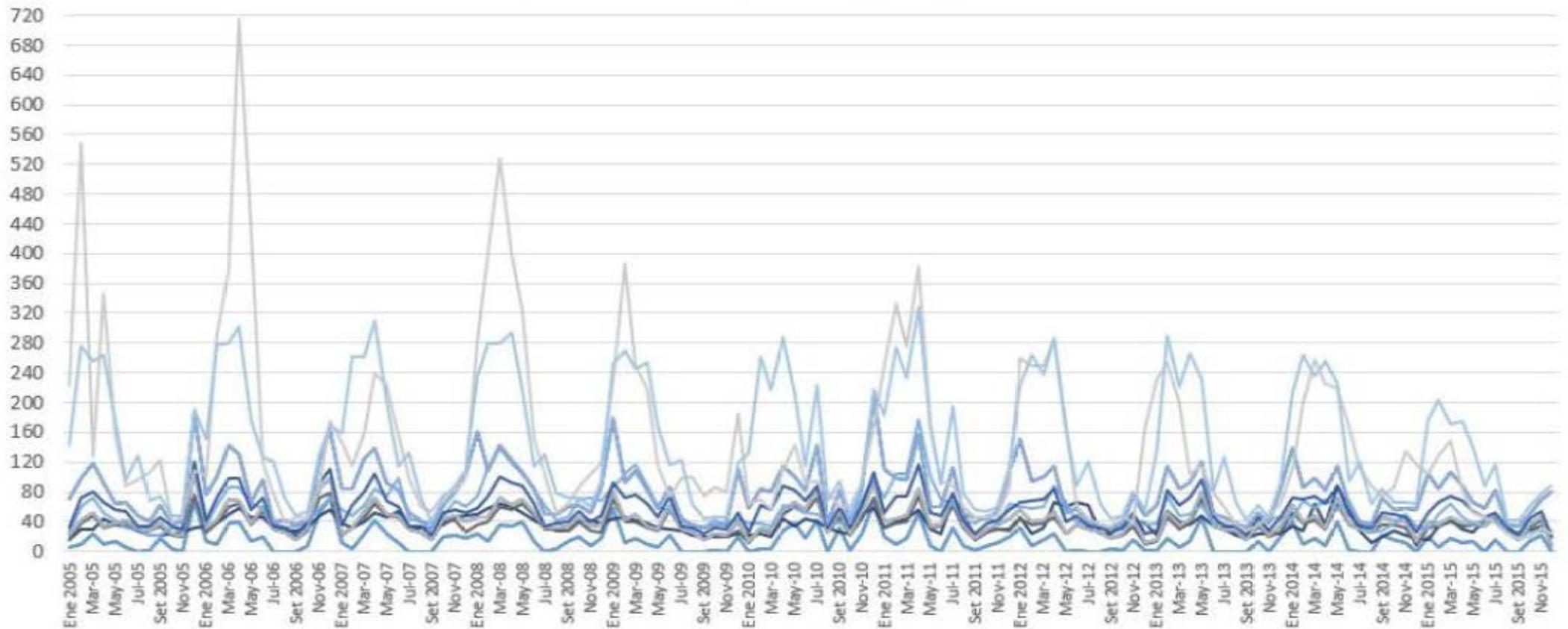
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

NOMBRE: Pamela Rodríguez

Enero 2019

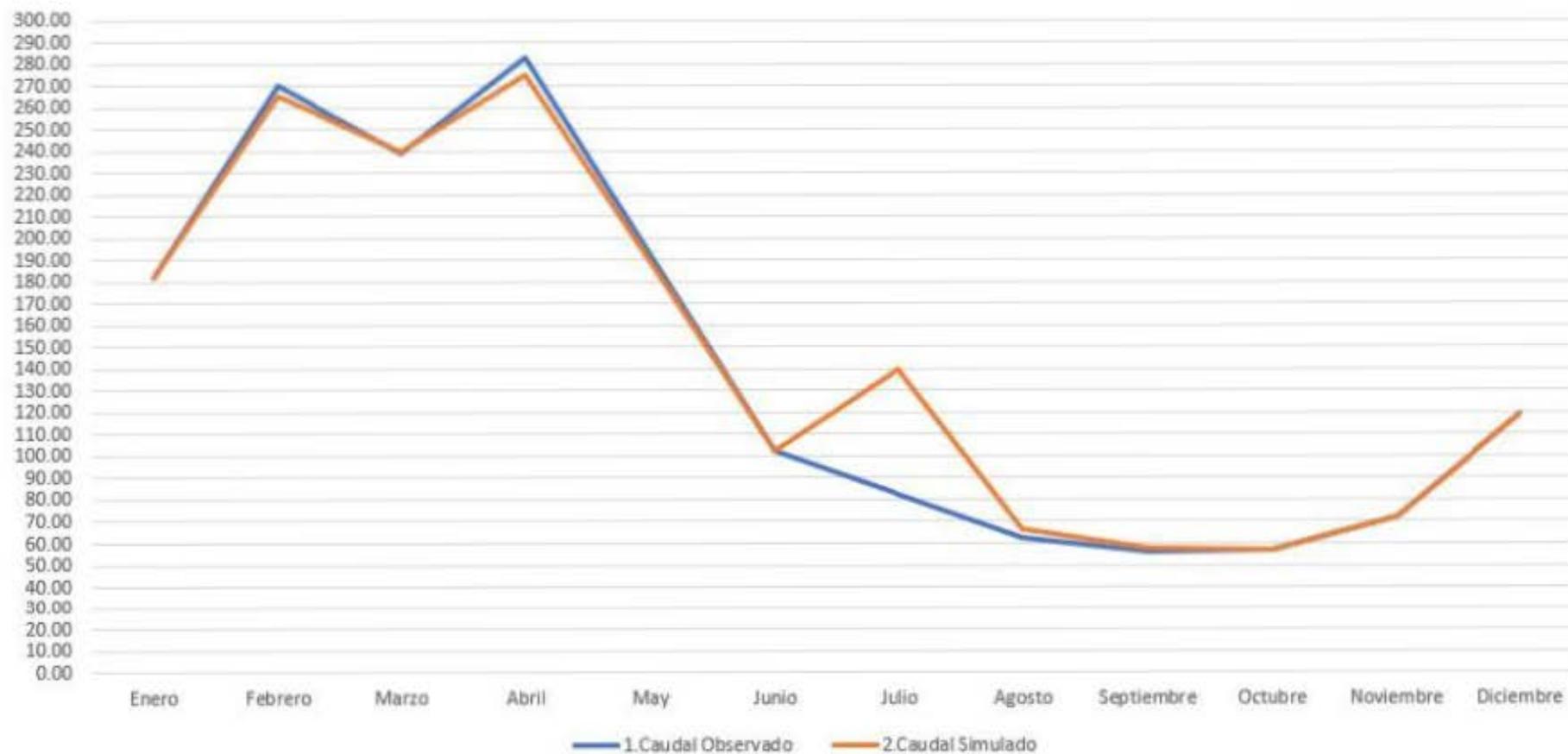
Lámina 14

Anexo 15. Caudales modelados vs caudales medidos en m3/s.

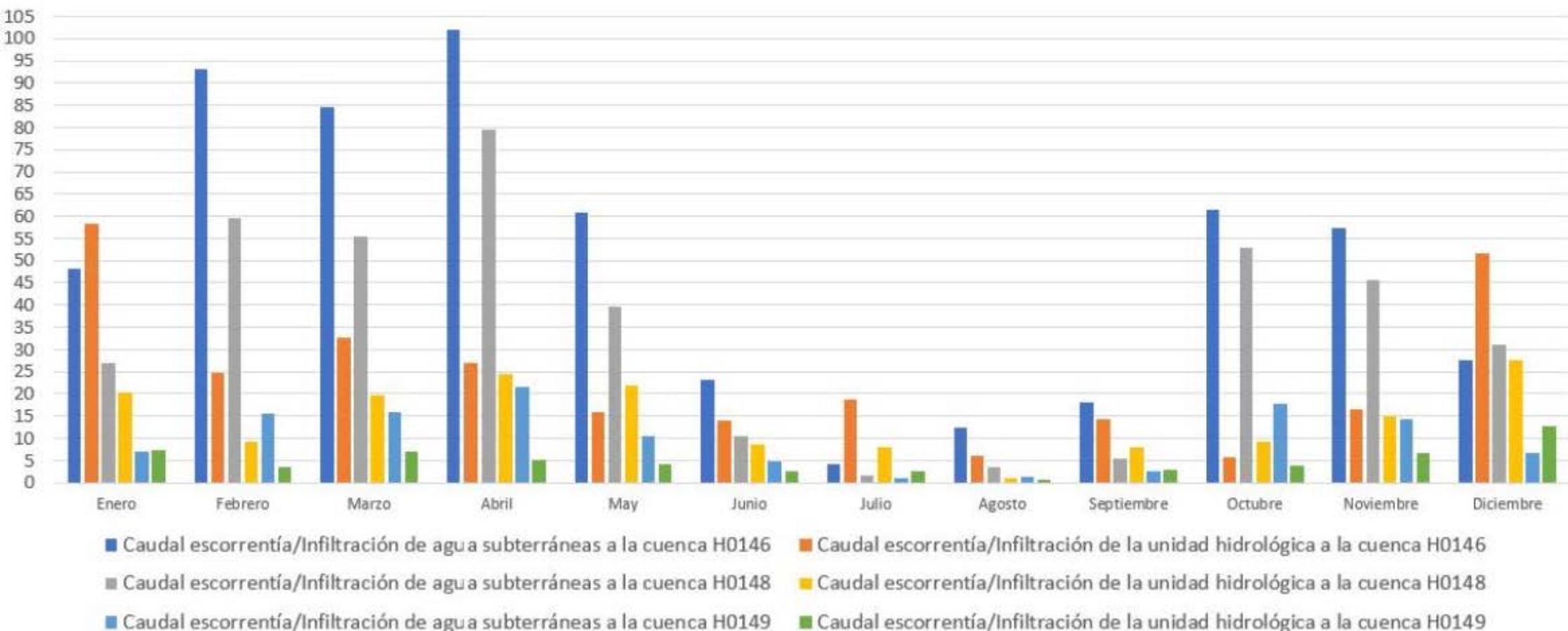


- 1. Afluente a Cuenca Alta(H0148) —2. Afluente a Cuenca Alta(H0148) —3. Afluente a Cuenca Alta(H0148)
- 4.H0148 (Caudalímetro) —5.Afluente a Cuenca Media (H0149)—6.Afluente a Cuenca Media (H0149)
- 7.Afluente a Cuenca Media (H0149)—8.Afluente a Cuenca Media (H0149)—9.H0149 (Caudalímetro)
- 10. Afluente a Cuenca Baja (H0146) —11. Afluente a Cuenca Baja (H0146) —12. Afluente a Cuenca Baja (H0146)
- 13. Afluente a Cuenca Baja (H0146) —14.Caudal Observado —15.Caudal Simulado

Anexo 16. Valores promedios mensuales modelos vs. valores promedios mensuales registrados



Anexo 17. Caudal de escorrentía-infiltración en m³/s, de la unidad hidrológica y aguas subterráneas a las cuencas; alta (H0148), media (H0149) y baja (H0146), de la cuenca de Río Guayllabamba.



Anexo 18. Tabla de radiación solar extraterrestre en mm/día

Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) (Original en MJ m⁻² día⁻¹; 1 mm/día = 2,45 MJ m⁻² día⁻¹)

HEMISFERIO NORTE

HEMISFERIO SUR

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

