



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental”

TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO CHAMBO PARA LA DETERMINACIÓN DE
LA CONDUCTANCIA ENTRE RÍO-ACUÍFERO Y ZONAS DE INUNDACIÓN.

Autores:

Hernán Vinicio Arias Zapata

Miguel Ángel Pérez Aguagallo

Tutor:

Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.

Riobamba - Ecuador

Año 2018

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título:

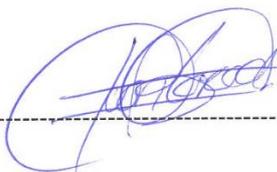
“ESTUDIO HÍDRÁULICO DEL RÍO CHAMBO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTANCIA ENTRE RÍO-ACUÍFERO Y ZONAS DE INUNDACIÓN”. Presentado por: Hernán Vinicio Arias Zapata, Miguel Ángel Pérez Aguagallo y dirigida por: PhD. Benito Mendoza Trujillo.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

Msc. Juan Carlos Caicedo

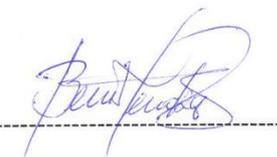
Presidente del Tribunal



Firma

PhD. Benito Mendoza

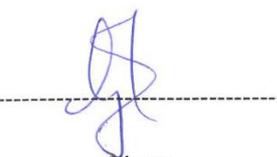
Tutor del Proyecto



Firma

Msc. Patricio Santillán

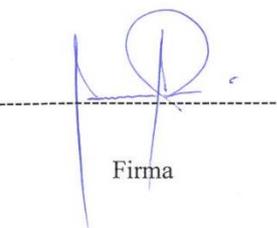
Miembro del Tribunal



Firma

PhD. Iván Ríos

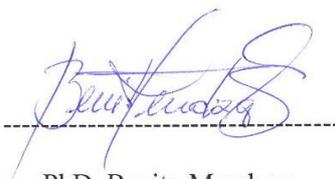
Miembro del Tribunal



Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del grado de **INGENIERO AMBIENTAL**. Con el Tema: **“ESTUDIO HÍDRÁULICO DEL RÍO CHAMBO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTANCIA ENTRE RÍO-ACUÍFERO Y ZONAS DE INUNDACIÓN”**, ha sido elaborado por HERNÁN VINICIO ARIAS ZAPATA y MIGUEL ÁNGEL PÉREZ AGUAGALLO, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que se encuentra apto para la presentación y defensa respectiva. Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



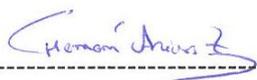
PhD. Benito Mendoza.

C.I: 060301386-3

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Nosotros, HERNÁN VINICIO ARIAS ZAPATA, con cédula de identidad N° 060334205-6 y MIGUEL ÁNGEL PÉREZ AGUAGALLO con cédula de identidad N° 060420892-6; somos responsable de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizados en la presente investigación, titulada: **“ESTUDIO HÍDRÁULICO DEL RÍO CHAMBO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTANCIA ENTRE RÍO-ACUÍFERO Y ZONAS DE INUNDACIÓN”**, dirigida por el Tutor del Proyecto, PhD Benito Mendoza.

En virtud de ello, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo, interpretación de datos y la elaboración de conclusiones, con el aporte de varios autores que se han referenciado adecuadamente en el contenido del documento.



Hernán Vinicio Arias Zapata

C.I: 060334205-6



Miguel Ángel Pérez Aguagallo

C.I: 060420892-6

AGRADECIMIENTO

Una eterna gratitud a Dios por ser nuestra guía, fuente de sabiduría y amigo fiel. A la Universidad Nacional de Chimborazo por darnos la bienvenida al mundo del conocimiento, a la Facultad de Ingeniería y a la Carrera de Ingeniería Ambiental por brindarnos una formación profesional y humanista con valores morales y éticos para afrontar los problemas de la sociedad.

Al PhD. Benito Mendoza quien con su amistad, motivación y orientación profesional ha sabido guiarme durante todo el trabajo investigativo y a todos mis maestros por sus conocimientos, dedicación y compromiso, su labor será valiosa en mi profesión.

Al presidente y miembros del tribunal: MsC. Juan Carlos Caicedo, PhD. Ivan Ríos, MsC. Patricio Santillán, quienes han sido de gran ayuda en el proyecto de investigación.

Un agradecimiento no menos importante, a catedráticos que impartieron sus enseñanzas en el transcurso de duración de la carrera de Ingeniería Ambiental. Gracias a todas las personas que estuvieron compartiendo experiencias y conocimientos en este período de investigación.

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Con gratitud desde el fondo de mi corazón a mis padres (Cecilia y Marco) por ser la luz que guía mi camino, por darme todo sin pedir nada, son el mejor regalo que Dios me ha dado. A mi sobrino (Mathías André) una de la razones para seguir adelante y una de las personitas más importantes en mi vida, a mi hermana y hermano (Esthelita y Marco) por su apoyo incondicional, por estar siempre pendientes de mí, han sido el pilar fundamental en mi formación, también es de vital importancia mencionar a mi cuñada, abuelitos, tíos, primos y amigos, gracias a ustedes mis días son alegres soy afortunado de tenerlos a mi lado.

Hernán Vinicio Arias Zapata

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de formación profesional. A mis padres José y Ana por haberme brindado su apoyo en todo momento, que a pesar de los duros momentos nunca me abandonaron cuando yo más los necesitaba. A mi novia Verónica por el apoyo incondicional y la confianza que siempre me ha brindado, por estar conmigo todo el tiempo y sé que este momento es tan especial para ella como lo es para mí. A mi familia en general porque me han brindado su apoyo incondicional y compartir conmigo buenos y malos momentos. A mis profesores gracias por su tiempo y apoyo así como la sabiduría que me transmitieron a lo largo de mi formación profesional.

Miguel Ángel Pérez Aguagallo

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

MDT: Modelos Digitales del Terreno.

HEC-RAS: Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Análisis del Río.

HEC-GeoRAS: Centro de Ingeniería Hidrológica- Sistema de Análisis Geoespacial del Río.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

GPS: Sistemas de Posicionamiento Global.

IDW: Distancia Inversa Ponderada.

3D: Tres Dimensiones.

C: Conductancia hidráulica.

K: Conductividad hidráulica.

Q: Caudal.

ÍNDICE GENERAL

| CONTENIDO | PÁGINA |
|--|---------------|
| DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA..... | ii |
| AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| DEDICATORIA..... | vi |
| SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS..... | vii |
| RESUMEN | 1 |
| SUMMARY | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.1. PROBLEMA..... | 4 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 5 |
| 2. OBJETIVOS..... | 6 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 6 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 6 |
| 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 7 |
| 3.1. Ciclo Hidrológico | 7 |
| 3.2. Balance Hídrico | 8 |
| 3.3. Análisis Hidrológico | 8 |
| 3.4. Cuenca Hidrográfica | 8 |
| 3.5. Agua Subterránea..... | 11 |
| 3.6. Inundaciones | 13 |
| 3.7. Batimetría..... | 14 |
| 3.8. Modelos Digitales del Terreno (MDT)..... | 14 |
| 3.9. Modelación matemática..... | 14 |
| 3.10. HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System)..... | 14 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4. | METODOLOGÍA..... | 15 |
| 4.1. | Tipo de Investigación..... | 15 |
| 4.2. | Metodológica de la investigación. | 16 |
| 4.2.1. | Identificación del área de estudio | 16 |
| 4.2.2. | Determinación de parámetros geomorfológicos..... | 18 |
| 4.2.3. | Determinación del Balance Hídrico | 18 |
| 4.2.4. | Determinación de la conductancia hidráulica..... | 20 |
| 4.2.5. | Establecimiento de batimetría y de zonas de inundación | 21 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 23 |
| 5.1. | Geomorfología de la microcuenca del río Chibunga. | 23 |
| 5.2. | Balance hídrico de la subcuenca del río Chambo. | 25 |
| 5.3. | Conductancia hidráulica entre el río Chambo con el acuífero del Chambo. ... | 30 |
| 5.4. | Zonas de inundación en la subcuenca del río Chambo. | 33 |
| 6. | CONCLUSIONES..... | 35 |
| 7. | RECOMENDACIONES | 36 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 37 |
| 9. | ANEXOS..... | 38 |
| 9.1. | Anexo 1. Geomorfología. | 38 |
| 9.2. | Anexo 2. Balance hídrico..... | 39 |
| 9.3. | Anexo 3. Conductancia hidráulica..... | 63 |
| 9.4. | Anexo 4. Zonas de inundación. | 66 |
| 9.5. | Anexo 5. Fotográfico | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1. | Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Chambo..... | 24 |
| Tabla 2. | Áreas afectadas por inundación en la subcuenca del río Chambo..... | 35 |
| Tabla 3. | Estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca del río Chambo..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Tabla 4. Temperatura media mensual (°C)..... | 40 |
| Tabla 5. Precipitación media mensual (mm). | 41 |
| Tabla 6. Evapotranspiración media mensual (mm/mes)..... | 42 |
| Tabla 7. Puntos de muestreo de la conductancia hidráulica en la subcuenca..... | 64 |
| Tabla 8. Datos de Infiltración | 66 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación del ciclo hidrológico..... | 7 |
| Figura 2 . Tipos de acuíferos | 12 |
| Figura 3. Fases metodológicas. | 16 |
| Figura 4. Ubicación geográfica de la subcuenca del Chambo..... | 17 |
| Figura 5. Límites geológicos del acuífero del Chambo..... | 18 |
| Figura 6. Curva Hipsométrica | 25 |
| Figura 7. Variación de Temperatura en la subcuenca del río Chambo. | 26 |
| Figura 8. Representación del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al primer periodo (1990-1998)..... | 27 |
| Figura 9. Representación del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al segundo periodo (1999-2006). | 28 |
| Figura 10. Representación del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al tercer periodo (2007-2014). | 30 |
| Figura 11. Comportamiento Velocidad de infiltración en el río Chambo..... | 32 |
| Figura 12. Representación Conductancia hidráulica del río Chambo. | 33 |
| Figura 13. Simulación de las zonas de inundación en la subcuenca del río Chambo ... | 34 |
| Figura 14. Pendientes de la subcuenca del río Chambo..... | 39 |
| Figura 15. Red de drenaje de la subcuenca del río Chambo | 40 |
| Figura 16. Mapas del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al primer periodo (1990-1998). | 49 |
| Figura 17. Mapas del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al segundo periodo (1999-2006)..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Mapas del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al tercer periodo (2007-2014). | 63 |
| Figura 19. Ubicación de los puntos de muestreo de la conductancia hidráulica en la subcuenca..... | 64 |
| Figura 20. Usos del suelo de la subcuenca del río Chambo | 65 |
| Figura 21. Geología de la subcuenca del río Chambo..... | 65 |
| Figura 22. Curvas de infiltración según la textura del suelo | 66 |
| Figura 23. Textura del suelo de la subcuenca del río Chambo..... | 66 |
| Figura 24. Simulación de las zonas de inundación en el sector 1 de la subcuenca. | 67 |
| Figura 25. Simulación de las zonas de inundación en el sector 2 de la subcuenca.. | 67 |
| Figura 26. Simulación de las zonas de inundación en el sector 3 de la subcuenca..... | 68 |

RESUMEN

La subcuenca del río Chambo forma parte de la cuenca alta del río Pastaza, está situada en el centro del Ecuador en la vertiente Atlántica de la cordillera de los Andes. El río principal toma el nombre de Chambo, mismo que se forma de la unión de los ríos Cebadas y Guamote, siguiendo su curso hacia el norte donde finalmente se une con el Patate para formar el río Pastaza.

La presente tesis tiene como objetivo el estudio hidráulico del río Chambo, determinando la conductancia hidráulica y las zonas de inundación que va existir a lo largo del río, para la conductancia hidráulica, es decir la eficacia con que los fluidos se van a transportar a través del suelo tanto del río al acuífero de Chambo y viceversa, se obtuvo que en la parte alta sector del puente vía a Chambo con un valor de $0.4249 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de interacción entre río-acuífero de $0.1955 \text{ m}^3/\text{h}$, existe aporte del río hacia el acuífero, en la parte media sector del puente vía a Quimiag con un valor de $0.1826 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de interacción entre río-acuífero de $0.0292 \text{ m}^3/\text{h}$, existe aporte del río hacia el acuífero y en la parte baja sector del puente vía a Penipe con un valor de $0.4999 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de interacción entre río-acuífero de $0.2300 \text{ m}^3/\text{h}$, de igual forma existe aporte del río hacia el acuífero.

Con respecto a las zonas de inundación se utilizó el modelo matemático HEC-RAS que conjuntamente con el Sistema de Información Geográfica y la incorporación de la extensión Hec-GeoRAS, nos permitieron obtener resultados de las zonas de inundación a lo largo del río y de acuerdo a las áreas afectadas por inundación en la subcuenca del río Chambo con mayor porcentaje del 28% del total de áreas afectadas por inundación son los pastos plantados localizados en su mayoría en la parte media correspondiente al sector del puente vía a Quimiag y en la parte baja en la desembocadura.

Palabras clave: conductancia hidráulica, modelación matemática integral, inundaciones.

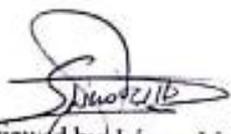
ABSTRACT

The sub-basin of the Chambo River forms part of the upper basin of the Pastaza River, it is located in the center of Ecuador on the Atlantic slope of the Andes mountain range. The main river takes the name of Chambo, its forms the unification of the Cebadas and Guamote rivers, following its course towards the north where finally it is unified with the Patate to form the Pastaza River.

The objective of this investigation work is the hydraulic study of the Chambo river, determining the hydraulic conductance and the flood zones that will exist along the river, for the hydraulic conductance, that is, the efficiency with which the fluids will be transported through from the soil of the river to the Chambo aquifer and vice versa, it was obtained that in the high sector of the bridge through Chambo with a value of $0.4249 \text{ m}^2 / \text{h}$ and an interaction flow between river-aquifer of $0.1955 \text{ m}^3 / \text{h}$, there is a contribution from the river towards the aquifer, in the middle section of the bridge way to Quimiag with a value of $0.1826 \text{ m}^2 / \text{h}$ and a flow of interaction between river-aquifer of $0.0292 \text{ m}^3 / \text{h}$, there is contribution from the river to the aquifer and in the lower sector of the bridge way to Penipe with a value of $0.4999 \text{ m}^2 / \text{h}$ and an interaction flow between river-aquifer of $0.2300 \text{ m}^3 / \text{h}$, in the same way there is a contribution from the river to the aquifer.

Regarding the flood zones, the HEC-RAS mathematical model was used, which, together with the Geographic Information System and the incorporation of the Hec-GeoRAS extension, allowed us to obtain results from the flood zones along the river and in accordance To the areas affected by flooding in the sub-basin of the Chambo River with a greater percentage of 28% of the total area affected by flooding are Planted Pastures located mostly in the middle part corresponding to the sector of the bridge way to Quimiag and in the lower part at the mouth.

Keywords: hydraulic conductance, integral mathematical modeling, floods.


Reviewed by López, Ligia,
LANGUAGE CENTER TEACHER



1. INTRODUCCIÓN

El río Chambo se encuentra en la provincia de Chimborazo, en el callejón interandino en la zona central de Ecuador. La parte baja del río se alimenta de la fusión del glaciar del volcán Chimborazo (Mendoza, 2016). Tiene una longitud de 273 Km y cuenta con 30 afluentes en total. Es considerado desde los nacimientos del Yasipán que, al unirse con el Ozogoche, forman el río Cebadas, el mismo que aguas abajo confluye con el Guamote tomando el nombre de Chambo. (Bautista, 2012)

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, sus procesos ocurren en forma continua: el agua se evapora desde los océanos y de la superficie terrestre hacia la atmósfera; la misma se transporta y se eleva hasta que condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, infiltrarse en él, escurrir por el suelo como flujo subsuperficial y descargar en ríos como escorrentía superficial; el agua infiltrada puede percolar para recargar el agua subterránea, finalmente fluye al mar y se da la continuación del ciclo (Poblete, 2008).

La aportación de agua subterránea que puede realizar un acuífero a un río, o, al contrario, la recarga que un acuífero puede recibir de un curso de agua superficial, para lo cual es fundamental conocer el tipo de conexión hidráulica que hay entre ambos. El tipo de conexión hidráulica vendrá dado principalmente por dos factores: la situación de las formaciones geológicas permeables en relación con el cauce del río y la situación relativa de los niveles del río y de los niveles piezométricos del acuífero (Samper, 2013).

El entendimiento de las inundaciones es compleja ya que implica la intervención de múltiples factores, entre los que destacan los relacionados con la fisiografía y morfología de la cuenca de drenaje, así como la respuesta hídrica a las características climáticas de la región (Garrido, 2013). Las inundaciones son uno de los desastres naturales más comunes del planeta y casi todos los países, regiones o zonas han experimentado en alguna ocasión una inundación (Robayo, 2014).

La presente tesis aborda el estudio hidráulico para la determinación de la conductancia entre río y acuífero, y además la modelación matemática para determinar las zonas de inundación. Los resultados del presente estudio otorgan datos esenciales en la modelación matemática del acuífero de la subcuenca del río Chambo y además la generación de un mapa de amenaza por inundación, para la localización de las zonas de que pueden verse afectadas por las

inundaciones, identificando claramente las amenazas y será una herramienta para la gestión adecuada de los recursos hídricos en la zona de influencia del acuífero.

1.1. PROBLEMA

Las aguas subterráneas son un recurso sustantivamente más abundante que las aguas superficiales, pero en general se las conoce menos y se las gestiona sin el adecuado conocimiento científico y técnico, degradándose o no utilizándose en definitiva el recurso.

En el Ecuador existen zonas en las que el agua subterránea es el único recurso accesible para abastecer poblaciones o para la irrigación de cultivos; constituye un recurso esencial para la seguridad alimentaria, a la vez que es vital para el funcionamiento de los ecosistemas. No obstante, los bienes y servicios que los acuíferos prestan en el desarrollo socio económico no se destacaron hasta el presente, salvo casos muy especiales en que se constituyen en el único recurso de agua accesible (INAMHI, 2014)

La problemática de las inundaciones se presenta en toda la geografía mundial y no solo en regiones de climas muy húmedos, sino también en regiones subhúmedas, semidesérticas y aún desérticas (Ubaldo, 2015). Las consecuencias de las inundaciones tienen relación directa con las acciones humanas ejercidas sobre el medio que habitan, ya sea por sus actividades productivas, por la urbanización o la industrialización, y la cercanía de las poblaciones a los ríos y zonas propensas a inundarse (Vergara, 2011).

El Ecuador presenta una gran variedad climática, debido a su posición geográfica y a la diversidad de alturas impuesta por la cordillera de los Andes. En el país, los eventos hidrometeorológicos han ocasionado una variedad de impactos, siendo las inundaciones las más frecuentes y las que han provocado mayor afectación. Muchas de las ciudades se asientan, precisamente, en las áreas próximas a las riveras de los ríos que conforman el sistema hidrográfico del Ecuador (GEOECUADOR, 2008).

La subcuenca del río Chambo tiene como río principal al Chambo, el cual influencia hidráulicamente el acuífero presente en esta zona, ya que presenta conexiones permeable entre río-acuífero; en esta subcuenca no se han realizado estudios hidrológicos e hidrogeológicos, que permitan conocer la interrelación que existe entre el agua subterránea y superficial, limitando el conocimiento de sus características físicas y geológicas, además no se han realizado estudios de riesgos de inundación a lo largo del cauce y sus posibles efectos sobre el

área de influencia del río (Mendoza, 2015), perjudicando de esta forma la toma de decisiones por parte de los gestores del agua para su gestión integral.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La interacción entre aguas superficiales y subterráneas presenta dinámicas complejas, en general la explotación irresponsable de un acuífero puede provocar el agotamiento de los caudales en los ríos por el bombeo inducido. En otros casos, cuando la recarga natural de los acuíferos se realiza con agua procedente de las corrientes superficiales y se hace un incremento en la captación y uso del recurso superficial, disminuye el agua disponible para la recarga y se presentan limitaciones para la cantidad de agua que se puede obtener del almacenamiento en el acuífero.

El manejo eficiente y racional del agua en una cuenca hidrográfica requiere en algunos casos de la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos, lo cual es un elemento clave en la gestión integral del agua. La gestión del recurso hídrico ha considerado las aguas superficiales y subterráneas como recursos distintos e independientes, omitiendo la conectividad física presente entre ambos sistemas (Estrada, 2009).

El estudio de inundabilidad muestra cómo caracterizar el fenómeno de inundaciones en espacios urbanos, marca pautas básicas desde la hidrología y la visión de gestión de riesgos para que pueda ser punto de partida de otras investigaciones y dé otra perspectiva a la gestión territorial, gracias al mapeo del entorno natural a través de la identificación de las amenazas por fenómenos naturales, a fin de reducir exposición al riesgo y por lo tanto minimizar desastres (Fernández C. , 2010). Es aquí donde cobra importancia la simulación hidráulica mediante el uso de un software especializado y los Sistemas de Información Geográfica, brindando una visión integrada y detallada de la región en estudio (Garrido, 2013).

Por esta razón este estudio hidráulico del río Chambo pretende conocer los intercambios de flujo entre río-acuífero mediante la característica hidrogeología que es la conductancia hidráulica, para así conocer las zonas de recarga real de los acuíferos, los sitios de preservación de recarga en los mismos ríos e identificar áreas de inundación que afectan a la subcuenca del río Chambo.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

- ✓ Realizar el estudio hidráulico del río Chambo para la determinación de la conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar parámetros geomorfológicos del río Chambo.
- ✓ Realizar el balance hídrico de la zona de estudio.
- ✓ Determinar la conductancia hidráulica del río-acuífero.
- ✓ Reconstruir el lecho del río en tres dimensiones usando batimetría.
- ✓ Establecer las zonas de inundación.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1.Ciclo Hidrológico

Es un modelo de circulación general que implica un despliegue complejo de los movimientos y transformaciones del agua. Su constante dinamismo define diferentes etapas o fases que por su manera de enlazarse, generan un verdadero ciclo como se muestra en la **Figura 1**. El ciclo del agua es el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua para las plantas, los animales y el hombre. Su fundamento es que toda gota de agua, en cualquier momento en que se considere, recorre un circuito cerrado (Arrueta, 2009).

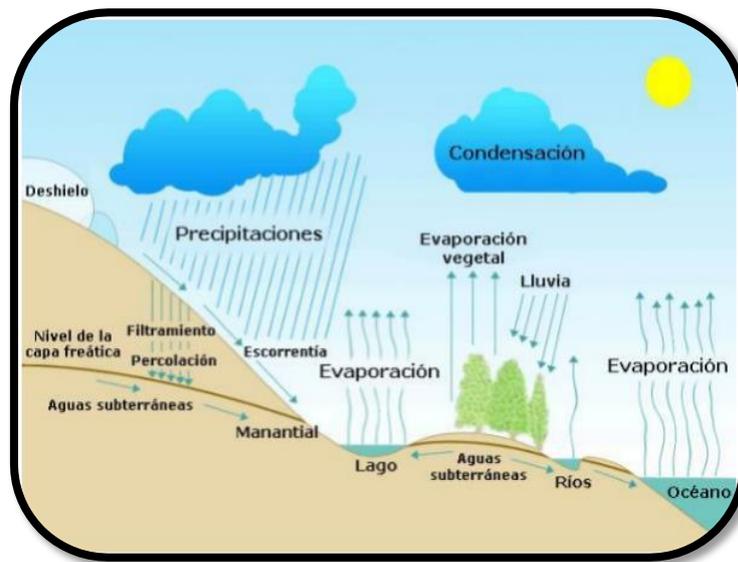


Figura 1. Representación del ciclo hidrológico.

Fuente: (Bárceñas, 2017).

Dentro de los principales componentes del ciclo tenemos: precipitación, evaporación, escorrentía, entre otras que se detalla a continuación, (Quishpe, 2017).

- **Precipitación.**- Es la forma de humedad mediante la cual el agua es depositada en la superficie terrestre, como: lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada. Los elementos más importantes para la formación de precipitación son: humedad atmosférica, radiación solar, enfriamiento del aire, condensación y crecimiento de las gotas.
- **Infiltración.**- Es el proceso por el cual el agua ingresa desde la superficie del terreno hacia el suelo. Existen varios factores que influyen en la capacidad de infiltración como: humedad, permeabilidad y cobertura vegetal del suelo, temperatura del suelo y condiciones de contorno.
- **Escorrentía.**- Consiste en la ocurrencia y transporte de agua en la superficie terrestre; tiene la influencia de factores como: climáticos y fisiográficos. Los factores climáticos

están los relacionados con la precipitación, tales como: intensidad, duración, precipitación antecedente y los fisiográficos con el área de la cuenca y la permeabilidad.

- **Evapotranspiración.**- Es la unión de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración efectuada por la vegetación; se considera evaporación al proceso por el cual el agua se transforma en vapor y transpiración a la pérdida de agua hacia la atmósfera ocasionada por las acciones físicas y fisiológicas de las plantas.

3.2. Balance Hídrico

Es una de las interacciones físicas que sucede en una cuenca hidrográfica, se lo entiende como el equilibrio entre el ingreso de agua ya sea por precipitación, deshielo, aporte de aguas subterráneas y/o trasvase desde otras cuencas hidrográficas colindantes; y la salida de agua por evapotranspiración, recarga de acuíferos (infiltración) y escorrentía superficial en un determinado tiempo (Quishpe, 2017).

La ecuación general de balance hídrico es:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Variación del almacenamiento}$$

3.3. Análisis Hidrológico

El análisis hidrológico consiste en la estimación de variables del balance hídrico como: precipitación, escorrentía, evapotranspiración, infiltración, reserva hídrica; estas variables sirven para la modelación matemática de crecientes avenidas, aportando con datos para dimensionar y diseñar obras hidráulicas, demarcar planicies de inundación, identificar áreas de riesgo, zonas de factibilidad para el desarrollo de ciudades y proyecto de desarrollo. Para el desarrollo del análisis hidrológico se necesita eventos registrados recabado a lo largo de los años es decir series históricas, (Campos, 2010).

3.4. Cuenca Hidrográfica

Es un área natural que se compone de agentes biofísicos, biológicos y antropocéntricos. En la cual existe agua proveniente de precipitaciones, y la acumulación de este recurso forma un cauce principal que desagua en los océanos, mares y lagos (Carchi, 2015).

Geomorfología de la Cuenca

Las características morfométricas y fisiográficas de una cuenca, son elementos que tienen gran importancia en el comportamiento hidrológico de esta unidad de territorio, pues éstas características tienen un impacto directo en el drenaje, ya que condicionan tanto el volumen de escurrimiento como la velocidad de repuesta (Juela, 2011).

Los parámetros más importantes y de mayor influencia sobre una cuenca son su forma, relieve, características de su red de drenaje y las del cauce principal las cuales se describen a continuación: (Centeno, 2015):

Características Físicas de las Cuencas

Área de la cuenca (A): Superficie en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas, se reporta en Km^2 , excepto las cuencas pequeñas que se expresan en ha.

Perímetro de la cuenca (P): Borde del contorno de la cuenca proyectada en un plano horizontal obtenida una vez delimitada la cuenca.

Índice de compacidad (Ic): Es el cociente entre el perímetro y área de la cuenca. $Ic = 1$ la cuenca es de forma circular; $Ic \approx 1$ cuenca regular; $Ic \neq 1$ cuenca irregular.

$$Ic = 0,282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (1)$$

Dónde: Ic: es el índice de compacidad, **P:** es el perímetro de la cuenca (Km), **A:** es el área de la cuenca (Km^2).

Factor de Forma (Ff): Fue definido por Horton, como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud del cauce principal.

$$Ff = \frac{A}{Lc^2} \quad (2)$$

Dónde: Ff: es el factor de forma, **A:** es el área de la cuenca (Km^2), **Lc:** es la longitud de la cuenca (Km).

Relación de Elongación (Re): Definido por Schumm, es la relación al diámetro en función del área de la cuenca (A).

$$Re = 1,1284 * \frac{\sqrt{A}}{Lc} \quad (3)$$

Dónde: Re: es la relación de elongación, **A:** es el área de la cuenca (Km²), **Lc:** es la longitud de la cuenca (Km).

Relación de circularidad (Rci): Es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca. La cuenca es circular si Rci=0.785.

$$Rci = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

Dónde: Rci: es la relación de circularidad, **A:** es el área de la cuenca (Km²), **P:** es el perímetro de la cuenca (Km).

Parámetros de Relieve

Pendiente de la cuenca: Tiene relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces.

Curva Hipsométrica: Es la representación gráfica del relieve de una cuenca; donde indica el porcentaje de área de la cuenca o superficie de la cuenca en Km² que existe por encima de una cota determinada, representado en coordenadas rectangulares.

Diagrama de frecuencias altimétricas: Es la representación gráfica, de la distribución en porcentaje, de las superficies ocupadas por diferentes altitudes.

Relación del relieve (Rr): Schumm (1956) propone una expresión muy simple para la descripción del relieve en función de la longitud de la cuenca y de la diferencia de altura entre la salida de la cuenca y el punto más alto en la divisoria de la cuenca (h).

$$R_r = \frac{h}{L} \quad (5)$$

Dónde: Rr: es la relación del relieve, **h:** es la diferencia de alturas de la cuenca (m), **L:** es la longitud de la cuenca (m).

Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca

Componentes de la red de drenaje: La red de drenaje de una cuenca está formada por el cauce principal y los cauces tributarios.

Densidad de drenaje (Dd): Horton (1945) Es el cociente entre la longitud total de los cauces pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca.

$$D_d = \frac{Lt}{A} \quad (6)$$

Dónde: **D_d**: es la densidad de drenajes, **L_t**: es la longitud total de los cauces (Km), **A**: es el área de la cuenca (Km²)

La pendiente media (S_m): relación entre la altura del cauce principal y su longitud.

$$S_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (7)$$

Dónde: **S_m**: es la pendiente media, **H_{max}**: es la altura de la cota máxima (m), **H_{min}**: es la altura de la cota mínima (m), **L**: es la longitud del cauce principal (m).

3.5. Agua Subterránea

Es el agua que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes, manantiales o cauces fluviales. Su movimiento en los acuíferos es de zonas de recarga hasta descarga (Collazo & Montaña, 2012).

3.1. Acuífero

Se denominan acuíferos aquellas formaciones o estratos comprendidos dentro de la zona de saturación, de los cuales se puede obtener agua con fines utilitarios. Es una unidad geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales. Por otra parte de acuerdo al tipo de material en el que se situó el acuífero este puede ser un acuitardo en el que el agua contenida se transmite lentamente y en sentido vertical y un acuífero heterogéneo en el que la propiedad varía de acuerdo con la posición del acuífero (Barbecho & Calle, 2012).

Clasificación de acuíferos

Según su comportamiento hidráulico los acuíferos pueden clasificarse (**Figura 2**) en (Naranjo, 2013):

Acuífero libre.- Cuando la superficie freática, se encuentra a presión atmosférica. Debajo de la superficie freática la presión incrementa en función de la columna de agua que carga sobre ese punto. Se supone que el peso de la roca no ejerce presión sobre el agua almacenada.

Acuífero Confinado.- Está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, siempre saturado de agua y en todos sus puntos se encuentra a una presión mayor que la atmosférica.

Acuífero Semiconfinado.- Los materiales que los rodean no son todos impermeables, por lo tanto, permiten el paso de agua desde el acuífero hacia el exterior o viceversa.

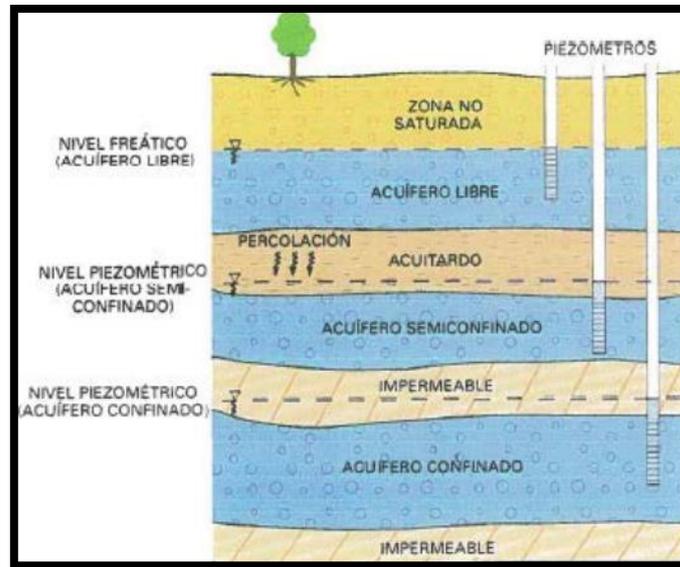


Figura 2. Tipos de acuíferos.

Fuente: (Naranjo, 2013)

Constantes hidrogeológicas

Son características de las propiedades hidráulicas del medio poroso, desde el punto de vista del drenaje las constantes de mayor importancia están la conductividad y la conductancia hidráulica las cuales se describen a continuación: (Villón, 2011).

Conductividad hidráulica.- Es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. La permeabilidad intrínseca define la capacidad de un medio de transmitir un fluido y esta propiedad esta únicamente en función del medio por lo que es independiente de las propiedades del fluido (Barbecho & Calle, 2012).

Conductancia hidráulica.- Es una medida de la eficacia con la que un fluido puede moverse a través de una superficie determinada por unidad de tiempo a una presión constante (Hevia, 2012).

3.6. Inundaciones

Es la aportación inusual de una cantidad de agua superior a la que puede drenar el propio cauce del río (Torres & González , 2014).

Clasificación de las inundaciones

La inundaciones se clasifican según su duración y mecanismo de generación como se detalla a continuación: (Quispe & Sullca, 2015).

Inundación según su duración

- Rápidas o dinámicas

Suele producirse en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas vertientes presentan fuertes pendientes, por efecto de lluvias intensas. Las crecidas son repentinas y de corta duración. Son éstas las que suelen producir los mayores estragos en la población, sobre todo porque el tiempo de reacción es prácticamente nulo.

- Lentas o estáticas

Se produce cuando lluvias persistentes y generalizadas, producen un aumento paulatino del caudal del río hasta superar su capacidad máxima de transporte. Entonces el río se sale de su cauce, inundando áreas planas cercanas al mismo.

Inundación según el mecanismo de generación

- Pluviales

Es la que se produce por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce fluvial. Este tipo de inundación se genera tras un régimen de precipitaciones intensas o persistentes, es decir, por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio período de tiempo sobre un suelo poco permeable.

- Fluviales

Causadas por el desbordamiento de los ríos y los arroyos es atribuida al aumento brusco del volumen de agua más allá de lo que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse, durante lo que se denomina como crecida.

Efectos de las inundaciones

Los efectos de las inundaciones pueden ser: (Méndez, 2013).

Salud de las personas: Incremento en la transmisión de enfermedades, lesiones causadas por árboles caídos, tendidos eléctricos y otros materiales.

Socioeconómicos: Grandes pérdidas para las personas en el ámbito agropecuario, destrucción de casas e infraestructuras.

Ambientales: Daños a las tierras agrícolas, daña los cultivos y el suministro de alimentos. Las fuentes de agua pueden contaminarse con materiales tóxicos.

3.7. Batimetría

Es la técnica asociada al levantamiento del relieve de superficies subacuáticas. La descripción de las características de los fondos acuáticos y obtención de valores de las profundidades puede ser de tipo marina, lacustre o fluvial (Sánchez, 2016).

3.8. Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Representa exclusivamente el terreno, eliminando principalmente los edificios, puentes y la vegetación (Gallardo, 2014).

3.9. Modelación matemática

Es un proceso en el cual se construyen modelos para describir situaciones de contextos reales. La modelación consiste en el arte de transformar problemas de la realidad en problemas matemáticos y resolverlos interpretando sus soluciones en un lenguaje del mundo real (Londoño & Muñoz, 2011).

3.10. HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System).

Es un paquete computacional de análisis hidráulico, el cual permite la modelación de cauces naturales o canales artificiales para la identificación de zonas con riesgo a inundación. El sistema es capaz de realizar cálculos de los flujos de la superficie del agua, cálculos de flujo uniforme incluyendo el flujo variado, transporte de sedimentos (Cajahuanca, 2015).

Análisis hidráulico: Modelación Matemática en HECRAS

Para el análisis hidráulico, existen programas de computación que permiten modelar el comportamiento de parámetros y perfiles hidráulicos de un río. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos ha desarrollado el programa conocido como HEC-RAS que permite modelar el flujo del agua en ríos, para obtener los parámetros hidráulicos en sitios de interés. El modelo utiliza las ecuaciones de “Saint Venant” de la continuidad y momentum que se describen a continuación: (Centeno, 2015).

Ecuación de la continuidad:

Forma conservativa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Forma no conservativa:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Ecuación de momentum:

Forma conservativa:

$$\frac{1}{A} * \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} * \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (10)$$

Forma no conservativa:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (11)$$

Dónde: **Q:** es el caudal (m³/s), **x:** es la distancia en dirección del flujo (m), **A:** es el área de flujo (m²), **t:** es el intervalo de tiempo (s), **V:** es la velocidad promedio del flujo (m/s), **y:** es el calado del flujo (m), **g:** es la aceleración de la gravedad (m/s²), **S_o:** es la pendiente longitudinal del fondo del lecho del canal, **S_f:** es la pendiente de fricción.

4. METODOLOGÍA

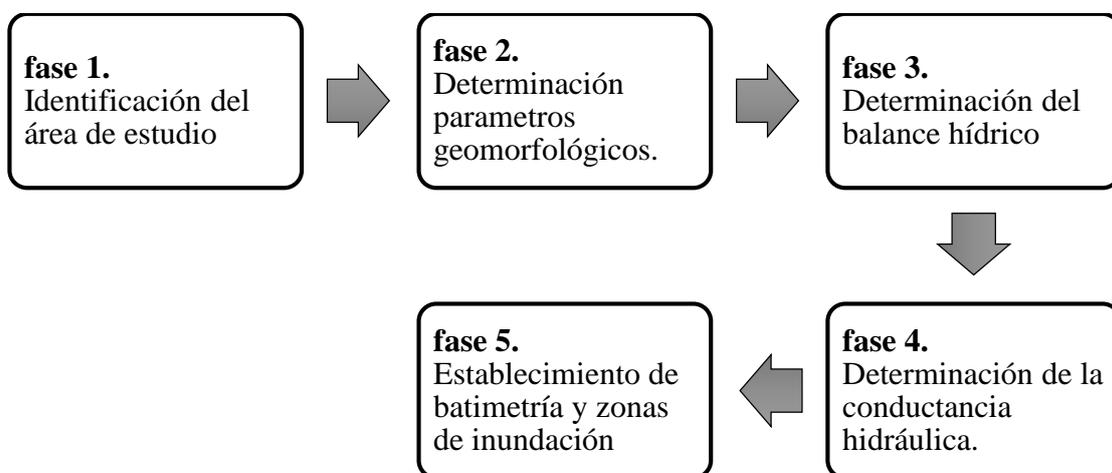
4.1. Tipo de Investigación

El tipo investigación de este estudio es en campo, puesto que la información es levantada directamente del lugar de estudio y así obtener datos hidráulicos, para aplicar en el modelo matemático. Según el nivel de investigación será de carácter descriptivo donde pretende analizar las características hidráulicas y geomorfológicas para la determinación de la

conductancia entre río-acuífero y zonas de inundación. Para esta investigación se aplica el método inductivo donde se genera información mediante la toma de datos y su análisis. La técnica a utilizar es la observación ya que permite identificar fenómenos, hechos, casos, acciones, situaciones, etc. que se desarrollan en la subcuenca, con lo cual se obtendrá información necesaria para la investigación.

4.2. Metodológica de la investigación.

Para el desarrollo de la investigación se consideró cinco fases metodológicas (**Figura 3**), las cuales se describen a continuación:



*Figura 3. Fases metodológicas.
Elaborado por: Autores.*

4.2.1. Identificación del área de estudio

En esta fase se determinará la ubicación geográfica, identificación de sitios para la recolección de datos como: caudal, batimetría, conductancia; mediante la técnica de observación e instrumentos de investigación como apuntes, GPS y registros fotográficos.

Datos generales de la subcuenca del río Chambo

La subcuenca del río Chambo (**Figura 4**) forma parte de la cuenca alta del río Pastaza, está situada en el centro del Ecuador en la vertiente Atlántica de la cordillera de los Andes; ocupando aproximadamente un 54 % de la superficie de la provincia de Chimborazo y un 0,1 % de la provincia de Tungurahua.

El río principal de la subcuenca es el Chambo, mismo que se forma de la unión de los ríos Cebadas y el Guamote, siguiendo su curso hacia el norte pasando donde finalmente se une con el Patate para formar el río Pastaza (Quishpe, 2017).

Toda la Cuenca del Río Chambo está dominada por las actividades agropecuarias. Son los agricultores que modelan los paisajes, de las zonas altas y valle interandino. De hecho, más del 70% de la población activa vive directamente o indirectamente del trabajo de la tierra y de la crianza de animales. Muchas personas de las zonas rurales tienen una relación estrecha con el campo. La agricultura es parte de la identidad de la mayoría de la gente que vive en la subcuenca (Bautista, 2012)

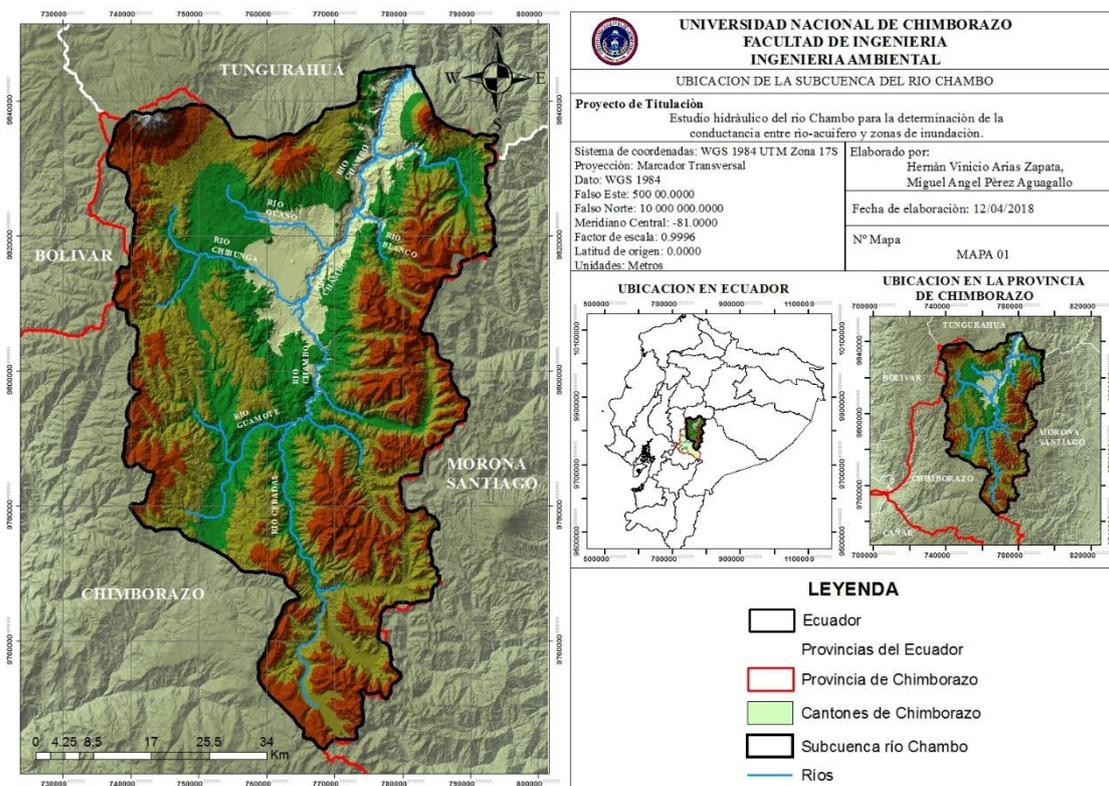


Figura 4. Ubicación geográfica de la subcuenca del río Chambo..

Elaborado por: Autores.

El río es parte del sistema acuífero del Chambo (**Figura 5**), es considerado como un límite hidráulico del mismo ya que en ciertas zonas del río existe el intercambio de agua con el acuífero. Los límites geológicos del acuífero son: al norte se encuentran lavas del Chimborazo y del Carihuairazo, además el río Guano; en el Sur está presente en su gran mayoría el río Chibunga y el río Chambo al sureste, (Mendoza, 2015).

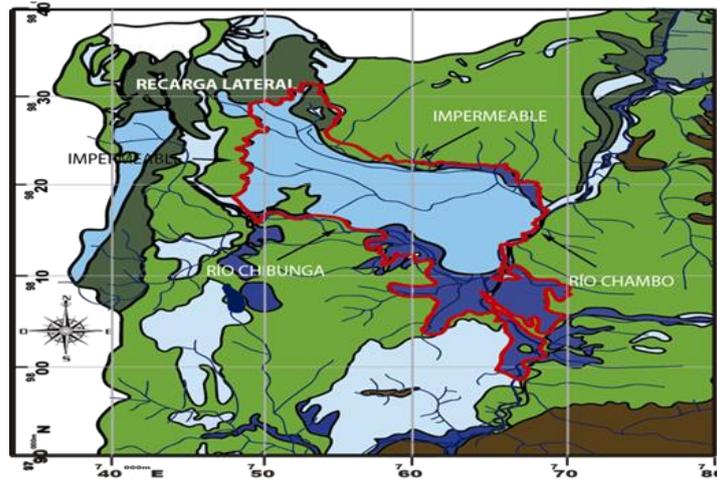


Figura 5. Límites geológicos del acuífero del Chambo.

Fuente: (Mendoza, 2015).

4.2.2. Determinación de parámetros geomorfológicos.

El cálculo de geomorfología de la microcuenca se realizaron con las ecuaciones (1-7) descritas en la fundamentación teórica, mediante la utilización de las herramientas geoespaciales como: análisis espacial, análisis espacial 3D, hidrología, pendientes, drenajes y calculadora de superficies todo esto en una base de datos en forma de un SIG.

4.2.3. Determinación del Balance Hídrico

Los datos utilizados para el balance hídrico de la microcuenca fueron obtenidos de los anuarios meteorológicos del INAMHI, se consideraron las estaciones más cercanas a la subcuenca (**Anexo 2; Tabla 3**), el espacio temporal de estudio es de 25 años, los cuales se dividieron en 3 periodos: primer periodo comprendido entre 1990 – 1998, segundo periodo comprendido entre 1999 – 2006 y tercer periodo comprendido entre 2007 – 2014.

La determinación de variables hidrológicas del balance hídrico se calculó valores medios mensuales para cada periodo, tanto de temperatura (**Anexo 2; Tabla 4**) y precipitación (**Anexo 2; Tabla 5**).

La evapotranspiración se calculó mediante el método de Thornthwaite (1948) (**Anexo 2; Tabla 6**), fundamentado en la relación existente entre la evapotranspiración potencial y la temperatura media mensual la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{tp}^i = K^i * \left[1.6 \left(\frac{10 T^i}{I} \right)^a \right] \quad (12)$$

Dónde: E_{tp}^i : es la evapotranspiración potencial en el mes i-ésimo (mm/mes), K^i : es el coeficiente de correlación de latitud, referido al mes i-ésimo, igual a la relación entre las horas diurnas y la mitad de las horas totales, T^i : es la temperatura media mensual del aire (°C), I : es el índice anual de calor igual a:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T^i}{5} \right)^{1.514} \quad (13)$$

Y, a se entiende un coeficiente que equivale:

$$a = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \quad (14)$$

La escorrentía se obtuvo utilizando el método de la curva de infiltración con la ecuación:

$$R = \frac{(P - 0.2C)^2}{P + 0.8C} \quad (15)$$

Dónde: R : es la escorrentía superficial (mm/mes), P : es la precipitación media mensual (mm), C : es la capacidad de campo es decir la máxima capacidad de almacenamiento hídrico del estrato de terreno.

La reserva hídrica fue calculada mediante la relación entre la evapotranspiración, la precipitación y el escurrimiento con la ecuación:

$$RI = (P - R) - E_{tp} \quad (16)$$

Dónde: RI : es la reserva hídrica (mm³), P : es la precipitación (mm), E_{tp} : es la evapotranspiración (mm/s).

Para determinar la infiltración que se utilizó la ecuación (17) del balance hídrico, toda esta información se procesó mediante geoestadística con la herramienta de interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW), además se utilizó otras herramientas como el análisis espacial y la calculadora de superficies todo esto en una base de datos en forma de un SIG.

La ecuación del balance hídrico es:

$$P = E_{tp} + I + R + RI \quad (17)$$

Dónde: **P:** es la precipitación (mm), **Etp:** es la evapotranspiración potencial (mm/mes), **I:** es la infiltración (mm/mes), **R:** es el escurrimiento superficial (mm/mes), **RI:** es reserva hídrica (mm³), (Torrico, 2011).

4.2.4. Determinación de la conductancia hidráulica

Para la determinación de la conductancia hidráulica se consideró tres puntos de muestreo (Anexo 3; Tabla 7; Figura 19), distribuidos en los 3 sectores alrededor del río, dónde se identificó el tipo, estructura de suelo (Figura 23) y su geología (Figura 21), mediante un previo recorrido y mapas. Para el cálculo de conductancia hidráulica, inicialmente se debe establecer la velocidad de infiltración, mediante un infiltrómetro de carga constante, que determina la capacidad de infiltración, y para mejores resultados se lo realiza en época de estiaje, considerando los siguientes pasos: (Ibañez , Moreno, & Blanquer , 2008).

1. Colocar los anillos sobre la ubicación elegida a un metro de ribera del río, comprobando que no queden ni piedras ni raíces bajo el filo de ninguno de los ellos.
2. Asegurarse que el cilindro interior esté totalmente centrado en el exterior.
3. Clavar los cilindros en el suelo a igual profundidad (10cm), y al mismo tiempo.
4. Llenar cuidadosamente de agua hasta los 30cm, empezando siempre por el anillo exterior.
5. Las medidas se realiza en el anillo interno a intervalos regulares 10 min por el lapso de una hora.

Para la determinación de la velocidad de infiltración se empleó el coeficiente I, a saber:

$$I = \frac{Dh * 600}{t} \quad (18)$$

Dónde: **I:** es la velocidad de infiltración (mm/h), **Dh:** es el diferencial de altura de agua (cm), **t:** es el diferencial de tiempo (min).

Para la determinación de conductancia se emplea la siguiente ecuación:

$$C = \frac{KA}{L} \quad (19)$$

Dónde: **C:** es la conductancia hidráulica (mm²/h), **K:** es la conductividad hidráulica en la dirección del flujo (mm/h), **L:** es la longitud del camino recorrido (L), **A:** es la sección transversal a la dirección del flujo (mm²) con la ecuación:

$$A = 2 * \pi * r * (h + r) \quad (20)$$

Dónde: **A:** es la sección transversal a la dirección del flujo o área del cilindro (mm^2), **r:** es el radio del cilindro (mm) y **h:** altura de agua recorrida (mm).

Por consiguiente, la ley de Darcy puede ser escrita en la forma:

$$Q = C(h_2 - h_1) \quad (21)$$

Dónde: **Q:** es el caudal (mm^3/s), **C:** es la conductancia hidráulica (mm^2/s), **h₂-h₁:** es la diferencia de alturas del flujo (mm).

4.2.5. Establecimiento de batimetría y de zonas de inundación

Para el levantamiento batimétrico, se realizó secciones transversales cada 10 m, donde en cada sección se mide el ancho del río (espejo de agua) y posteriormente dividir en 5 o 10 partes (midiendo cada 0.20, 0.30, 0.50m, etc), y en cada extremo medir su profundidad.

Una vez con la información levantada en campo, primeramente debemos tener datos topográficos, debidamente georreferenciados, para posteriormente aplicar el modelo de inundaciones mediante HEC-RAS 5.0.3 y HEC-GeoRAS.

El proceso se desarrolla en tres pasos:

a) Pre-proceso

Utilizando la extensión Hec-GeoRAS, se define la corriente principal (stream centerline), los bordes del río (banks), el área de posible afectación a inundaciones (flowpaths) y los cortes transversales sobre el cauce (Xs Cutlines): Tomando como base el modelo digital de terreno raster disponible (DEM), se genera un Modelo digital de terreno de tipo vectorial TIN (Triangulated Irregular Network), el cual fue la base para realizar los cortes transversales a lo largo del río Chambo. Para posteriormente desarrollar el proceso en HEC-RAS 5.0.3

b) Modelamiento

Con HEC-RAS 5.0.3, se realiza el proceso de modelación de la información generada en Hec-GeoRAS. Dentro de este proceso se define la geometría del tramo del río y la información de contorno, para luego correr la simulación hídrica de la corriente, generando un archivo tipo .sdf, el cual se convierte a formato .xml, para ser cargado nuevamente en un Sistema de Información Geográfica.

Para los datos de flujo se realizó tres perfiles: caudal base, caudal máximo y caudal de inundación, que se introducen en el paquete de datos de flujo.

Para el cálculo de caudal base y máximo se realizó mediante el método del flotador, donde se escoge un tramo recto del río, libre de vegetación o cualquier otro obstáculo que pueda interrumpir el flujo. Se coloca un objeto que flote sobre el agua, a la mitad del tramo. Se mide el tiempo que tarda en recorrer una distancia determinada. La velocidad estará dada por el cociente entre distancia y tiempo, además el ancho y las profundidades del lecho del río mediante la siguiente ecuación:

$$Q = K * V_s * A_p \quad (22)$$

Dónde:

Q: es el caudal (m³/s),

K: es el factor de corrección equivale a 0.8,

V_s: es la velocidad superficial (m/s),

A_p: es el área transversal promedio de la sección (m²).

Caudal base: fue tomando los meses de agosto y septiembre del año 2017, por el lapso de una semana de lunes a domingo, tanto en la parte alta, media y baja del río obteniendo así un valor medio de cada sitio.

Caudal máximo: se obtuvo en el mes de octubre por el lapso de una semana de lunes a domingo.

Caudal de inundación: se lo realizó mediante la ecuación de caudal pico para el hidrograma unitario triangular el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_p = 0.208 \frac{hp_e * A}{t_p} \quad (23)$$

Dónde: **Q_p:** es el caudal punta (m³/s), **hp_e :** es la precipitación efectiva (mm), **A:** es el área de la subcuenca (Km²), **t_p :** es el tiempo pico (hrs) con la ecuación:

$$t_p = \sqrt{t_c} + (0.6 * t_c) \quad (24)$$

y **t_c :** es el tiempo de concentración (hrs), con la ecuación:

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (25)$$

Dónde: **L:** es la longitud del cauce principal (m), **S:** es la pendiente del cauce principal (m).

Cálculo de caudal de inundación.

Datos: **hp_e:** 2.63 mm; **A:** 3589 Km²; **L:** 85400 m; **S:** 0.01954333

$$Qp = 0.208 \frac{2.63 \text{ mm} * 3589 \text{ Km}^2}{4.06 \text{ hr}} = 228,75 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_p = \sqrt{9,27} + (0.6 * 9,27) = 8,60 \text{ hr}$$

$$t_c = 0.000325 * \left(\frac{(85400 \text{ m})^{0.77}}{(0.0195 \frac{\text{m}}{\text{m}})^{0.385}} \right) = 9,27 \text{ hr}$$

c) Post-proceso:

En esta fase del proceso final mediante un Sistema de Información Geográfica Y Hec-GeoRAS, se generan las superficies de inundación para cada perfil, grids de profundidad, y cartografía final, obteniendo una salida gráfica y numérica que permite verificar los sitios más críticos donde se presentarían inundaciones si las condiciones de caudal máximos se incrementan según el período de análisis (Romo, 2015).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Geomorfología de la microcuenca del río Chibunga.

El análisis geomorfológico de la subcuenca (**Tabla 1**), permite caracterizar la morfología, cobertura vegetal, la naturaleza y uso del suelo, pues las características físicas inciden directamente en su comportamiento hidrológico, Es de gran importancia su caracterización, para conocer la influencia que tiene la conductancia hidráulica y las zonas que serán afectadas por una inundación en la subcuenca.

La subcuenca del río Chambo presenta un área de 3589,61 Km², es decir es una cuenca de tamaño grande. La orientación del río principal es de sur a norte con una longitud de 85,40 Km, sus aguas confluyen en la cuenca alta del río Pastaza. El índice de compacidad es de 1,60 lo que significa que es una cuenca oval oblonga a rectangular oblonga por lo que la precipitación que recibe tarda más en llegar a la salida. El factor de forma es de 0,69 mostrando crecida en eventos fuertes de precipitación, el caudal pico se acumula en la salida. La pendiente media de la cuenca que es de 23.95 % lo cual es accidentada (**Anexo 1, Figura 14**). La relación de elongación es de 0,94 esto indica que la cuenca tiene relieve pronunciado. La densidad de

drenaje presenta un valor de 1,18 Km/Km², que corresponde a cuencas con drenajes intermedios. De acuerdo a la red de drenaje el río Chimborazo y Sicalpa son de segundo orden, el río Chibunga de tercer orden y el río Chambo de cuarto orden (**Anexo 1, Figura 15**).

Tabla 1. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Chambo.

PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE

| Nombre | Sigla | Unidad | Valores |
|-------------------------------------|-------|-----------------|------------|
| Área | A | Km ² | 3589,61 |
| Perímetro | P | Km | 339,39 |
| Cota máxima | Cmax | msnm | 6280,00 |
| Cota mínima | Cmin | msnm | 1940,27 |
| Centroide x | Cx | UTM | 764997,69 |
| Centroide y | Cy | UTM | 9801500,18 |
| Centroide z | Cz | msnm | 3004,41 |
| Índice de compacidad | Ic | adimensional | 1,60 |
| Longitud Media | Lc | Km | 72,00 |
| Factor de Forma | Ff | adimensional | 0,69 |
| Relación de Elongación | Re | adimensional | 0,94 |
| Relación de circularidad | Rci | adimensional | 0,39 |
| Área sobre la curva | As | Km ² | 198380,99 |
| Área bajo la curva | Ab | Km ² | 137711,34 |
| Relación Hipsométrica | RH | adimensional | 1,44 |
| Altitud media | Amed | msnm | 3004,41 |
| Altitud más frecuente | Amf | msnm | 3748,49 |
| Altitud de Frecuencia Media | Afm | msnm | 3705,29 |
| Pendiente Media de la cuenca | Pmc | % | 23,95 |

PROPIEDADES DE LA RED HÍDRICA

| Nombre | Sigla | Unidad | Valores |
|--|-------|--------------|---------|
| Longitud del cauce principal | Lcp | Km | 85,40 |
| Orden de la Red Hídrica | Or | adimensional | 4,00 |
| Sumatoria de las longitudes de la red hídrica | ΣRH | Km | 642,10 |
| Densidad de Drenaje | Dd | Km-1 | 1,18 |
| Número de Canales o ramales | Nt | adimensional | 134,00 |
| Densidad Hidrográfica | Dh | Km-1 | 0,036 |
| Altura máxima del río | Hmax | msnm | 3760,00 |
| Altura mínima del río | Hmin | msnm | 2090,80 |
| Pendiente Media del cauce principal | Sm | adimensional | 19,54 |

Elaborado por: Autores

La curva hipsométrica (**Figura 6**) muestra que la unidad hidrográfica se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con una curva tipo B, representando una actividad erosiva media.

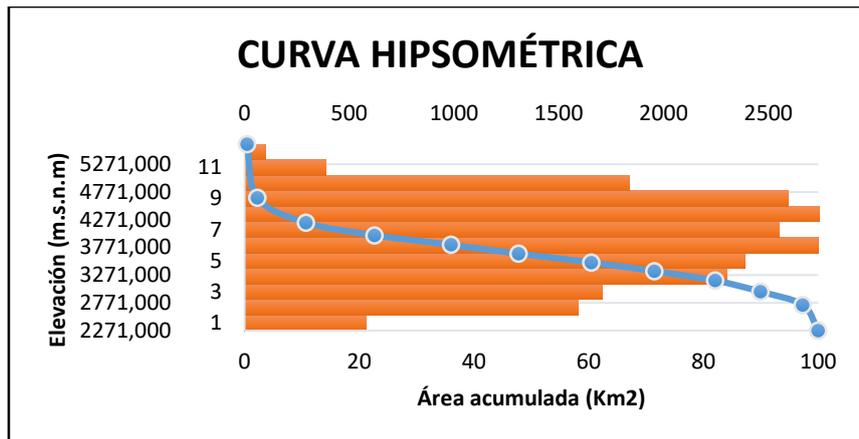


Figura 6. Curva Hipsométrica.

Elaborado por: Autores.

5.2. Balance hídrico de la subcuenca del río Chambo.

Análisis de la variabilidad de temperatura

La **Figura 7** muestra la variación media mensual de temperatura en la subcuenca del río Chambo, entre los periodos en análisis con valores que fluctúan de 12,9 a 16,2 °C. El primer período en los meses de noviembre, diciembre presenta valores altos de 15,0 °C y en los meses de junio, julio y octubre con valores bajos de 14,0; 12,9; 14,0°C. El segundo en los meses de abril, noviembre, diciembre tiene valores de 14,9; 15,9; 14,9 °C y en los meses de mayo, agosto con valores bajos de 13,2; 13,4 °C. El tercero en los meses de febrero y noviembre contiene valores de 16,0; 15,8 °C y en los meses de junio, agosto con valores bajos de 13,4; 14,1 °C. Las variaciones mensuales de un período a otro son un poco significativas y por lo tanto su amplitud (diferencia entre los valores máximos y mínimos) es <2°C, teniendo como resultado en el tercer período una mayor temperatura anual en comparación con los demás períodos.

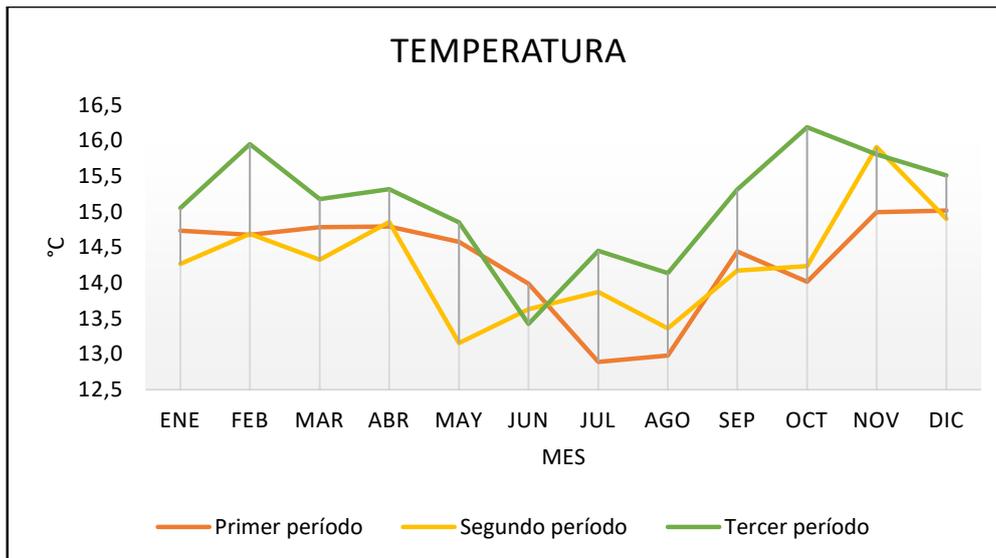


Figura 7. Variación de temperatura en la subcuenca del río Chambo.

Elaborado por: Autores.

Análisis del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al primer periodo (1990-1998)

Los resultados obtenidos del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al primer periodo (1990-1998). (**Anexo2, Figura 16**).

Las precipitaciones tienen una distribución espacial variable, debido a su orografía y a factores ambientales que condicionan las mismas, en la **Figura 8** se observan valores que oscilan entre 37,64 y 95,36 mm. En los meses de abril, junio y julio existe una mayor cantidad de lluvia con valores de 81,13; 88,82; 95,36, mientras que en los meses de enero y diciembre hay menor cantidad de lluvia con valores de 37,64; 44,23 mm.

La evapotranspiración va de 5,05 a 6,24 mm, con lo cual es evidente que no existe una diferenciación tan marcada en las variaciones de los rangos a nivel mensual como en el caso de la precipitación. Sin embargo, se observa que a nivel temporal, se presenta la mayor incidencia de pérdidas de agua potenciales en los meses de enero, marzo y diciembre con valores de 6,20; 6,24; 6,20 mm/mes, y lo contrario sucede en los meses de julio y agosto con menor incidencia teniendo valores de 5,05; 5,11 mm/mes. Dependiendo de las condiciones de uso del suelo, de la disponibilidad de agua dada por la precipitación y la capacidad de retención de agua del suelo, así como de las condiciones climáticas.

La escorrentía entre los meses de la época de lluvias y los de la época seca, presenta un rango menor de diferencia, el escurrimiento máximo ocurre en los meses de junio, julio y el mínimo en los meses de enero y diciembre con valores de 37,76; 43,35 mm/mes y 12,90; 12,15

mm/mes, respectivamente. Dependiendo de los factores que presenta el sitio como es deficiente cobertura vegetal en zonas de mayor pendiente y saturación temprana del suelo descubierto. La reserva hídrica representa el flujo subsuperficial que se genera en la subcuenca, la recarga a los acuíferos y las variaciones de los cuerpos de agua. Es importante mencionar que los resultados obtenidos, son promedios mensuales de un periodo de 8 años, por lo que los valores individuales de cada mes pueden variar dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten. El mayor almacenamiento está presente en los meses de junio y julio y el menor en los meses de enero y diciembre con valores de 71,87; 78,59 mm³ y 19,81; 25,32 mm³, respectivamente.

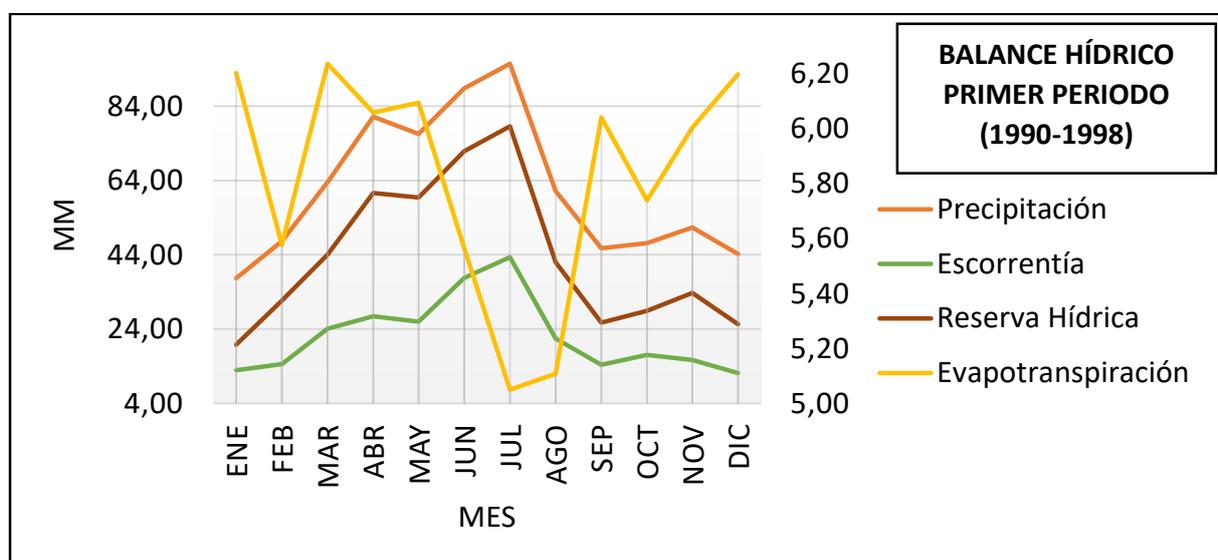


Figura 8. Representación de balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al primer periodo (1990-1998)

Elaborado por: Autores.

Análisis del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al segundo periodo (1999-2006)

Los resultados obtenidos del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al segundo periodo (1999-2006), (**Anexo2, Figura 17**).

Las precipitaciones tienen una distribución espacial variable, debido a su orografía y a factores ambientales que condicionan las mismas, en la **Figura 9** se observan valores que oscilan entre 36,85 y 97,04 mm. En los meses de marzo y junio existe una mayor cantidad de lluvia con valores de 85,38; 97,04 mm, mientras que en los meses de enero y octubre hay menor cantidad de lluvia con valores de 36,85; 40,87 mm.

La evapotranspiración va de 5,31 a 6,70 mm, con lo cual es evidente que no existe una diferenciación tan marcada en las variaciones de los rangos a nivel mensual como en el caso de la precipitación. Sin embargo, se observa que a nivel temporal, se presenta la mayor incidencia de pérdidas de agua potenciales en los meses de noviembre y diciembre con valores de 6,70; 6,31 mm/mes, y lo contrario sucede en los meses de junio y agosto con menor incidencia teniendo valores de 5,36; 5,44 mm/mes. Dependiendo de las condiciones de uso del suelo, de la disponibilidad de agua dada por la precipitación y la capacidad de retención de agua del suelo, así como de las condiciones climáticas.

La escorrentía entre los meses de la época de lluvias y los de la época seca, presenta un menor rango de diferencia, el escurrimiento máximo ocurre en los meses de marzo, junio y el mínimo en los meses de febrero y noviembre con valores de 29,82; 41,64 mm/mes y 13,89; 12,75 mm/mes, respectivamente.

La reserva hídrica representa el flujo subsuperficial que se genera en la subcuenca, la recarga a los acuíferos y las variaciones de los cuerpos de agua. Es importante mencionar que los resultados obtenidos, son promedios mensuales de un periodo de 7 años, por lo que los valores individuales de cada mes pueden variar dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten. El mayor almacenamiento está presente en los meses de marzo, junio y el menor en los meses de enero, octubre con valores de 66,80; 82,41 mm³ y 18,26; 20,85 mm³, respectivamente.

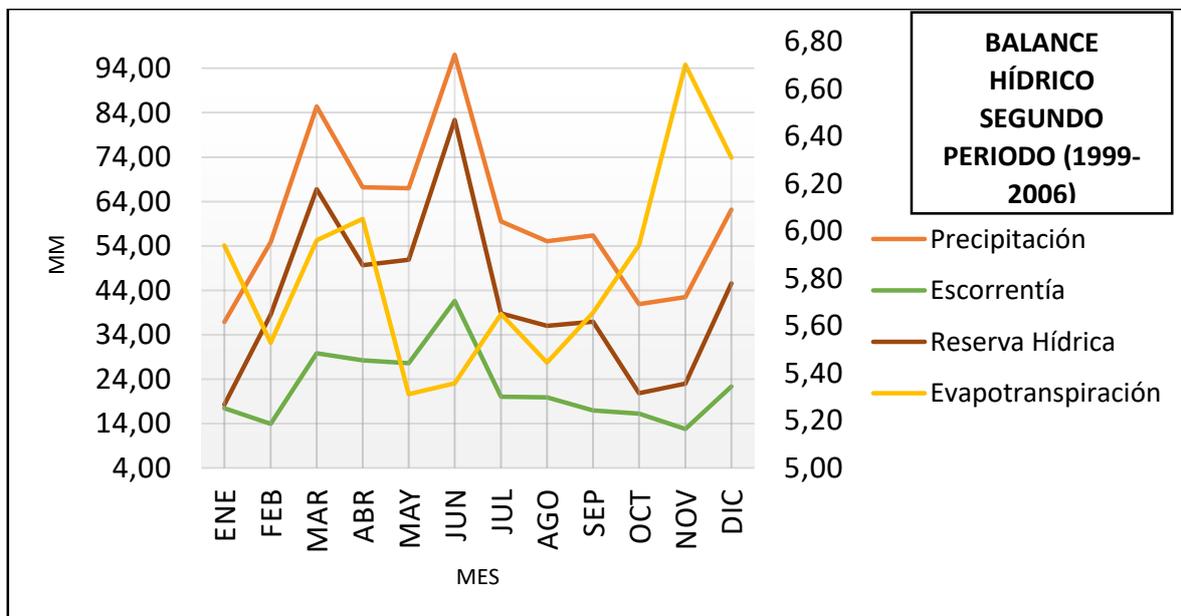


Figura 9. Representación del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al segundo período (1999-2006)

Elaborado por: Autores

Análisis del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al tercer periodo (2007-2014).

Los resultados obtenidos del Balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al tercer periodo (2007-2014), (**Anexo2, Figura 18**).

Las precipitaciones tienen una distribución espacial variable, debido a su orografía y a factores ambientales que condicionan las mismas, en la **Figura 10** se observan valores que oscilan entre 44,75 y 86,69 mm. En los meses de mayo y junio existe una mayor cantidad de lluvia con valores de 82,88; 86,69 mm, mientras que en los meses de febrero y noviembre hay menor cantidad de lluvia con valores de 44,75; 45,90 mm.

La evapotranspiración va de 4,74 a 6,86 mm, con lo cual es evidente que no existe una diferenciación tan marcada en las variaciones de los rangos a nivel mensual como en el caso de la precipitación. Sin embargo, se observa que a nivel temporal, se presenta la mayor incidencia de pérdidas de agua potenciales en los meses de noviembre y diciembre con valores de 6,70; 6,31 mm/mes, y lo contrario sucede en los meses de junio y agosto con menor incidencia teniendo valores de 5,36; 5,44 mm/mes. Dependiendo de las condiciones de uso del suelo, de la disponibilidad de agua dada por la precipitación y la capacidad de retención de agua del suelo, así como de las condiciones climáticas.

La escorrentía entre los meses de la época de lluvias y los de la época seca, presenta un menor rango de diferencia, el escurrimiento máximo ocurre en los meses de junio, julio y el mínimo en los meses de enero, diciembre con valores de 35,92; 30,79 mm/mes y 12,60; 13,04 mm/mes, respectivamente.

La reserva hídrica representa el flujo subsuperficial que se genera en la subcuenca, la recarga a los acuíferos y las variaciones de los cuerpos de agua. Es importante mencionar que los resultados obtenidos, son promedios mensuales de un periodo de 7 años, por lo que los valores individuales de cada mes pueden variar dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten. El mayor almacenamiento está presente en los meses de mayo, junio y el menor en los meses de febrero, diciembre con valores de 65,99; 71,42 mm³ y 26,74; 28,42 mm³, respectivamente.

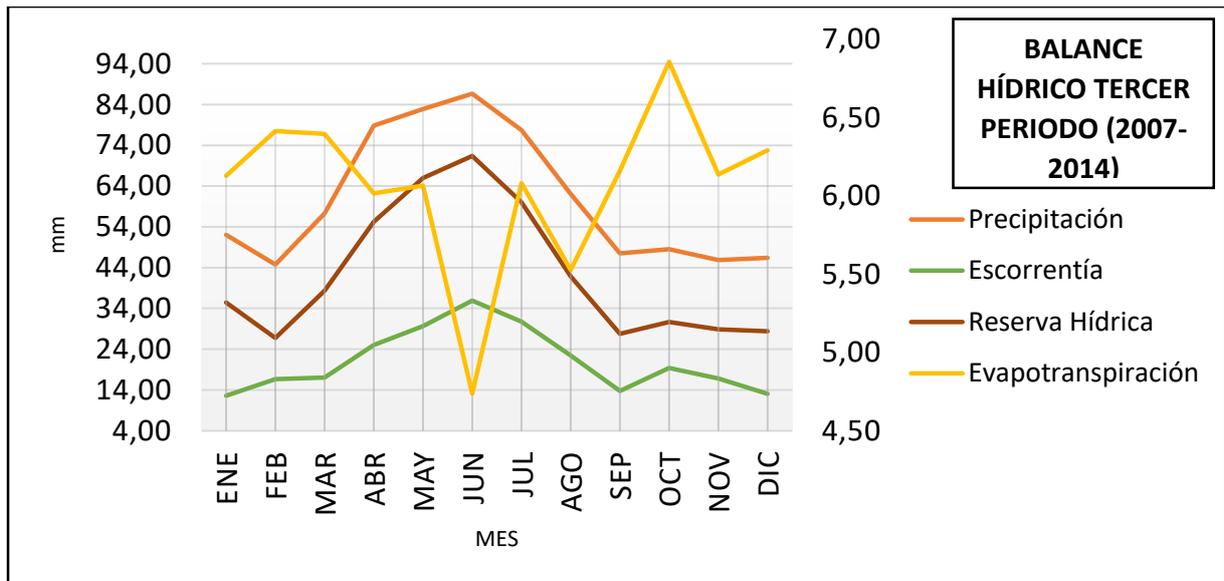


Figura 10. Representación del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondiente al tercer período (2007-2014).

Elaborado por: Autores.

5.3. Conductancia hidráulica entre el río Chambo con el acuífero del Chambo.

Cálculo de la Conductancia hidráulica

Punto 1. Puente vía a Chambo

Velocidad de Infiltración (Anexo 3, Tabla 8).

$$I = \frac{10 \text{ cm} * 600}{10 \text{ min}} = 600 \text{ mm/h}$$

Conductancia hidráulica

Datos: h: 460 mm; r: 150 mm; L: 460 mm; h1: 140 mm; h2: 600 mm.

$$K = \frac{300 \text{ mm/h} + 360 \text{ mm/h} + 360 \text{ mm/h}}{3} = 340 \text{ mm/h}$$

$$A = 2 * 3.1416 * 150 \text{ mm/h} * (460 \text{ mm} + 150 \text{ mm}) = 574912.8 \text{ mm}^2$$

$$C = \frac{340 \text{ mm/h} * 574912.8 \text{ mm}^2}{460 \text{ mm}} = 424935.548 \text{ mm}^2/\text{h} \approx 0.4249 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$Q = 424935.548 \text{ mm}^2/\text{h} * (600 \text{ mm} - 140 \text{ mm}) = 195470352 \text{ mm}^3/\text{h} \approx 0.1955 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 2. Puente vía a Quimiag

Velocidad de Infiltración (**Anexo 3, Tabla 8**).

$$I = \frac{4 \text{ cm} * 600}{10 \text{ min}} = 240 \text{ mm/h}$$

Conductancia hidráulica

Datos: **h:** 160 mm; **r:** 150 mm; **L:** 160 mm; **h1:**140 mm; **h2:**300 mm.

$$K = \frac{120 \text{ mm/h} + 120 \text{ mm/h} + 60 \text{ mm/h}}{3} = 100 \text{ mm/h}$$

$$A = 2 * 3.1416 * 150 \text{ mm/h} * (160 \text{ mm} + 150 \text{ mm}) = 292168.8 \text{ mm}^2$$

$$C = \frac{100 \text{ mm/h} * 292168.8 \text{ mm}^2}{160 \text{ mm}} = 182605.5 \text{ mm}^2/\text{h} \approx 0.1826 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$Q = 182605.5 \text{ mm}^2/\text{h} * (300 \text{ mm} - 140 \text{ mm}) = 29216880 \text{ mm}^3/\text{h} \approx 0.0292 \text{ m}^3/\text{h}$$

Punto 3. Puente vía a Penipe

Velocidad de Infiltración (**Anexo 3, Tabla 8**).

$$I = \frac{10 \text{ cm} * 600}{10 \text{ min}} = 600 \text{ mm/h}$$

Conductancia hidráulica

Datos: **h:** 460 mm; **r:** 150 mm; **L:** 460 mm; **h1:** 140 mm; **h2:** 600 mm.

$$K = \frac{420 \text{ mm/h} + 360 \text{ mm/h} + 420 \text{ mm/h}}{3} = 400 \text{ mm/h}$$

$$A = 2 * 3.1416 * 150 \text{ mm/h} * (460 \text{ mm} + 150 \text{ mm}) = 574912.8 \text{ mm}^2$$

$$C = \frac{400 \text{ mm/h} * 574912.8 \text{ mm}^2}{460 \text{ mm}} = 499924.174 \text{ mm}^2/\text{h} \approx 0.4999 \text{ m}^2/\text{h}$$

$$Q = 499924.174 \text{ mm}^2/\text{h} * (600 \text{ mm} - 140 \text{ mm}) = 229965120 \text{ mm}^3/\text{h} \approx 0.2300 \text{ m}^3/\text{h}$$

Análisis de la conductancia hidráulica entre el río Chambo y el acuífero

En el punto 1 (**Anexo 3, Figura 19**) se obtiene una velocidad de infiltración media de 460 mm/h (**Figura 11**), de acuerdo a la estructura de suelo (**Figura 23**) que presenta es de tipo arenoso es decir excelente permeabilidad y capacidad de infiltración. El valor calculado de la conductancia es $0,4249 \text{ m}^2/h$ (**Figura 12**) y un caudal de $0.1955 \text{ m}^3/h$, mismo que indica la interacción entre río-acuífero, en este sitio el río está aportando al acuífero, el cual varía de acuerdo a las condiciones meteorológicas

En el punto 2 (**Anexo 3, Figura 19**) se obtiene una velocidad de infiltración media de 160 mm/h (**Figura 11**), de acuerdo a la estructura de suelo (**Figura 23**) que presenta es de tipo arenoso es decir buena permeabilidad y capacidad de infiltración. El valor calculado de la conductancia es $0,1826 \text{ m}^2/h$ (**Figura 12**) y un caudal de $0.0292 \text{ m}^3/h$, mismo que indica la interacción entre río-acuífero, en este sitio el río está aportando al acuífero, el cual varía de acuerdo a las condiciones meteorológicas

En el punto 3 (**Anexo 3, Figura 19**) se obtiene una velocidad de infiltración media de 460 mm/h (**Figura 11**), de acuerdo a la estructura de suelo (**Figura 23**) que presenta es de tipo arenoso es decir excelente permeabilidad y capacidad de infiltración. El valor calculado de la conductancia es $0,4999 \text{ m}^2/h$ (**Figura 12**) y un caudal de $0.2300 \text{ m}^3/h$, mismo que indica la interacción entre río-acuífero, en este sitio el río está aportando al acuífero, el cual varía de acuerdo a las condiciones meteorológicas.

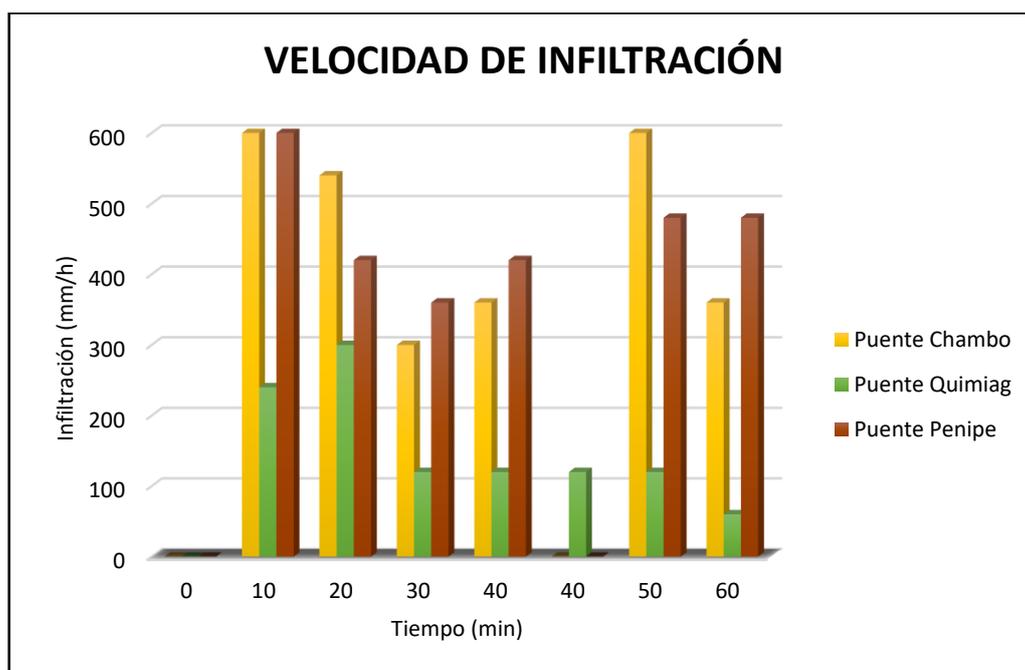


Figura II. Comportamiento velocidad de infiltración en el río Chambo.

Elaborado por: Autores.

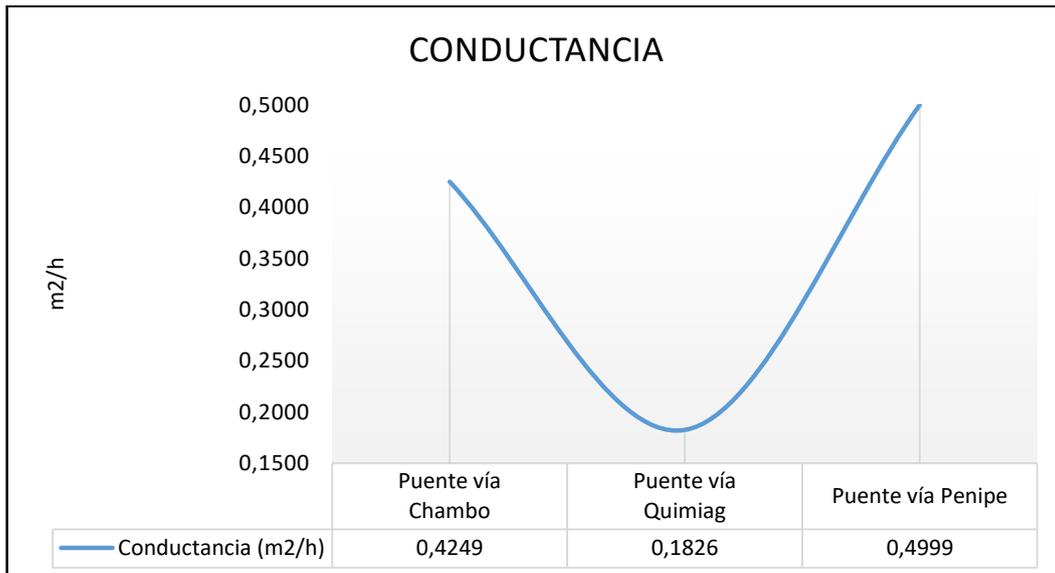


Figura 12. Representación conductancia hidráulica del río Chambo.

Elaborado por: Autores.

5.4. Zonas de inundación en la subcuenca del río Chambo.

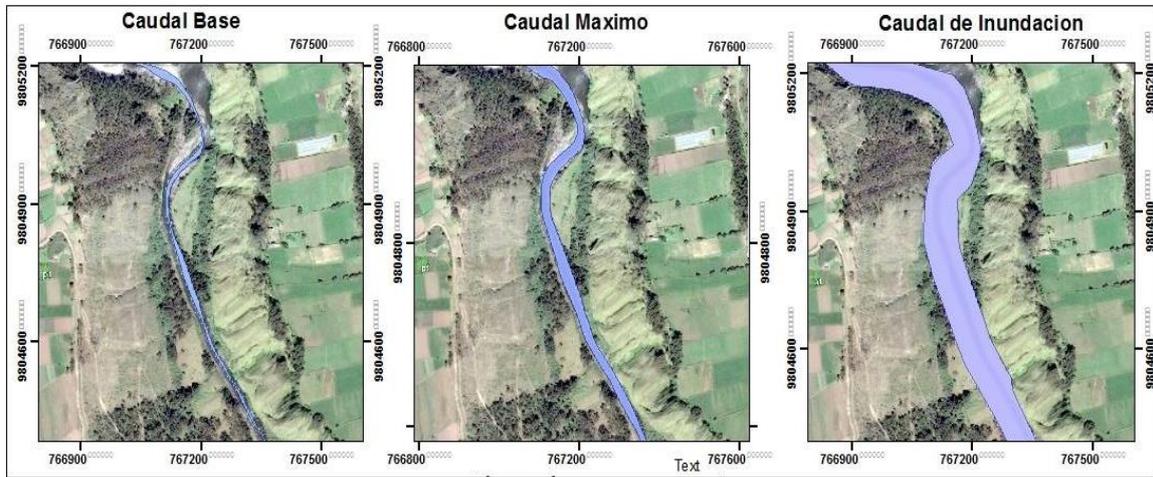
Una vez obtenidas las simulaciones hidráulicas con los diferentes caudales calculados (base, máximo, inundación) se puede apreciar que: la simulación de caudal base en la subcuenca, en el punto 1 inicia con un caudal de 15.9 m³/s en el punto 2 de 21.3 m³/s y en el punto 3 con un caudal de 19.7 m³/s. Mientras que la profundidad máxima que alcanza la lámina de agua en todo el río es de 2.60m.

La simulación de caudal máximo en la subcuenca, en el sector 1 inicia con un caudal de 38,2 m³/s, en el sector 2 de 42,7 m³/s y en el sector 3 con un caudal de 40.9 m³/s. Mientras que la profundidad máxima que alcanza la lámina de agua en todo el río es de 5.30 m.

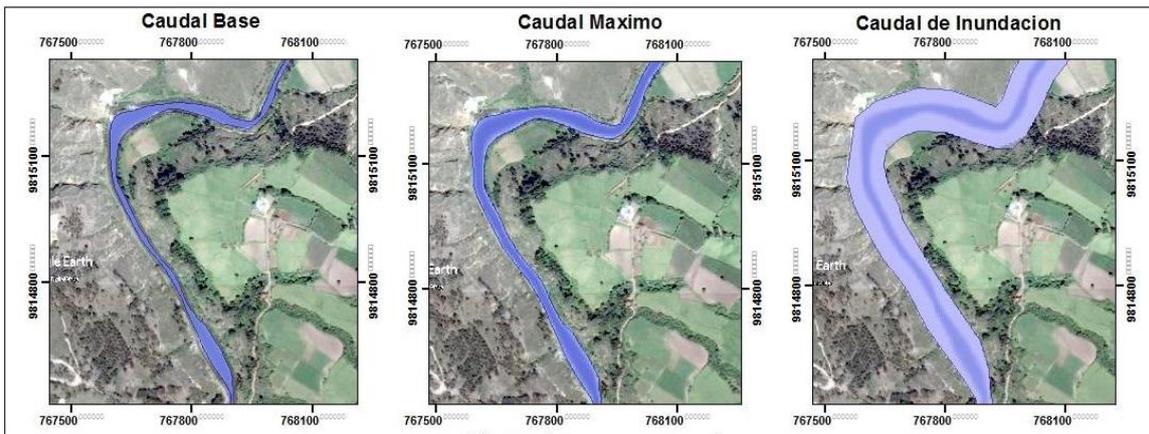
La simulación para caudal de inundación (**Figura 13**) para un periodo de retorno de 8 años, con un precipitación efectiva máxima en el mes de abril de 2,63 mm/día, un tiempo pico de aproximadamente 9 horas alcanza un caudal de 228,71 m³/s para toda la subcuenca, por lo tanto se puede apreciar que en el sector 1 de la subcuenca (**Anexo 4, Figura 24**), donde los bordes del río han sido sobrepasados por la lámina de agua y han inundado la parte izquierda y derecha del río aproximadamente unos 5m, en el sector 2 de la subcuenca (**Anexo 4, Figura 25**), de igual manera los bordes del río han sido sobrepasados por la lámina de agua y han inundado la parte izquierda y derecha del río aproximadamente unos 7 m. Mientras que en el sector 3 (**Anexo 4, Figura 26**) los bordes del río han sido sobrepasados por la lámina de agua

y han inundado la parte izquierda y derecha del río aproximadamente unos 10 m. La profundidad máxima que alcanza la lámina de agua en todo el río es de 9.21 m.

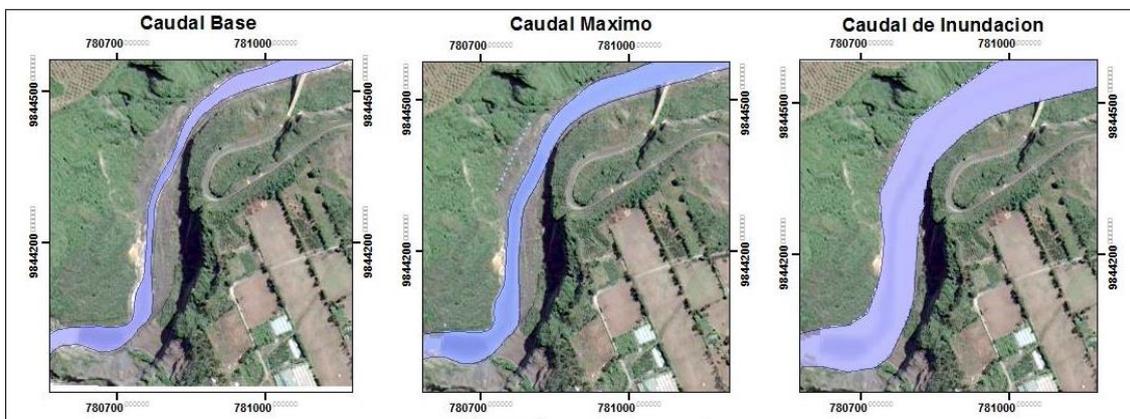
SIMULACION SECTOR 1



SIMULACION SECTOR 2



SIMULACION SECTOR 3



*Figura 13. Simulación de las zonas de inundación en la subcuenca del río Chambo.
Elaborado por: Autores.*

De acuerdo a las áreas afectadas por inundación en la subcuenca del río Chambo con mayor porcentaje del 28% del total de áreas afectadas por inundación son los Pastos plantados localizados en su mayoría en la parte media correspondiente al puente vía a Quimiag y en la parte baja en la desembocadura y con el 1% están los Frutales ubicados en la parte baja de la subcuenca pasando el puente vía a Penipe.

Tabla 2. Áreas afectadas por inundación en la subcuenca del río Chambo.

| Uso del suelo | Área ha | Porcentaje |
|--|---------------|-------------|
| Cultivos de ciclo corto | 41.53 | 11% |
| Cultivos de ciclo corto - Áreas erosionadas | 68.89 | 18% |
| Cultivos de ciclo corto - Pastos plantados | 54.10 | 14% |
| Frutales | 3.73 | 1% |
| Frutales - Pastos plantados | 6.16 | 2% |
| Maíz | 48.91 | 13% |
| Maíz - Pastos plantados | 26.38 | 7% |
| Pastos naturales | 27.41 | 7% |
| Pastos plantados | 105.79 | 28% |
| Suma Total | 382.91 | 100% |

Elaborado por: Autores.

6. CONCLUSIONES

- ✓ La geomorfología permite comprender la influencia que tiene su forma, relieve, red de drenaje con las variaciones climáticas, flora y fauna, la subcuenca del río Chambo es de tamaño grande, irregular con un relieve bajo con amplia variedad de climas, geología y se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con una curva hipsométrica tipo B, representando una actividad erosiva media y baja sedimentación.
- ✓ El balance hídrico para los tres periodos en la subcuenca del río Chambo, evidencia mayores valores de precipitación en meses con una distribución bimodal, con el pico máximo en los meses de marzo, abril, junio y el mínimo en agosto, septiembre y mínimo en noviembre, estas lluvias son marcadas por la orografía del territorio, determinando así variaciones de evapotranspiraciones, y reservas hídricas.
- ✓ La conductancia hidráulica que es la eficacia con que los fluidos se van a transportar a través del suelo tanto del río al acuífero y viceversa, en el puente vía Chambo se tiene un valor de conductancia de $0.4249 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de $0.1955 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a que estos sitios presentan un suelo de tipo arenoso va existir aporte del río hacia el acuífero. En el puente vía a Quimiag se tiene un valor de conductancia de $0.1826 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de $0.0292 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a que estos sitios presentan un suelo de tipo arenoso va existir aporte

del río hacia el acuífero. En el puente vía a Penipe se tiene un valor de conductancia de $0.4999 \text{ m}^2/\text{h}$ y un caudal de $0.2300 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a que estos sitios presentan un suelo de tipo arenoso va existir aporte del río hacia el acuífero. Este tipo de condiciones muestra como el acuífero tiene intercambio hidráulico con el lecho del río, sobre todo en los lugares donde existe mayor infiltración de agua junto al lecho del río. Esto hace que el cauce del río Chambo mantenga un nivel de agua durante todo el año, aunque no exista precipitación y se utilice en actividades antrópicas el agua del mismo.

- ✓ La reconstrucción del lecho del río mediante un modelo digital con el cual nos permitió conocer el cauce del río cubierto por agua en dos y tres dimensiones, teniendo así la profundidad máxima que alcanza la lámina de agua para época seca es de 2.60 m, en época de lluvia es de 5.30 m, el conocimiento de este parámetro es muy importante para el desarrollo de modelos de inundación, además permite conocer cómo influye las características de la profundidad a lo largo del mismo, es así que la modelación matemática integral de la subcuenca del río Chambo permitió determinar zonas que se verían afectadas por posibles inundaciones, determinando que de acuerdo al tipo de uso de suelo se verían afectadas en mayor extensión zonas con pastos plantados localizados en su mayoría en el sector 2 correspondiente al puente vía a Quimiag y en el sector 3 en el puente vía a Penipe.
- ✓ Los resultados de este trabajo permitieron obtener la conductancia hidráulica del río Chambo, la misma que será utilizada en el modelo matemático del acuífero del Chambo, además de conocer las zonas de interés a intervenir con la finalidad evitar daños por posibles inundaciones.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Al momento del levantamiento batimétrico del río realizarlo con la debida seguridad para que no ocurran accidentes.
- ✓ Para realizar el modelo tener cuidado al momento de trazar el eje central del río (stream center line) y sus bancos (banks), en caso de no contar con una topografía adecuada utilizar imágenes satelitales u ortofotografías del sector para obtener mejores resultados.
- ✓ Se debe actualizar periódicamente la información relacionada con la calidad y cantidad de agua mediante una red de monitoreo en los puntos establecidos en la investigación.
- ✓ La presente investigación presenta fundamentos para realizar programas de investigación, que permitan no solo la adquisición del conocimiento hidrogeológico del acuífero Chambo, sino además, efectuar estrategias para la evaluación de las reservas que aún no son estudiadas, así asegurar una gestión integral de los acuíferos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Arrueta, M. (2009). *Balance hídrico y análisis de las relaciones precipitación-escorrentía en la microcuenca de la Quebrada El Gallo, San Antonio de Oriente*. Zamorano.
- Barbecho, J., & Calle, J. (2012). *Caracterización de la conductividad hidráulica de los uelos de la subcuenca del río Tarqui*. Cuenca.
- Bárcenas, R. (2017). *Balance hídrico de la cuenca abastecedora de la planata de tratamiento de agua potable Luis Prieto Gómez en la vereda de Gallinazo de VillaMaría Caldas*. Medellín.
- Bautista, V. (2012). *Estudio de la calidad del agua de la cuenca del río Chambo en época de estiaje*. Riobamba.
- Cajahuanca, J. (2015). *Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la identificación de zonas con riesgo a inundación, tramos puente Las Balsas-puente La Breña*. Huancayo.
- Campos, D. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana*. San Luis Potosí: Libre.
- Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río Machangara*. Cuenca.
- Centeno, M. (2015). *Análisis Hidrológico - Hidráulico para los puentes en zonas de inundación generadas por el proyecto "Pacalori"*. Cuenca.
- Collazo, M., & Montañó, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. Montevideo.
- Estrada, O. (2009). *Modelación acoplada de Aguas Superficiales y Subterráneas para la Gestión Conjunta del Recurso Hídrico*. Medellín.
- Fernández, C. (2010). *Caracterización de la Inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador*. San Salvador.
- Gallardo, J. (2014). *Batimetría de ríos, arroyos, embalse y estuarios de la comunidad Autónoma del país Vasco*.
- Garrido, M. (2013). *Sistema automatizado de alerta temprana ante el peligro de inundaciones*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
- Gaspari, J. (2012). *Caracterización morfológica de la cuenca alta del río Sauce Grande*. Buenos Aires.
- GEOECUADOR. (2008). *Desastres Naturales*.
- INAMHI. (2014). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. Quito.
- INAMHI. (2015). *Estaciones Meteorológicas*. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/>
- Juela, O. (2011). *Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación El Arenal en el sitio el Boquerón, provincia de Loja*. Loja.
- Londoño, S., & Muñoz, L. (2011). *La modelación matemática: un proceso para la construcción de relaciones lineales entre dos variables*. Medellín.
- Méndez, M. (2013). *Consecuencias de las inundaciones*.
- Mendoza, B. (2015). *Estudio del acuífero del Chambo (EC) mediante interpretación geológica, geofísica y matemática*. Researchgate.
- Naranjo, L. (2013). *Caracterización Hidrogeológica de la Subcuenca del Río Chambo*. Quito.
- Poblete, D. (2008). *Modelo Hidrológico para la Simulación de Recursos Hídricos*. Santiago.
- Quishpe, A. (2017). *Caracterización Hidrometeorológica y Estimación del Balance Hídrico de la Cuenca del Río Chambo*. Quito.
- Quispe, J., & Sullca, R. (2015). *Aplicación del modelo matemático HEC RAS para el cálculo del perfil hidráulico del río Ramis*. Juliaca.
- Robayo, L. (2014). *Análisis de amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de Sistemas de Información Geográfica*. Bogotá.

Romo, S. (2015). *Estimación del riesgo por inundación en la ribera del río Mulato*. Mocoa.

Samper, J. (2013). *Manantiales y Relaciones río-acuífero de Hidrología del Subsuelo*.

Sánchez, I. (2016). *Levantamiento batimétrico y medición de parámetros físico-químicos en el lago de Ilopango, El Salvador*. Ciudad Universitaria.

Torrico, M. (2011). *Determinación de balances hídricos en microcuencas y subcuencas*. Cochabamba.

Ubaldo, C. (2015). *Gestión integrada de crecidas*. Santa Fé.

Vergara, M. (2011). *La conceptualización de la inundaciones y la percepción del riesgo ambiental*. México.

Villón, M. (2011). *Hidrología*. Perú- Lima: Villón.

9. ANEXOS

9.1. Anexo 1. Geomorfología.

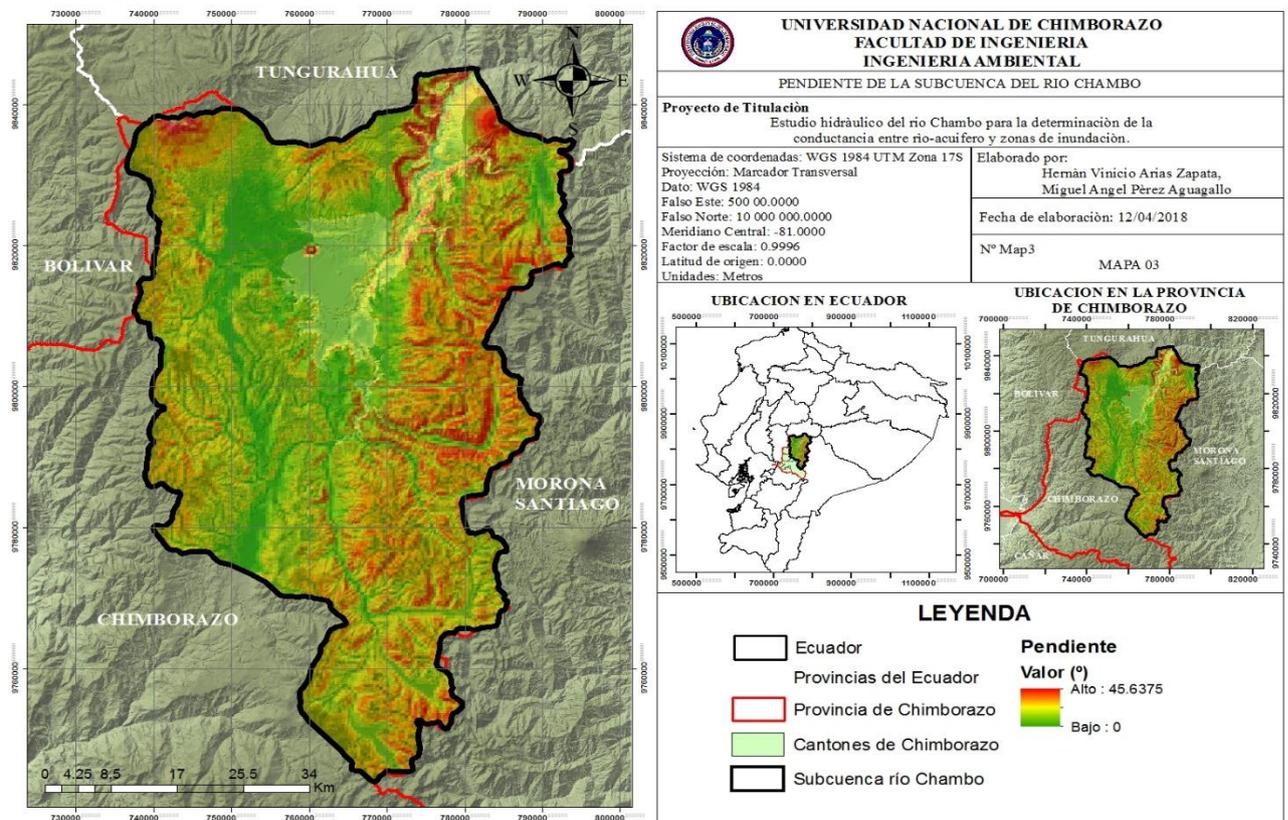


Figura 14. Pendientes de la subcuenca del río Chambo.
 Elaborado por: Autores.

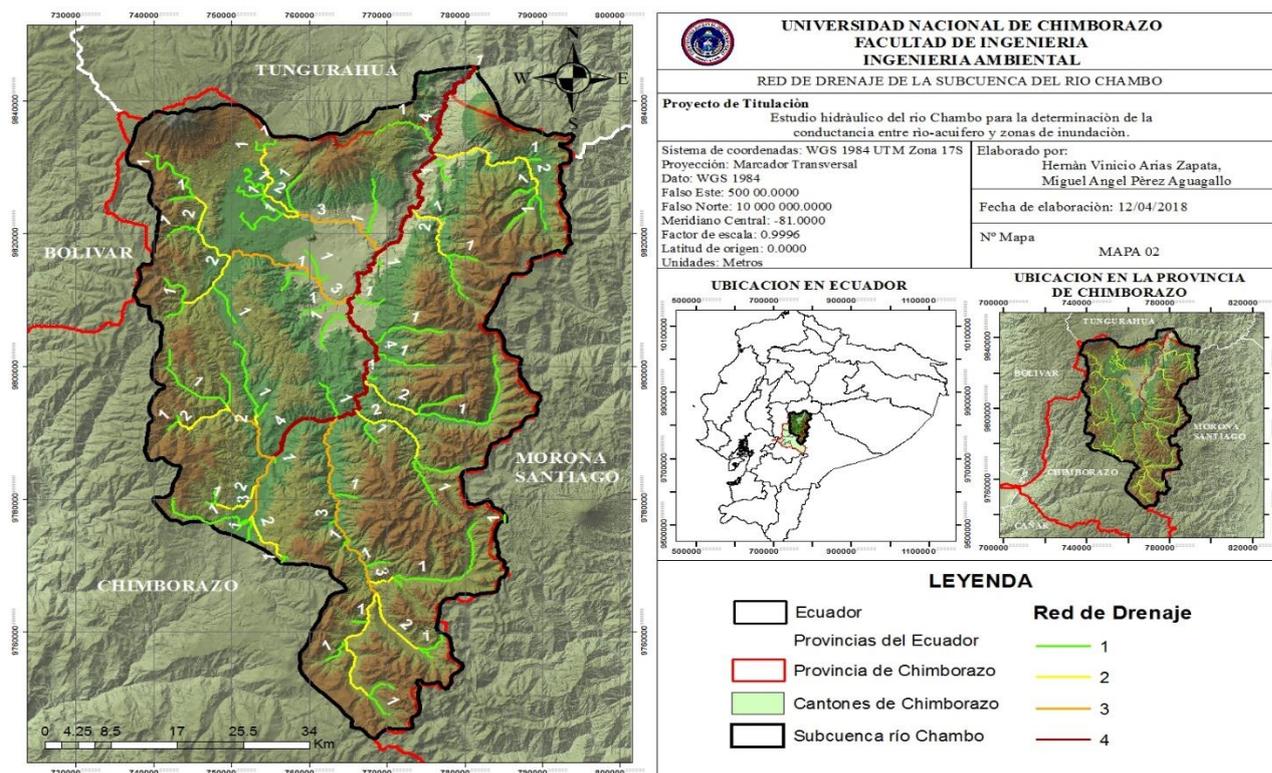


Figura 15. Red de drenaje de la subcuenca del río Chambo.

Elaborado por: Autores.

9.2. Anexo 2. Balance hídrico

Tabla 3. Estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca del río Chambo.

| CODIGO | NOMBRE | X | Y | ALTURA |
|--------|-------------------------------|--------|---------|--------|
| M029 | BAÑOS | 787314 | 9846052 | 1695 |
| M031 | CAÑAR | 728467 | 9717724 | 3083 |
| M126 | PATATE | 776958 | 9869605 | 2220 |
| M127 | PILLARO | 771629 | 9870315 | 2793 |
| M128 | PEDRO FERMIN | 765394 | 9850377 | 2910 |
| M130 | CHILLANES | 715176 | 9781147 | 2330 |
| M133 | GUASLAN | 761698 | 9808190 | 2850 |
| M136 | CHUNCHI | 731106 | 9748469 | 2177 |
| M137 | BIBLIAN | 734157 | 9700012 | 2640 |
| M243 | PUNGALES | 770748 | 9824835 | 2550 |
| M258 | QUEROCHACA | 766205 | 9848380 | 2865 |
| M1069 | CALAMACA CONVENIO INAMHI HGPT | 742705 | 9858860 | 3440 |

Fuente: (INAMHI, 2015).

Tabla 4. Temperatura media mensual (°C).

| ESTACIONES | PERIODOS | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BAÑOS | Primero (1990-1998) | 18.2 | 18.1 | 18.2 | 18.2 | 17.8 | 17.1 | 16.5 | 16.7 | 17.9 | 18.1 | 18.6 | 18.6 |
| | Segundo (1999-2006) | 18.2 | 17.8 | 18.0 | 18.1 | 17.6 | 16.7 | 17.4 | 16.5 | 17.6 | 18.5 | 18.6 | 18.5 |
| | Tercero (2007-2014) | 18.0 | 18.0 | 18.2 | 18.3 | 18.0 | 17.1 | 16.8 | 17.0 | 17.6 | 18.6 | 18.9 | 18.5 |
| CAÑAR | Primero (1990-1998) | 11.7 | 11.7 | 11.8 | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.0 | 11.1 | 11.9 | 11.8 | 11.6 | 11.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 11.8 | 11.8 | 12.0 | 12.3 | 12.5 | 12.0 | 11.7 | 11.6 | 12.2 | 12.3 | 12.2 | 12.1 |
| | Tercer (2007-2014) | 11.7 | 11.5 | 12.0 | 11.8 | 12.1 | 11.9 | 11.6 | 11.5 | 11.9 | 12.0 | 11.8 | 11.6 |
| PATATE | Primero (1990-1998) | 14.5 | 16.1 | 16.1 | 16.2 | 15.7 | 15.0 | 14.4 | 14.2 | 15.2 | 14.8 | 16.9 | 16.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 13.8 | 15.7 | 15.4 | 15.4 | 15.3 | 14.7 | 14.5 | 14.4 | 14.7 | 10.2 | 16.4 | 16.0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Tercer (2007-2014) | 14.3 | 18.4 | 15.8 | 17.1 | 15.6 | 14.4 | 17.5 | 17.0 | 16.2 | 11.1 | 17.4 | 18.6 |
| PILLARO | Primero (1990-1998) | 10.8 | 10.6 | 9.2 | 10.5 | 11.9 | 11.3 | 10.7 | 10.7 | 11.6 | 12.0 | 10.9 | 12.7 |
| | Segundo (1999-2006) | 13.5 | 13.6 | 13.4 | 13.5 | 13.3 | 9.2 | 10.9 | 9.3 | 9.9 | 11.9 | 11.9 | 10.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 13.9 | 13.6 | 15.0 | 15.5 | 14.2 | 13.5 | 13.5 | 14.5 | 11.2 | 11.5 | 12.4 | 12.2 |
| PEDRO FERMIN | Primero (1990-1998) | 13.1 | 13.1 | 13.3 | 13.3 | 13.0 | 12.2 | 11.2 | 11.2 | 12.2 | 12.9 | 13.6 | 13.5 |
| | Segundo (1999-2006) | 13.2 | 13.0 | 12.9 | 13.0 | 12.9 | 11.8 | 11.5 | 11.5 | 12.2 | 13.0 | 13.5 | 13.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 13.2 | 13.3 | 13.3 | 13.2 | 13.0 | 12.1 | 11.7 | 11.6 | 12.0 | 13.4 | 13.9 | 13.6 |
| CHILLANES | Primero (1990-1998) | 13.9 | 14.2 | 14.2 | 14.3 | 14.2 | 13.9 | 13.7 | 14.1 | 14.2 | 14.2 | 14.4 | 14.4 |
| | Segundo (1999-2006) | 14.2 | 14.2 | 14.6 | 14.6 | 14.4 | 13.7 | 13.3 | 13.8 | 13.9 | 14.1 | 14.2 | 14.2 |
| | Tercer (2007-2014) | 13.6 | 13.8 | 14.0 | 14.2 | 14.0 | 13.2 | 12.9 | 12.9 | 13.1 | 13.7 | 13.8 | 13.6 |
| GUASLAN | Primero (1990-1998) | 13.2 | 13.2 | 13.1 | 13.2 | 13.0 | 12.7 | 10.7 | 10.7 | 12.7 | 11.4 | 13.0 | 13.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 11.6 | 13.6 | 11.9 | 13.4 | 9.9 | 11.3 | 12.7 | 12.2 | 12.7 | 11.6 | 13.5 | 11.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 14.9 | 18.1 | 16.4 | 15.3 | 15.6 | 10.7 | 13.7 | 13.1 | 15.9 | 14.3 | 13.0 | 14.1 |
| CHUNCHI | Primero (1990-1998) | 13.9 | 13.9 | 14.1 | 14.2 | 14.5 | 14.6 | 14.6 | 12.8 | 12.8 | 11.2 | 11.0 | 10.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 14.4 | 14.3 | 14.2 | 16.3 | 16.5 | 16.5 | 16.3 | 16.9 | 15.0 | 15.2 | 15.2 | 16.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 14.3 | 15.8 | 14.9 | 13.1 | 14.8 | 14.9 | 15.3 | 15.5 | 17.0 | 16.8 | 13.9 | 16.2 |
| BIBLIAN | Primero (1990-1998) | 15.1 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 14.8 | 14.0 | 12.9 | 13.1 | 14.0 | 14.6 | 15.0 | 15.2 |
| | Segundo (1999-2006) | 15.2 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 14.7 | 13.9 | 13.4 | 13.4 | 13.9 | 14.5 | 14.9 | 15.2 |
| | Tercer (2007-2014) | 14.8 | 14.8 | 14.7 | 14.7 | 14.4 | 13.7 | 13.2 | 13.1 | 13.7 | 14.5 | 15.1 | 14.8 |
| PUNGALES | Primero (1990-1998) | 15.8 | 15.2 | 15.3 | 15.1 | 15.1 | 14.6 | 13.7 | 13.7 | 16.7 | 15.5 | 16.0 | 15.9 |
| | Segundo (1999-2006) | 16.6 | 16.0 | 16.3 | 16.1 | 15.9 | 16.0 | 15.6 | 15.2 | 16.2 | 16.9 | 18.5 | 17.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 17.1 | 16.9 | 16.5 | 16.2 | 15.6 | 16.2 | 16.4 | 15.9 | 18.0 | 19.1 | 18.6 | 17.0 |
| QUEROCHACA | Primero (1990-1998) | 13.3 | 13.3 | 13.4 | 13.4 | 12.9 | 12.1 | 11.1 | 11.1 | 12.2 | 13.1 | 13.8 | 13.7 |
| | Segundo (1999-2006) | 13.3 | 13.1 | 13.0 | 13.0 | 12.8 | 11.8 | 11.5 | 11.3 | 12.2 | 13.2 | 13.6 | 13.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 12.9 | 15.0 | 13.0 | 14.1 | 12.7 | 11.5 | 13.4 | 13.2 | 13.0 | 15.2 | 14.1 | 15.3 |
| CALAMACA | Primero (1990-1998) | 9.6 | 9.2 | 9.9 | 9.6 | 9.5 | 9.3 | 7.7 | 7.6 | 8.5 | 6.3 | 9.9 | 9.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 9.5 | 9.2 | 9.4 | 9.6 | 9.4 | 8.9 | 8.7 | 8.4 | 9.0 | 9.2 | 9.5 | 9.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.4 | 8.7 | 8.3 | 8.1 | 8.1 | 9.3 | 9.6 | 9.6 |

Elaborado por: Autores.

Tabla 5. Precipitación media mensual (mm).

| ESTACIONES | PERIODOS | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| BAÑOS | Primero (1990-1998) | 48.8 | 66.7 | 84.3 | 135.3 | 141.0 | 191.8 | 212.4 | 137.6 | 95.1 | 79.0 | 82.6 | 73.5 |
| | Segundo (1999-2006) | 57.6 | 95.3 | 158.1 | 106.0 | 109.3 | 200.0 | 136.0 | 135.3 | 119.1 | 70.9 | 70.3 | 103.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 75.9 | 50.9 | 78.4 | 113.2 | 150.1 | 176.3 | 168.1 | 137.8 | 93.9 | 68.2 | 64.5 | 67.8 |
| CAÑAR | Primero (1990-1998) | 11.7 | 11.7 | 11.8 | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.0 | 11.1 | 11.9 | 11.8 | 11.6 | 11.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 11.8 | 11.8 | 12.0 | 12.3 | 12.5 | 12.0 | 11.7 | 11.6 | 12.2 | 12.3 | 12.2 | 12.1 |
| | Tercer (2007-2014) | 11.7 | 11.5 | 12.0 | 11.8 | 12.1 | 11.9 | 11.6 | 11.5 | 11.9 | 12.0 | 11.8 | 11.6 |
| PATATE | Primero (1990-1998) | 30.8 | 37.2 | 51.6 | 53.6 | 59.8 | 64.3 | 80.3 | 46.4 | 33.9 | 48.6 | 59.4 | 30.5 |
| | Segundo (1999-2006) | 26.6 | 47.6 | 64.6 | 64.0 | 76.9 | 91.8 | 35.5 | 50.2 | 46.2 | 29.0 | 28.8 | 63.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 38.6 | 43.3 | 52.2 | 79.0 | 82.8 | 80.8 | 67.3 | 60.2 | 40.1 | 60.9 | 40.1 | 50.6 |
| PILLARO | Primero (1990-1998) | 32.5 | 47.9 | 46.0 | 52.4 | 46.7 | 38.0 | 30.8 | 22.7 | 25.3 | 44.3 | 45.8 | 30.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 26.4 | 37.4 | 38.5 | 51.2 | 51.1 | 57.4 | 23.9 | 17.2 | 22.3 | 17.7 | 19.6 | 27.8 |
| | Tercer (2007-2014) | 23.7 | 56.4 | 34.0 | 43.9 | 61.7 | 47.3 | 30.5 | 31.0 | 24.0 | 31.9 | 46.9 | 46.4 |
| PEDRO FERMIN | Primero (1990-1998) | 25.9 | 30.6 | 41.0 | 52.3 | 54.5 | 47.8 | 52.6 | 40.7 | 23.6 | 37.6 | 51.4 | 24.3 |
| | Segundo (1999-2006) | 30.5 | 49.8 | 55.9 | 62.5 | 66.4 | 66.5 | 24.5 | 32.6 | 32.6 | 31.6 | 40.1 | 53.0 |
| | Tercer (2007-2014) | 34.2 | 37.8 | 45.2 | 90.7 | 82.5 | 74.9 | 47.8 | 42.1 | 32.5 | 49.5 | 41.6 | 39.8 |
| CHILLANES | Primero (1990-1998) | 13.9 | 14.2 | 14.2 | 14.3 | 14.2 | 13.9 | 13.7 | 14.1 | 14.2 | 14.2 | 14.4 | 14.4 |
| | Segundo (1999-2006) | 14.2 | 14.2 | 14.6 | 14.6 | 14.4 | 13.7 | 13.3 | 13.8 | 13.9 | 14.1 | 14.2 | 14.2 |
| | Tercer (2007-2014) | 13.6 | 13.8 | 14.0 | 14.2 | 14.0 | 13.2 | 12.9 | 12.9 | 13.1 | 13.7 | 13.8 | 13.6 |
| GUASLAN | Primero (1990-1998) | 31.2 | 56.0 | 78.6 | 86.3 | 61.3 | 38.3 | 27.8 | 15.1 | 23.0 | 62.9 | 49.1 | 37.5 |
| | Segundo (1999-2006) | 40.2 | 54.1 | 73.1 | 89.5 | 88.0 | 57.1 | 19.0 | 21.2 | 25.3 | 28.9 | 44.2 | 37.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 50.3 | 62.1 | 61.7 | 78.0 | 48.6 | 49.3 | 29.9 | 31.6 | 24.0 | 68.6 | 62.4 | 47.1 |
| CHUNCHI | Primero (1990-1998) | 44.1 | 54.4 | 78.1 | 68.4 | 35.3 | 9.4 | 1.6 | 1.7 | 6.0 | 12.9 | 20.2 | 34.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 22.2 | 66.3 | 88.0 | 82.4 | 31.5 | 24.4 | 7.3 | 6.1 | 11.5 | 14.6 | 21.2 | 43.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 83.0 | 101.4 | 97.6 | 97.1 | 44.4 | 20.0 | 8.9 | 9.1 | 13.6 | 19.5 | 27.0 | 41.1 |
| | Primero (1990-1998) | 15.1 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 14.8 | 14.0 | 12.9 | 13.1 | 14.0 | 14.6 | 15.0 | 15.2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| BIBLIAN | Segundo (1999-2006) | 15.2 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 14.7 | 13.9 | 13.4 | 13.4 | 13.9 | 14.5 | 14.9 | 15.2 |
| | Tercer (2007-2014) | 14.8 | 14.8 | 14.7 | 14.7 | 14.4 | 13.7 | 13.2 | 13.1 | 13.7 | 14.5 | 15.1 | 14.8 |
| PUNGALES | Primero (1990-1998) | 46.5 | 43.9 | 62.6 | 67.4 | 54.7 | 49.9 | 35.7 | 19.5 | 26.1 | 41.2 | 50.4 | 37.4 |
| | Segundo (1999-2006) | 34.0 | 29.1 | 43.2 | 42.0 | 43.2 | 34.2 | 15.0 | 6.4 | 19.3 | 54.1 | 33.0 | 67.6 |
| QUEROCHACA | Primero (1990-1998) | 31.7 | 37.1 | 47.0 | 64.0 | 59.8 | 60.5 | 66.2 | 41.5 | 26.6 | 41.8 | 55.6 | 28.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 32.7 | 52.0 | 57.7 | 65.3 | 72.3 | 76.0 | 36.0 | 35.2 | 38.1 | 34.9 | 41.8 | 54.7 |
| CALAMACA | Primero (1990-1998) | 63.0 | 72.7 | 109.7 | 55.3 | 64.7 | 53.0 | 108.0 | 51.1 | 27.7 | 59.0 | 64.2 | 46.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 41.0 | 59.6 | 71.4 | 73.6 | 68.6 | 71.0 | 43.3 | 43.5 | 41.1 | 31.0 | 44.2 | 63.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 71.8 | 59.4 | 76.1 | 81.8 | 75.1 | 106.3 | 85.2 | 59.9 | 44.6 | 49.4 | 54.1 | 72.5 |

Elaborado por: Autores.

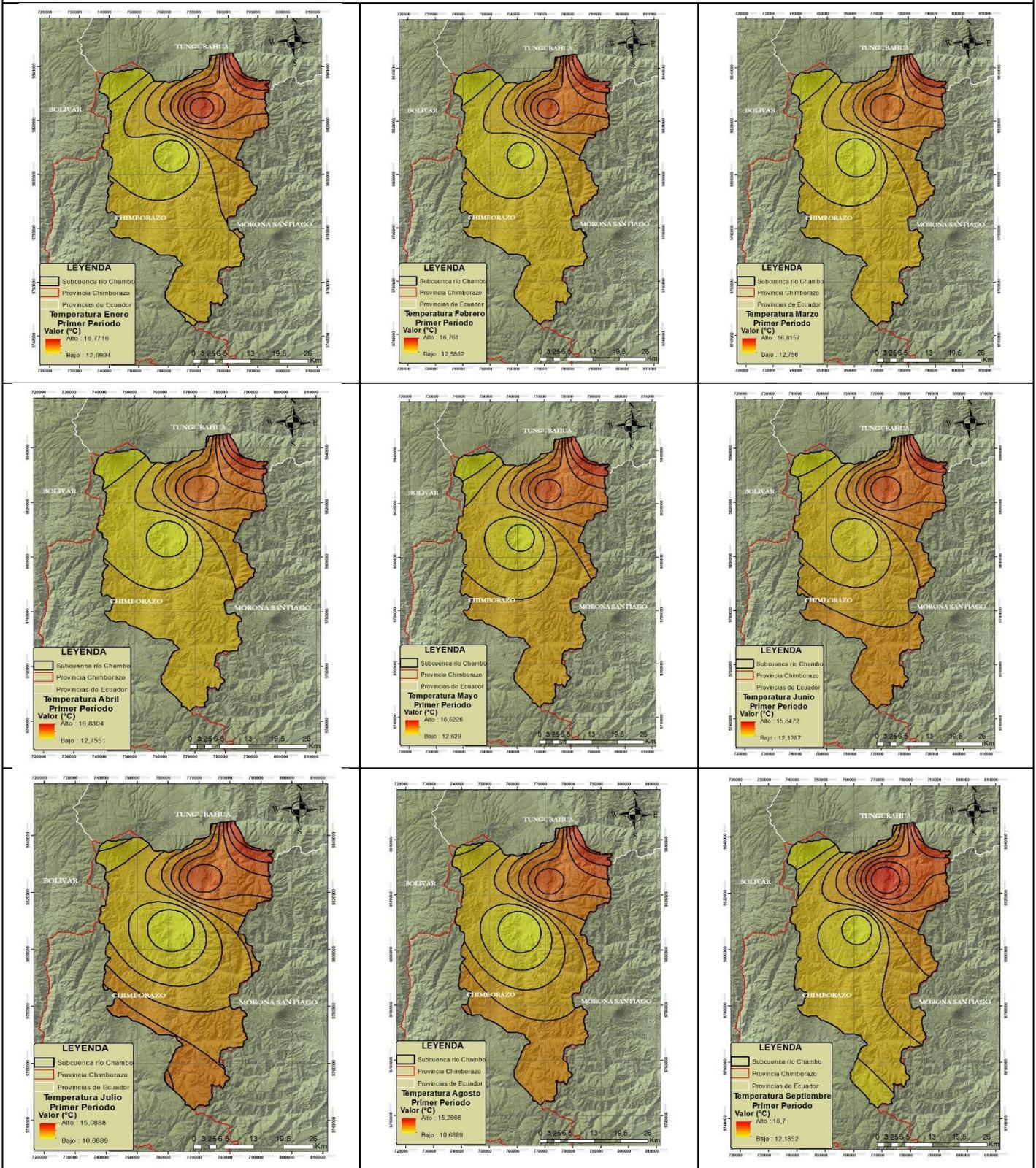
Tabla 6. Evapotranspiración media mensual (mm/mes).

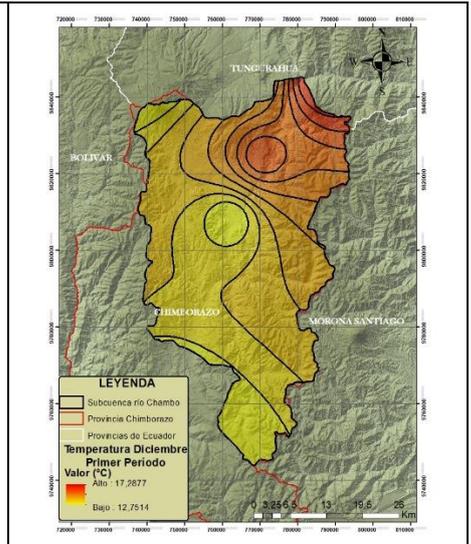
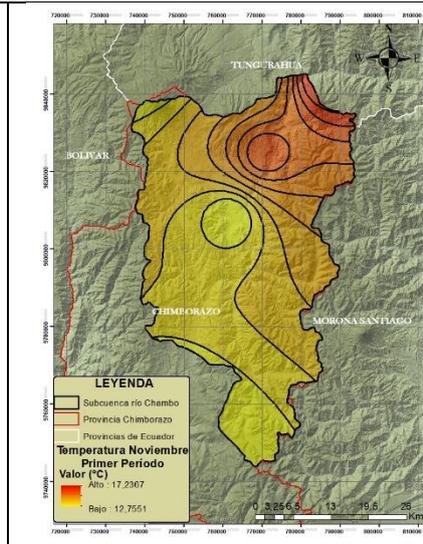
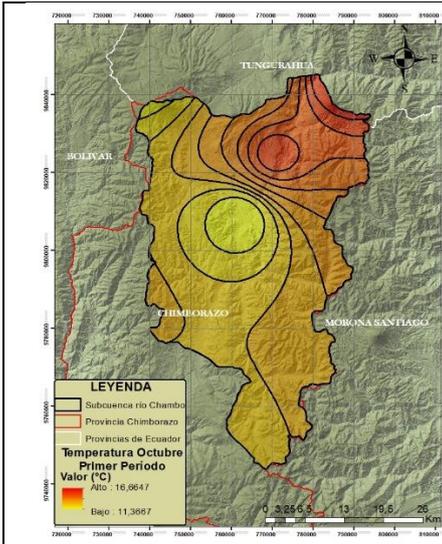
| ESTACIÓN | PERIODO | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| BAÑOS | Primero (1990-1998) | 7.0 | 6.3 | 7.1 | 6.9 | 6.8 | 6.1 | 5.9 | 6.0 | 6.7 | 7.0 | 7.1 | 7.4 |
| | Segundo (1999-2006) | 7.1 | 6.1 | 7.0 | 6.8 | 6.7 | 5.9 | 6.5 | 5.9 | 6.4 | 7.3 | 7.1 | 7.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 6.9 | 6.2 | 7.0 | 6.9 | 6.9 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.4 | 7.3 | 7.3 | 7.2 |
| CAÑAR | Primero (1990-1998) | 5.4 | 4.8 | 5.4 | 5.4 | 5.6 | 5.3 | 5.0 | 5.0 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.4 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.3 | 4.8 | 5.4 | 5.4 | 5.6 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.6 | 5.3 | 5.5 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.3 | 4.7 | 5.5 | 5.3 | 5.6 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.2 | 5.3 |
| PATATE | Primero (1990-1998) | 5.5 | 5.9 | 6.5 | 6.3 | 6.3 | 5.7 | 5.5 | 5.4 | 5.8 | 5.7 | 6.8 | 6.9 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.4 | 5.9 | 6.4 | 6.1 | 6.3 | 5.8 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 3.5 | 6.7 | 6.7 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.2 | 7.0 | 6.0 | 6.7 | 5.9 | 5.1 | 7.1 | 6.9 | 6.1 | 3.4 | 6.9 | 7.9 |
| PILLARO | Primero (1990-1998) | 5.1 | 4.5 | 4.3 | 4.8 | 5.7 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 5.4 | 5.8 | 5.0 | 6.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 6.3 | 5.8 | 6.3 | 6.1 | 6.2 | 3.9 | 4.9 | 4.0 | 4.2 | 5.4 | 5.3 | 4.6 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.9 | 5.2 | 6.6 | 6.7 | 6.1 | 5.5 | 5.7 | 6.3 | 4.3 | 4.6 | 4.9 | 5.0 |
| PEDRO FERMIN | Primero (1990-1998) | 5.8 | 5.2 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.1 | 4.7 | 4.7 | 5.1 | 5.6 | 5.8 | 6.0 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.8 | 5.1 | 5.6 | 5.5 | 5.7 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.7 | 5.8 | 6.0 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.8 | 5.2 | 5.8 | 5.6 | 5.7 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.9 | 6.0 | 6.0 |
| CHILLANES | Primero (1990-1998) | 5.7 | 5.3 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 5.5 | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 5.8 | 6.0 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.9 | 5.3 | 6.1 | 5.9 | 6.0 | 5.4 | 5.4 | 5.6 | 5.5 | 5.8 | 5.7 | 5.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.7 | 5.3 | 6.0 | 5.9 | 5.9 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.8 | 5.7 | 5.7 |
| GUASLAN | Primero (1990-1998) | 5.9 | 5.3 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 5.4 | 4.5 | 4.5 | 5.4 | 4.9 | 5.6 | 5.8 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.1 | 5.6 | 5.3 | 5.9 | 4.2 | 4.8 | 5.7 | 5.4 | 5.5 | 5.1 | 6.0 | 5.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 6.1 | 7.3 | 7.0 | 6.2 | 6.5 | 3.6 | 5.4 | 5.0 | 6.5 | 5.7 | 4.8 | 5.6 |
| CHUNCHI | Primero (1990-1998) | 6.0 | 5.4 | 6.1 | 6.0 | 6.3 | 6.2 | 6.4 | 5.4 | 5.2 | 4.5 | 4.3 | 4.3 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.4 | 4.9 | 5.3 | 6.4 | 6.7 | 6.5 | 6.6 | 6.9 | 5.6 | 5.9 | 5.7 | 6.9 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.5 | 5.8 | 5.9 | 4.7 | 5.8 | 5.7 | 6.1 | 6.2 | 6.9 | 7.1 | 5.1 | 6.7 |
| BIBLIAN | Primero (1990-1998) | 6.2 | 5.6 | 6.3 | 6.1 | 6.1 | 5.5 | 5.0 | 5.1 | 5.4 | 5.9 | 6.0 | 6.3 |
| | Segundo (1999-2006) | 6.3 | 5.6 | 6.2 | 6.0 | 6.0 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.4 | 5.9 | 6.0 | 6.3 |
| | Tercer (2007-2014) | 6.1 | 5.6 | 6.1 | 5.9 | 5.9 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.4 | 6.0 | 6.1 | 6.1 |
| PUNGALES | Primero (1990-1998) | 6.4 | 5.5 | 6.1 | 5.8 | 6.0 | 5.6 | 5.2 | 5.2 | 6.8 | 6.2 | 6.3 | 6.5 |
| | Segundo (1999-2006) | 6.5 | 5.5 | 6.3 | 6.0 | 6.1 | 5.9 | 5.8 | 5.6 | 6.0 | 6.7 | 7.5 | 7.4 |
| | Tercer (2007-2014) | 6.6 | 5.9 | 6.2 | 5.8 | 5.7 | 5.8 | 6.2 | 5.8 | 7.0 | 8.0 | 7.4 | 6.6 |
| QUEROCHACA | Primero (1990-1998) | 5.8 | 5.2 | 5.9 | 5.7 | 5.6 | 5.0 | 4.6 | 4.7 | 5.1 | 5.7 | 5.9 | 6.1 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.9 | 5.2 | 5.7 | 5.5 | 5.6 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 5.1 | 5.8 | 5.9 | 6.0 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.3 | 5.9 | 5.4 | 5.8 | 5.2 | 4.4 | 5.6 | 5.4 | 5.2 | 6.6 | 5.8 | 6.7 |
| CALAMACA | Primero (1990-1998) | 5.3 | 4.6 | 5.5 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 4.3 | 4.2 | 4.6 | 3.5 | 5.3 | 5.0 |
| | Segundo (1999-2006) | 5.2 | 4.5 | 5.1 | 5.0 | 5.1 | 4.7 | 4.7 | 4.5 | 4.7 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| | Tercer (2007-2014) | 5.1 | 4.7 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 4.6 | 4.5 | 4.4 | 4.3 | 5.1 | 5.1 | 5.2 |

Elaborado por: Autores.

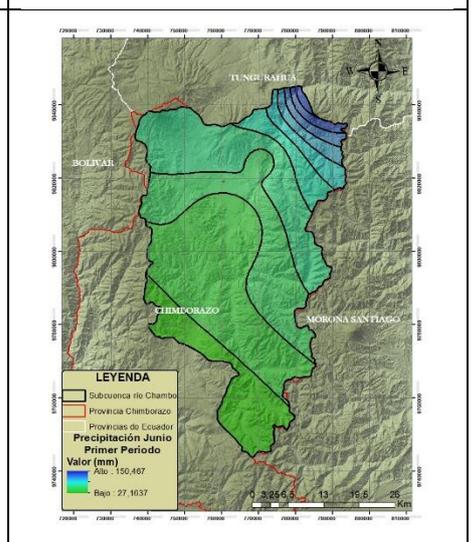
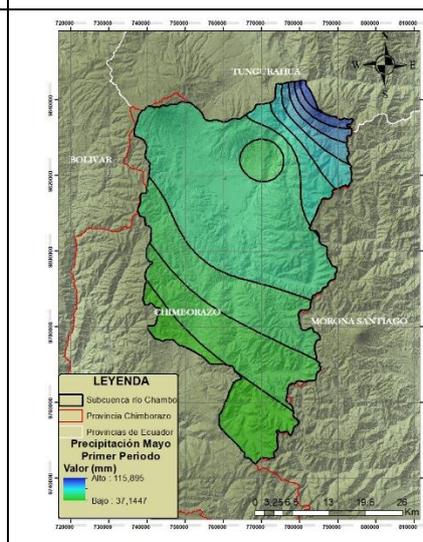
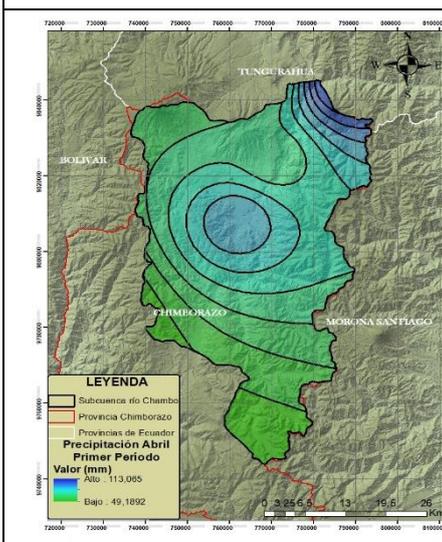
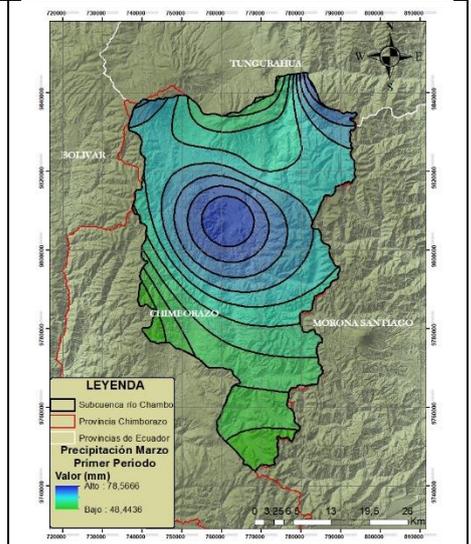
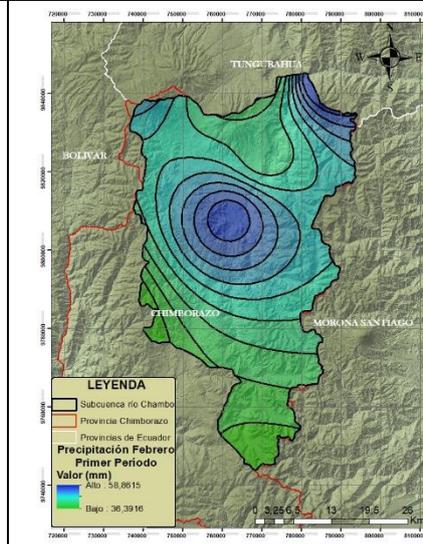
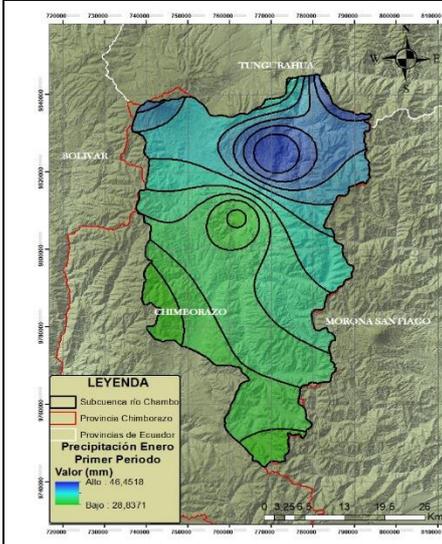
MAPAS DEL BALANCE HÍDRICO PRIMER PERIODO (1990-1998)

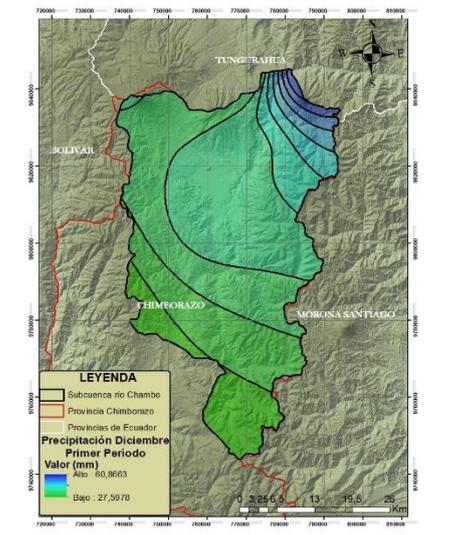
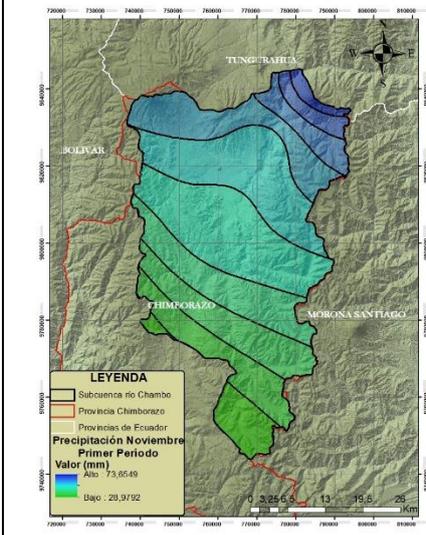
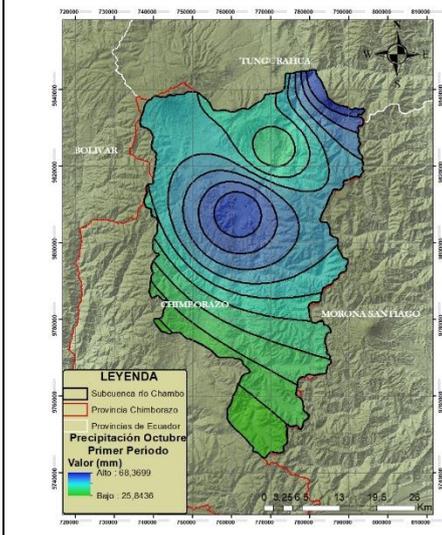
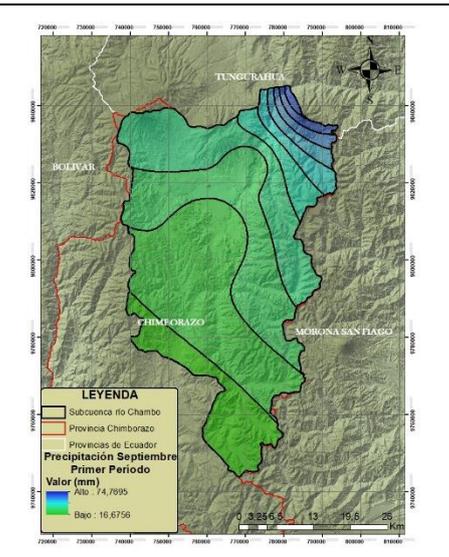
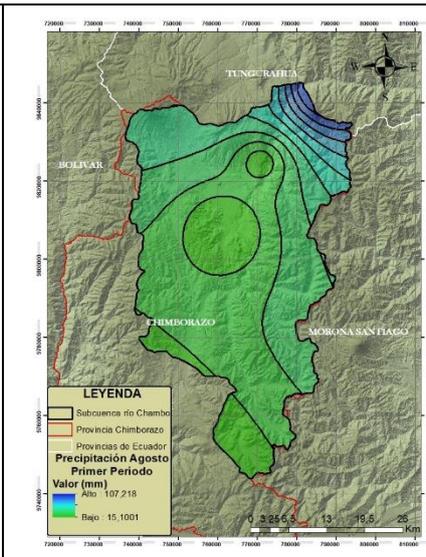
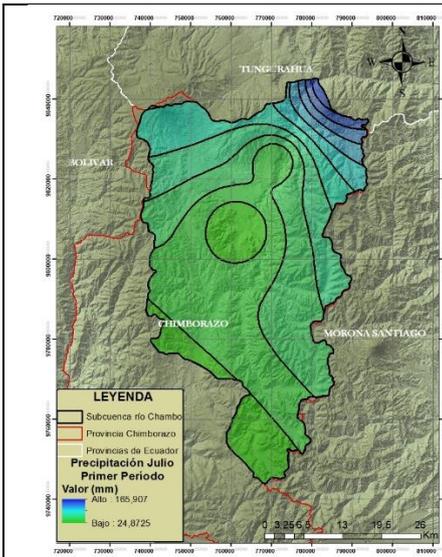
TEMPERATURA



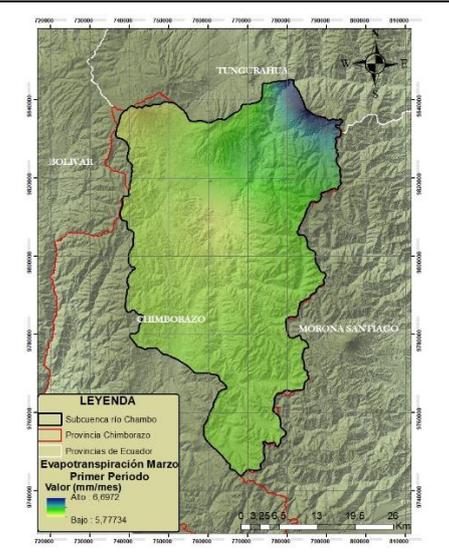
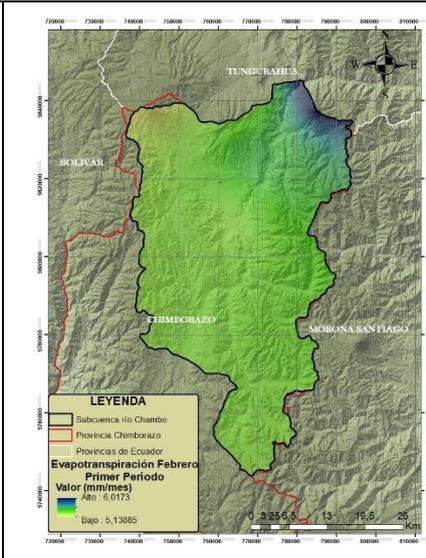
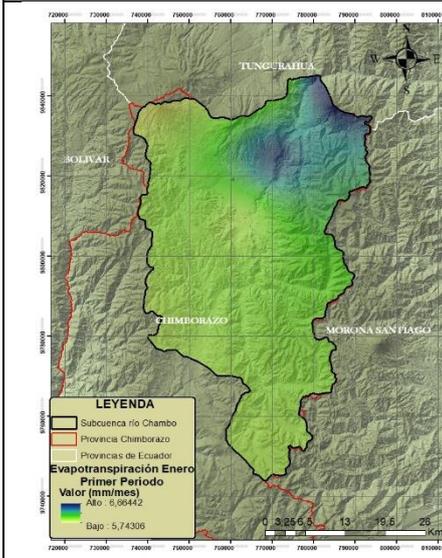


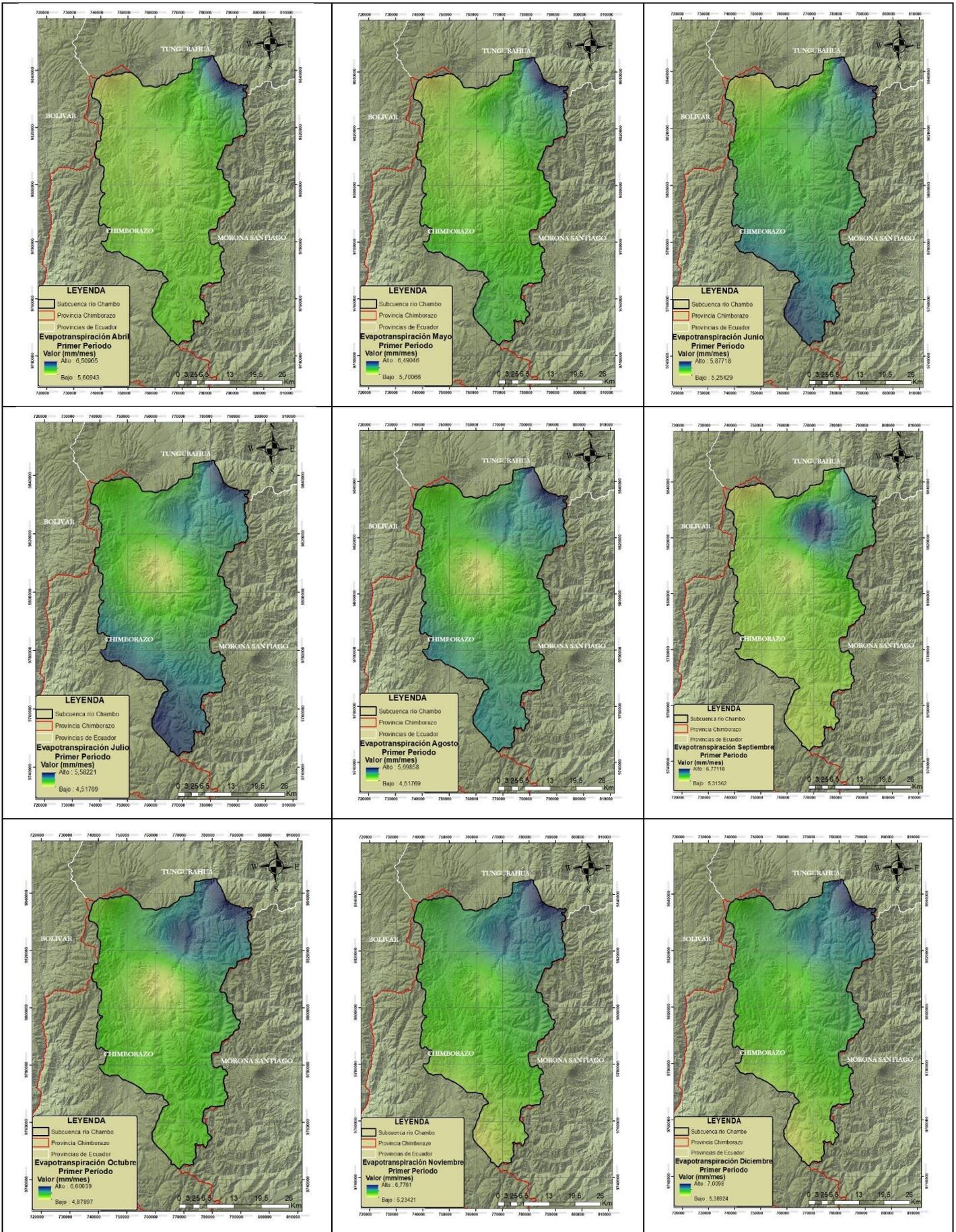
PRECIPITACIÓN



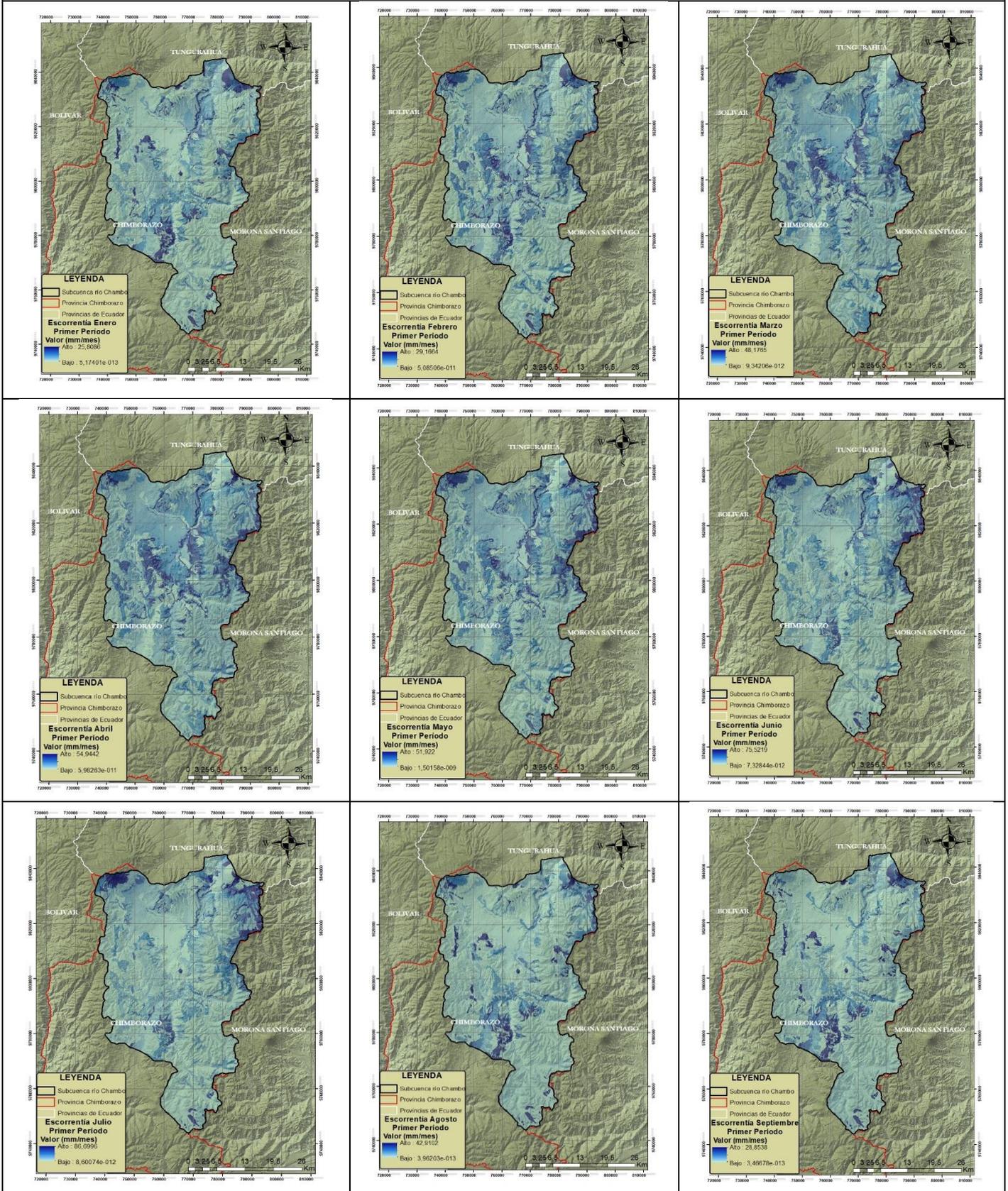


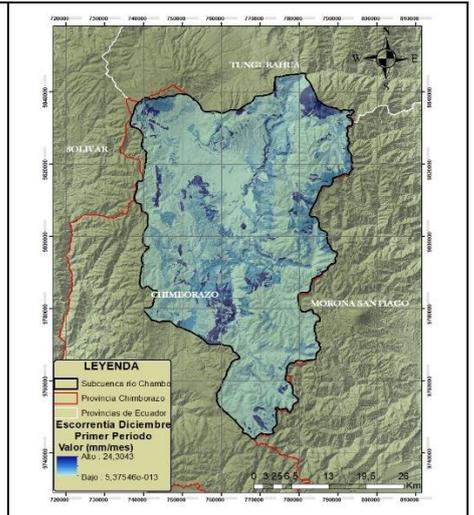
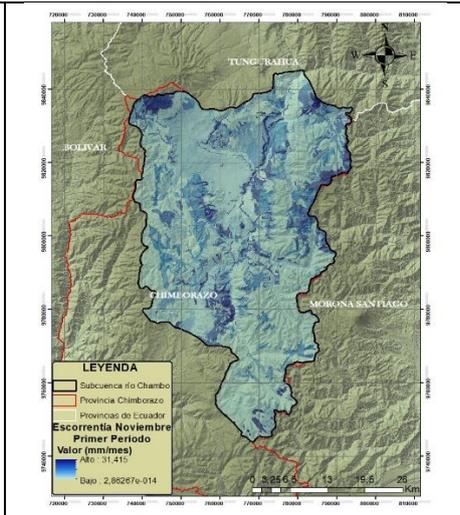
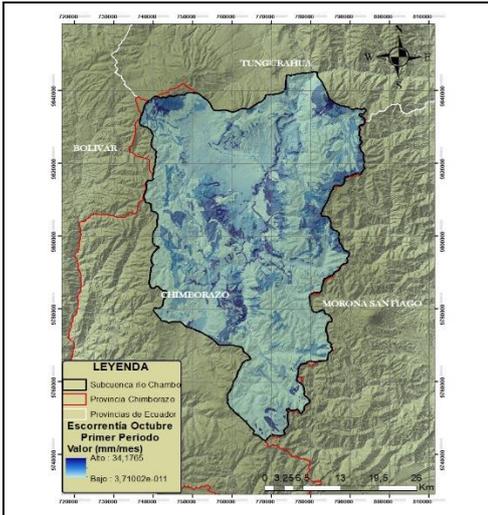
EVAPOTRANSPIRACIÓN



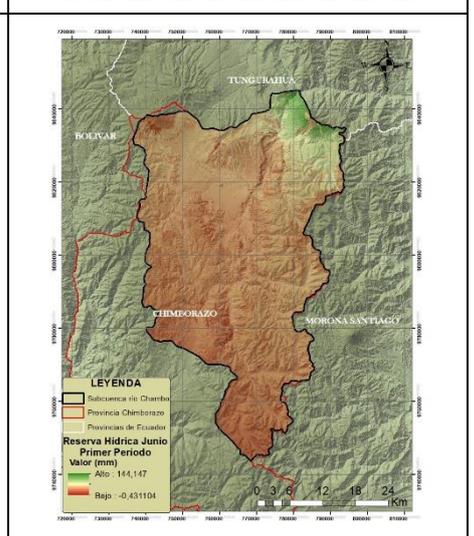
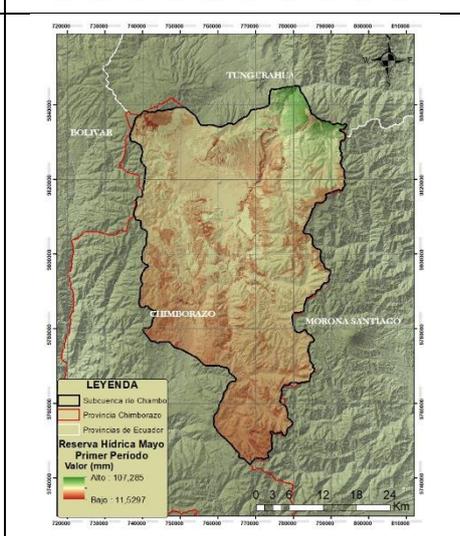
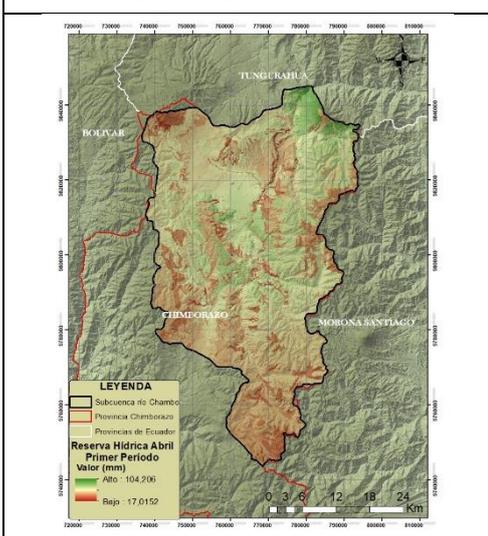
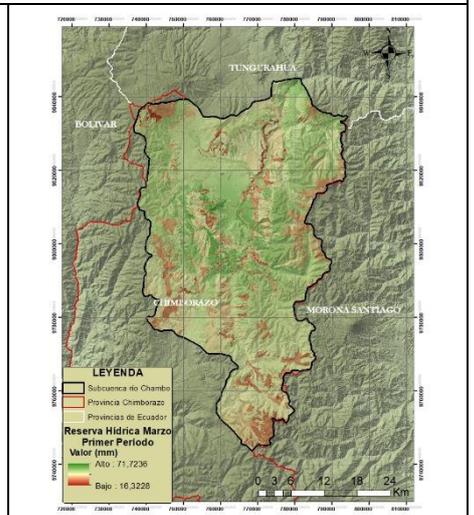
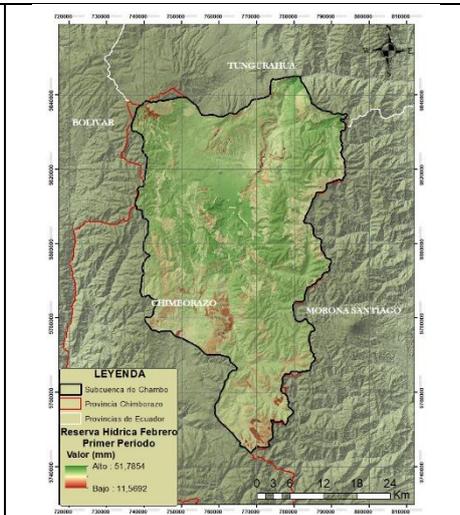
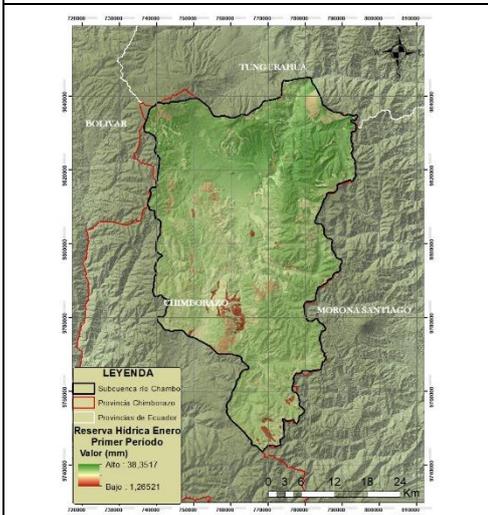


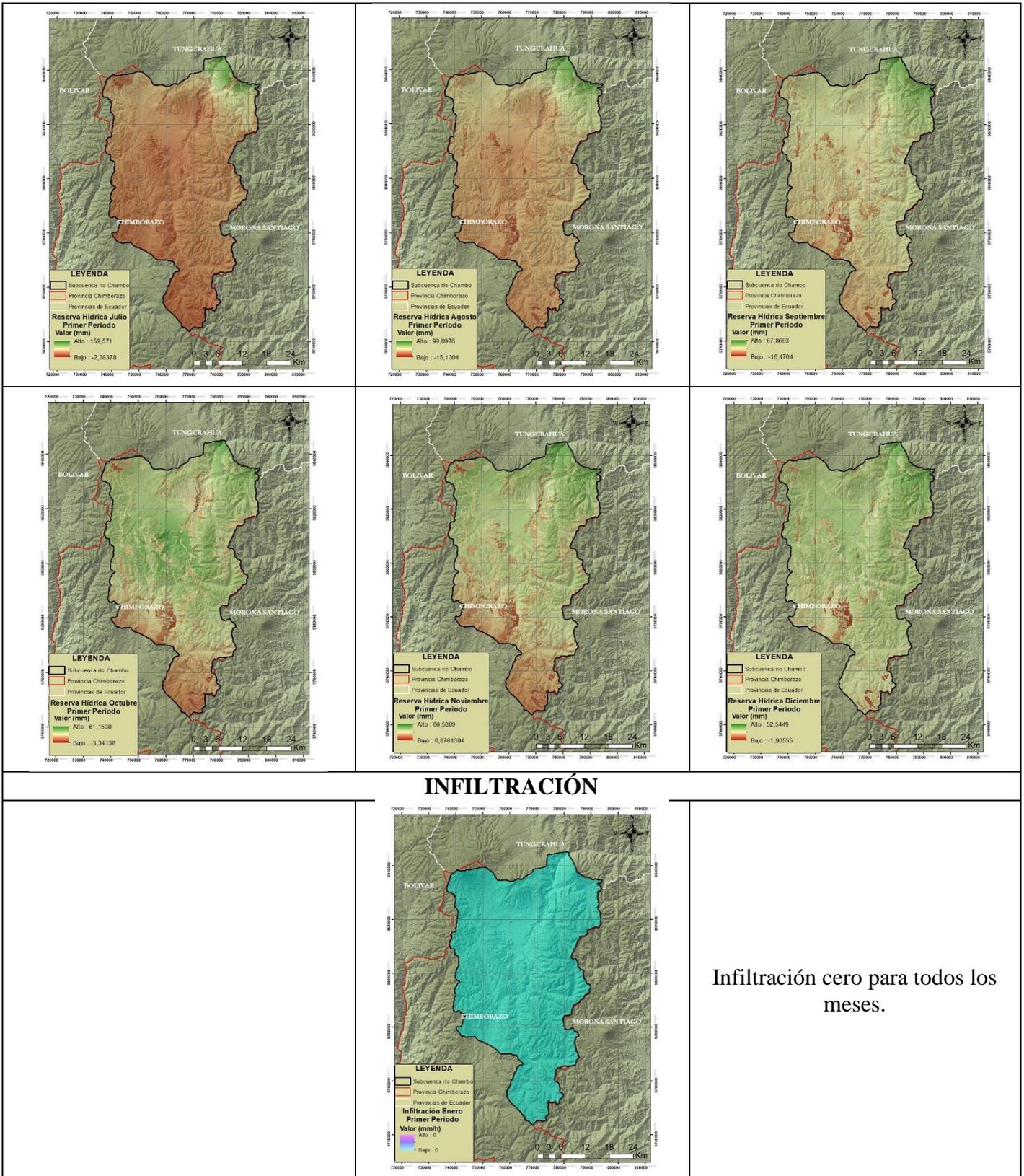
ESCORRENTÍA





RESERVA HÍDRICA





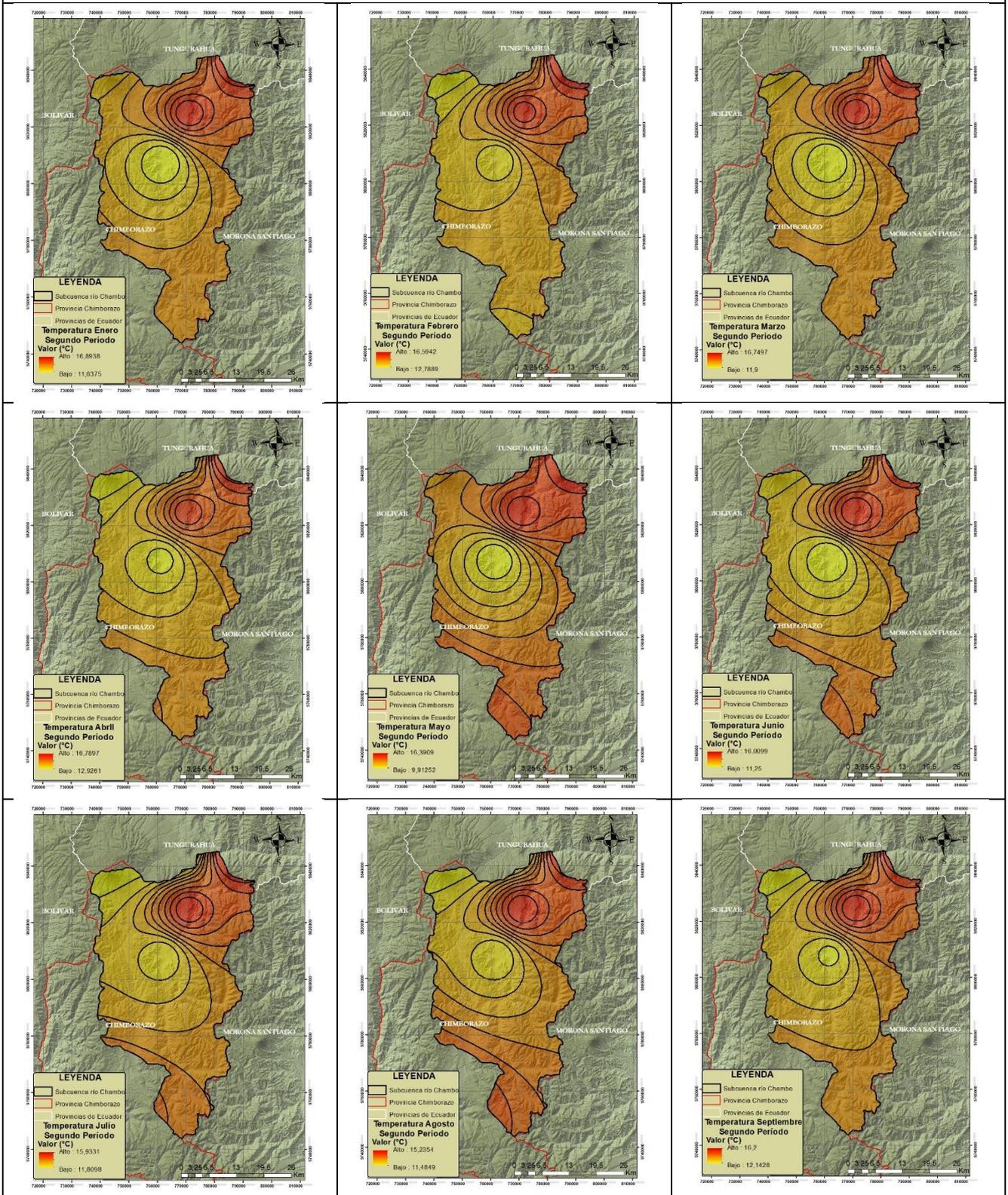
Infiltración cero para todos los meses.

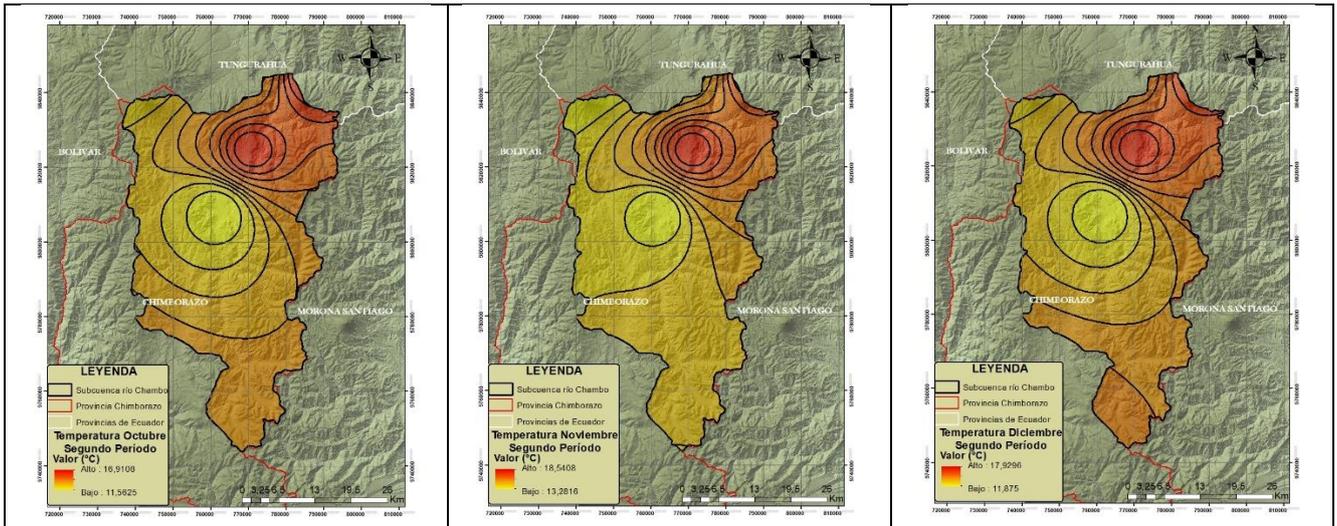
Figura 16. Mapas del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al primer periodo (1990-1998)

Elaborado por: Autores.

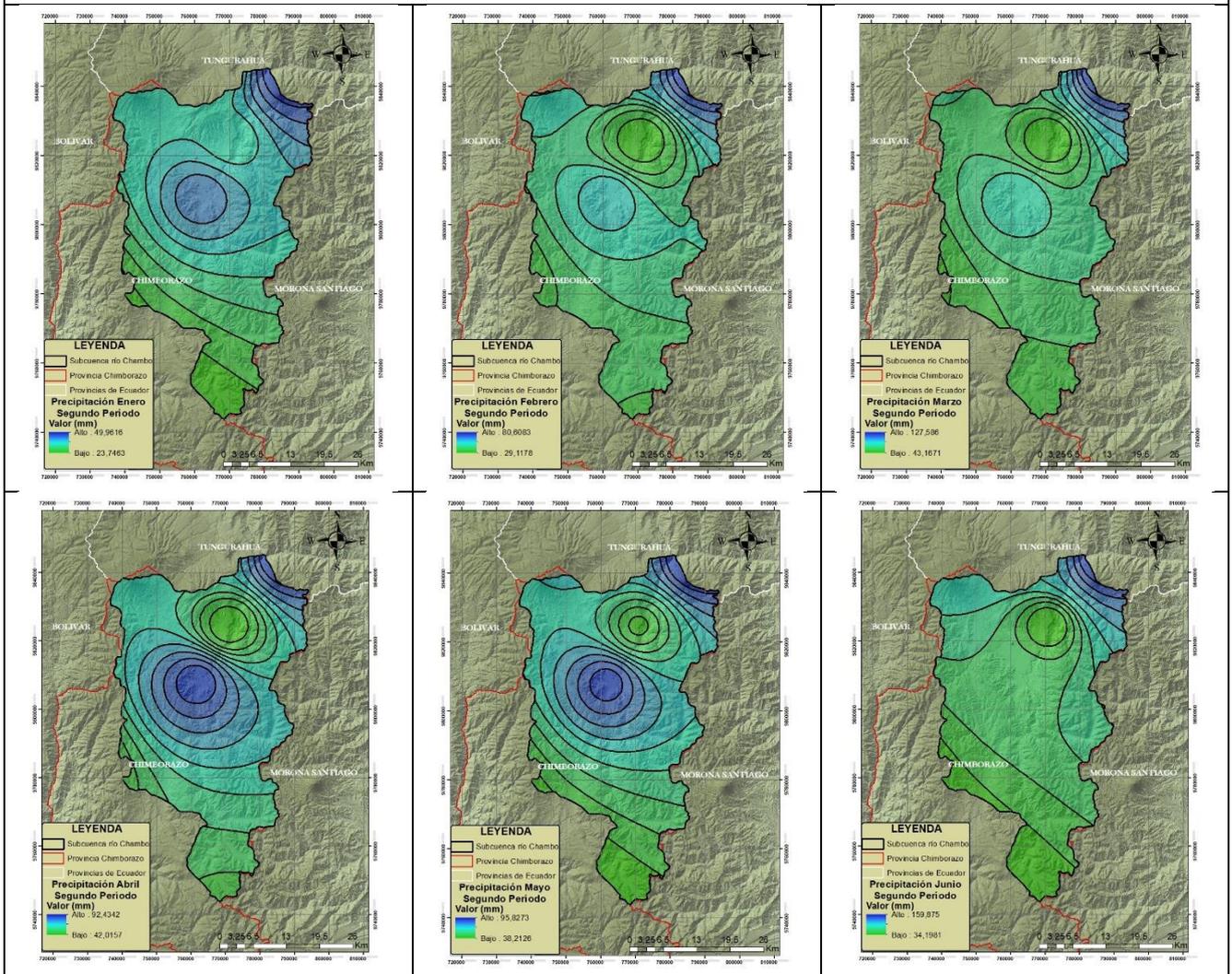
MAPAS DEL BALANCE HÍDRICO SEGUNDO PERIODO (1999-2006)

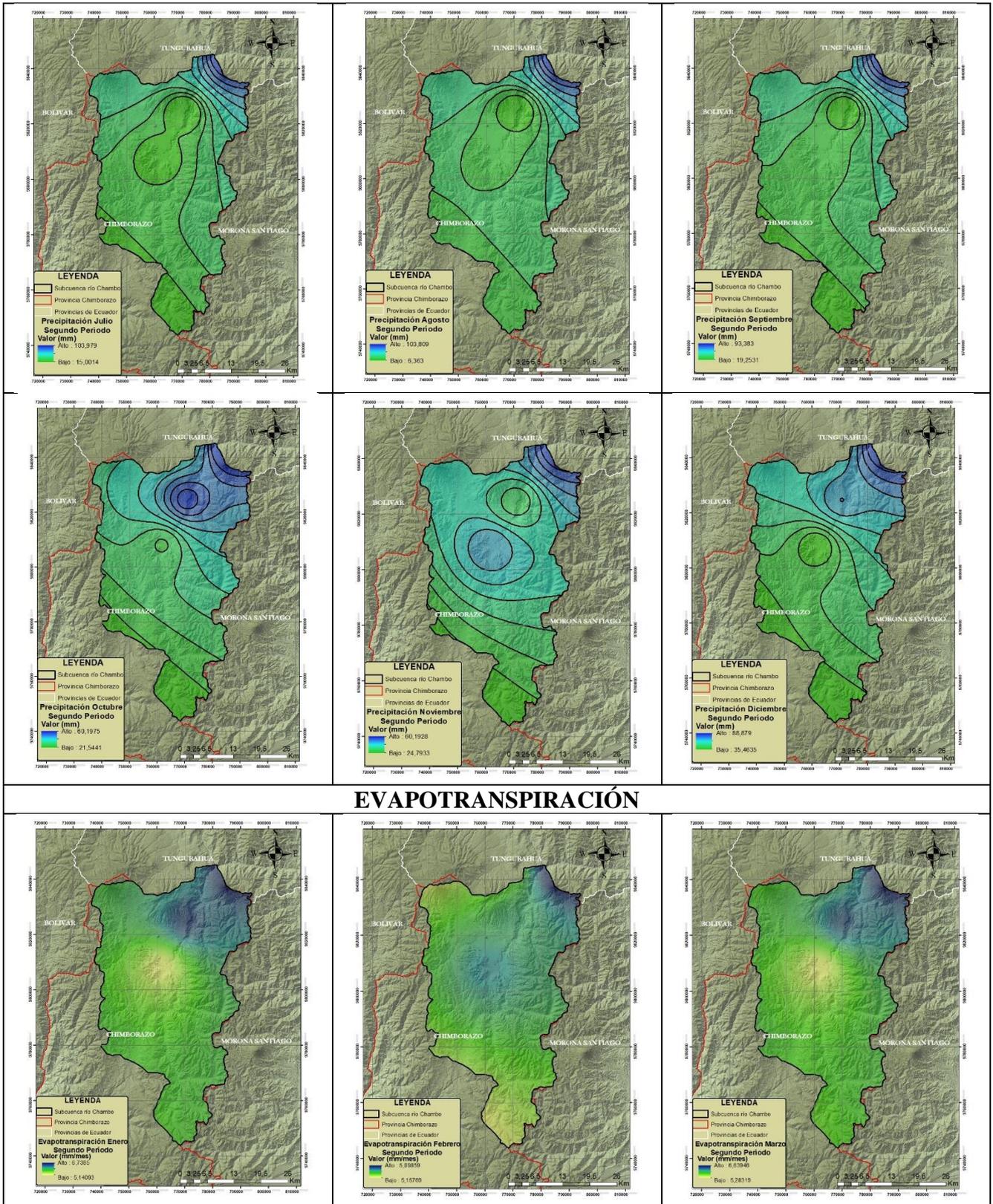
TEMPERATURA

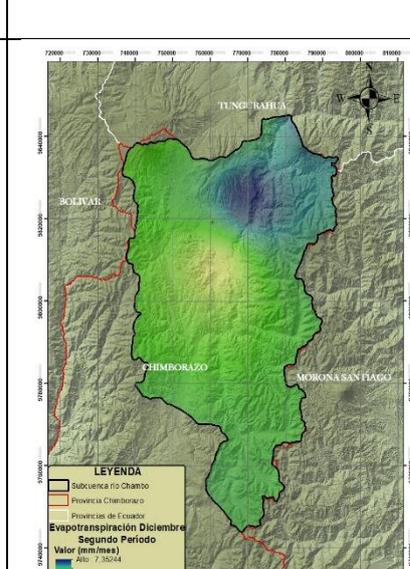
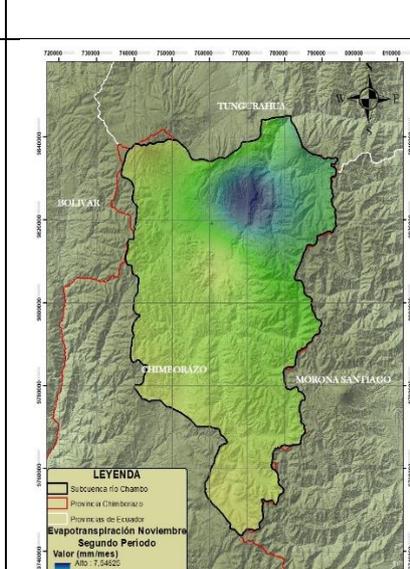
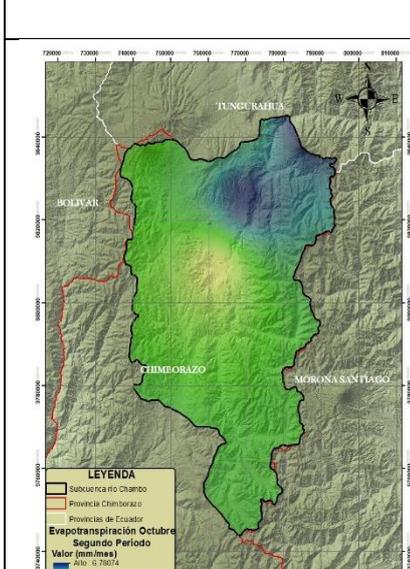
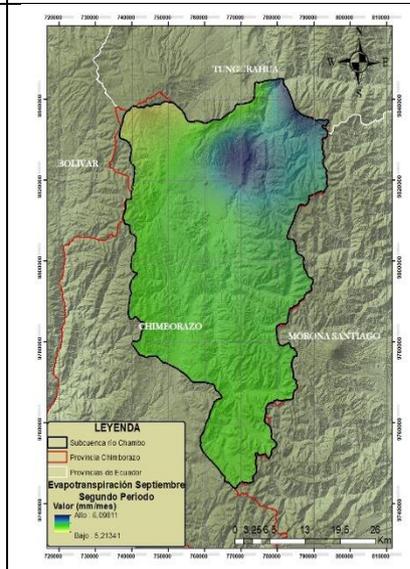
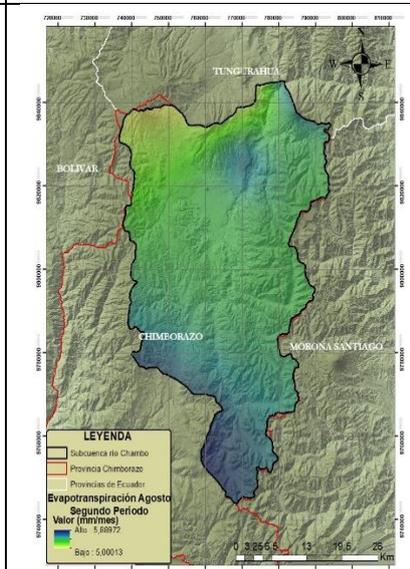
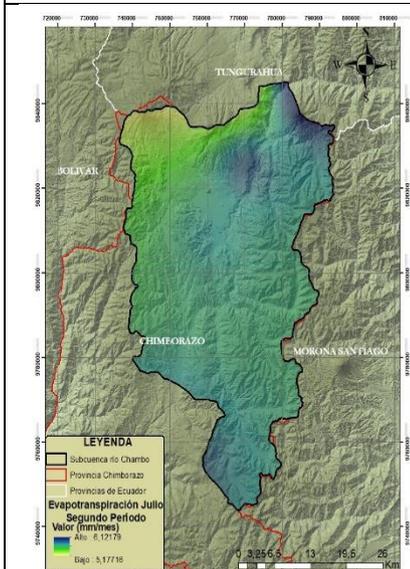
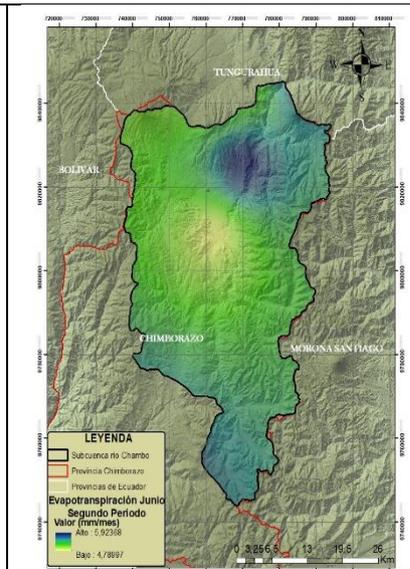
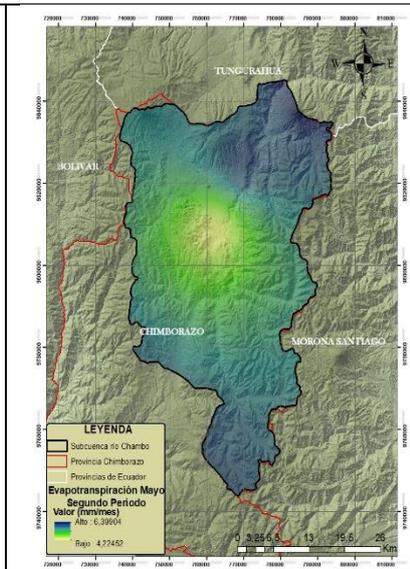
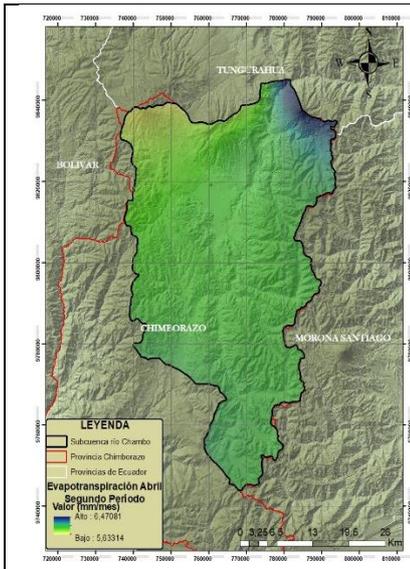




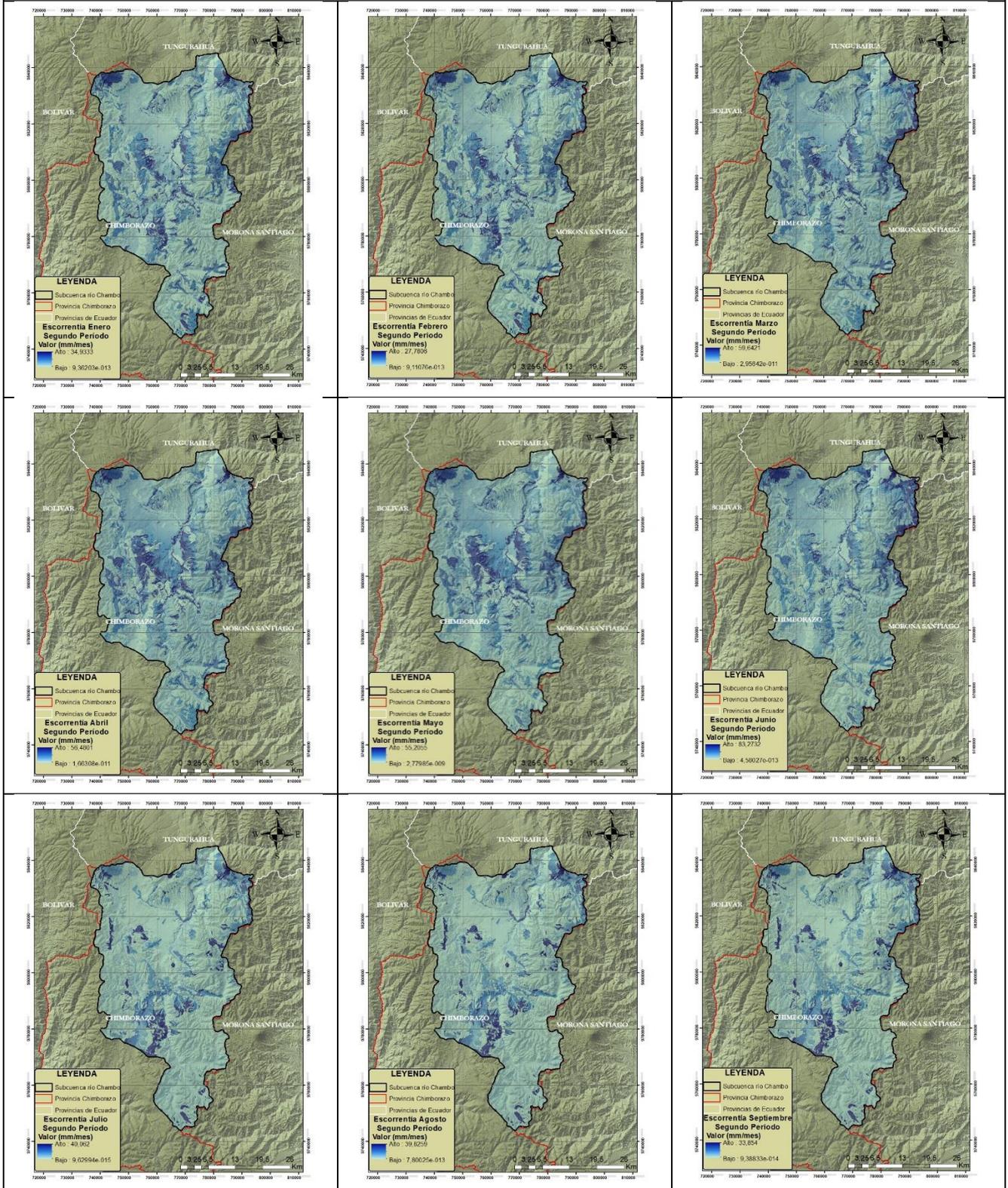
PRECIPITACIÓN

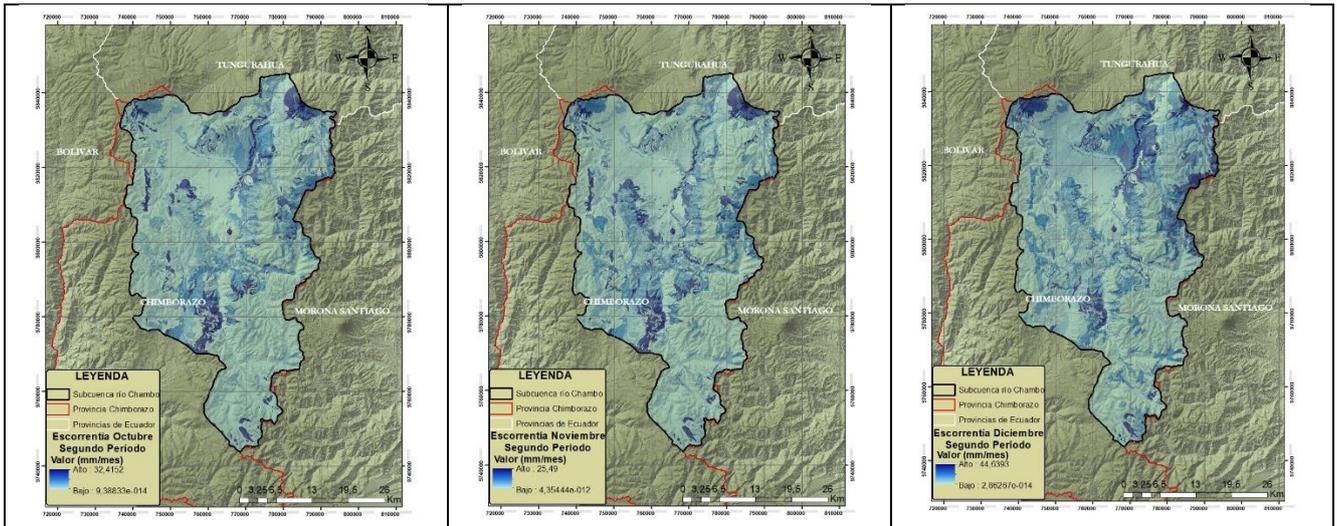




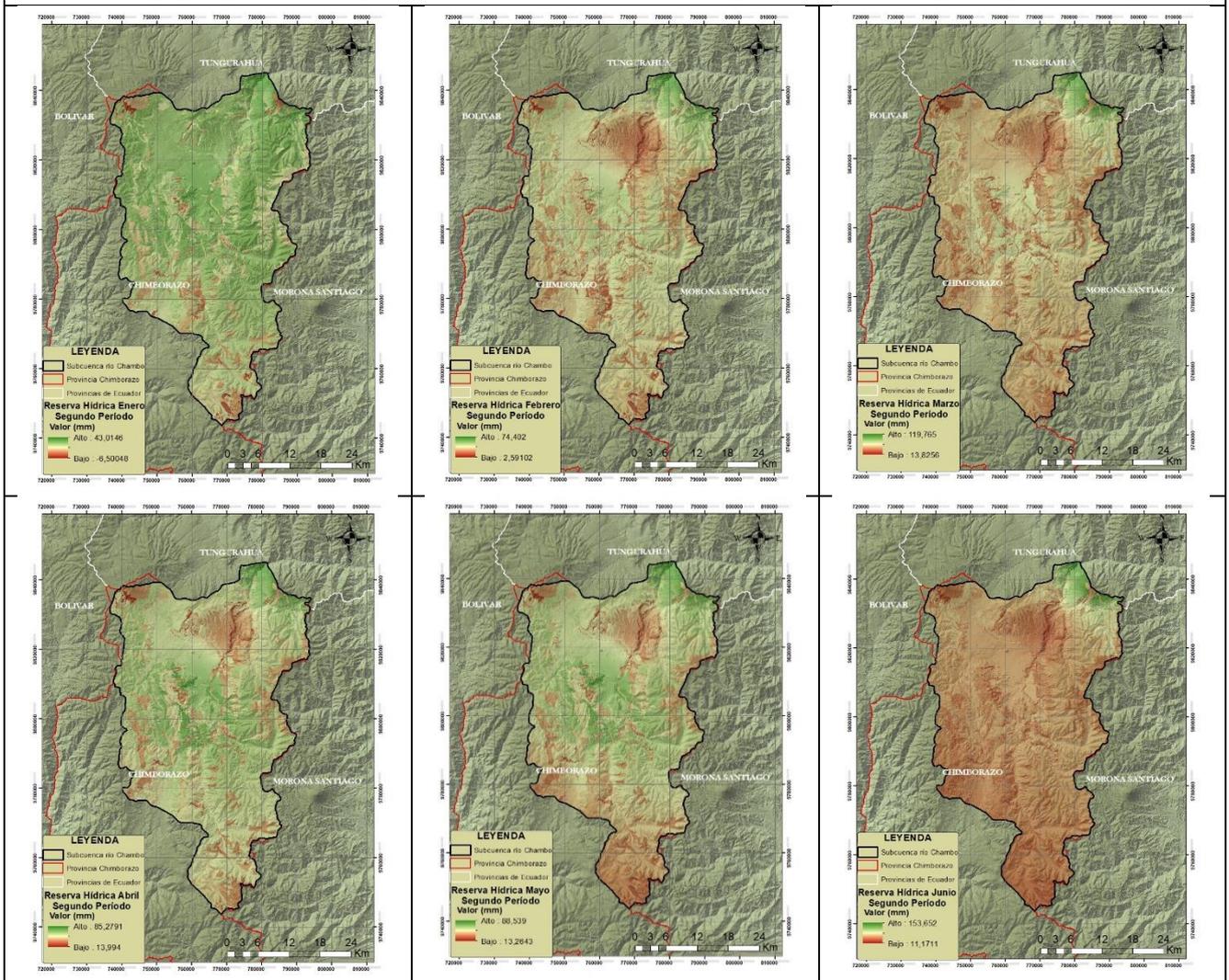


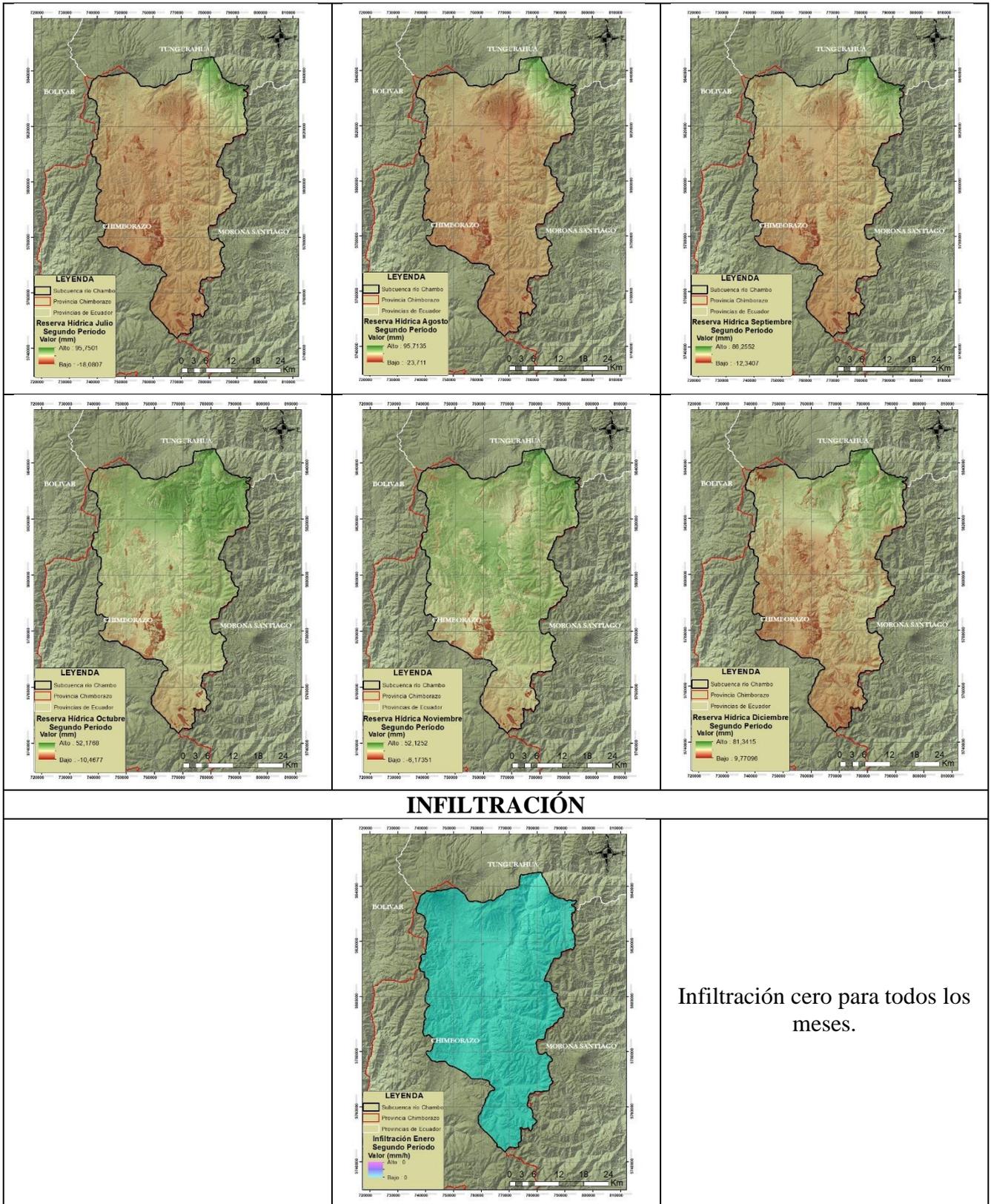
ESCORRENTÍA





RESERVA HÍDRICA





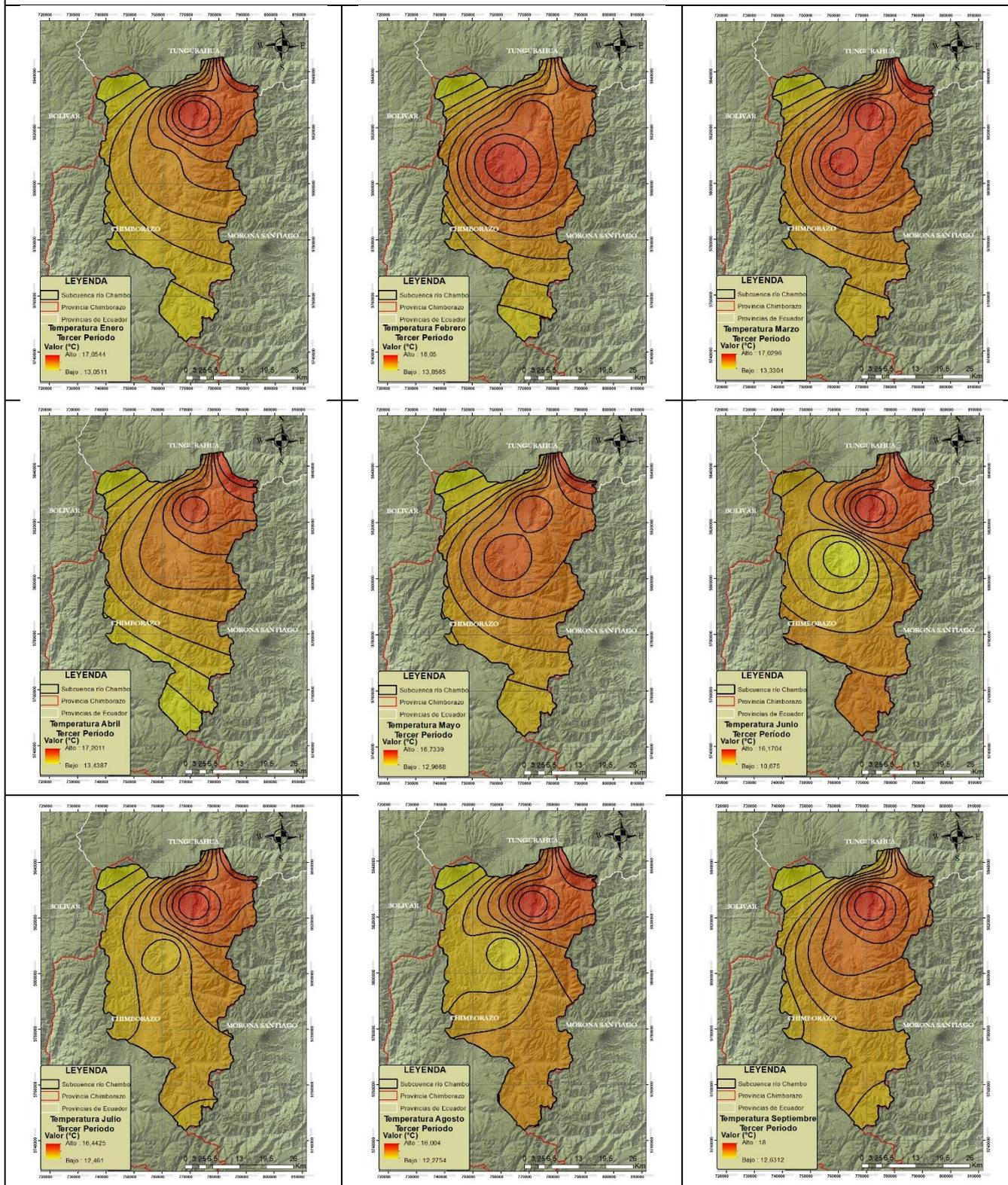
Infiltración cero para todos los meses.

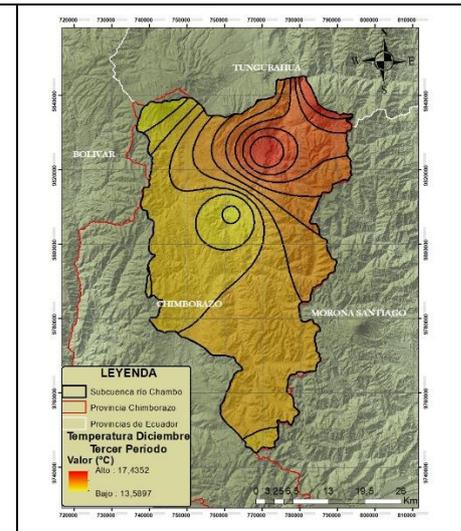
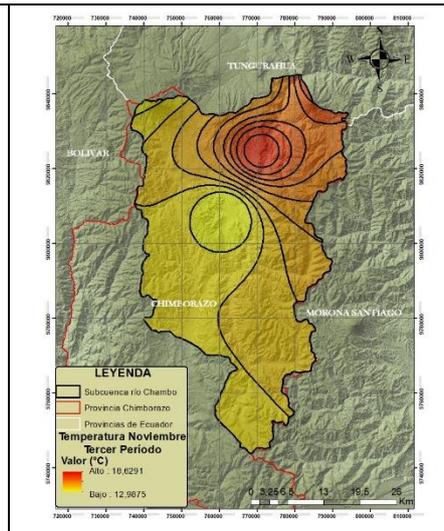
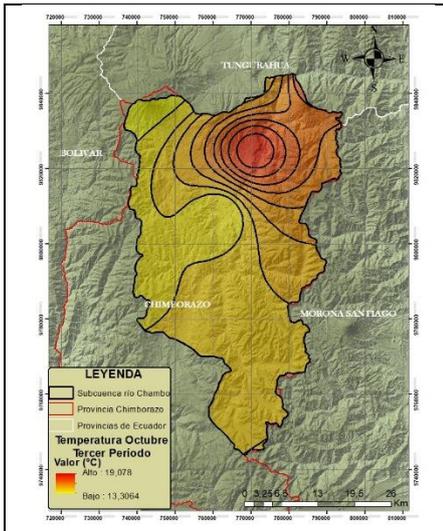
Figura 17. Mapas del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al segundo periodo (1999-2006).

Elaborado por: Autores.

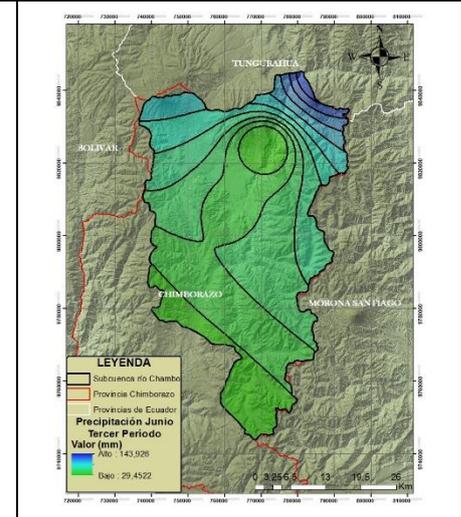
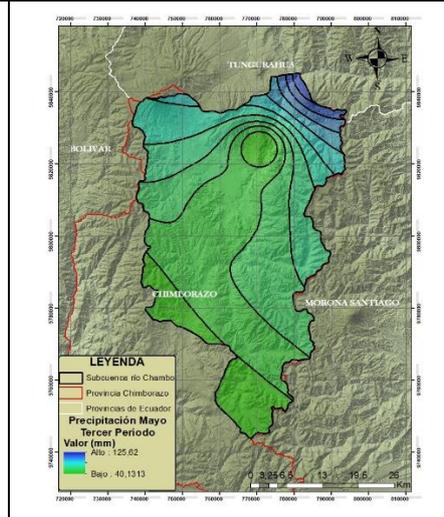
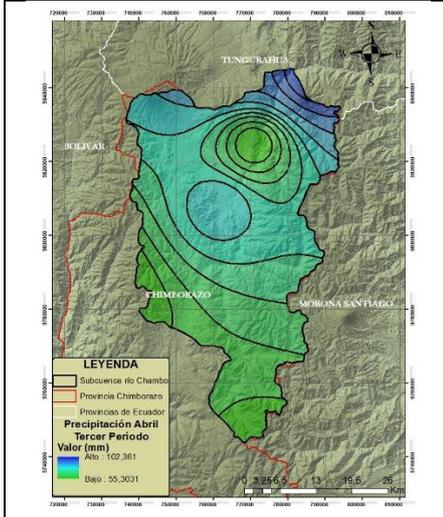
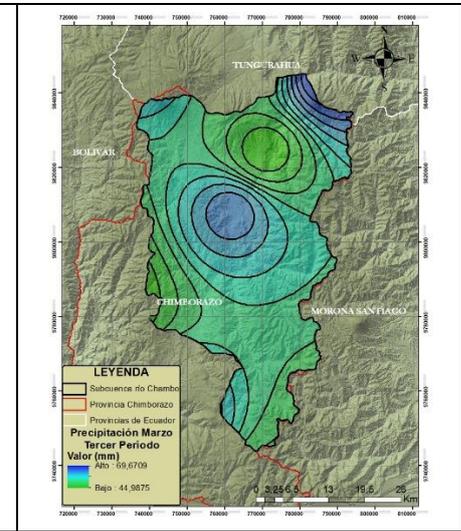
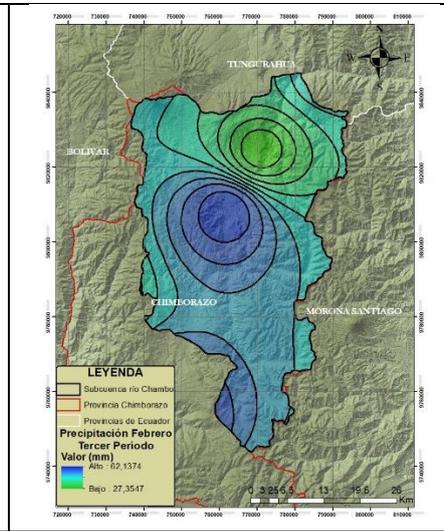
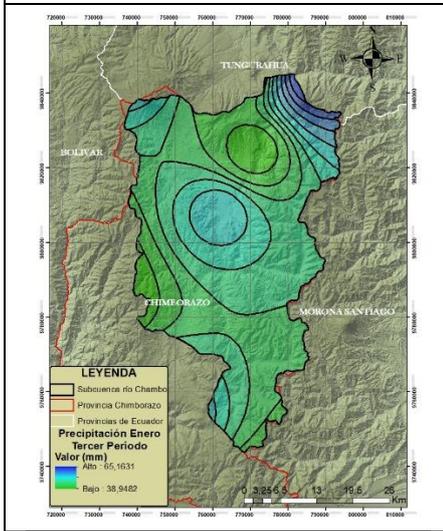
MAPAS DEL BALANCE HÍDRICO TERCER PERIODO (2007-2014)

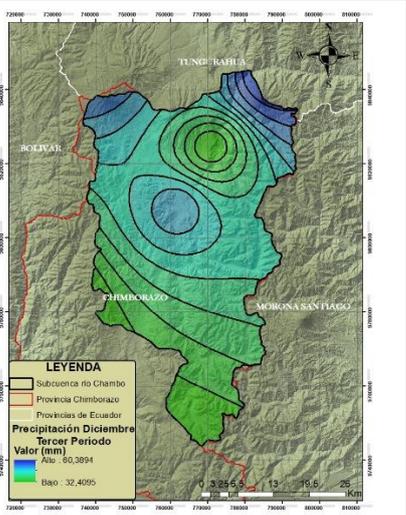
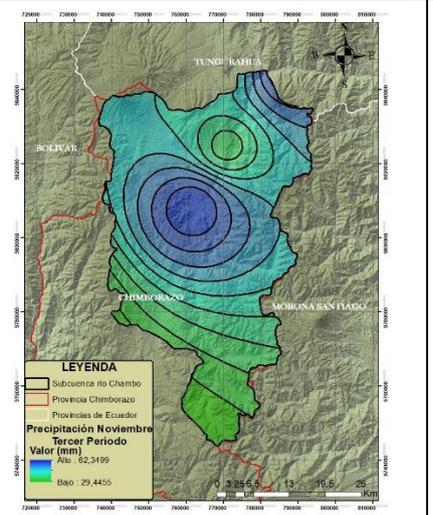
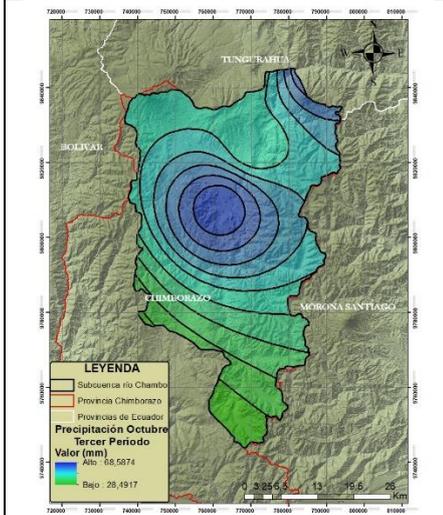
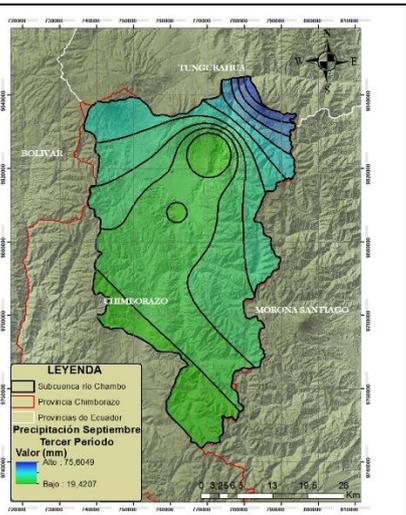
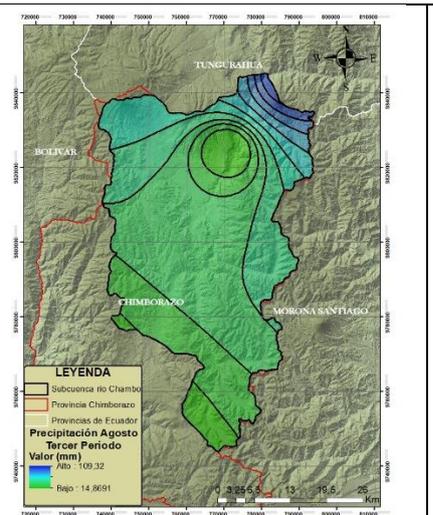
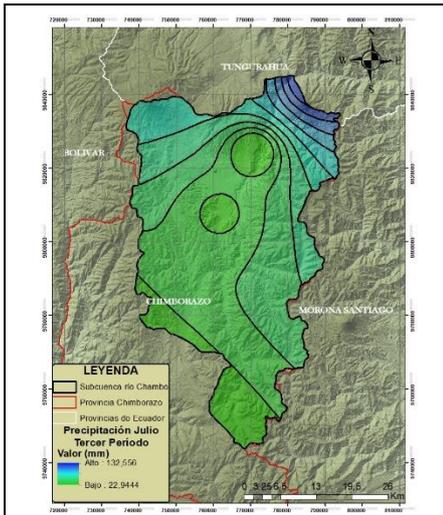
TEMPERATURA



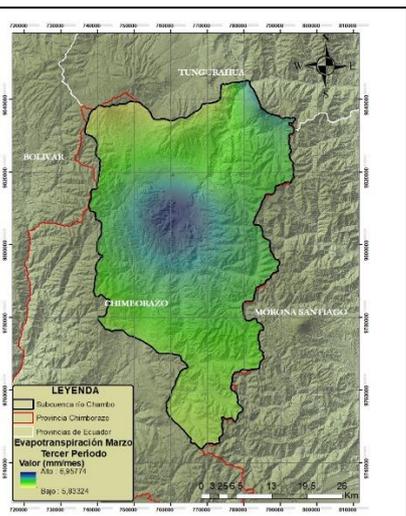
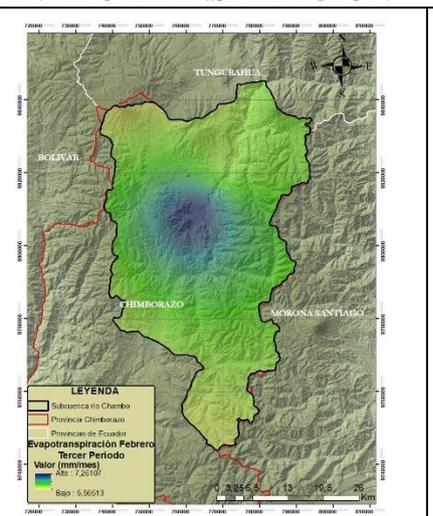
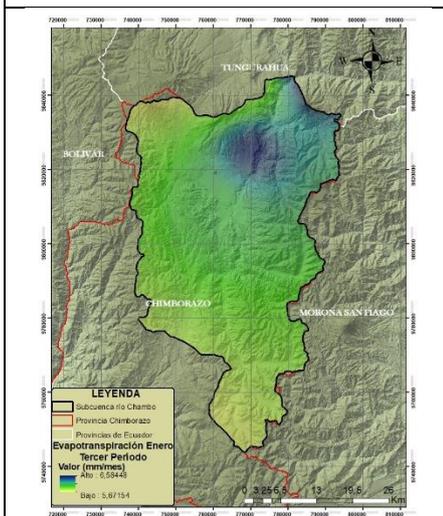


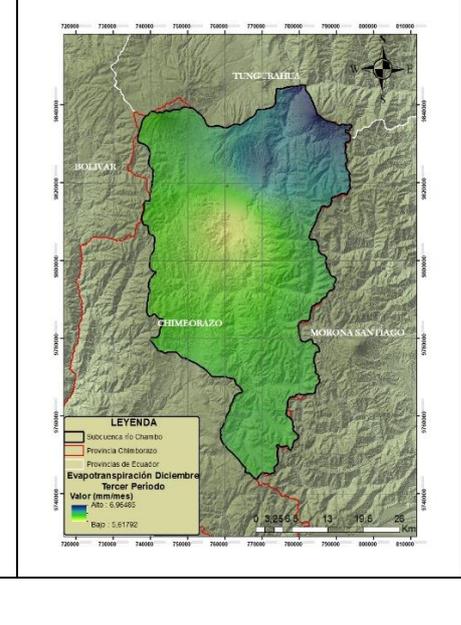
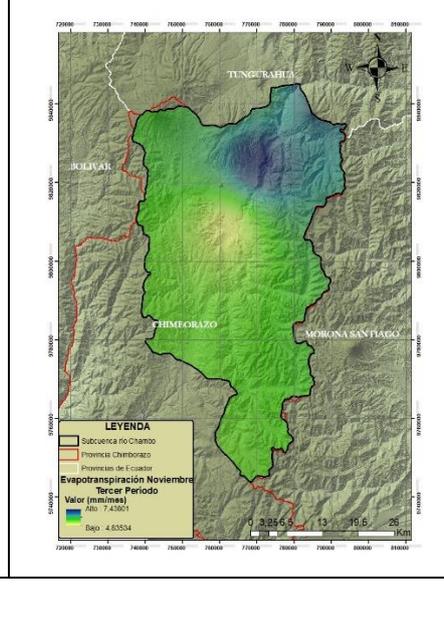
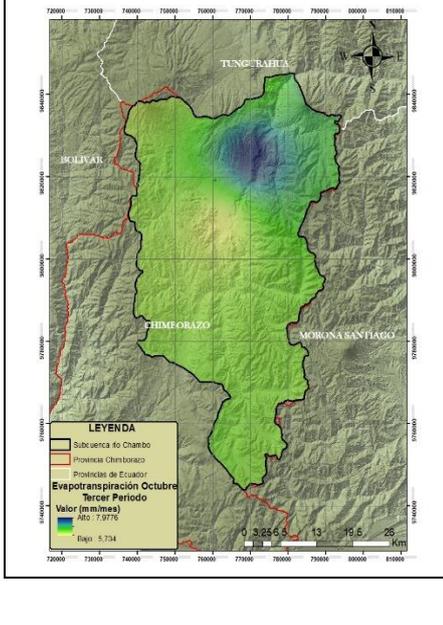
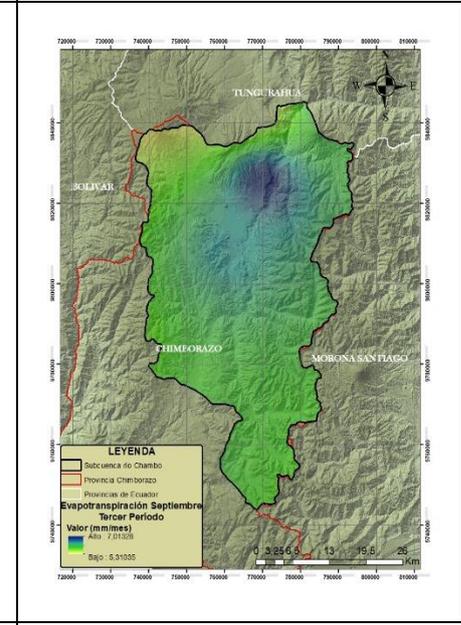
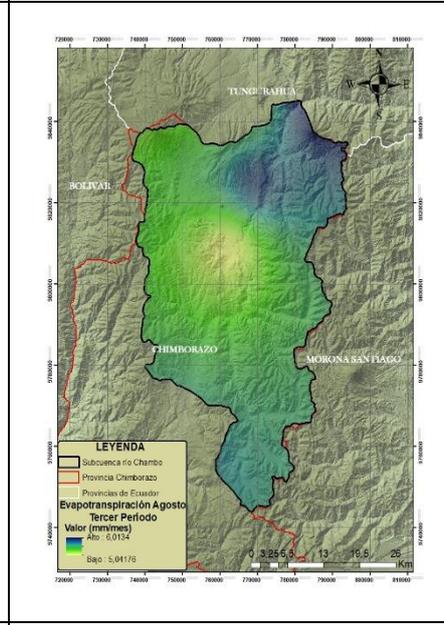
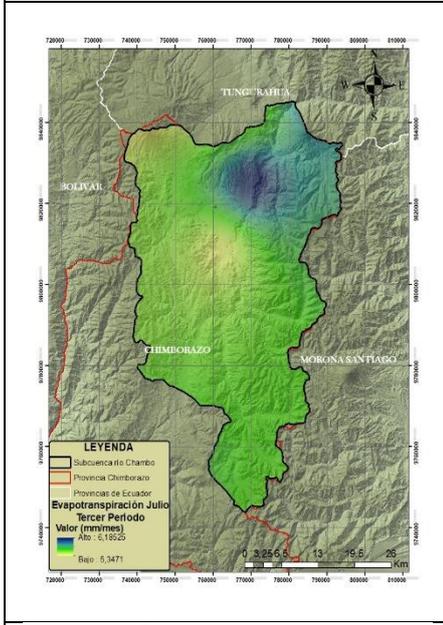
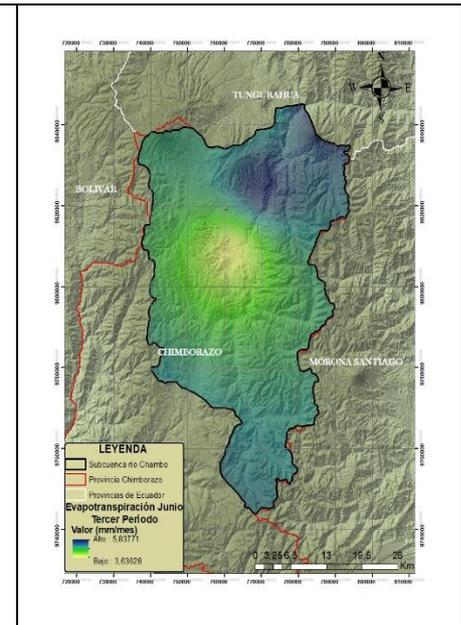
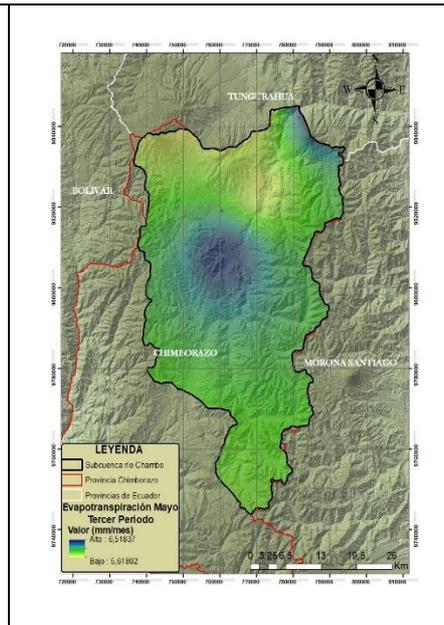
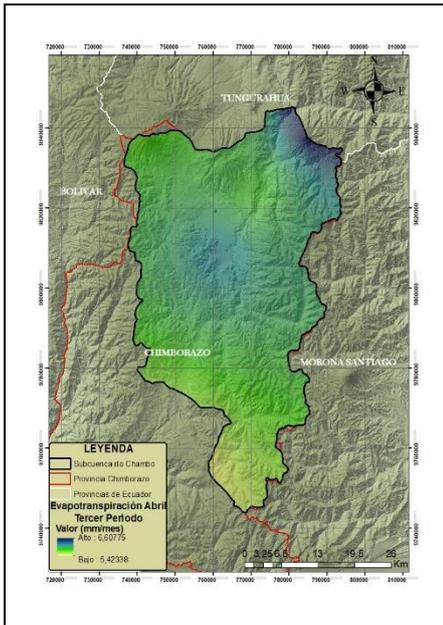
PRECIPITACIÓN



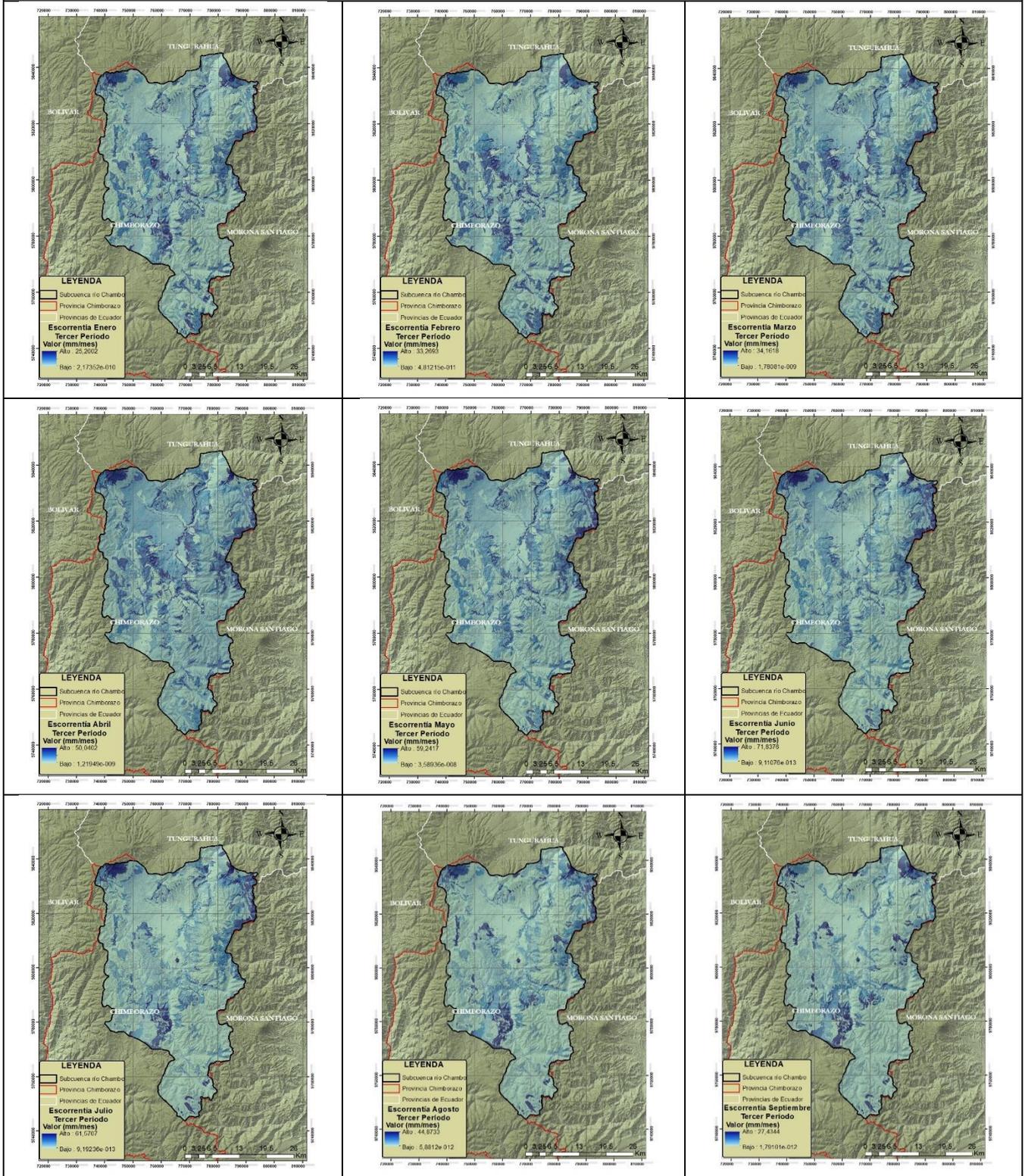


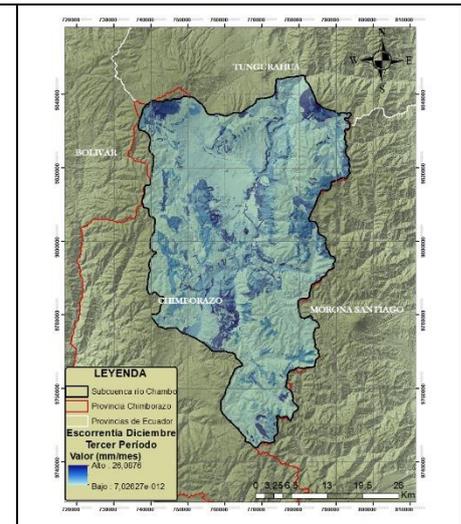
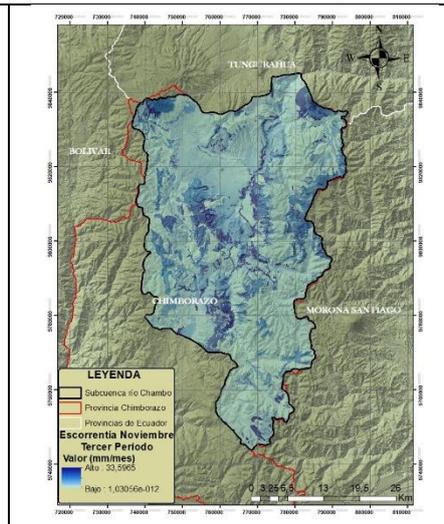
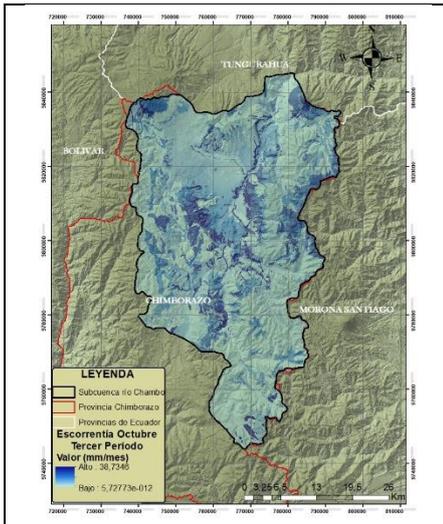
EVAPOTRANSPIRACIÓN



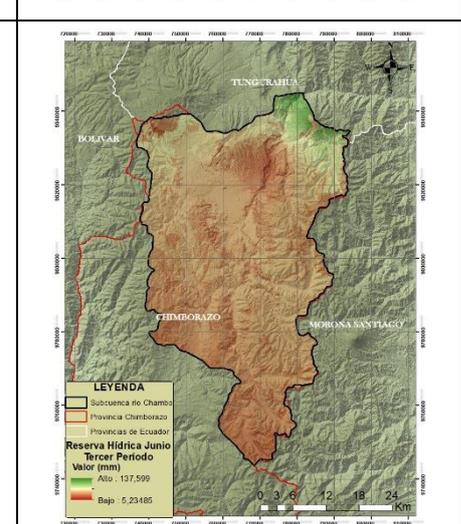
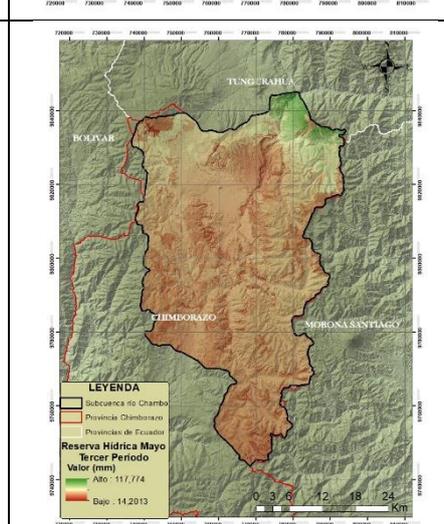
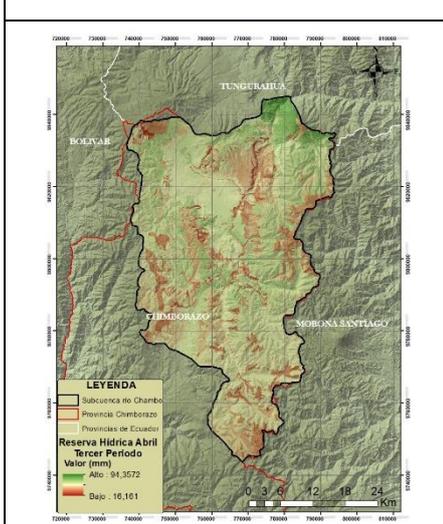
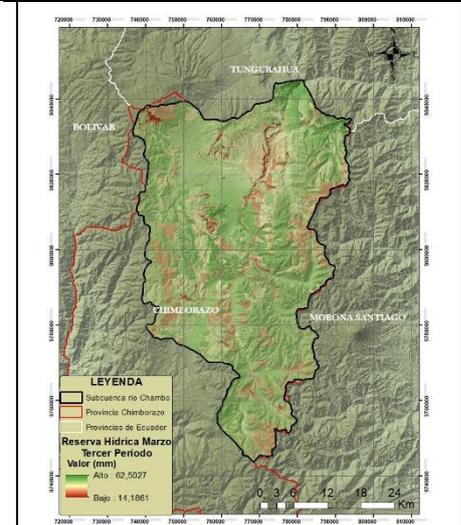
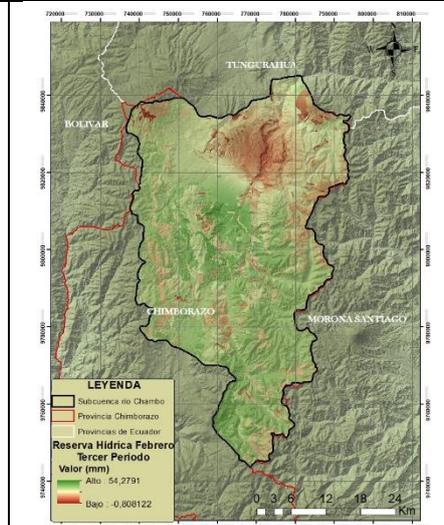
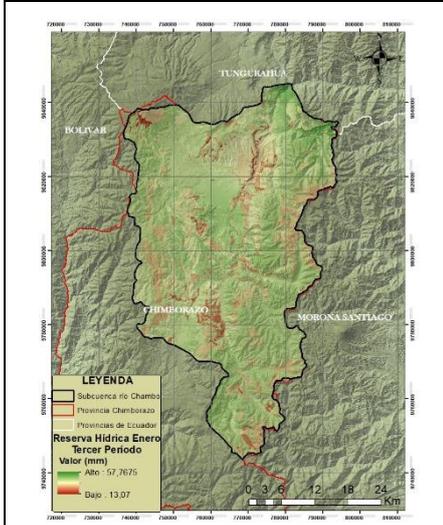


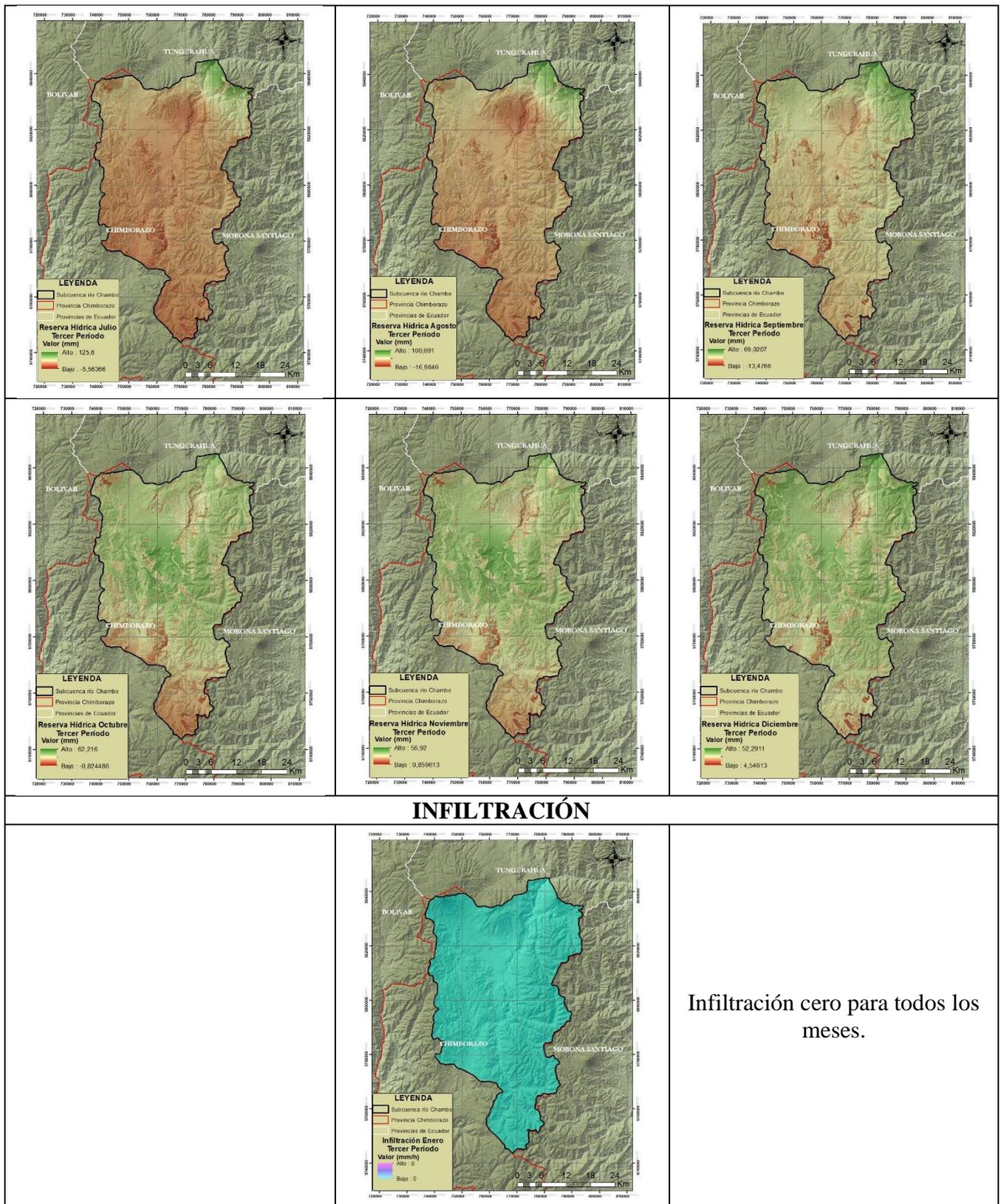
ESCORRENTÍA





RESERVA HÍDRICA





Infiltración cero para todos los meses.

Figura 18. Mapas del balance hídrico en la subcuenca del río Chambo correspondientes al tercer período (2007-2014).

Elaborado por: Autores.

9.3. Anexo 3. Conductancia hidráulica

Tabla 7. Puntos de muestreo de la conductancia hidráulica en la subcuenca.

| PUNTO | RÍO | DESCRIPCIÓN | X | Y | CONDUCTANCIA | CAUDAL |
|-------|--------|---------------|--------|---------|--------------|---------|
| | | | | | m^2/h | m^3/h |
| 1 | Chambo | PUENTE CHAMBO | 766082 | 9810590 | 0.4249 | 0.1955 |
| 2 | | PUETE QUIMIAG | 768614 | 9816764 | 0.1826 | 0.0292 |
| 3 | | PUENTE PENIPE | 774214 | 9827080 | 0.4999 | 0.2300 |

Elaborado por: Autores.

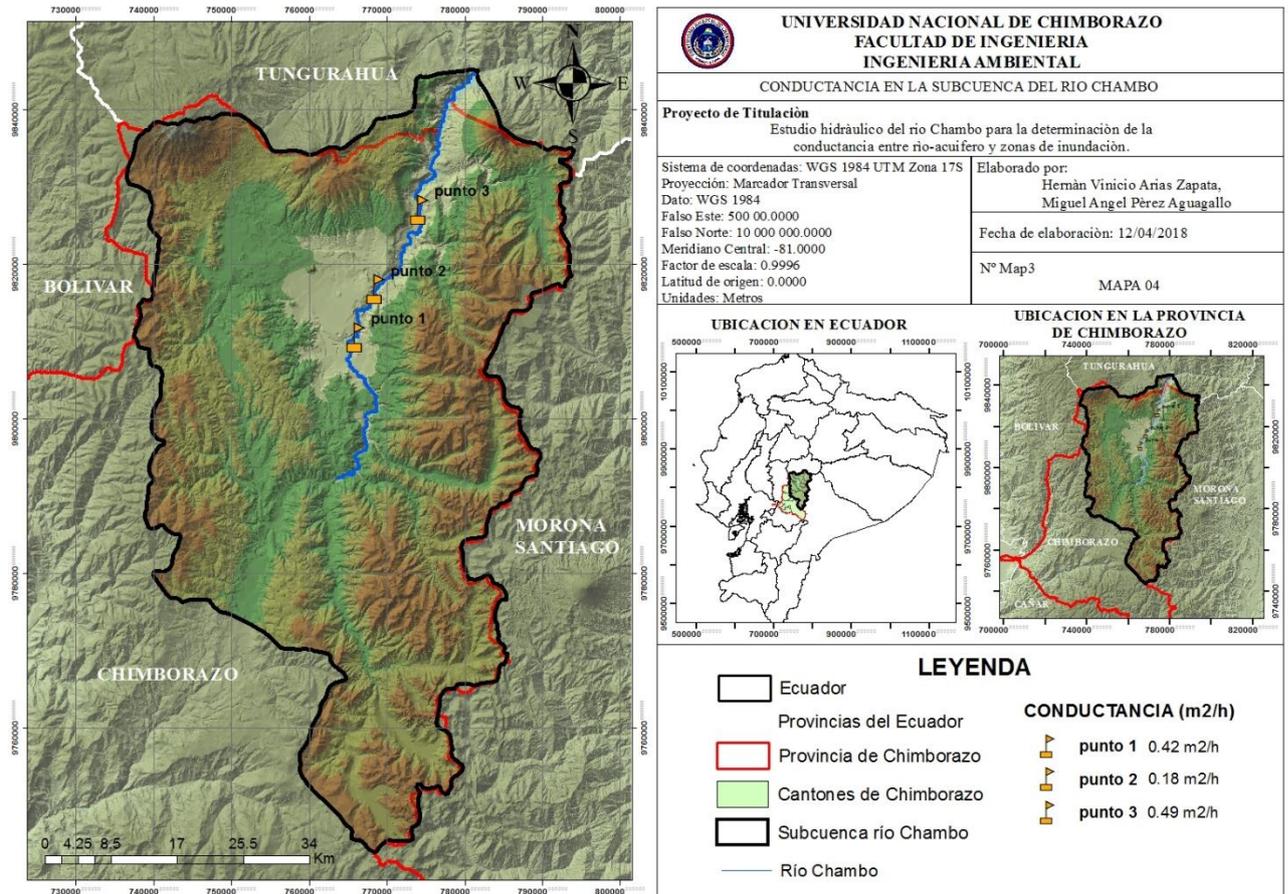
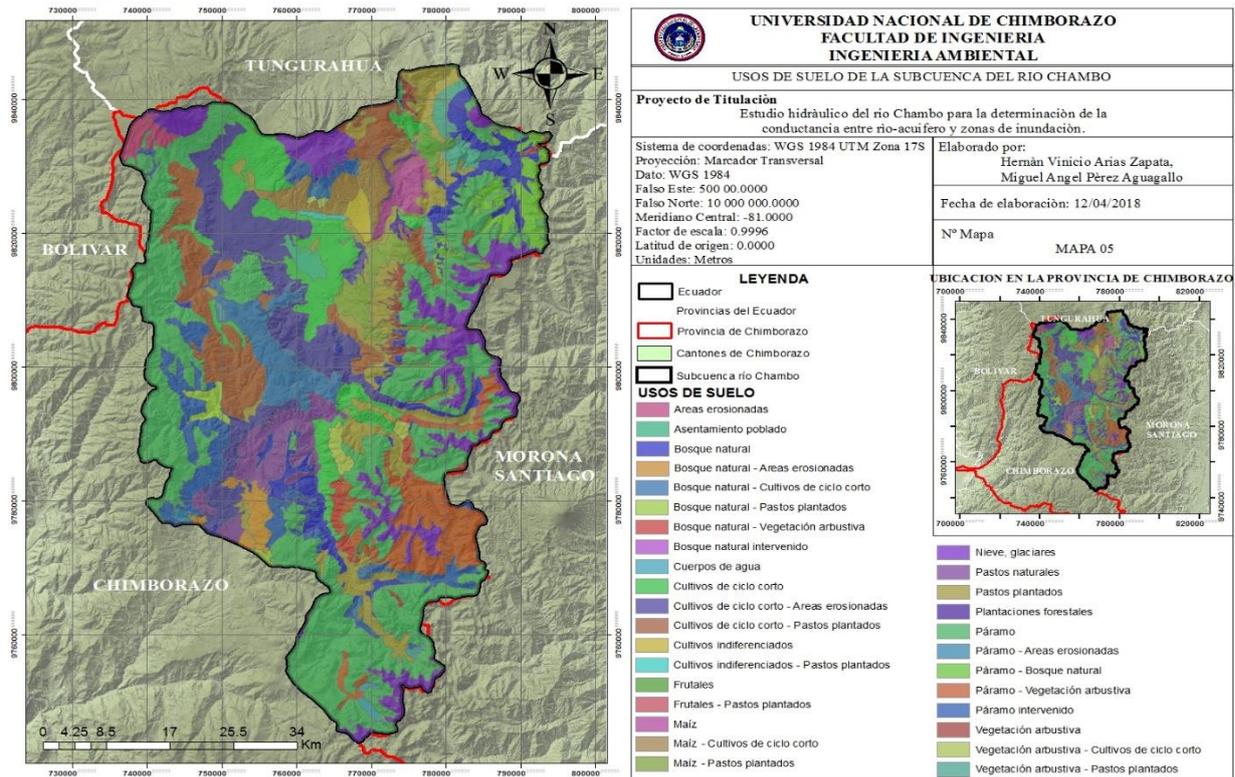
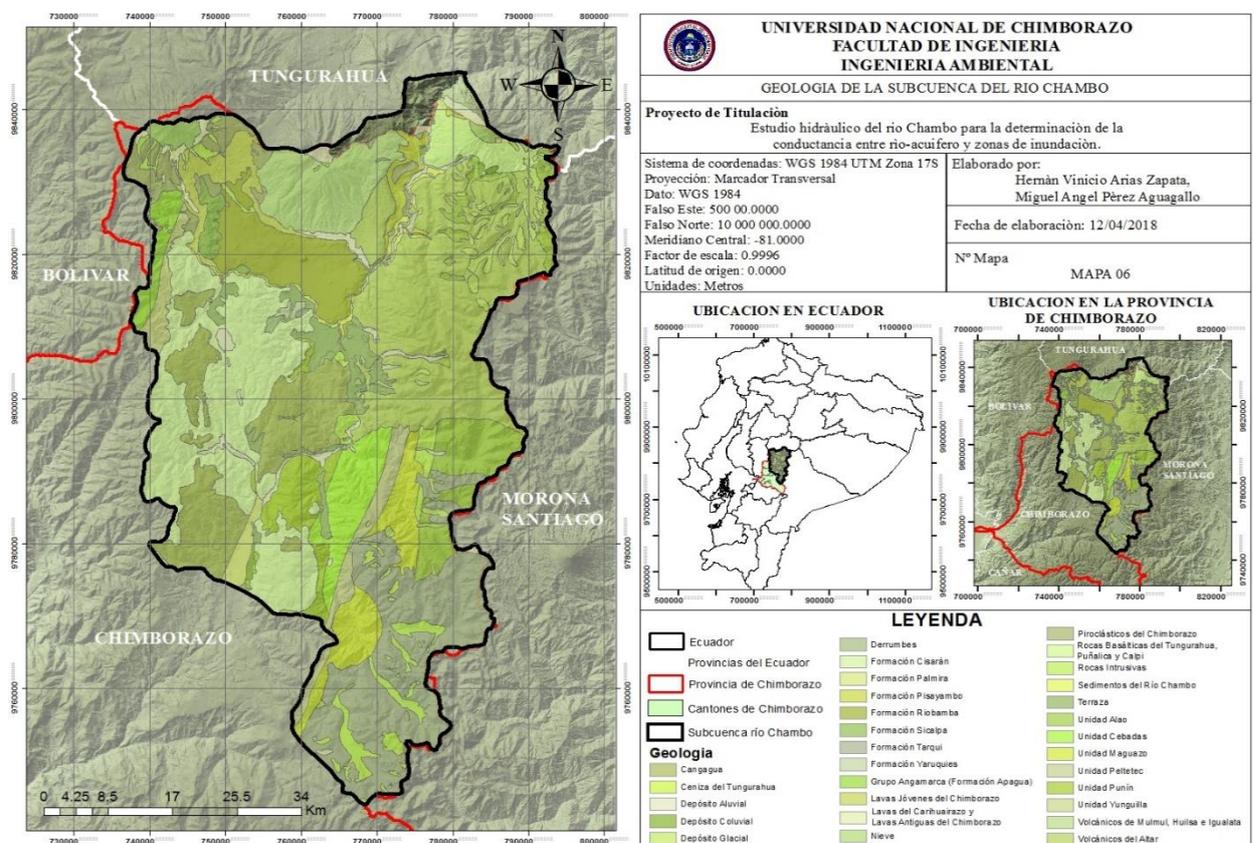


Figura 19. Ubicación de puntos de muestreo de la conductancia hidráulica en la subcuenca.

Elaborado por: Autores.



*Figura 20. Usos de suelos de la subcuenca del río Chambo.
 Elaborado por: Autores*



*Figura 21. Geología de la subcuenca del río Chambo.
 Elaborado por: Autores.*

Tabla 8. Datos de Infiltración

| Tiempo (min) | | 10 | 20 | 30 | 40 | 40 | 50 | 60 |
|----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| PUENTE CHAMBO | Dh (cm) | 10 | 9 | 5 | 6 | 0 | 10 | 6 |
| | I (mm/h) | 600 | 540 | 300 | 360 | 0 | 600 | 360 |
| PUENTE QUIMIAG | Dh (cm) | 4 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| | I (mm/h) | 240 | 300 | 120 | 120 | 120 | 120 | 60 |
| PUENTE PENIPE | Dh (cm) | 10 | 7 | 6 | 7 | 0 | 8 | 8 |
| | I (mm/h) | 600 | 420 | 360 | 420 | 0 | 480 | 480 |

Elaborado por: Autores.

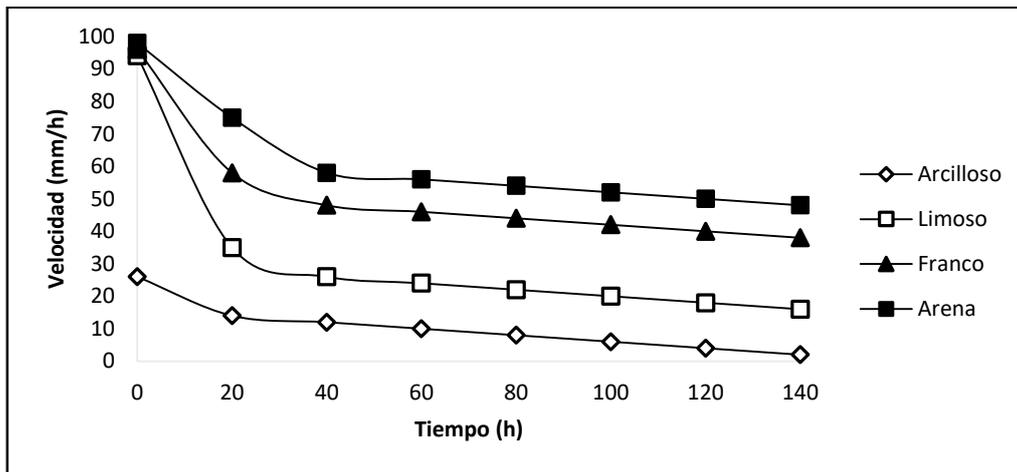


Figura 22. Curvas de infiltración según la textura del suelo.

Fuente: (Ibañez, Moreno, & Blanquer, 2008)

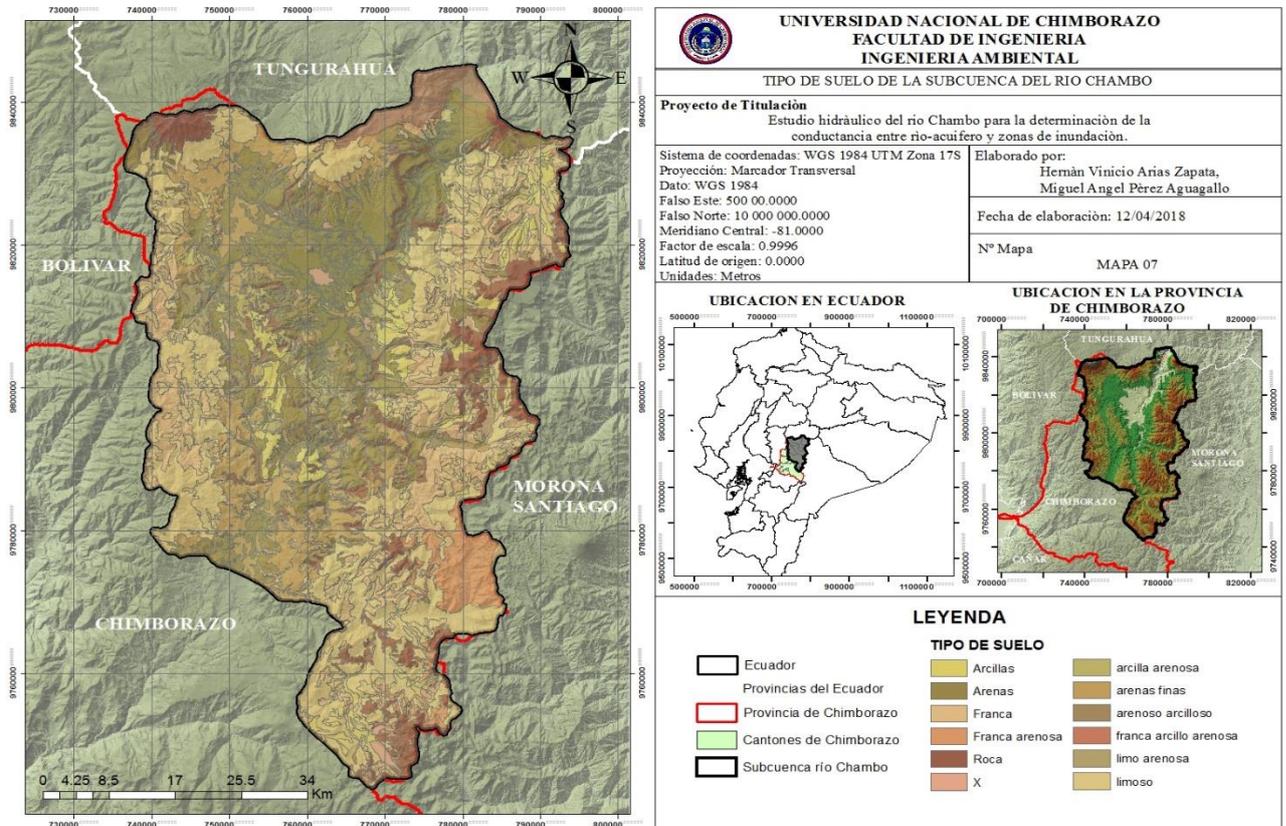


Figura 23. Textura del suelo de la subcuenca del río Chambo.

Elaborado por: Autores.

9.4. Anexo 4. Zonas de inundación.

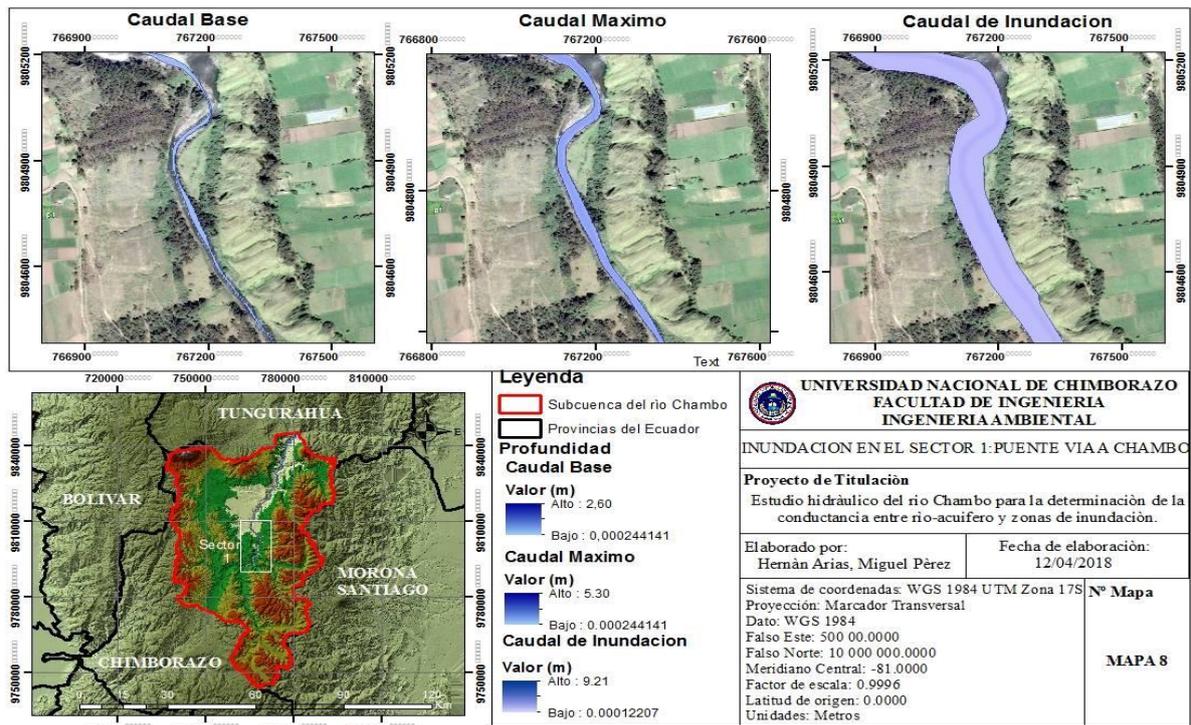


Figura 24. Simulación de las zonas de inundación en el sector 1 de la subcuenca.
Elaborado por: Autores.

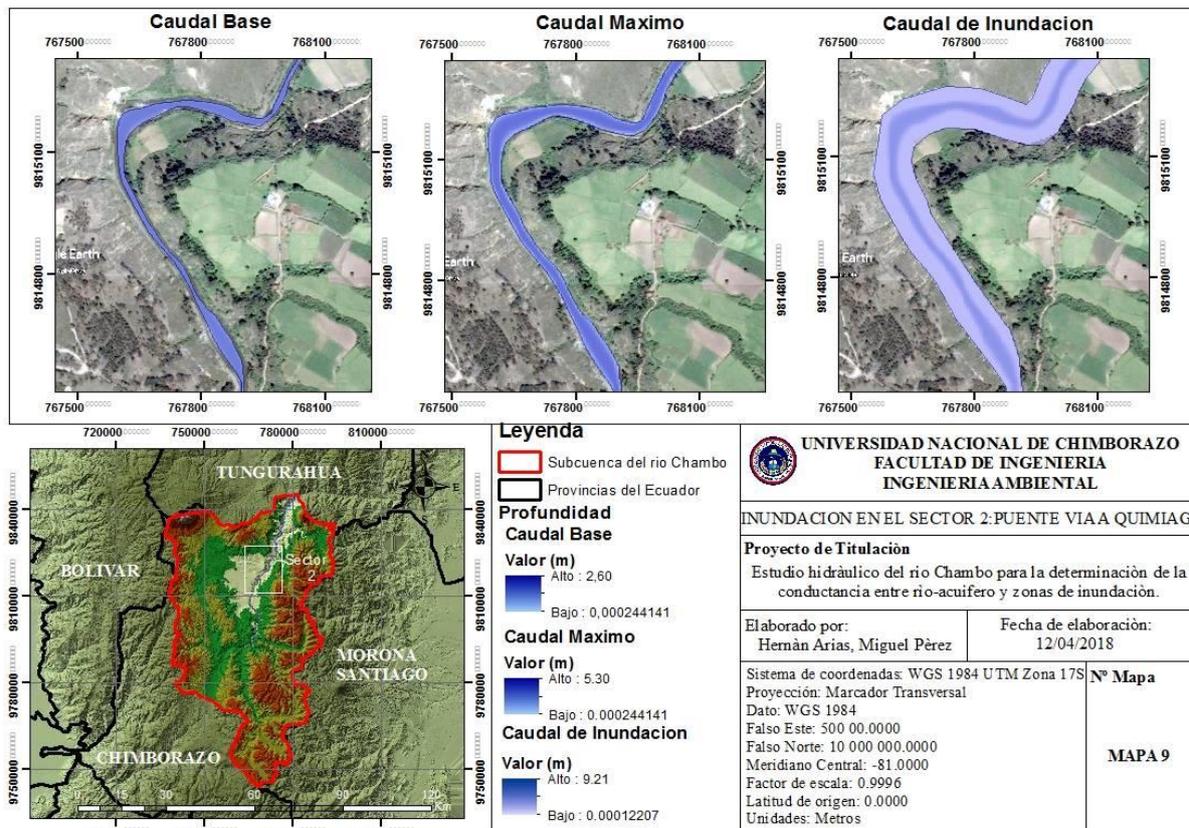


Figura 25. Simulación de las zonas de inundación en el sector 2 de la subcuenca.
Elaborado por: Autores.

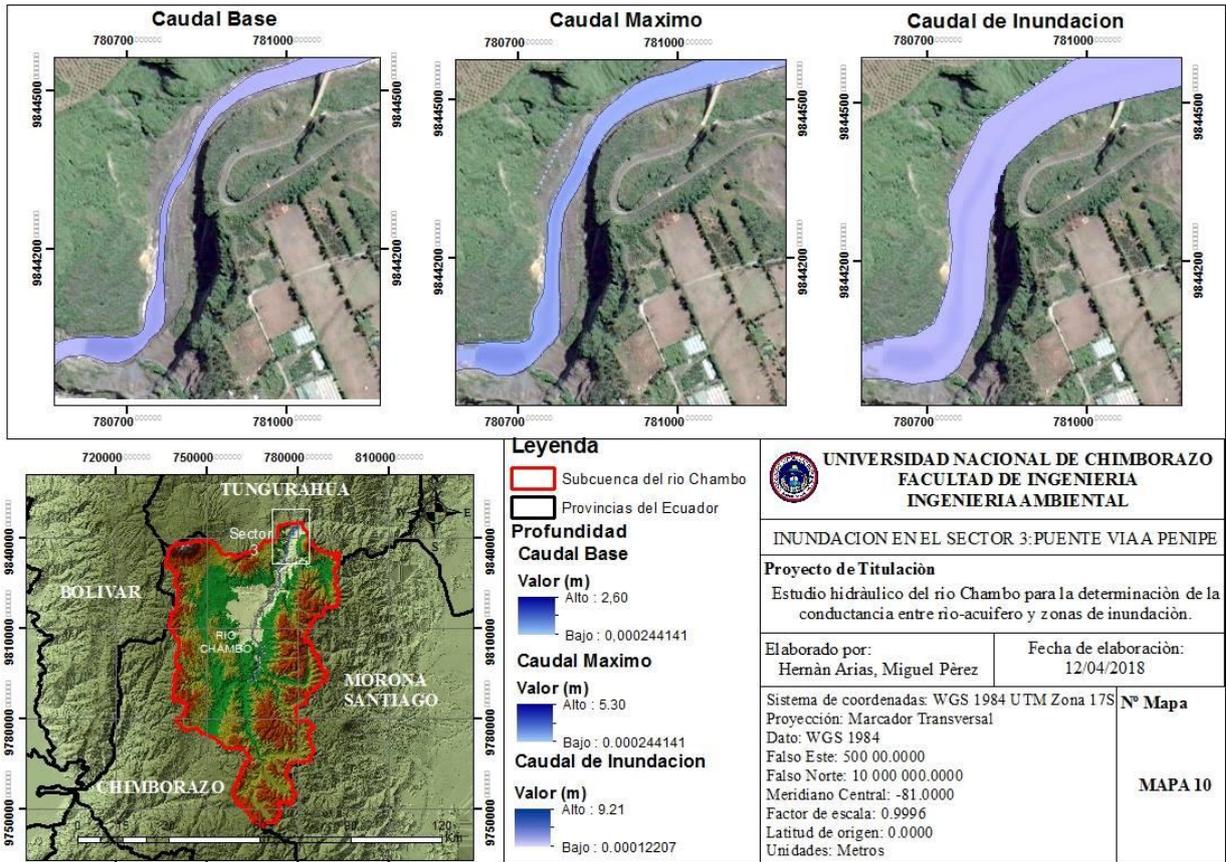


Figura 26. Simulación de las zonas de inundación en el sector 3 de la subcuenca.
 Elaborado por: Autores.

9.5. Anexo 5. Fotográfico



Descarga de aguas residuales



*Medición de infiltración mediante el
infiltrómetro de carga constante, punto de
muestreo 1*



*Medición de infiltración mediante el
infiltrómetro de carga constante, punto de
muestreo 2*



*Medición de infiltración mediante el
infiltrómetro de carga constante, punto de
muestreo 3*

