



Instituto de  
Posgrado

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**INSTITUTO DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDRICA Y PROPUESTA DE GESTION DEL  
RECURSO HÍDRICO EN LA MICROCUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO EL  
ÁNGEL”**

**Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magíster en  
Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**DIRECTOR:**

Ing. Oscar Rosales Enríquez Ms.C

**AUTOR:**

Ing. Diego Geovanny Bracho Palacios

IBARRA - ECUADOR

**2021**

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de Tutor del Trabajo de Grado presentado por el Ingeniero Diego Geovanny Bracho Palacios, para optar por el título de Magister en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, doy fé que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 12 días del mes de febrero del año 2021.



Ing. Oscar Rosales Enríquez, Ms.C.

**TUTOR**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo en el que puse todo mi entusiasmo, dedicación y cariño es para mis padres Julio Ernesto Bracho Salazar y Paz Victoria Palacios Palacios quienes me apoyaron incondicionalmente. De igual manera para los maestros de la Universidad Técnica del Norte quienes con sus enseñanzas brindadas contribuyeron conocimientos para llevar a cabo esta investigación, en fin dedico a todas las personas que me dieron su voz de aliento.

## **AGRADECIMIENTOS**

La gratitud es uno de los valores más prominentes de la vida y es por eso que aprovecho de esta oportunidad para agradecer a todos los actores que contribuyeron en la elaboración del trabajo de grado, en especial.

Al Ing. Oscar Rosales, Tutor, por todas las instrucciones impartidas en el proceso de elaboración del documento de titulación.

Al PhD. Jesús Aranguren, Asesor, por todo el apoyo incondicional y consejos que de una u otra forma fueron fundamentales para la culminación de este trabajo de investigación.

A mis Padres por su apoyo de invaluable cuantía, a la Universidad Técnica del Norte y todos los familiares y amigos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD</b>	0401319579		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	Bracho Palacios Diego Geovanny		
<b>DIRECCIÓN</b>	Eugenio Espejo O1-232		
<b>EMAIL</b>	tichogeovanny86@gmail.com		
<b>TELÉFONO FIJO</b>	062770048	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0960640500

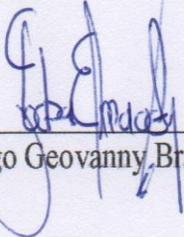
<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	“ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HIDRICA Y PROPUESTA DE GESTION DEL RECURSO HÍDRICO EN LA MICROCUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO EL ÁNGEL”
<b>AUTOR :</b>	Bracho Palacios Diego Geovanny
<b>FECHA:</b>	12/02/2021
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA</b>	<input type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA</b>	Maestría en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Oscar Rosales Enríquez Ms.C

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días del mes de marzo del 2021

**EL AUTOR:**

Firma

  
Diego Geovanny Bracho Palacios.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPITULO I.....	1
EL PROBLEMA.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.4 Justificación.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2 MARCO REFERENCIAL.....	7
2.1 Marco teórico.....	7
2.1.1 Cobertura vegetal de la cuenca hídrica.....	7
2.1.2 El caudal superficial de la cuenca hidrográfica.....	9
2.1.3 Balance hídrico de la cuenca hídrica.....	10
2.1.4 Estrategias de conservación del recurso hídrico.....	11
2.2 Marco Legal.....	12
CAPÍTULO III.....	14
3 MARCO METODOLÓGICO.....	14
3.1 Descripción del área de estudio.....	14
3.1.1 Descripción del área de estudio.....	14
3.2 Enfoque y tipo de investigación.....	15
3.3 Procedimiento de investigación.....	16
3.3.1 Fase 1. Cambio de la cobertura vegetal.....	16
3.3.2 Fase2. Variación del caudal de la subcuenca del río El Ángel.....	18

3.3.3	Fase 3. Cálculo del balance hídrico superficial .....	22
3.3.4	Fase 4. Estrategias de conservación del recurso hídrico para la subcuenca del Río el Ángel .....	26
3.4	Consideraciones bioéticas.....	27
CAPÍTULO IV .....		28
4	RESULTADOS Y DICUSIÓN.....	28
4.1	Fase 1. Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo subcuenca del río El Ángel	28
4.2	Fase 2. Variación del caudal de la subcuenca del Río El Ángel.....	32
4.2.1	Textura y grupo hidrológico.....	33
4.2.2	Pendiente del terreno.....	35
4.2.3	Cobertura vegetal y uso de suelo.....	37
4.2.4	Curva Número .....	37
4.2.5	Precipitación.....	40
4.2.6	Caudal medio mensual y anual.....	42
4.3	Fase3. Cálculo del balance hídrico superficial de la subcuenca del río El Ángel .	47
4.3.1	Precipitación balance hídrico.....	48
4.3.2	Evapotranspiración balance hídrico.....	49
4.3.3	Caudal balance hídrico .....	50
4.4	Fase 4. Estrategias de conservación del recurso hídrico para la subcuenca del río El Ángel .....	53
4.4.1	Estrategia 1 Protección de la cobertura vegetal de la subcuenca del río el ángel .....	54
4.4.2	Estrategia 2 Conservación de caudal de la subcuenca del río El Ángel .....	54
4.4.3	Estrategia 3 Balance hídrico simplificado de la subcuenca del río El Ángel .	55
4.5	CONCLUSIONES .....	56
4.6	RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		58
ANEXOS.....		64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coordenadas WGS 1984 UTM Zona 17 Sur de la subcuenca del río El Ángel.....	14
Tabla 2	Categorización hidrológica del suelo .....	19
Tabla 3	Número curva para condiciones medias de humedad .....	20
Tabla 4	Precipitación estaciones INAMHI año 1999.....	21
Tabla 5	Precipitación estaciones INAMHI año 2017.....	22
Tabla 6	Precipitación anual-mensual.....	23
Tabla 7	Temperatura anual mensual.....	24
Tabla 8	Evapotranspiración media mensual anual 1990-2015.....	25
Tabla 9	Valor promedio CN .....	26
Tabla 10	Clases de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999 .....	28
Tabla 11	Clases de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 2017 .....	29
Tabla 12	Cambio de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999 – 2017 .....	31
Tabla 13	Textura de Suelo Subcuenca río El Ángel.....	33
Tabla 14	Grupo hidrológico de la subcuenca del río El Ángel. ....	34
Tabla 15	Pendiente de la subcuenca del río El Ángel. ....	35
Tabla 16	Cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999 - 2017 .....	37
Tabla 17	Curva Número subcuenca del río El Ángel año 1999-2017.....	37
Tabla 18	Valor CN ponderado.....	40
Tabla 19	Precipitación subcuenca del río El Ángel años 1999. ....	40
Tabla 20	Precipitación subcuenca del río El Ángel años 2017 .....	41
Tabla 21	Caudal superficial subcuenca del río El Ángel año 1999.....	42
Tabla 22	Caudal Superficial subcuenca del río El Ángel año 2017 .....	44
Tabla 23	Precipitación mensual subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015.....	48
Tabla 24	Evapotranspiración mensual subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015.....	49
Tabla 25	Caudal superficial subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015 .....	50
Tabla 26	Validación de escorrentía superficial subcuenca del río El Ángel. ....	51
Tabla 27	Balance Hídrico superficial subcuenca del río El Ángel.....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la subcuenca del río El Ángel. ....	15
<b>Figura 2.</b> Imagen satelital LANSAT 5. 1999 11 14 .....	17
<b>Figura 3.</b> . Imagen satelital LANSAT 7. 2017 09 20 .....	17
<b>Figura 4.</b> Relación de textura de suelo y clasificación USLA.....	19
<b>Figura 5.</b> Cobertura vegetal y uso de Suelo 1999.....	29
<b>Figura 6.</b> Cobertura vegetal y uso de suelo 2017. ....	30
<b>Figura 7.</b> Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca del río El Ángel...	32
<b>Figura 8.</b> Textura de suelo subcuenca del río El Ángel.....	34
<b>Figura 9.</b> Grupo Hidrológico de suelo subcuenca del río El Ángel.....	35
<b>Figura 10.</b> Pendiente de la subcuenca del río El Ángel. ....	36
<b>Figura 11.</b> Valor curva número año 1999.....	38
<b>Figura 12.</b> Valor curva número año 2017.....	39
<b>Figura 13.</b> Precipitación mensual subcuenca del río El Ángel 1999 .....	41
<b>Figura 14.</b> Precipitación mensual 2017. ....	42
<b>Figura 15.</b> Caudales mensuales año 1999.....	43
<b>Figura 16.</b> Caudal medio anual 1999.....	44
<b>Figura 17.</b> Caudales mensuales año 2017.....	45
<b>Figura 18.</b> Caudal medio anual 2017.....	46
<b>Figura 19.</b> Variación de caudal de la subcuenca del río El Ángel.....	47
<b>Figura 20.</b> Precipitación 1990-2015 .....	48
<b>Figura 21.</b> Evapotranspiración Mensual 1990-2015. ....	49
<b>Figura 22.</b> Caudal mensual 1990-2015.....	51
<b>Figura 23.</b> Balance Hídrico de la subcuenca del río El Ángel.....	53

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL  
NORTE INSTITUTO DE  
POSGRADO PROGRAMA DE  
MAESTRÍA**

**“ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA Y PROPUESTA DE GESTIÓN DEL  
RECURSO HÍDRICO EN LA MICROCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO EL  
ÁNGEL”**

**Autor:** Ing. Diego Geovanny Bracho Palacios

**Tutor:** Ing. Oscar Rosales Enríquez Ms.C

**Año:** 2021

**RESUMEN**

La estimación de oferta hídrica y propuesta de gestión del recurso hídrico de la subcuenca del río El Ángel evaluó la disponibilidad de agua con base a los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo con el fin de proponer estrategias de gestión y conservación del recurso hídrico. El enfoque de esta investigación es de carácter cuantitativo, consideró cuatro fases: el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales LANDSAT con la metodología de Clasificación Supervisada, el estudio determinó que el uso de suelo agrícola aumentó para el año 2017; la variaciones de caudales medios y anuales con el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Número Curva) que evaluó la escorrentía superficial de la subcuenca, para lo cual registró la disminución de caudal para el año 2017 de acuerdo a los eventos de precipitación para dicho año; la oferta y demanda hídrica mediante la ecuación simplificada de balance hídrico, se determinó seis meses de superávit y seis meses de déficit hídrico; el diseño estrategias de conservación del recurso agua, se propone medidas de mitigación con el fin de precautelar el deterioro de los ecosistemas naturales. El mayor cambio de cobertura de la subcuenca del río El Ángel se asocia a la actividad agrícola con el 8.29% de incremento que representa 2654.680 ha de la subcuenca, mientras que la escorrentía superficial disminuyó 0.93 m<sup>3</sup>/s en 18 años.

**Palabras clave:** oferta hídrica, cobertura vegetal, uso del suelo, escorrentía.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA  
DEL NORTE INSTITUTO DE  
POSGRADO PROGRAMA DE  
MAESTRÍA**

**“ESTIMATION OF THE WATER SUPPLY AND PROPOSAL FOR THE  
MANAGEMENT OF WATER RESOURCE OF THE HYDROGRAPHIC MICRO  
BASIN OF THE EL ANGEL RIVER”**

**Autor:** Ing. Diego Geovanny Bracho Palacios

**Tutor:** Ing. Oscar Rosales Enríquez Ms.C

**Año:** 2021

**ABSTRACT**

The estimation of the water supply and the proposal of the management of the water resource of the Angel river sub basin evaluated the availability of water based on changes in vegetation cover and land used in order to propose strategies for the management and conservation of the water resources. The focus of this research is quantitative, it considered four phases: 1.- Change in vegetation cover and land use through the multitemporal analysis of LANDSAT satellite images with the supervised classification methodology the study determined that the use of agricultural land increased in 2017. 2.- Average and annual flows variations with the United States soil Conservation Service method (Curve Number) the surface runoff of the sub-basin was evaluated, therefore it recorded the decrease in flow for the year 2017 according to the precipitation events for that year. 3.- water supply and demand using the simplified equation of the water balance, six months of surplus and six months of water deficit were determined. 4.- designed water resource conservation strategies, proposed mitigation measures in order to prevent the deterioration of natural ecosystems. The greatest change in coverage of the El Angel river sub-basin is associated with agricultural activity with an 8.29% increase, which represents 2 654.680 ha. of the sub-basin, while surface runoff decreased 0.93 m<sup>3</sup>/s in 18 years.

**Keywords:** supply water, vegetation cover, land use, runo

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

La percepción entre cobertura vegetal y escurrimiento hace relación a que los bosques utilizan más agua por procesos de evapotranspiración e intercepción de lluvia que otros usos de tierra tal como la agricultura y ganadería, en general esta relación debe ser analizada a profundidad para determinar el efecto de la deforestación con la oferta hídrica de la cuenca (Gonzales *et al.*, 2016). Por otra parte el crecimiento poblacional y el desconocimiento del cuidado de los recursos naturales alteran los ecosistemas, en efecto los ecosistemas se modifican por actividades de sustento diario como la labranza de suelo y crianza de ganado (Morochó, 2002). En la provincia del Carchi el principal cambio del paisaje se presenta por la expansión de la frontera agrícola que origina la pérdida de amplios espacios de vegetación y por ocasiones tiene como resultado la eliminación de ecosistemas completos (Gobierno Autónomo Descentralizado la Provincia del Carchi, 2015).

Los recursos hídricos son importantes para el desarrollo poblacional, el bienestar y la calidad de vida de los seres vivos. La cuenca baja del río El Ángel presenta una superficie considerable para déficit hídrico y puede verse comprometida por la expansión de la frontera agrícola en la cuenca media-alta (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Espejo, 2011), estas actividades alteran la funcionalidad de los ecosistemas y comprometen el régimen de precipitación y escorrentía de la subcuenta, los efectos de las actividades anteriormente mencionadas pueden generar problemas de escases de agua y limitar las labores de la población.

El agua es fundamental para cumplir con las actividades del ser humano. Poveda (1995) explica que, la deforestación modifica el caudal como también afecta las fuentes de agua. El recurso hídrico está en riesgo por acciones antrópicas como el avance de la frontera agrícola, la tala de bosques nativos entre otros, las actividades antrópicas pueden afectar la recarga de fuentes de agua potable, riego y generación de energía eléctrica. La cuenca hidrográfica con actividades de deforestación se expone a modificar sus ecosistemas y ciclo hídrico.

La relación entre la vegetación y el ciclo del agua se denominan conectividad ecológica, la conectividad ecológica cumple con la regulación de los flujos hídricos suelo - aire. Las plantas conducen el agua hacia la superficie terrestre y la vegetación hace que regrese a la atmósfera por medio de la evapotranspiración (Valencia, 2017). Por esta razón cualquier alteración a la vegetación por actividades antrópicas de la cuenca hidrográfica puede afectar de forma significativa los procesos hidrológicos y al balance hídrico de la cuenca.

El Ecuador es afectado por la pérdida de cobertura vegetal en los últimos años, la principal causa es la deforestación que genera el avance de la frontera agrícola. De acuerdo con Sierra (2013), el 99.4% de área deforestada del territorio ecuatoriano en el periodo 1990 - 2000 fue por actividades agropecuarias. El motivo de la deforestación es utilitario, esta actividad crea espacios productivos agrícolas y pecuarios los cuales aceleran el avance de la frontera agrícola y como consecuencia modifica el uso de suelo.

El uso excesivo de suelo por actividades agropecuarias genera la degradación de los ecosistemas de la cuenca hidrográfica (Cárdenas 2014). Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2017), el uso del suelo del Ecuador está distribuido en diferentes categorías como: cultivos permanentes, cultivos transitorios, descanso, pastos cultivados, pastos naturales, montes y bosques. Los cultivos perennes y pastos cultivados representan el 32 % de la superficie en el Ecuador. El deterioro de los ecosistemas y el cambio de uso de suelo podrían disminuir la disponibilidad del recurso hídrico.

La demanda del recurso hídrico para satisfacer las necesidades de una población en muchas ocasiones es mayor a la disponibilidad hídrica de la cuenca; la escasez del recurso agua causa conflictos sociales a nivel de comunidades, así como también el incremento del consumo de agua genera alteraciones al régimen de los ríos y la disminución del caudal necesario para alcanzar un equilibrio ecológico (Chávez y González, 2015).

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Espejo (GADCE, 2011), las actividades de producción y obras de interés para el desarrollo producen deterioros ambientales como la pérdida de ecosistemas de gran importancia para la generación de agua. Las subcuencas conocidas como: Plata, Santiaguillo, El Ángel y la quebrada la Chimba presentan áreas significativas para el déficit hídrico. El cambio del uso del suelo,

la deforestación y el avance de la frontera agrícola son causas que a largo plazo pueden alterar el régimen de precipitación de la cuenca hidrográfica y por ende afectar el caudal.

La disponibilidad hídrica puede variar por el cambio de uso de suelo y la pérdida de la cobertura vegetal, la desmembración de la vegetación natural puede afectar al régimen hídrico a largo plazo e incidir en la escasez de agua, la escasez de agua reduce las funciones de los ecosistemas y limita las actividades humanas.

El presente trabajo de investigación analiza el cambio de uso de suelo y pérdida de vegetación por procesos antrópicos y con el objeto de examinar la variación de escorrentía superficial de la subcuenca del río El Ángel, el propósito es evaluar la disponibilidad del recurso hídrico de acuerdo con los cambios que se evidenció en el tiempo de estudio. Esta investigación consideró que las prácticas de deforestación, cambio de uso de suelo y avance de la frontera agrícola alteraran la disponibilidad y oferta hídrica de la subcuenca del río El Ángel.

A continuación se presenta la pregunta de investigación:

¿La deforestación, el cambio de uso de suelo, el avance de la frontera agrícola, incidirá en la disponibilidad y oferta hídrica de la subcuenca del río El Ángel?

## 1.2 Antecedentes

Restrepo (2015) realizó una investigación sobre el efecto de la pérdida de masa forestal en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010), determinando la variabilidad espacial de pérdida de sedimentos en la cuenca del río Magdalena por la extracción de los bosques primarios. Indica que las actividades agrícolas es la principal causa del cambio del uso del suelo y pérdida forestal.

Poveda y Mesa (1995) realizaron el estudio de los efectos hidrológicos de la deforestación, analizan los efectos de la deforestación sobre los componentes del ciclo hidrológico y los balances de agua, encuentran que la deforestación reduce los caudales medios y aumenta los caudales extremos que causan efectos de inundaciones y sequías más fuertes y frecuentes.

Martínez y Coello (2017) en la investigación sobre el análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal, relacionan el comportamiento del caudal con el nivel de precipitación anual-mensual y el uso del suelo, encontrando que las microcuencas presentan respuestas diferentes en escorrentía por la diferencia de clima y el uso de suelo.

Crespo, *et al* (2014) analizan los impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos, a partir de comparar tres microcuencas pareadas con el fin de determinar los impactos del uso suelo en la hidrología, concluyen que los efectos en una microcuenca con cultivos y pastoreo intensivo reduce el caudal de salida; el caudal es menor que la microcuenca con mayor cobertura vegetal.

Santillán, *et al.* (2013) en la investigación sobre la estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México, analizaron el comportamiento hidrológico y la capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica, concluyendo que el balance hídrico permite definir los periodos secos y húmedos, identificar el meses del año que genera la mayor cantidad de exceso de agua, y el escurrimiento superficial en la cuenca, así como el comportamiento en los procesos hidrológicos por la afectación de los cambios en las variables climáticas.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar la disponibilidad del recurso hídrico de la subcuenca del río El Ángel con base en los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo, con el fin de proponer estrategias para su gestión y conservación.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Analizar los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo de la subcuenca del río El Ángel durante el periodo 1999– 2017.
- Analizar las variaciones de caudales medios anuales y mensuales del río El Ángel durante el periodo 1999 - 2017.
- Calcular el Balance Hídrico simplificado de la subcuenca del río El Ángel.
- Diseñar estrategias de conservación del recurso hídrico en la subcuenca del río El Ángel.

## **1.4 Justificación**

El estudio de alteración de cobertura vegetal y el cambio de uso de suelo de la subcuenca del río el Ángel permite evidenciar las modificaciones de los ecosistemas en un periodo de tiempo determinado para el área de influencia especialmente en la dinámica del ciclo hidrológico de la subcuenca. El presente estudio mejorará la gestión del recurso hídrico y establecerá información sobre la oferta de agua para la subcuenca del río El Ángel en el periodo de tiempo de 18 años, la investigación comparará el cambio del uso del suelo con la variación de caudales de la subcuenca.

El Ecuador necesita generar información de las fuentes hídricas, balance hídrico y control de calidad de agua para mejorar la administración del recurso entre el Gobierno Central y los Gobiernos Autónomos del país, esta investigación aportó información para el manejo sustentable del agua en la subcuenca del río El Ángel, la cual debe ser tratada como un derecho tal dicta la constitución (Plan Nacional de Desarrollo, 2017 ).El presente estudio realizó la propuesta de gestión del río El Ángel con el fin de reforzar la ejecución de los programas y proyectos que contempla el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Espejo como también del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia del Carchi.

La investigación responde a la línea de investigación de la UTN: Biotecnología, Energía y Recursos Naturales Renovables.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **2.1 Marco teórico**

En este capítulo examina temas y conceptos que se relacionan con los propósitos de la investigación, tratará argumentos de cobertura vegetal, la relación de la precipitación con el caudal y la determinación de la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica.

##### **2.1.1 Cobertura vegetal de la cuenca hídrica.**

Cobertura vegetal se denomina a la capa de vegetación natural que protege la superficie del suelo, la vegetación se calcula en porcentajes de área y su estimación evidencia el cambio o conservación de la misma en un periodo de tiempo determinado. Comprender las modificaciones que existe en la cobertura vegetal permite identificar el estado ecológico del sitio de estudio (Nieto y Jiménez, 2016), por tal razón las alteraciones de ecosistemas está directamente relacionada con las dinámicas del recurso hídrico de la subcuenca dl río El Ángel.

El recurso suelo está en constante modificación por la interacción de factores biofísicos, económicos, tecnológicos, culturales que se desarrollan en él, las modificaciones de la superficie son resultado de las actividades antrópicas a escala espacial y temporal las mismas influye en los cambios de patrones del paisaje natural (Rodríguez, 2011). Los cambios de uso de suelo cada vez son más acelerados y por tal razón es necesario analizar los efectos sobre la cobertura vegetal y escorrentía superficial de la subcuenca del río El Ángel.

La escorrentía superficial altera su comportamiento cuando desaparece cobertura vegetal de la cuenca hidrográfica, la vegetación natural extraída hace que el caudal aumente, esto debido a que el suelo se satura de forma acelerada. La vegetación amortigua el efecto de la precipitación en el suelo descubierto y logra que la escorrentía disminuya (Pizarro, 2006). El presente estudio analizará el comportamiento de las actividades de ocupación del uso del suelo en relación con la deforestación de la subcuenca del río El Ángel y la incidencia que tiene con el caudal.

### **2.1.1.1 Análisis multitemporal de la cobertura vegetal**

El ser humano ejecuta actividades necesarias para el desarrollo económico como la agricultura, ganadería y obras civiles; las cuales afectan de forma directa al cambio del paisaje natural del espacio de intervención. Las actividades vulneran el estado de conservación de la vegetación y el entorno natural, por esta razón dichas modificaciones deben ser evaluadas mediante prácticas de Teledetección Satelital y Análisis Multitemporal con Sistemas de Información Geográfica (Isurralde, 2012).

El análisis multitemporal de imágenes satelitales permite evaluar y comparar los procesos de transformación de cobertura vegetal que origina las actividades que realiza el ser humano, este análisis permitió evidenciar las modificaciones de paisaje de la subcuenca del río El Ángel. La teledetección consiste en registrar imágenes satelitales, las cuales son examinadas con los Sistemas de Información Geográfica con el propósito de obtener información automatizada de las variaciones del terreno para un periodo de tiempo determinado (Cárcamo y Rejas, 2015).

### **2.1.1.2 Cambio del uso de suelo**

El humano como especie ha transformado el territorio geográfico de diferentes maneras al paso del tiempo, las distintas actividades que realiza generan cambios constantes en la superficie terrestre por tal razón es necesario identificar los impactos provocados al suelo y cobertura vegetal (Silva y Rubio, 2014). Los impactos traen como consecuencia el agotamiento de la biodiversidad y producen cambios en la funcionalidad del ambiente, como resultado se pone en vulnerabilidad los servicios ambientales para las futuras generaciones (Pinos, 2016).

El cambio de uso de suelo que produce las interacciones antrópicas a escala temporal con el entorno biofísico pueden comprometer la biodiversidad biológica y la degradación del suelo, los cambios están relacionados con el crecimiento de población rural, la expansión agrícola y prácticas ganaderas las mismas que se analizaron en esta investigación, dichas actividades producen impactos ambientales negativos por implementar plantaciones forestales con especies exóticas y sobrepastoreo. Los procesos de evapotranspiración, infiltración y distribución del agua tienen relación directa con el cambio de uso de suelo

y cobertura vegetal, el análisis de la vegetación natural permite diagnosticar los efectos de la desertificación en la hidrología de la cuenca (Martínez, 2009), estos mecanismos establecieron el análisis del déficit hídrica de la subcuenca del río El Ángel.

### **2.1.2 El caudal superficial de la cuenca hidrográfica**

El receptor natural de la precipitación de denomina cuenca hidrográfica, parte de la precipitación se convierte en escorrentía superficial. El escurrimiento depende de las condiciones climáticas y características físicas de la cuenca (Gasparí, 2012).

El caudal se define como el proceso por el cual el agua superficial fluye por el plano del terreno hacia el cauce de un río principal o mar (Beteman, 2007). El caudal es el volumen de agua que produce la precipitación, menos la infiltración y retención superficial. El escurrimiento superficial está en función del tiempo de la precipitación, permeabilidad de la superficie del suelo, tipo de vegetación, pendiente, nivel freático y extensión de la cuenca hidrográfica (SENAMHI, 2011), variables importantes que consideró el diagnóstico del caudal del río El Ángel.

#### **2.1.2.1 Relación precipitación – escorrentía**

El cambio de uso de suelo y la pérdida de cobertura vegetal por causa de diversas actividades que desarrolla el ser humano puede de afectar la sostenibilidad de la cuenca hidrográfica como también al ambiente de la región, la práctica de acciones no sustentables con la vegetación alteran la dinámica de la escorrentía superficial, influye en la disminución de niveles de agua, además genera impactos que acelera los procesos de erosión y degradación del suelo y reduce la biodiversidad (Librada, 2004).

La determinación del cambio de la cobertura vegetal es importante para corroborar el estado del recurso agua, la pérdida de vegetación altera al ciclo hídrico de la cuenca, esto tiene como consecuencia el aumento del caudal superficial. La cobertura vegetal funciona como un elemento que sistematiza la precipitación, esto se refiere a que disminuye la fuerza de escurrimiento para lo cual los efectos anteriormente mencionados se usaron en el análisis de esta investigación.

### **2.1.2.2 Coeficiente de escorrentía**

La pérdida de bosque natural altera las funciones del ciclo hidrológico como también una redistribución de precipitaciones y aumento de la escorrentía superficial ya que la vegetación actúa como un regulador de estos procesos. Es importante estudiar los cambios de cobertura vegetal del área de incidencia del río El Ángel, por cuanto esto se cuentan con métodos como el “Número Curva” que permiten relacionar los efectos de las precipitaciones en la superficie de la cuenca y determinar de esta forma coeficientes de escorrentía (Pizarro, 2006).

El coeficiente de escorrentía representa la relación entre la precipitación que escurre en la superficie de la cuenca hidrográfica en un tiempo determinado, dividido para el volumen total de precipitación. El modelo de escorrentía es primordial para determinar y simular caudales con base a diferentes procesos físicos de una cuenca como la infiltración, evapotranspiración, flujo superficial y flujo subterráneo (Carbajal y Roldán. 2007).

### **2.1.3 Balance hídrico de la cuenca hídrica**

El proceso que regula el abastecimiento de agua a los seres vivos en la cuenca hidrográfica es el ciclo hidrológico, este proceso depende de cada uno de los elementos que conforman la cuenca como la atmósfera, vegetación, suelo, agua y que actúan de forma conjunta en interacción para crear un ambiente natural (Maderey, 2001).

A medida que pasa el tiempo es probable que la disponibilidad del agua disminuya y la demanda del recurso aumente debido al crecimiento de la población, el cambio climático y la industrialización. Es primordial la cuantificación del recurso hídrico con el objeto de generar información base para establecer una planificación en seguridad hídrica y conocer la disponibilidad de agua que presenta una cuenca (SENAMHI, 2017).

La disponibilidad del recurso hídrico en una región se basa con el volumen promedio que recibe anualmente una cuenca y del agua que vuelve a la atmósfera en forma de transpiración. La importancia de establecer y conocer el régimen hídrico de una cuenca se define en caracterizar las épocas con déficit hídrico que el sistema presenta y determinar la disponibilidad de agua superficial de los ríos (Ruíz, 2012). De esta manera

se determinó el régimen hídrico de la subcuenca del río El Ángel para determinar los ingresos y egresos de agua.

Para elaborar el balance hídrico se necesita datos reales o simulados de precipitación e información climatológica con el fin de calcular el requerimiento hídrico de una cuenca en particular (Cleves, 2016). La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de la estimación correcta del balance hídrico, esto permite analizar el ciclo del agua en sus diferentes etapas, como la cantidad de agua que recibe la cuenca por precipitación y la cantidad de agua que pierde la cuenca en forma de evapotranspiración, escorrentía e infiltración. El modelo de balance hídrico es un factor esencial para la gestión del agua (Ordoñez, 2011). Los registros meteorológicos de la subcuenca del río El Ángel consideró la base de datos Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

#### **2.1.4 Estrategias de conservación del recurso hídrico**

Para lograr trabajos que mitiguen de forma paulatina las acciones y las prácticas definidas como equivocadas en la gestión del recurso hídrico se necesita de un proceso educativo formal, donde las actividades que se realicen sean valoradas por las habitantes de la cuenca en cuanto al impacto que causan. La educación ambiental pretende aportar con elementos para afrontar de forma colectiva e individual los problemas actuales para la prevención de eventualidades (Moreira, *et al*, 2015).

##### **2.1.4.1 Determinación de la oferta hídrica**

El recurso agua está comprometido por la humanidad, su disponibilidad en la naturaleza se encuentra afectada por la sobreexplotación de acuíferos como también por contaminación de cuerpos de agua, así como también por la deforestación, prácticas agrícolas inadecuadas y el incremento de áreas urbanas en zonas de producción hídrica (Ordoñez, 2011).

El incremento de la población mundial aumenta la demanda de agua dulce, esto en muchas ocasiones ha llevado a varios lugares del planeta a enfrentar conflictos hídricos (Silva, *et al*, 2014). La demanda hídrica identifica las potencialidades y restricciones que tiene el recurso hídrico en la cuenca por medio de inventarios hidrológicos. El análisis

histórico de datos climatológicos y el cálculo de balance hídrico identifica el mes de oferta hídrica más alta y el mes de oferta hídrica más baja (Flores, 2015).

## **2.2 Marco Legal**

El marco legal aporta las bases reglamentarias para el desarrollo de la investigación las mismas que se fundamentan en la Constitución del Ecuador (2008) y Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y aprovechamientos del Agua (2014).

La Constitución del Ecuador (2008) garantiza la preservación de los recursos naturales del país con el objeto de asegurar el beneficio ecosistémico a futuras generaciones. El artículo 411 expresa que:

El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico y que regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, especialmente en las fuentes y zonas de recarga (p.182).

El capítulo séptimo de los Derechos de la naturaleza (2008), en el Artículo 71 señala que la naturaleza tiene derecho al respeto, mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales; por lo consiguiente el estado incentivará a personas jurídicas, naturales y colectivas a la protección del ambiente y garantizar el respeto de los ecosistemas. De igual manera el artículo 72 indica que, la naturaleza tiene derecho a la restauración y en caso de impacto ambiental grave de los recursos naturales de modo que el Estado usará mecanismos eficientes la restauración y mitigación para consecuencias ambientales adversas. El artículo 73 discurre usar medidas de precaución y restricción para actividades que conduzcan a la extinción de especies y ecosistemas o alteren los ciclos naturales.

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y aprovechamientos del Agua (2014) hace referencia en el artículo 14 el cambio de uso de suelo done menciona que:

El Estado regulará las actividades que puedan afectar la cantidad y calidad del agua, el equilibrio de los ecosistemas en las áreas de protección hídrica que abastecen los sistemas de agua para consumo humano y riego; con base en

estudios de impacto ambiental que aseguren la mínima afectación y la restauración de los mencionados ecosistemas (p. 6)

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Descripción del área de estudio

Este apartado describe las características generales del área de estudio tal como la ubicación, temperatura, elevación, tipo de clima y las principales actividades económicas. Describe el tipo de investigación y procedimiento metodológico para cumplimiento de los objetivos establecidos.

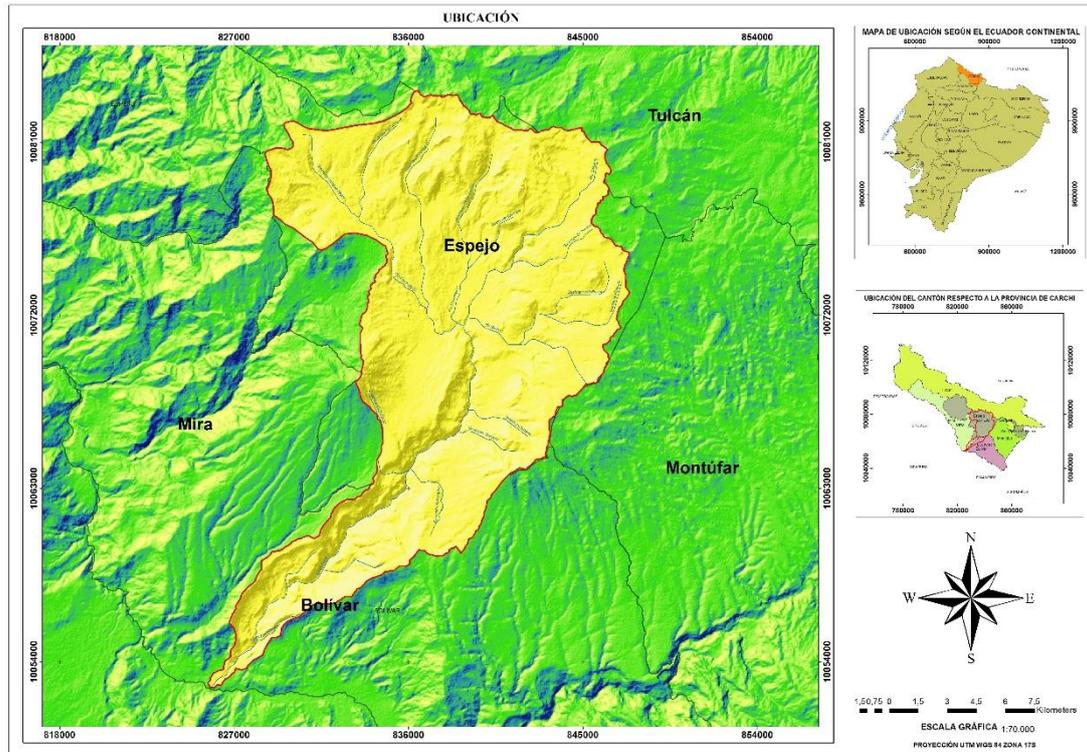
##### 3.1.1 Descripción del área de estudio

La subcuenca del río El Ángel se encuentra ubicada al norte del país en la provincia del Carchi, cantones Espejo, Mira Bolívar (GADCE, 2011). La Tabla 1 describe los puntos de referencia espacial del el área de estudio.

Tabla 1  
*Coordenadas WGS 1984 UTM Zona 17 Sur de la subcuenca del río El Ángel.*

<b>Puntos</b>	<b>Coordenada UTM X</b>	<b>Coordenada UTM Y</b>
Norte	838625	10083622
Sur	825999	10052676
Este	846975	10072038
Oeste	833469	10071004

El mayor porcentaje de área de la cuenca del río El Ángel se encuentra en el cantó Espejo Figura 1. Las características de subcuenta del río El Ángel correspondientes al clima ecuatorial meso térmico semi-húmedo y clima ecuatorial de alta montaña, presenta precipitaciones que van desde los 925.9 mm hasta los 3226 mm, esto demuestra las variaciones de las cotas y diferencia de altitud entre los 900 y 3000 msnm (GADCE, 2011).



**Figura 1.** Ubicación de la subcuenca del río El Ángel.

La variación de temperatura de la cuenca del río El Ángel ocurre como consecuencia a la diferencia altitudinal sobre el nivel del mar. En general las temperaturas medias mensuales y anuales no presentan variación mayor a 5 °C. La subcuenca del río El Ángel se encuentra en la formación geológica de la Sierra Andina. El levantamiento de esta cordillera ocasionó la formación de las cuencas orientales y occidentales en la Era Paleozoica hace 230 millones de años (GADCE, 2011).

Las actividades agrícolas y ganaderas son la base de la economía de la población, representa el 50.30 % de la economía de la subcuenca. El mayor porcentaje de suelo se destina para la producción de cultivos y pastos; la cobertura vegetal ha cambiado con respecto al uso de suelo de los años 1990 a 2010 (GADCE, 2011).

### 3.2 Enfoque y tipo de investigación

El enfoque de esta investigación es de carácter cuantitativo. Se analizó el cambio de la cobertura vegetal y su incidencia en el caudal del río El Ángel, el cambio de la cobertura vegetal en un periodo de 18 años. Se relacionó los cambios de cobertura vegetal con el

caudal del río El Ángel por el mismo periodo de tiempo. El análisis de la cobertura vegetal con el caudal generó información en la cual se determinó la incidencia de las mismas.

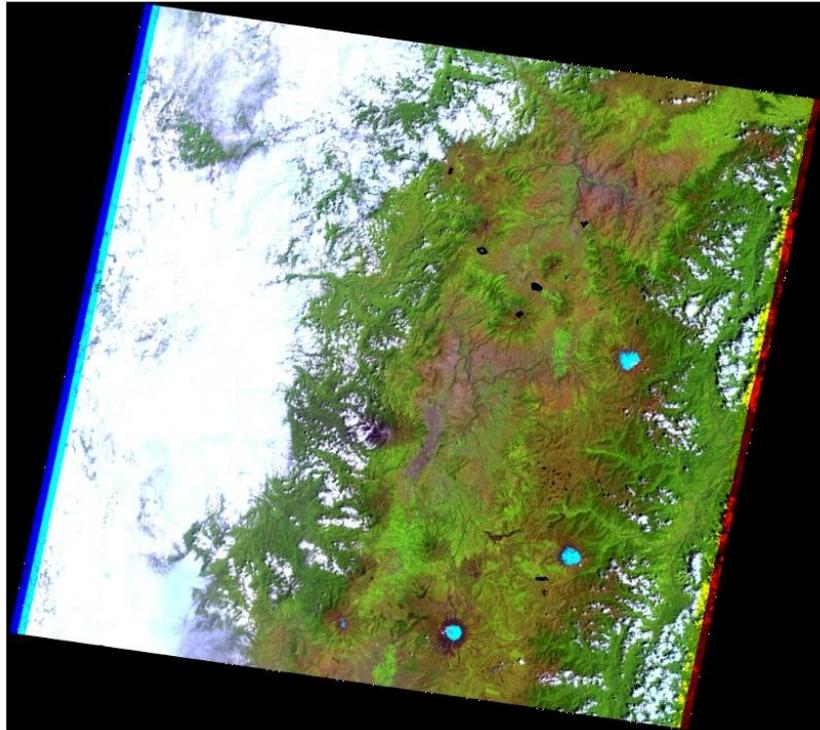
### **3.3 Procedimiento de investigación**

La presente investigación tiene como objeto el estudio del cambio de la cobertura vegetal y escorrentía de la subcuenca del río El Ángel en el periodo 1999 – 2017, estableció la incidencia del cambio de uso de suelo con el caudal del río principal y determinó la oferta hídrica de la subcuenca con el análisis de balance hídrico.

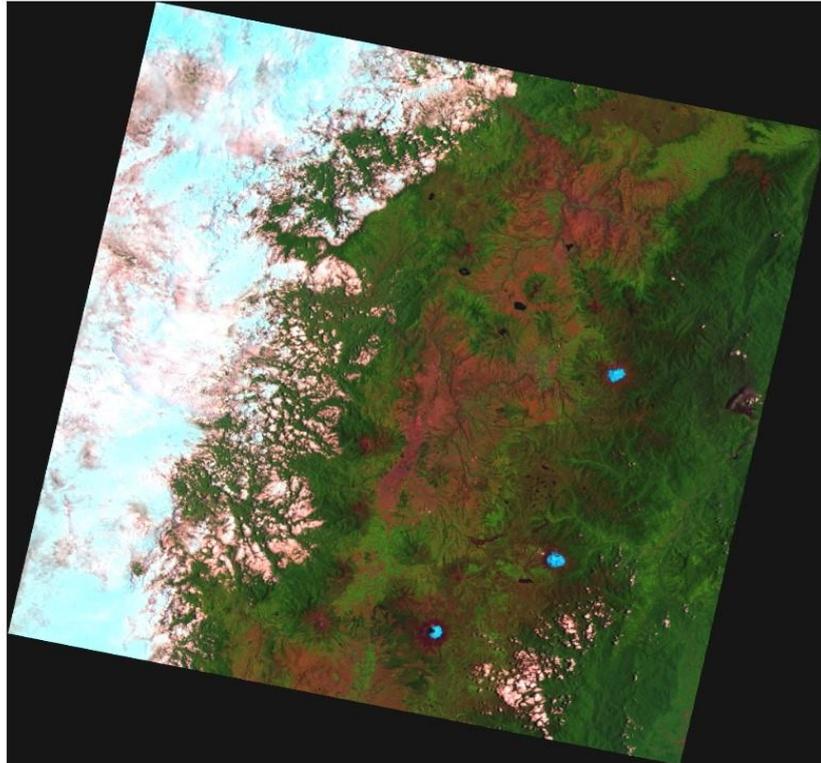
#### **3.3.1 Fase 1. Cambio de la cobertura vegetal**

El cambio de cobertura vegetal y uso de suelo se realizó mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales LANDSAT y la aplicación del método de Clasificación Supervisada (Arango, 2005) con el fin de identificar las clases de información de interés de los diferentes tipos de cobertura terrestre del área de estudio, esto se denominó sitios de entrenamiento. Estas áreas de la imagen satelital se basó en el conocimiento previo del número de coberturas asociados a cada clase espectral presente en la imagen LANDSAT (Eastman, 2012).

La clasificación supervisada de imágenes satelitales se realizó con el software ArcGis 10.7 el cual procesó algoritmos de máxima verosimilitud o máxima probabilidad. El algoritmo etiqueta cada pixel de las diferentes muestras de cobertura y uso de suelo que se identificó del área influencia. El análisis de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo se utilizó dos imágenes satelitales LANDSAT 5 y LANDSAT 7, con resolución de 30m para los años de 1999-2017 (Álvarez, *et al*, 2015). Las imágenes satelitales se represente en la Figura 2 y Figura 3.



**Figura 2.** Imagen satelital LANSAT 5. 1999 11 14  
Fuente: Servicio Geológico de los EE. UU (2019).



**Figura 3.** . Imagen satelital LANSAT 7. 2017 09 20  
Fuente: Servicio Geológico de los EE. UU (2019).

La validación del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal del área de estudio se realizó con el análisis del grado de concordancia de los parámetros estudiados, se aplicó el elemento estadístico coeficiente Kappa que evaluó la correspondencia de cada clase de cobertura vegetal de la subcuenca (Cerdea, 2008). La matriz de confusión Kappa fue elaborada con el software ArcGis 10.7 y la herramienta de análisis estadístico *Pivot Table*.

### 3.3.2 Fase2. Variación del caudal de la subcuenca del río El Ángel

La variación del caudal con respecto a la cobertura vegetal se realizó con el método número curva, el cual permitió caracterizar el potencial de escorrentía de la subcuenca hidrológica, este método determinó las características físicas del área de estudio como la densidad y tratamientos de coberturas, también el grupo hidrológico del suelo (Carvajal y Fernández, 2017). El método estableció la relación que tiene la precipitación con el escurrimiento en función del tipo de suelo y cobertura vegetal con las condiciones hidrológicas. La estimación del escurrimiento superficial del Servicio de Conservación de Suelos de los EE UU se realizó mediante la ecuación:

Ecuación 1:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Donde:

Pe = Escorrentía Directa (mm)

P = Precipitación Mensual (mm)

S =  $(25400/NC) - 254$  y NC = Número curva.

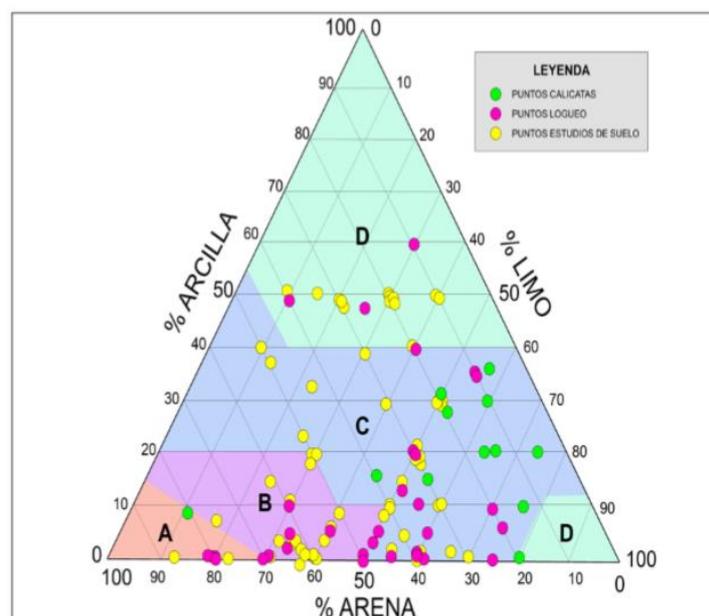
El cálculo del valor número curva consideró variables como el uso-cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y pendiente. La variable cobertura vegetal del área de estudio se determinó de acuerdo al objetivo 1 de esta investigación. Para la variable grupo hidrológico de suelo se estimó las clases texturales del terreno como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2  
*Categorización hidrológica del suelo*

Grupo de Suelo	Descripción
A	Suelos con bajo potencial de escurrimiento. Su composición en general presenta 10% de arcilla y 90% de arena o gravas. Son suelos profundos de textura gruesa; altamente drenados.
B	Suelo con mesurado potencial de escurrimiento, cuando están muy húmedos tienen infiltración moderada. Su composición presenta de 10 a 20% de arcilla y de 50 a 90% arena. Su textura es franco –arenosa o arena-franca.
C	Suelos con medio – alto potencial de escurrimiento. Su composición presenta de 20-40% de arcillas y menos del 50% de arena. Su textura es franco, franco-limosa, franco–arcilloso-arenoso, franco-arenosa y franco-arcillo-limosa.
D	Son suelos con alto potencial de escurrimiento. Su composición presenta 40% de arcilla y menos del 50% de arena, su textura es arcillosa.

**NOTA:** Villarroya (2013). Fuente Estimación del parámetro hidrológico del número curva NC.

La textura de suelo de la microcuenca de río El Ángel se generó con la descripción de textura del Sistema de Información Nacional – Archivos de Información Geográfica escala 1:25000 mediante el software Arc Gis 10.7 y se realizó la clasificación de los grupos hidrológicos de acuerdo al diagrama de Ferrer y Julia (Córdova, 2017), el cual establece el grupo hidrológico de suelo de acuerdo a la textura. (Figura 4).



**Figura 4.** Relación de textura de suelo y clasificación USLA.  
 Fuente: Córdova (2017).

La pendiente del terreno se elaboró con el Modelo de Elevación Digital para lo cual se clasificó en dos grupos; menor al 3% y mayor o igual al 3% (Ferrer, 1995). El cálculo de pendiente se realizó con el software 10.7. Una vez que se determinó las características de uso y cobertura vegetal, textura de suelo, pendiente de la subcuenca el valor de curva número se obtuvo mediante la Tabla 3.

Tabla 3  
*Número curva para condiciones medias de humedad*

<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>Pendiente</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Barbecho R	>=3	77	68	89	93
Barbecho N	>=3	74	82	86	89
Barbecho R/N	<3	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	>=3	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	>=3	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	>3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	>=3	63	75	83	86
Cereales de invierno N	>=3	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	<3	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	>=3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	>=3	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	<3	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	>=3	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos N	>=3	54	69	78	82
Rotación de cultivos densos R/ N	<3	52	67	76	79
Pradera pobre	>=3	68	78	86	89
Pradera media	>=3	49	69	78	85
Pradera buena	>=3	42	60	74	79
Pradera muy buena	>=3	39	55	69	77
Pradera pobre	<3	46	67	81	88
Pradera media	<3	39	59	75	83
Pradera buena	<3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovecha forestal pobre	>=3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovecha forestal media	>=3	39	60	73	79
Plantaciones regulares de aprovecha forestal buena	>=3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovecha forestal pobre	>3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovecha forestal media	>3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovecha forestal buena	>3	25	50	67	76
Masa forestal muy clara		56	75	86	91
Masa forestal clara		46	68	78	83
Masa forestal media		40	60	69	76
Masa forestal espesa		36	52	62	69
Masa forestal muy espesa		29	44	54	60
Rocas Permeables	>=3	94	94	94	94
Rocas Permeables	<3	91	91	91	91

Rocas impermeables	>=3	96	96	96	96
Rocas impermeables	<3	93	93	93	93

**Nota:** Ferrer (1995). Fuente, Generación automática de número curva con sistemas de información geográfica.

De acuerdo a Temez (1987), clasificó el uso de la tierra en dos grupos; N refiere a cultivos que siguen curvas de nivel y R refiere a cultivos que siguen la línea máxima de pendiente. El uso Barbecho corresponde a tierras de cultivo que no son aprovechadas; el uso Cultivo en línea se refiere a la práctica de labranza en hileras, el uso de Cereales de invierno representa cultivos de trigo, cebada y avena; el uso Rotación de cultivos indica la secuencia cíclica de siembras de una parcela; el uso Pradera se refiere a cultivos de alimentación de ganado; el uso de Plantaciones regulares de aprovecha forestal indica las plantaciones de eucaliptos, pinos ; el uso Masa forestal pertenece a vegetación arbórea y arbustiva; el uso Rocas correspondes a superficies que favorecen la escorrentía.

El método del Servicio de Conservación de Suelos de las Estados Unidos parámetro Curva Número estima la variable precipitación como pate del análisis del escurrimiento superficial. Para la subcuenca del río El Ángel la precipitación se determinó con las estaciones del Instituto de Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador, el estudio registró datos de precipitación media mensual de los años 1999 y 2017 para lo cual fueron procesados con el software ArcGis 10.7 y el método de interpolación IDW . Ver Tabla 4y Tabla 5.

Tabla 4  
*Precipitación estaciones INAMHI año 1999.*

CÓDIGO	M301	M305	M312	M314	M102	M103	M104	M694
ENE	124.4	178.6	202.8	40.9	145.4	126.4	127.6	344.4
FEB	142.1	165.6	109.1	88.2	195.4	151.2	86	274.4
MAR	50.6	128.8	110.4	93.7	106.4	200.4	63	342.6
ABR	63.9	130.7	119.5	77.9	121.2	125.5	91.8	349.4
MAY	42.0	100	38.8	18.2	79.3	145.3	60.7	358.2
JUN	40.9	106.3	42.3	80.4	69.7	101.8	63.7	106.5
JUL	9.1	89.6	11.2	15.6	6.4	51.1	11.9	90.2
AGO	11.2	65.2	4.0	7.3	21.2	52.4	5.0	103.2
SEP	61.8	60.1	65.8	38.6	105.1	82.4	61.2	187.5
OCT	16.0	198.7	49	11.2	53.2	45.2	55.7	422.6
NOV	56.1	188.3	112.2	35.6	147.2	150.2	67.3	399.2
DIC	175.8	146.8	246.5	119.8	285.8	265.2	273.6	418.4
ANUAL	793.9	1558.7	1111.6	627.4	1336.3	1497.1	967.5	3396.3

**Nota:** Fuente INAMHI (1999).

Los datos de precipitación para el año 1999 de la subcuenca del río El Ángel se registró con las estaciones M301 – FF CC Carchi; M305-Julio Andrade; M312-Pablo Arenas; M314-Ambuquí; M102-El Ángel; M103-San Gabriel; M104-Mira; M694-Maldonado Carchi . La interpolación de datos ejecutó el método IDW con el software ArcGis. 10.7.

Tabla 5  
*Precipitación estaciones INAMHI año 2017.*

<b>CODIGO</b>	<b>M301</b>	<b>M305</b>	<b>M312</b>	<b>M314</b>	<b>M103</b>	<b>M694</b>
ENE	62.6	58.6	82.3	19.5	54.3	344.4
FEB	4.0	18.1	2.0	0.0	27	274.4
MAR	35.2	28.8	28	23.1	42.6	342.6
ABR	81.1	255.4	143.1	73.3	84.3	349.4
MAY	51.6	91.4	21.9	23.0	77.5	358.2
JUN	13.3	138.6	20	20.0	75.3	106.5
JUL	3.3	136.4	0.7	6.5	64.6	90.2
AGO	0.6	25.9	1.2	9.0	11.3	103.2
SEP	20.2	110.9	23.7	29.9	63.0	187.5
OCT	48.1	149.7	73.2	43.4	99.5	422.6
NOV	76.9	51.9	51.7	43.8	66.4	399.2
DIC	60.2	76.8	88.4	46.3	89.0	418.4
ANUAL	457.1	1142.5	536.2	337.8	754.8	3396.3

**Nota:** Fuente INAMHI (2017).

Los datos de precipitación para el año 2017 de la subcuenca del río El Ángel se registró con las estaciones M301 – FF CC Carchi; M305-Julio Andrade; M312-Pablo Arenas; M314-Ambuquí; M103-San Gabriel; M694-Maldonado Carchi. La interpolación de datos ejecutó el método IDW con el software ArcGis. 10.7

### 3.3.3 Fase 3. Cálculo del balance hídrico superficial

El cálculo de balance hídrico anuales permitió cuantificar los fenómenos hidrológicos de la cuenca como, la precipitación, evapotranspiración y escorrentía y detallar los almacenamientos (Vargas, 2012). Para la estimación del balance hídrico se utilizó los aportes y pérdidas de agua de la subcuenca del río El Ángel y se aplicó la siguiente ecuación (Cajamarca, 2017).

Ecuación 2:

$$P = ET + Q \pm \Delta S$$

Donde:

P = Precipitación (mm)

ET = Evapotranspiración (mm)

Q = Flujo superficial (mm)

$\Delta S$  = Variación de almacenamiento (mm)

La evaluación del balance hídrico de la cuenca del río El Ángel se realizó con el software ArcGis 10.7, el software procesó datos de precipitación y evapotranspiración medias mensuales de la subcuenca y con la herramienta Map Algebra se aplicó la siguiente ecuación (*op.cit.*).

Ecuación 3:

$$P = ET + \Delta$$

Donde:

P = Precipitación (mm)

Et = Evapotranspiración (mm)

$\Delta$  = Cantidad de agua (mm)

La precipitación mensual y anual de la subcuenca del río El Ángel se determinó con datos de estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador. La variable precipitación para el estudio de balance hídrico estableció un promedio de 25 años. Las estaciones más cercanas al área de estudio son: M102 El Ángel; M103 San Gabriel; M104 Mira FAO La Portada; M301 FF CC Carchi; M35 Julio Andrade; M3014 Ambuquí; M694 Maldonado Carchi. Ver Tabla 6.

Tabla 6  
*Precipitación anual-mensual*

<b>CODIGO</b>	<b>M301</b>	<b>M305</b>	<b>M312</b>	<b>M314</b>	<b>M102</b>	<b>M103</b>	<b>M104</b>	<b>M694</b>
ENE	66.7	94.4	83.5	32.7	89.7	92.4	53.5	344.4
FEB	50.6	99.7	76.5	39.1	79.9	87.9	64.3	274.4
MAR	61.2	109.3	90.1	56.9	101.7	100.2	57.7	342.6
ABR	61.4	128.3	89.0	59.1	85.1	101.1	68.7	349.4
MAY	42.0	124.9	62.6	47.8	70.3	97.0	61.3	358.2
JUN	18.7	71	22.8	26.2	35.2	61.6	24.5	106.5

JUL	9.5	56.1	12.7	13.6	24.3	52.1	13.6	90.2
AGO	6.5	36.1	7.6	13.2	19.3	42.1	8.7	103.2
SEP	21.8	40.6	22.7	18.4	35.2	42.1	23.0	187.5
OCT	52.3	102	68.9	44.6	82.7	94.3	65.6	422.6
NOV	65.7	136	97.4	48.6	114	113.4	71.9	399.2
DIC	74.2	111	97.0	41.2	111.1	107.7	73.0	418.4
<b>ANUAL</b>	<b>531</b>	<b>1109.9</b>	<b>731.4</b>	<b>441.8</b>	<b>849.1</b>	<b>992.3</b>	<b>586.5</b>	<b>3396.3</b>

**Nota:** Fuente: INAMHI (1990-2015) Registro de precipitación

Los datos de precipitación de la subcuenca del río El Ángel se realizó con el registro histórico de los años 1990-2015. La interpolación de datos ejecutó el método IDW con el software ArcGis. 10.7.

La temperatura de la cuenca se determinó con las estaciones meteorológicas INAMHI El Ángel M0102, San Gabriel m103, Mira FAO La Portada M104 y Chahuasquí. Para completar la información de temperatura se consideró los datos de la página web CLIMATE-DATE.ORG. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-carchi-> , que registra datos históricos de ciudades de Tulcán. Bolívar, San Isidro, San Vicente de Pusir y Pusir Grande. Ver Tabla 7.

Tabla 7  
*Temperatura anual mensual*

COD	CIUDADES					ESTACIONES INAMHI				
	TUL	BOL	SAN ISIDRO	SAN VICEN	PUSIR G	M102	M103	M104	M694	M0107
ENE	11.5	13.9	11.5	18.3	19.2	12	12.6	16.1	19.4	16.3
FEB	11.6	13.9	11.5	18.3	19.2	12	12.6	16	19.5	16.4
MAR	11.6	14	11.5	18.4	19.3	12.2	12.8	16.5	19.8	16.6
ABR	11.9	14.1	11.8	18.5	19.5	12.5	12.8	16.6	19.8	16.6
MAY	11.7	14.1	11.8	18.5	19.5	12.4	12.6	16.8	19.7	16.9
JUN	11.1	13.4	11.0	18.2	19.2	11.8	12	16.8	19.6	17.0
JUL	10.4	3.1	10.7	18.4	19.1	11.4	11.4	16.6	19.6	16.7
AGO	10.5	13.3	10.9	18.5	19.3	11.3	11.4	16.6	19.6	16.9
SEP	11.1	13.7	11.5	18.6	19.4	11.8	11.7	16.8	19.6	17.2
OCT	11.7	14	11.6	18.7	19.4	12.3	12.6	16.5	19.5	16.9
NOV	11.8	14	11.6	18.3	19.1	12.1	12.9	16.3	19.2	15.2
DIC	12.1	14.1	11.7	18.2	19.0	12.1	12.8	16.1	19.3	16.4
<b>ANUAL</b>	<b>11.42</b>	<b>12.97</b>	<b>11.43</b>	<b>18.41</b>	<b>19.27</b>	<b>11.99</b>	<b>12.35</b>	<b>16.48</b>	<b>19.55</b>	<b>16.59</b>

**Nota:** Fuente, INAMHI- CLIMATE-DATA.ORG (1990-2015).

Los datos de temperatura de la subcuenca del río El Ángel se realizó con el registro histórico de 25 años, periodo 1990-2015. La interpolación de datos de temperatura para

la subcuenca del río El Ángel se determinó con el método IDW y el software ArcGis. 10.7.

La evapotranspiración potencial se determinó con el método de Thornthwaite, este método consideró la temperatura media mensual del área de estudio, como también las horas de heliofanía de la subcuenca (Duque, 2019).

Ecuación 4: Método de Thornthwaite:

$$ETP = 16 \times (10T/I)^a$$

Donde:

**I = Índice de calor anual.** El índice de calor anual se calculó con la sumatoria del índice de calor mensual (i), donde  $i = (T/5)^{1.514}$ . T = temperatura media mensual.

**T = Temperatura media mensual °C.**

$$a = 0.000000675 \times I^3 + 0.000071 \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.49239$$

Ecuación 5: ETP Corregido.

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \frac{N}{12} \frac{d}{30}$$

Donde:

**N** = Valor máximo de horas de sol.

**d** = Valor de días al mes.

Los datos para el estudio de evapotranspiración de la subcuenca del río El Ángel se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8

*Evapotranspiración media mensual anual 1990-2015*

COD	TUL	BOLI	SAN IS	SAN VIC	PUSIR G	M102	M103	M104	M694	M0107
ENE	53.5	58.1	53.5	69.3	72.9	54.1	56	61.4	73.5	62.3
FEB	48.8	52.4	48.4	62.7	65.9	48.9	50.6	55	67.2	56.9
MAR	54.2	58.8	53.6	70.2	73.9	55.3	57.3	64.2	76.9	64.4
ABR	54.1	57.5	53.5	68.7	73.1	55.2	55.5	62.8	74.5	62.4
MAY	54.9	59.5	55.4	71.1	75.7	56.6	56.4	66.3	76.3	66.5
JUN	50.0	53.7	49.4	66.7	71	51.6	51.3	64.2	73.1	65

JUL	47.8	53.7	49.4	70.3	72.5	51.1	49.7	64.9	75.4	65.1
AGO	46.8	53.1	48.9	68.7	71.7	48.9	48.1	62.8	73	64.3
SEP	51.5	57	53.6	71.6	74.7	53.1	51.3	66.1	75.3	68.3
OCT	54.7	58.7	54.1	72.3	74.6	55.8	56.1	64.1	74.4	66.2
NOV	53.4	56.7	52.3	67.1	69.9	52.9	55.9	60.7	69.7	53.7
DIC	56.7	59.1	54.3	68.5	71.4	54.6	57.1	61.4	72.7	62.9
<b>ANUAL</b>	<b>626.3</b>	<b>678.4</b>	<b>626.7</b>	<b>827.1</b>	<b>867.3</b>	<b>638.1</b>	<b>645.4</b>	<b>753.9</b>	<b>881.9</b>	<b>758</b>

**Nota:** Fuente, INAMHI- CLIMATE-DATA.ORG (1990-2015).

Los datos de evapotranspiración de subcuenca del río El Ángel se interpoló con el método IDW y el software ArcGis 10.7

El cálculo de caudal o escorrentía superficial para la ecuación de balance hídrico superficial de la subcuenca del río El Ángel se realizó con la media de los valores de número curva estimados en el objetivo 2 de este estudio, que se refiere al análisis de variación de caudal con el método de número curva. El valor promedio considerado de número curva de la subcuenca del río El Ángel se observa en la Tabla 9.

Tabla 9  
*Valor promedio CN*

<b>Año</b>	<b>CN</b>
1999	71.98
2017	73.80
<b>Promedio</b>	<b>73</b>

De acuerdo al promedio de los años de estudio el valor de número curva para la subcuenca del río El Ángel es 73.

### **3.3.4 Fase 4. Estrategias de conservación del recurso hídrico para la subcuenca del río el ángel**

Con base en los datos obtenidos de uso de suelo y cobertura vegetal se realizó un análisis multitemporal en el cual se examinó la relación del cambio de la cobertura vegetal con el caudal del río El Ángel. Se propuso estrategias para la conservación del recurso hídrico como: Protección la zonas de recarga hídrica, conservación de áreas de protección, reforestación con especies nativas y educación ambiental (Comisión Nacional Forestal, 2006).

### **3.4 Consideraciones bioéticas**

Este trabajo de investigación se realizará con base en la información de los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial parroquial, cantonal y provincial. De igual forma se contará el consentimiento de las autoridades correspondientes para la generación de información del área de estudio.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DICUSIÓN

El capítulo describe los resultados obtenidos del estudio de estimación de oferta hídrica y gestión del recurso de la subcuenca del río El Ángel. Las fases de investigación analizaron los cambios de la cobertura vegetal y uso de suelo, variación del caudal, cálculo del balance hídrico y propuesta de estrategias de conservación del recurso. A continuación se detalla los resultados obtenidos.

#### 4.1 Fase 1. Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo subcuenca del río El Ángel

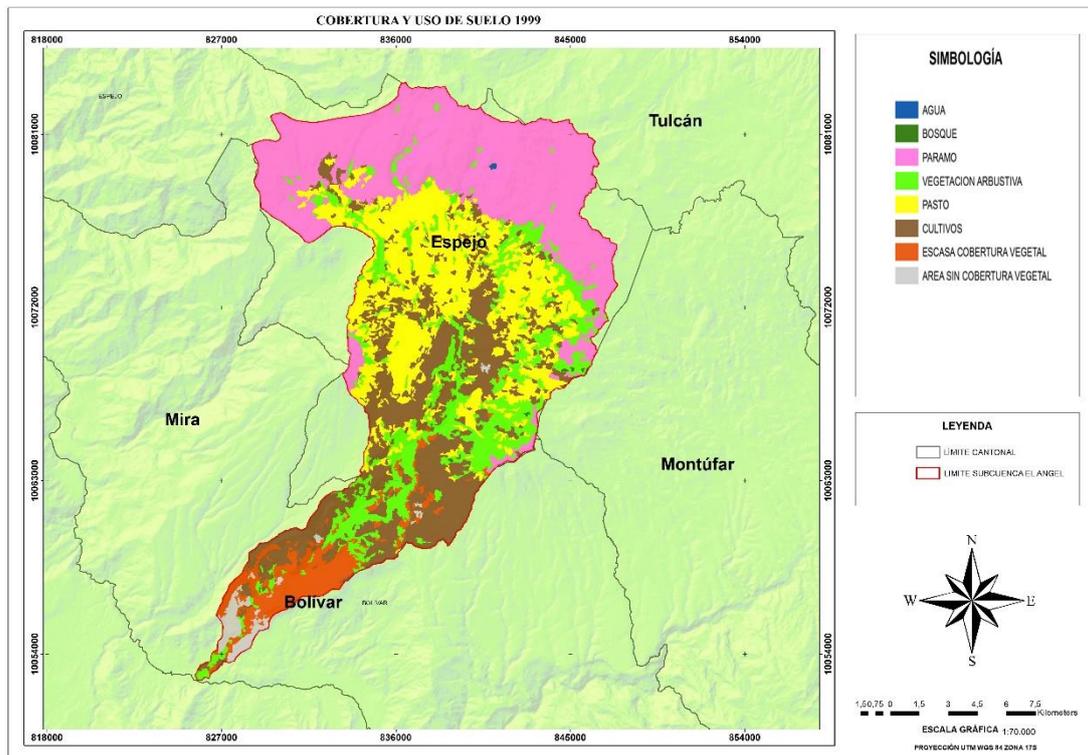
La clasificación supervisada de la subcuenca del río El Ángel determinó ocho categorías de cobertura para los periodos de estudio. Las categorías que se identificaron fueron: agua; bosque; páramo; vegetación arbustiva; pasto; cultivos; área con escasa cobertura vegetal; área sin cobertura vegetal. La imagen LANDSAT5 de 1999 presentó categorías de nubes y sombra de nubes las cuales se descartó del análisis pero se respetó la superficie para compensar con el área total de la subcuenca. A partir de este análisis se generó el estudio de cobertura vegetal y uso de suelo para los dos periodos de la subcuenta del río El Ángel. La información del análisis de Imágenes LAMDSAT se detalla en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10  
*Clases de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999*

Nº	Clase	Hectáreas	%
1	Agua	9.42	0.031
2	Bosque	19.16	0.064
3	Páramo	9626.10	32.158
4	Vegetación arbustiva	4603.46	15.379
5	Cultivos	6690.98	22.353
6	Pasto	6856.57	22.906
7	Escasa cobertura vegetal	1696.52	5.668
8	Área sin cobertura vegetal	431.66	1.442
	<b>Área Total</b>	<b>29933.886</b>	<b>100%</b>

Para el año 1999 la cobertura vegetal y uso de suelo con mayor predominancia fue la categoría de Páramo con el 32.2%, seguido de la categoría de Pasto con el 22.9 %, Cultivos con el 22.4%, Vegetación Arbustiva con el 15.4 % y menores al 10% se presenta

las categorías de Agua, Bosque, Escasa cobertura vegetal, Área sin cobertura vegetal. La Figura 5 detalla las clases de cobertura vegetal y uso de suelo para el año 1999.



**Figura 5.** Cobertura vegetal y uso de Suelo 1999

La representación de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo consideró la siguiente simbología: clase agua color azul; clase bosque color verde opaco; clase páramo color rosáceo; clase vegetación arbustiva color verde claro; clase pasto color amarillo; clase cultivos color café; clase escasa cobertura vegetal color naranja y clase sin cobertura vegetal color gris. El análisis del coeficiente Kappa para el año de 1999 determinó el **86.6 %** de concordancia para las clases de coberturas imagen LANDSAT 5 del año 1999.

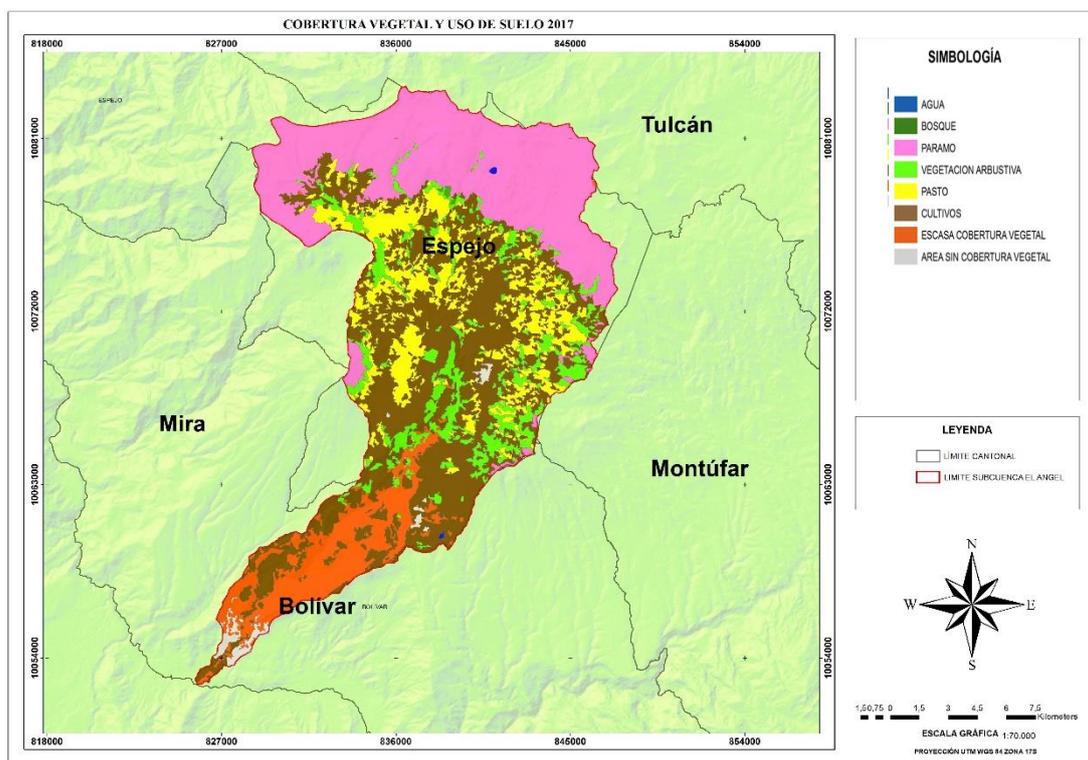
La Tabla 11 describe los resultados de la clasificación supervisada para la Imagen Satelital LANDSAT 7 del año 2017.

Tabla 11  
*Clases de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 2017*

Nº	Clase	Hectáreas	%
1	Agua	18.14	0.06
2	Bosque	32.05	0.11
3	Páramo	8941.12	29.87

4	Vegetación arbustiva	2787.15	9.31
5	Cultivos	10672.76	35.65
6	Pasto	4201.89	14.03
7	Escasa cobertura vegetal	2955.56	9.87
8	Área sin cobertura vegetal	325.63	1.09
	<b>Área Total</b>	<b>29934.323</b>	<b>100%</b>

Para el año 2017 la cobertura vegetal y uso de suelo con mayor predominancia fue la categoría de Cultivos con el 35.6%, seguido de la categoría de Páramo con el 29.9 %, Pasto con el 14.04%, y menores al 11% se presenta las categorías de Agua, Bosque, Escasa cobertura vegetal, Área sin cobertura vegetal. La Figura 6 detalla las clases de cobertura vegetal y uso de suelo para el año 2017.



**Figura 6.** Cobertura vegetal y uso de suelo 2017.

La representación de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo consideró la siguiente simbología: clase agua color azul; clase bosque color verde opaco; clase páramo color rosáceo; clase vegetación arbustiva color verde claro; clase pasto color amarillo; clase cultivos color café; clase escasa cobertura vegetal color naranja y clase sin cobertura vegetal color gris. El análisis del coeficiente Kappa para el año de 1999 determinó el

**80.39 %** de concordancia para las clases de coberturas imagen LANDSAT 7 del año 2017.

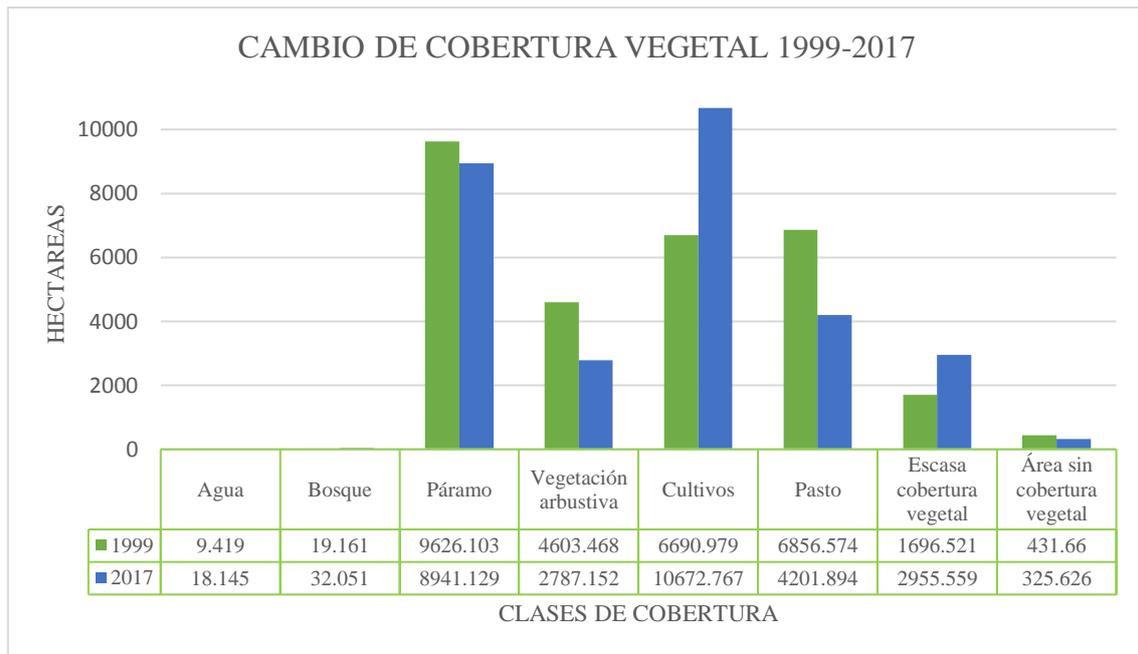
La variación de la cobertura vegetal y uso de suelo del periodo de análisis se evidenció de acuerdo al cálculo de diferencias de áreas para cada clase y año de estudio ver Tabla 12.

Tabla 12

*Cambio de cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999 – 2017*

Nº	Clase	Año 1999		Año 2017		Variación	
		ha	%	ha	%	ha	%
1	Agua	9.41	0.03	18.14	0.061	8.72	0.03
2	Bosque	19.16	0.07	32.05	0.107	12.89	0.04
3	Páramo	9626.10	32.15	8941.12	29.869	684.97	2.29
4	Vegetación arbustiva	4603.46	15.37	2787.15	9.311	1816.31	6.07
5	Pasto	6690.97	22.35	10672.76	35.654	3981.78	13.30
6	Cultivos	6856.57	22.90	4201.89	14.037	2654.68	8.87
7	Escasa cobertura vegetal	1696.52	5.66	2955.55	9.873	1259.04	4.21
8	Área sin cobertura vegetal	431.66	1.44	325.62	1.088	106.03	0.35
	<b>Total</b>	<b>29933.89</b>	<b>100</b>	<b>29934.32</b>	<b>100</b>		

Los cambio de cobertura vegetal y uso de suelos de subcuenca del río El Ángel para los años 1999 y 2017 fueron los siguientes: la clase de Bosque aumentó 0.043 %, la clase Páramo disminuyó 2.30 %, la clase Vegetación Arbustiva disminuyó 6.7%, clase Cultivos aumentó 8.90 %, la clase Pastos disminuyó 13.30%, clase Escasa Cobertura Vegetal aumentó 4.21 % y la clase Área sin Cobertura Vegetal disminuyó 0.35%. La Figura 7 detalla la diferencia de superficie del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo para el periodo 1999 – 2017.



**Figura 7.** Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca del río El Ángel

De acuerdo a Isurralde 2012 el ser humano efectúa actividades que cambian el paisaje natural en el transcurso del tiempo, dichas actividades afectan la conservación de la vegetación natural, este cambio se evidencia en la subcuenca del río El Ángel para los años de 1999 – 2017. Las principales actividades antrópicas de la subcuenta están asociadas a las prácticas agrícolas y ganaderas, el análisis del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo de estudio pone en manifiesto el incremento de la actividad agrícola mientras que para el análisis de la vegetación natural se observó una disminución del área en las categorías de páramo y vegetación arbustiva. Según Restrepo (2015) indica que las actividades agrícolas son la principal causa de cambio de uso de suelo y pérdida forestal. El mayor cambio de cobertura de la subcuenca del río El Ángel para el periodo de estudio se asocia a la actividad agrícola con el 8.29% de incremento que representa 2654.680 ha de la subcuenca.

#### **4.2 Fase 2. Variación del caudal de la subcuenca del Río El Ángel**

La variación de caudal para los años 1999 – 2017 se realizó con el análisis del método Número Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) consideró variables relacionadas con las condiciones físicas de la subcuenca del río El Ángel como: textura del suelo y grupo hidrológico; pendiente; cobertura de la tierra, número curva y precipitación.

#### 4.2.1 Textura y grupo hidrológico

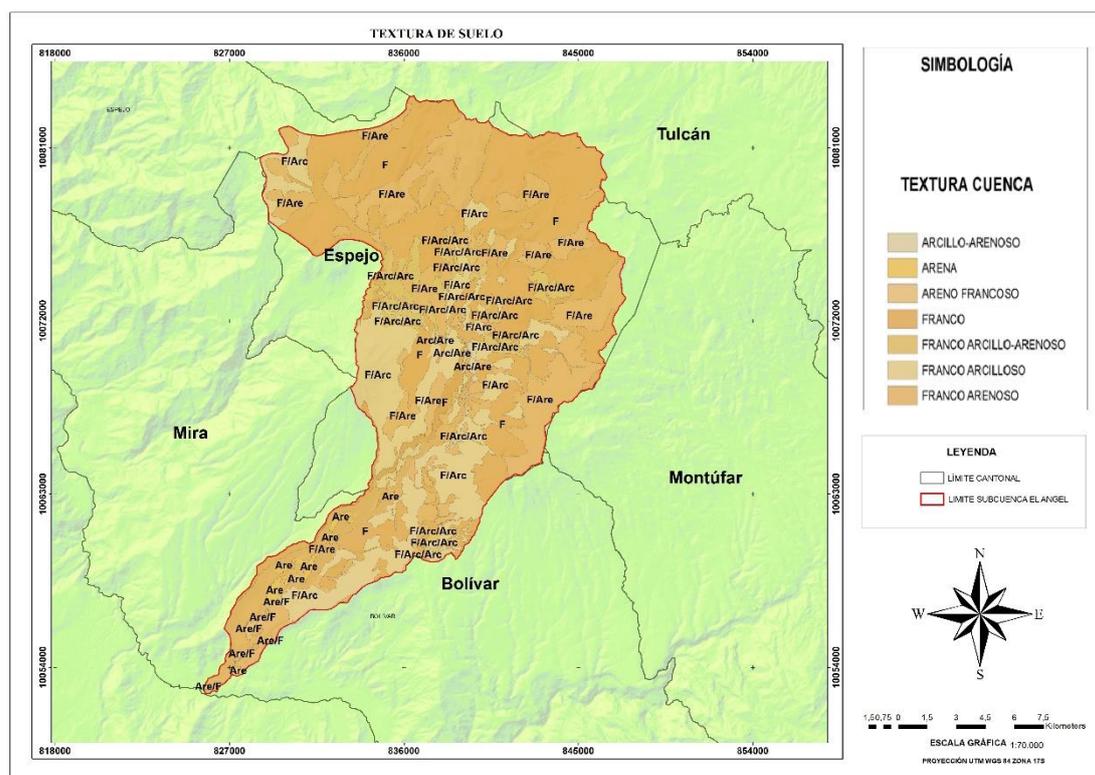
Los datos de textura para el área de estudio se determinó con la información del Sistema de Información Nacional – Archivos de Información Geográfica escala 1:25000 para lo cual los resultados se observa en la Tabla 13.

Tabla 13

*Textura de Suelo Subcuenca río El Ángel.*

<b>TEXTURA</b>	<b>ARENA%</b>	<b>LIMO%</b>	<b>ARCILLA%</b>	<b>AREA (ha)</b>
ARCILLO-ARENOSO	52	6	42	69.03
ARENA	92	3	5	269.82
ARENO FRANCOSO	65	25	10	96.13
FRANCO	42	40	18	12469.49
FRANCO ARCILLO-ARENOSO	10	56	34	1387.33
FRANCO ARCILLOSO	33	33	34	6530.25
FRANCO ARENOSO	62	25	10	9118.43

Se identificó siete clases de textura de suelo para el sitio de investigación, así pues la clase Franco caracteriza la mayor superficie de la subcuenca, mientras que la clase Areno Francoso posee el menor porcentaje para el área de estudio. La Figura 8 define la textura de suelo del sitio de estudio.



**Figura 8.** Textura de suelo subcuena del río El Ángel.

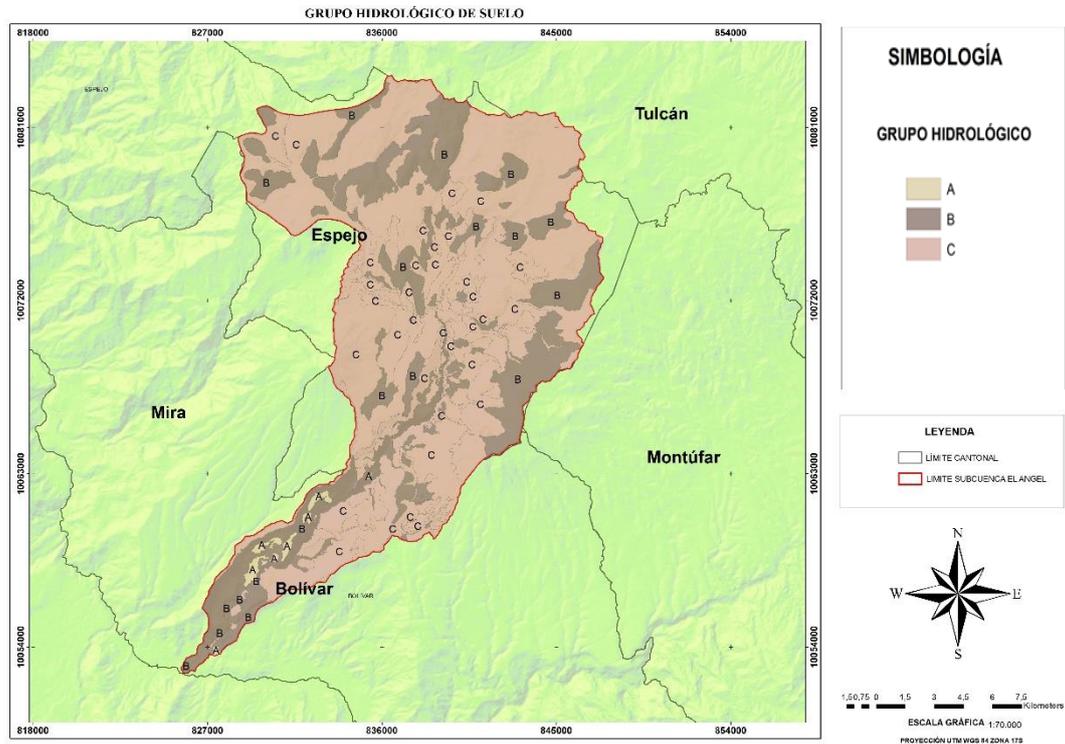
Las clases de textura de suelo se representaron con la escala de color café y las iniciales de textura en los diferentes polígonos. Los resultados del grupo hidrológico de suelo se realizaron con la clasificación hidrológica de suelo de la Tabla 2 y la relación textural del suelo con la clasificación USLA, Figura 4. La Tabla 14 describe la clasificación hidrológica del suelo de la subcuena del río El Ángel.

Tabla 14  
*Grupo hidrológico de la subcuena del río El Ángel.*

<b>GRUPO HIDRO</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>ARENA%</b>	<b>LIMO%</b>	<b>ARCILLA%</b>	<b>AREA (ha)</b>
C	ARCILLO-ARENOSO	52	6	42	69.03
A	ARENA	92	3	5	269.82
B	ARENO FRANCOSO	65	25	10	96.13
C	FRANCO	42	40	18	12469.49
C	FRANCO ARCILLO-ARENOSO	10	56	34	1387.33
C	FRANCO ARCILLOSO	33	33	34	6530.25
B	FRANCO ARENOSO	62	25	10	9118.43

Como resultado del análisis se determinó tres grupos hidrológicos para la subcuena del río El Ángel los cuales pertenecen a la categoría de A, B, y C. El grupo C con textura

Franco presenta el mayor porcentaje de área en la subcuenca. La Figura 9 describe la distribución de los grupos hidrológicos en la zona de estudio.



**Figura 9.** Grupo Hidrológico de suelo subcuenca del río El Ángel.

Las clases de grupos hidrológicos se representan en tonos de color marrón para lo cual las letras de categorías se presentan en los diferentes polígonos. El mayor porcentaje de área de la subcuenca del río El Ángel pertenece al grupo hidrológico C.

#### 4.2.2 Pendiente del terreno

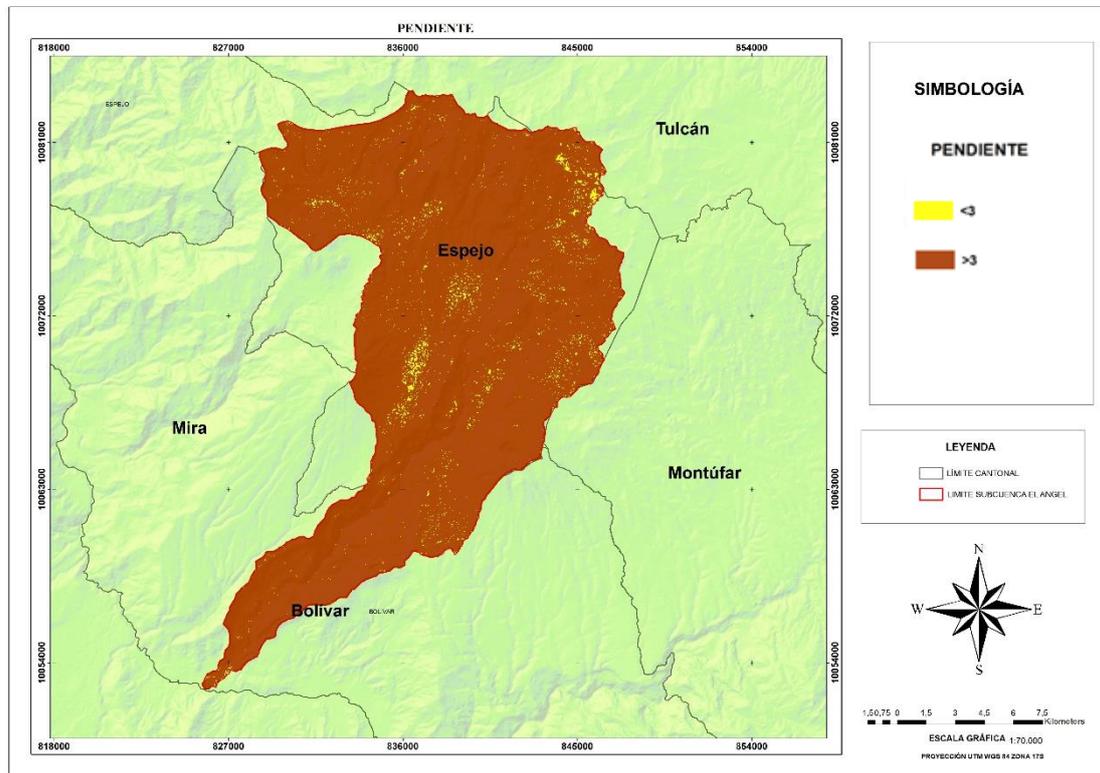
La pendiente del terreno se determinó con el Modelo de Elevación Digital (Ferrer, 1995) por consiguiente se clasificó en dos grupos, mayores o igual a 3% y menores al 3%. Los resultados se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15  
*Pendiente de la subcuenca del río El Ángel.*

<b>Pendiente</b>	<b>ÁREA (ha)</b>	<b>ÁREA (%)</b>
> o = 3%	29315.75	98%
< 3%	622.66	2%

**Nota:** Ferrer (1995).

La subcuenca del río el Ángel de acuerdo a la clasificación empleada por Ferrer 1999 presenta el 98% de pendiente mayor o igual al 3% y 2% de pendiente menor al 3%. La Figura 10 detalla los resultados de la clasificación de pendiente.



**Figura 10.** Pendiente de la subcuenca del río El Ángel.

Las pendientes con valor mayor o igual al 3% se representó con el color vino, igualmente las pendientes con valor menor a 3% se representó con el color amarillo .El mayor porcentaje de superficie de la de la subcuenca del río El Ángel pertenece a pendientes mayores al 3%.

### 4.2.3 Cobertura vegetal y uso de suelo

La cobertura vegetal y uso de suelo se determinó a partir del objetivo 1 de esta investigación, el diagnóstico de imágenes satelitales LANDSAT consideró como resultado 8 clases para cada año de exploración tal como se observa en la Tabla 16.

Tabla 16  
*Cobertura vegetal subcuenca del río El Ángel año 1999 - 2017*

N°	Clase	Año 1999		Año 2017	
		ha	%	ha	%
1	Agua	9.41	0.03	18.14	0.06
2	Bosque	19.16	0.06	32.05	0.10
3	Páramo	9626.10	32.15	8941.12	29.86
4	Vegetación arbustiva	4603.46	15.37	2787.15	9.31
5	Pasto	6690.97	22.35	10672.76	35.65
6	Cultivos	6856.57	22.90	4201.89	14.03
7	Escasa cobertura vegetal	1696.52	5.66	2955.55	9.87
8	Área sin cobertura vegetal	431.66	1.44	325.62	1.08
	<b>Total</b>	<b>29933.886</b>	<b>100</b>	<b>29934.323</b>	<b>100</b>

La categoría de cobertura de suelo con mayor significancia para el año 1999 es la clase páramo, como también la clase con menor representatividad para el mismo año es la clase agua, mientras que para el año 2017 la categoría con mayor porcentaje es la clase pasto y la categoría de menos porcentaje es la clase agua.

### 4.2.4 Curva Número

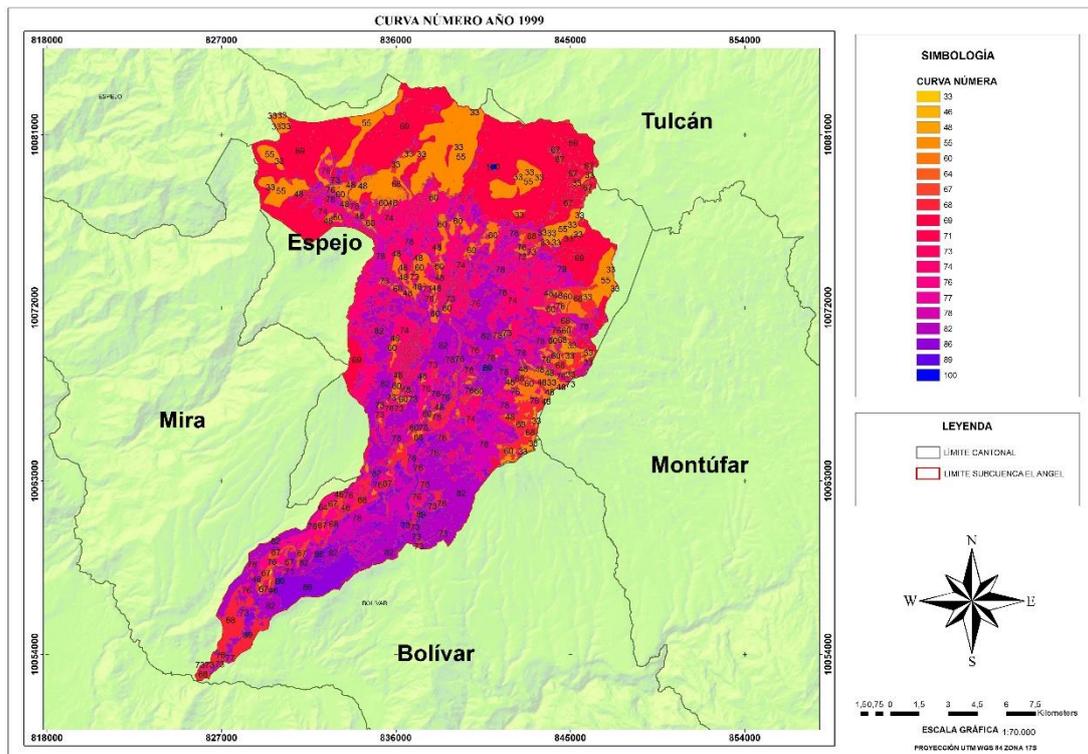
De acuerdo al análisis de las variables anteriormente mencionadas y la Tabla 3. Número curva para condiciones medias de humedad se identificó 19 valores de CN para los dos años de estudio. Ver Tabla 17.

Tabla 17  
*Curva Número subcuenca del río El Ángel año 1999-2017*

N°	Curva Número	1999		2017	
		Ha	%	Ha	%
1	33	42.86	0.14	37.21	0.12
2	46	14.37	0.05	0.05	0
3	48	40.79	0.14	33.57	0.11
4	55	3071.64	10.28	2734.49	9.15

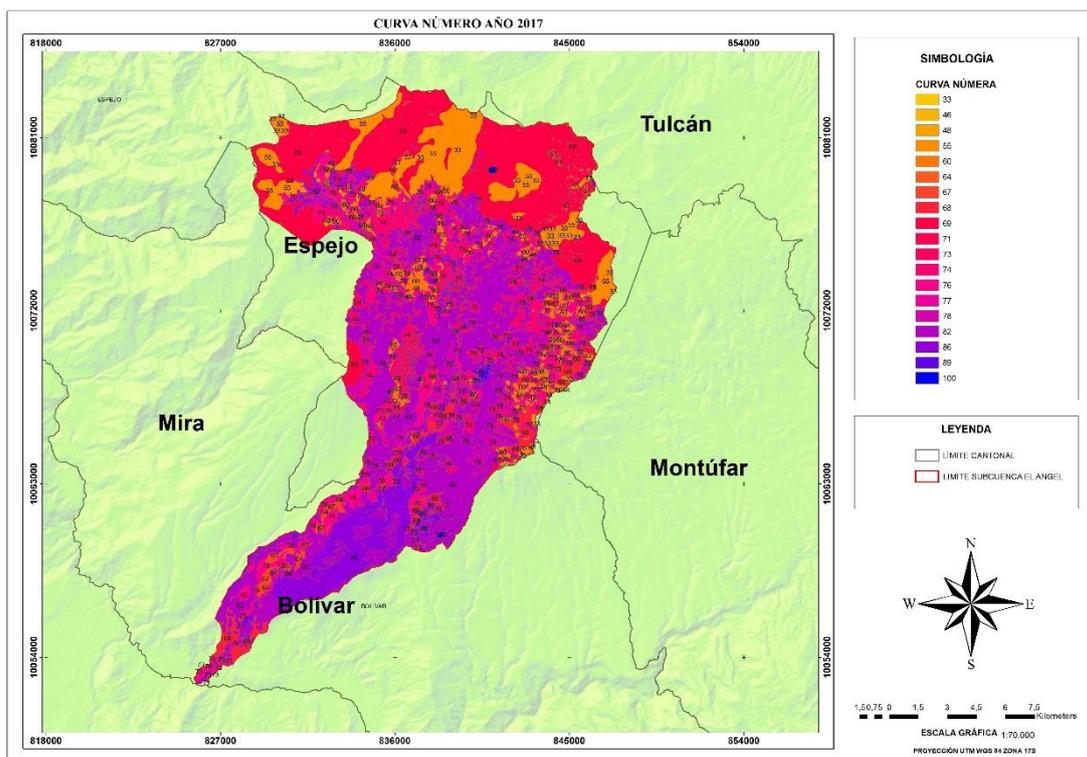
5	60	1670.17	5.59	1124.06	3.76
6	64	1.58	0.01	1.97	0.01
7	67	356.02	1.19	380.96	1.28
8	68	1796.95	6.01	1110.38	3.72
9	69	6549.95	21.92	6164.96	20.63
10	71	0.42	0.0	0.09	0.0
11	73	40.37	0.14	57.64	0.19
12	74	4988.89	16.69	2935.7	9.83
13	76	1813.24	6.07	2954.41	9.89
14	77	11.81	0.04	12.34	0.04
15	78	3265.52	10.93	2071.74	6.93
16	82	5264.23	17.61	8424.1	28.2
17	86	927.12	3.1	1777.64	5.95
18	89	29.4	0.1	55.46	0.19
19	100	9.42	0.03	18.14	0.06
<b>Total</b>		<b>29885.3</b>	<b>100</b>	<b>29934.32</b>	<b>100</b>

El cálculo de curva número de la subcuenca del río El Ángel determinó 19 CN los cuales varían desde 33 que corresponde el valor mínimo y 100 como valor máximo. La Figura 11 detalla el cálculo de curva número par el año 1999.



*Figura 11.* Valor curva número año 1999

Los Números Curva con mayor incidencia para el año 1999 en la subcuenca del río El Ángel son: **69** que corresponde a uso y cobertura de pasto y páramo, grupo hidrológico C, pendiente mayor al 3%; **82** que corresponde a uso y cobertura de cultivos y escasa cobertura vegetal, grupo hidrológico B y C respectivamente y pendiente mayor al 3%; **74** que corresponde a uso de pasto, grupo hidrológico C y pendiente mayor al 3%; **78** correspondiente a cobertura de vegetación arbustiva, grupo hidrológico C y pendiente >3 %; **55** correspondiente a cobertura páramo, grupo hidrológico B y pendiente mayor al 3%. La Figura 12 indica el número curva para el año 2017.



**Figura 12.** Valor curva número año 2017.

Para el año 2017 los Números Curva con mayor incidencia en la subcuenca son: **82** que corresponde a uso y cobertura de cultivos y escasa cobertura vegetal, grupo hidrológico C y B respectivamente y pendiente mayor al 3%; **69** que corresponde a uso y cobertura de pasto y páramo, grupo hidrológico C, pendiente menor al 3% y mayor al 3% respectivamente, **76** que corresponde uso cultivos, grupo hidrológico B, pendiente mayor al 3%, **74** que corresponde a uso pasto, grupo hidrológico C y pendiente mayor al 3 %; **55** que corresponde a cobertura de páramo , grupo hidrológico B y pendiente mayor al 3%.

Se realizó un CN ponderado para cada año de estudio de la subcuenca del río El Ángel, el valor que se obtuvo es de 71,98 para el año 1999 y 73.80 para el año 2017. Los valores se utilizaron para el cálculo de la escorrentía directa. Ver Tabla 18.

Tabla 18  
*Valor CN ponderado*

<b>CN</b>	<b>S</b>	<b>la</b>	<b>0.8*S</b>	<b>Año</b>
71.98	98.87	19.77	79.09	1999
73.80	90.17	18.04	72.14	2017

De acuerdo a la ponderación para cada año de estudio se evidencia que el el valor de curva número para el año 2017 aumentó.

#### **4.2.5 Precipitación**

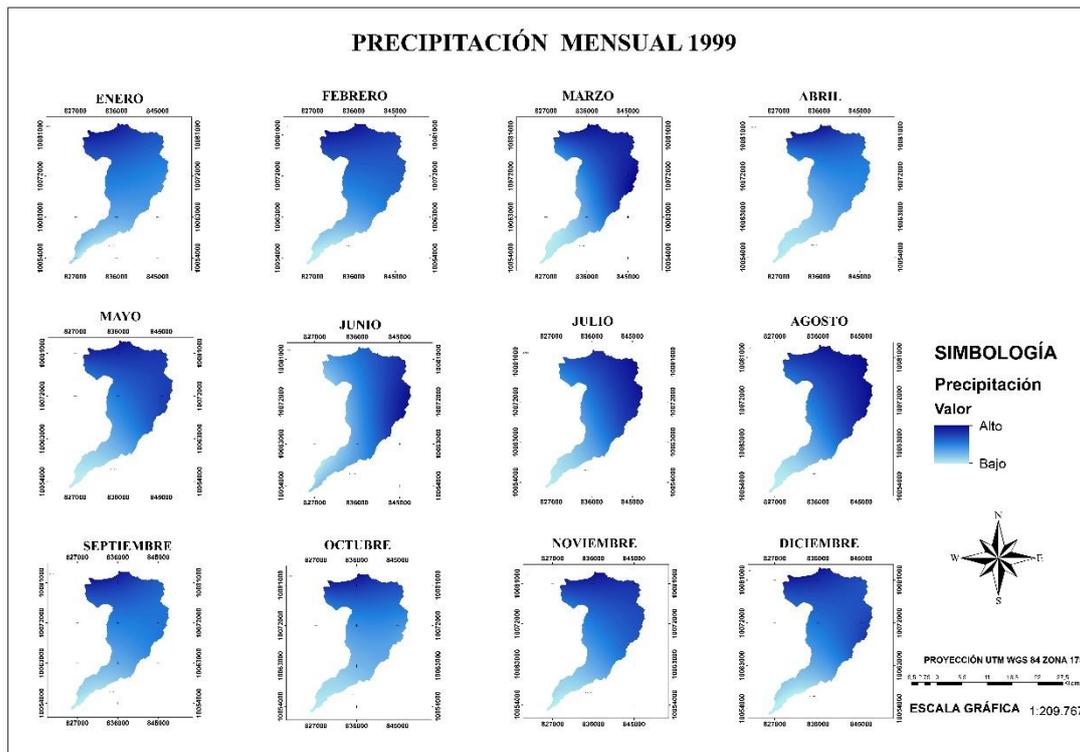
La precipitación media anual y mensual de la subcuenca del río El Ángel se determinó con la interpolación IDW de las estaciones más cercanas a la cuenca. Los resultados de interpolación del estudio se detallan en la Tabla 19 y Tabla 20.

Tabla 19  
*Precipitación subcuenca del río El Ángel años 1999.*

<b>Mes</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>	<b>Total</b>
<b>P (mm)</b>	145.4	147.5	146.1	125.0	105.5	80.6	40.8	37.6	75.8	87.3	134.8	219.2	<b>1345.62</b>

NOTA: Fuente INAMHI

Para el año 1999 los meses de mayor precipitación se presentan en enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre. La Figura 13 puntualiza la distribución de la precipitación en la subcuenca del río El Ángel para el año de estudio.



**Figura 13.** Precipitación mensual subcuenca del río El Ángel 1999

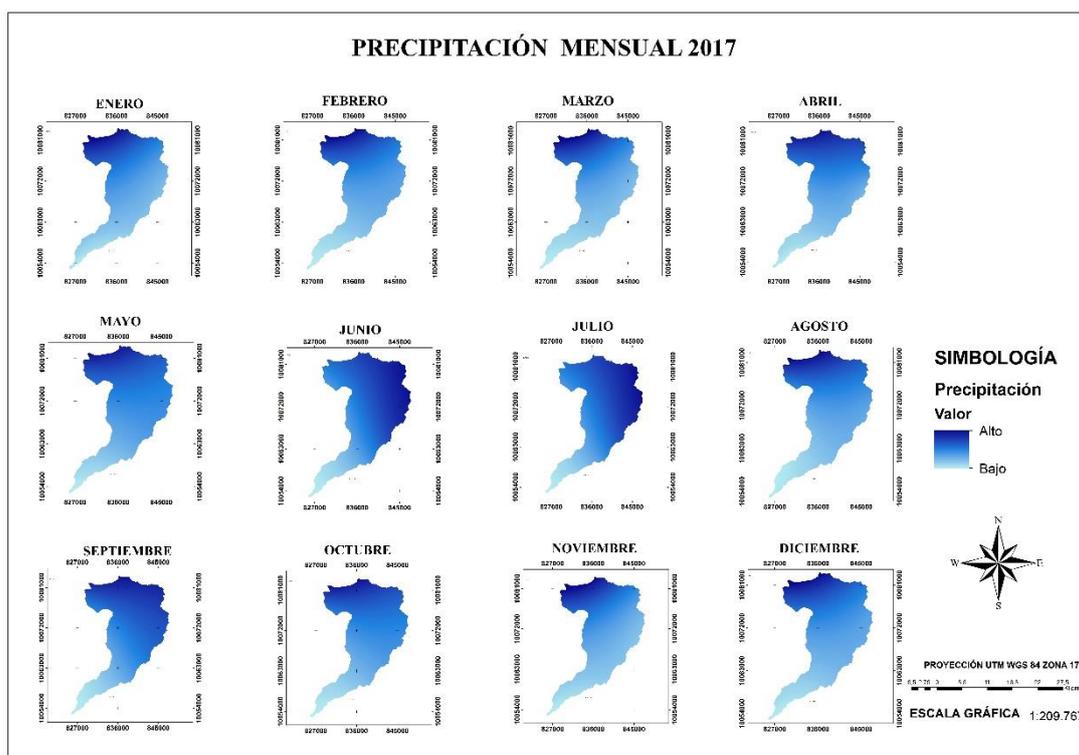
La precipitación del área de estudio se interpretó con la degradación de color azul donde la precipitación de menor valor se representa con tonos de azul claro y la precipitación de mayor valor representa tonos de azul oscuros. En la imagen se interpreta que la zona media alta de la subcuenca del río El Ángel concentra valores altos de precipitación. Los resultados de precipitación mensual para el año 2017 se describen en la Tabla 20.

**Tabla 20**  
*Precipitación subcuenca del río El Ángel años 2017*

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
<b>P (mm)</b>	79.9	36.6	61.9	133.1	84.7	58.3	47.0	17.9	61.9	112.4	91.8	104.2	<b>889.7</b>

**Nota:** INAMHI (2017).

Para el año 2017 los meses de mayor precipitación se presentan en marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. La Figura 14 puntualiza la distribución de la precipitación en la subcuenca del río El Ángel para el año de estudio.



**Figura 14.** Precipitación mensual 2017.

La precipitación del área de estudio se interpretó con una degradación de color azul donde la precipitación de menor valor se representa con tonos de azul claro y la precipitación de mayor valor representa tonos de azul oscuros. En la imagen se interpreta que la zona media alta de la subcuenca del río El Ángel concentra valores altos de precipitación.

#### 4.2.6 Caudal medio mensual y anual

El cálculo del caudal medio mensual y medio anual para los años de estudio se realizó con datos de precipitación mensual y la Ecuación 1 de escorrentía directa. Los resultados de la variación de caudal o escorrentía superficial se presentan de la siguiente manera. Ver Tabla 21 y Tabla 22.

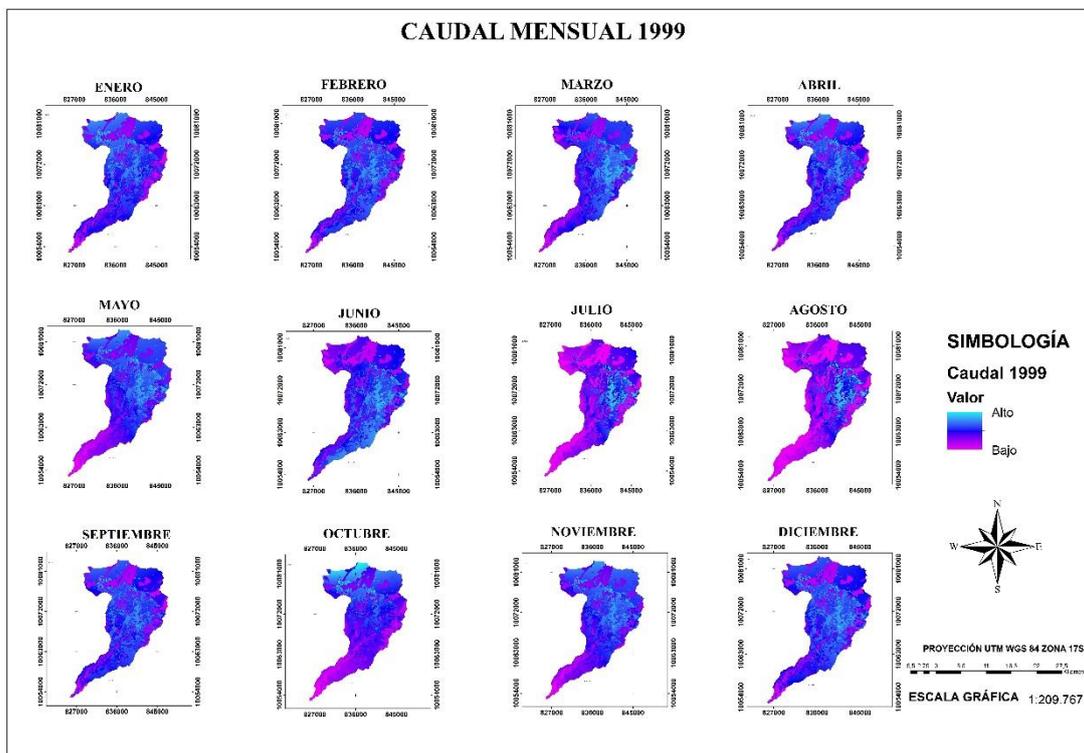
Tabla 21

*Caudal superficial subcuenca del río El Ángel año 1999*

Mes	P (mm)	CN	la	0.8S	Q S (mm)	Q S (m <sup>3</sup> /s)
Enero	145.42	71.98	19.77	79.09	70.53	8.15
Febrero	147.54	71.98	19.77	79.09	72.38	8.36
Marzo	146.13	71.98	19.77	79.09	71.18	8.22
Abril	124.99	71.98	19.77	79.09	54.67	6.31

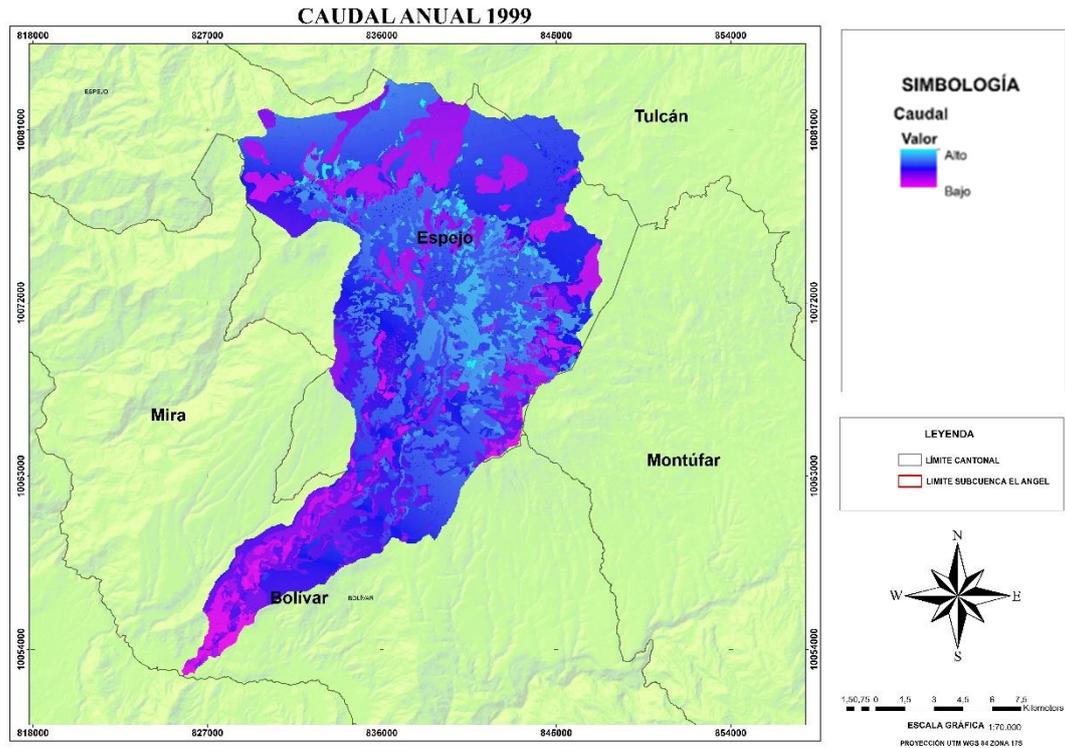
Mayo	105.45	71.98	19.77	79.09	40.37	4.66
Junio	80.57	71.98	19.77	79.09	24.41	2.82
Julio	40.76	71.98	19.77	79.09	4.60	0.53
Agosto	37.62	71.98	19.77	79.09	3.61	0.42
Septiembre	75.83	71.98	19.77	79.09	21.18	2.45
Octubre	87.29	71.98	19.77	79.09	28.16	3.25
Noviembre	134.83	71.98	19.77	79.09	62.08	7.17
Diciembre	219.19	71.98	19.77	79.09	132.87	15.35
<b>Anual</b>					<b>586.04</b>	<b>5.64</b>

El valor de caudal para el año 1999 de acuerdo al método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos es de 586.04 mm o 5.56 m<sup>3</sup>/s. anual. La Figura 15 describe el caudal mensual del año 1999.



*Figura 15.* Caudales mensuales año 1999

El caudal del río El Ángel para el año se representó con la degradación de color azul a violeta para lo cual la gama de color azul representa valores bajos a moderados y la gama de color violeta representa los valores altos de caudal. El caudal medio anual de la subcuenca del río El Ángel se detalla en la Figura 16.



**Figura 16.** Caudal medio anual 1999

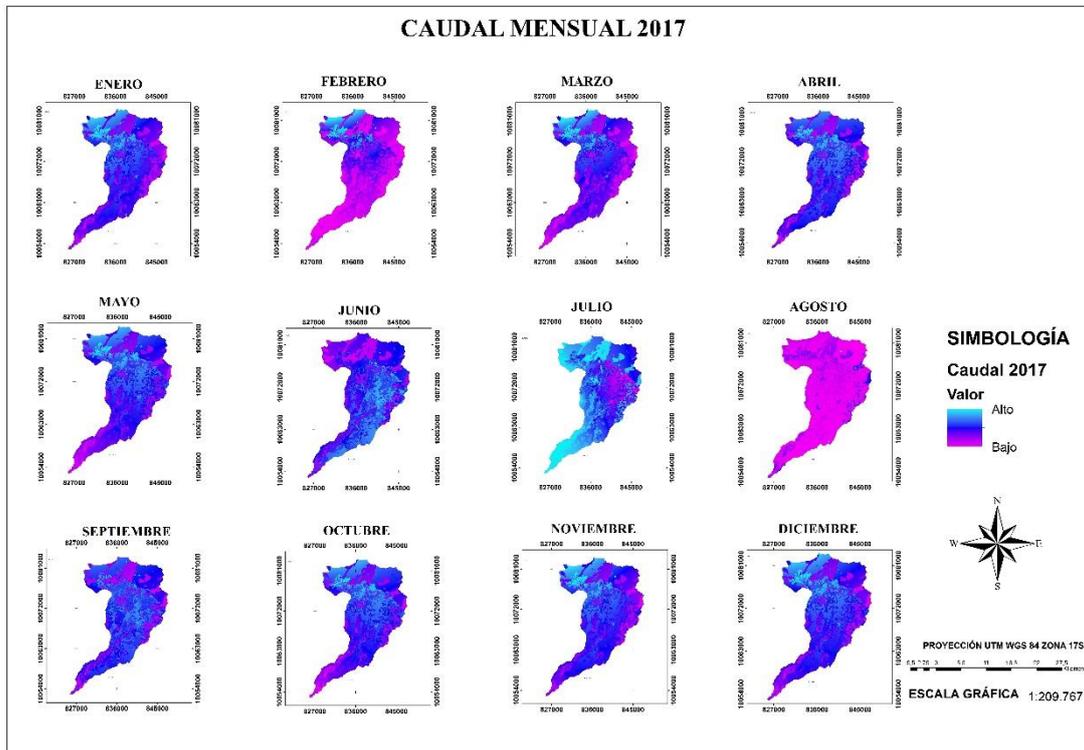
La representación de caudales se realizó con la degradación de colores de gama azul a violeta y el análisis consideró los tonos azules como valores bajos y tonos violetas como valores altos. La Tabla 22 muestra los resultados de caudal para el año 2017.

Tabla 22

*Caudal Superficial subcuena del río El Ángel año 2017*

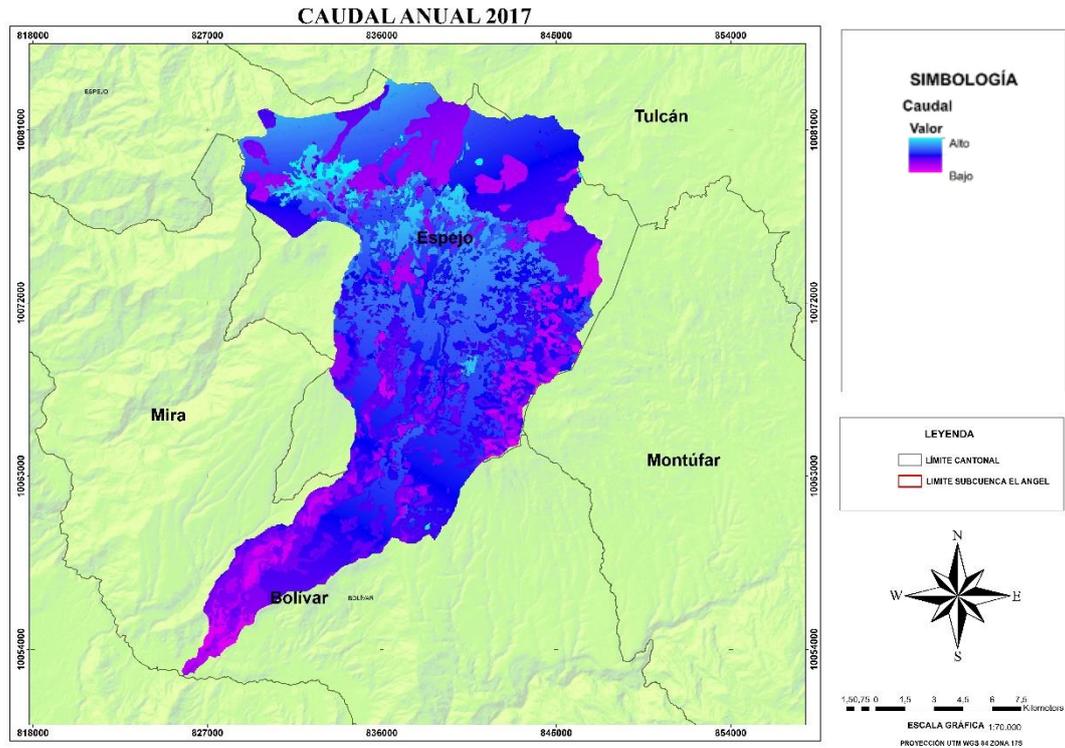
Mes	P (mm)	CN	la	S0.8	Q S (mm)	Q S (m <sup>3</sup> /s)
Enero	79.86	73.8	18.04	72.14	25.96	2.90
Febrero	36.58	73.8	18.04	72.14	4.17	0.50
Marzo	61.91	73.8	18.04	72.14	15.26	1.71
Abril	133.1	73.8	18.04	72.14	64.78	7.48
Mayo	84.71	73.8	18.04	72.14	28.98	3.24
Junio	58.3	73.8	18.04	72.14	13.58	1.57
Julio	46.99	73.8	18.04	72.14	8.32	0.93
Agosto	17.87	73.8	18.04	72.14	0.54	0.06
Septiembre	61.91	73.8	18.04	72.14	15.22	1.76
Octubre	112.38	73.8	18.04	72.14	48.56	5.43
Noviembre	91.83	73.8	18.04	72.14	33.96	3.92
Diciembre	104.16	73.8	18.04	72.14	42.58	4.76
<b>Anual</b>					<b>301.82</b>	<b>2.87</b>

El valor de caudal para el año 2017 de acuerdo al método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos es de 301.91 mm o 2.87 m<sup>3</sup>/s. anual. La Figura 17 muestra el caudal mensual del año 2017.



*Figura 17.* Caudales mensuales año 2017.

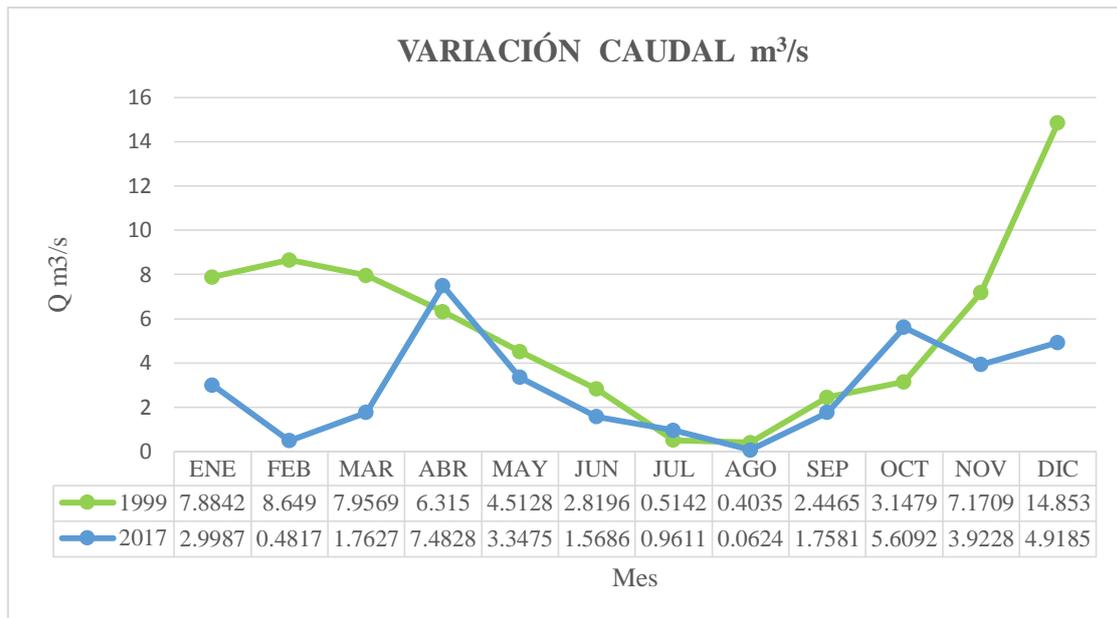
El caudal del río *Él Ángel* para el año 2017 se representó con la degradación de color azul a violeta para lo cual la gama de color azul representa valores bajos a moderados y la gama de color violeta representa los valores altos. El caudal medio anual de la subcuenca del río *El Ángel* se detalla en la Figura 18.



**Figura 18.** Caudal medio anual 2017

La representación de caudales se realizó con la degradación de colores que varían en tonos de azul a violeta y el análisis consideró tonos azules como valores bajos y tonos violetas como valores altos.

La variación del caudal de la subcuenca del río El Ángel se determinó con base a la precipitación media mensual para los dos periodos. El estudio determinó que para el año 1999 el caudal medio anual es de  $5.56 \text{ m}^3/\text{s}$  y para el año 2017 el caudal medio anual es de  $2.87 \text{ m}^3/\text{s}$ . El año 2017 presenta una disminución de  $2.69 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal con respecto al año de 1999. La Figura 19 detalla la variación de caudal para los dos periodos de estudio.



**Figura 19.** Variación de caudal de la subcuenca del río El Ángel.

Según Martínez y Coello (2017) las microcuencas presentan respuestas distintas en escorrentía por la diferencia de clima y el uso de suelo. La subcuenca del río El Ángel presentó diversos eventos de precipitación para los años de estudio por esta razón el año 2017 manifestó menor precipitación por tanto menor caudal. El análisis del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo demostró que el uso agrícola aumentó y las coberturas de páramo y vegetación arbustiva disminuyeron para el periodo de estudio, como resultado el valor de CN aumentó para el año 2017, esto representa mayor escorrentía para distintos eventos de precipitación que la subcuenca del río El Ángel.

Para Crespo (2014) los efectos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de páramos andinos que presentan cultivos y pastoreo intensivo reduce el caudal de salida y el caudal es menor que la microcuenca con mayor cobertura vegetal. Este análisis se puede evidencia en al subcuenca del río El Ángel que para el año 1999 se registra un caudal de 5.56 m<sup>3</sup>/s mientras que para el año de 2017 el caudal disminuyo a 2.87 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.3 Fase3. Cálculo del balance hídrico superficial de la subcuenca del río El Ángel**

El aporte y déficit de agua en la subcuenca del río El Ángel consideró variables como: precipitación, escorrentía superficial y evapotranspiración. El análisis del balance hídrico de la subcuenca examinó datos mensuales medios de precipitación, escorrentía superficial

y evapotranspiración, por lo tanto los resultados de los procesos de cálculo de la ecuación simplificada se detalla de la siguiente manera..

### 4.3.1 Precipitación balance hídrico

La variable de precipitación de la subcuenca del río El Ángel se determinó con los datos estaciones INAMHI y la interpolación de precipitación del método IDW, el análisis de precipitación se detallan en la Tabla 23.

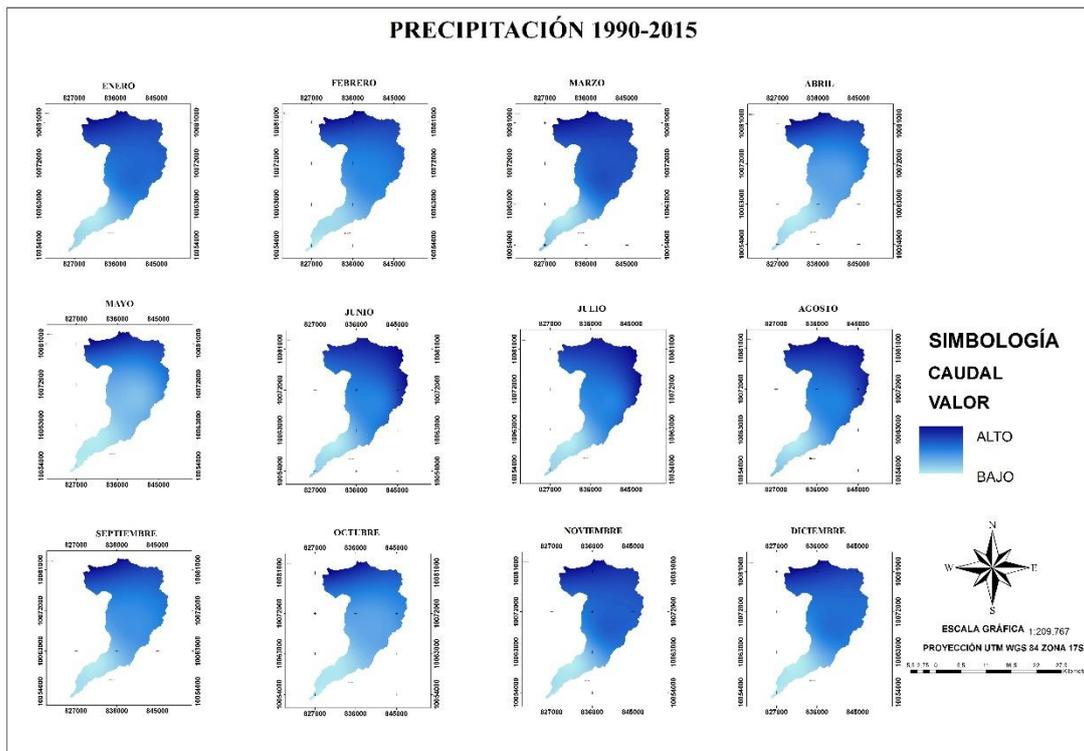
Tabla 23

*Precipitación mensual subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015.*

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
P (mm)	88.8	80.8	95.8	90.9	79.4	37.3	26.2	21.1	36.5	88.2	109.1	107.2	<b>862.3</b>

NOTA: Fuente, INAMHI

El registro de precipitación con de incidencia se presentan en marzo, abril, noviembre y diciembre. La Figura 20 puntualiza la distribución de la precipitación en la subcuenca del río El Ángel para el año de estudio.



**Figura 20.** Precipitación 1990-2015

La precipitación del área de estudio se interpretó con una degradación de color azul donde la precipitación de menor valor se representa con tonos de azul claro y la precipitación de mayor valor representa tonos de azul oscuros

### 4.3.2 Evapotranspiración balance hídrico

La variable de evapotranspiración de la subcuenca del río El Ángel se determinó con el método de Thornthwaite que estableció valores a lo largo del año. La Tabla 24 indica la distribución de la evapotranspiración mensual de la fase de estudio.

Tabla 24

*Evapotranspiración mensual subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015*

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
ETP(mm)	58.5	53.0	60.0	58.9	60.8	56.4	56.7	54.8	58.7	60.2	57.0	58.9	694.0

NOTA: Fuente INAMHI, CLIMATE-DATA.ORG (1990-2015).

El método de Thornthwaite determinó valores de evapotranspiración mensual que fluctúan desde los 53.02mm hasta los 60.67 mm y una precipitación anual de 583.89 mm. La Figura 21. Determina la distribución mensual de evapotranspiración para los 25 años de estudio.

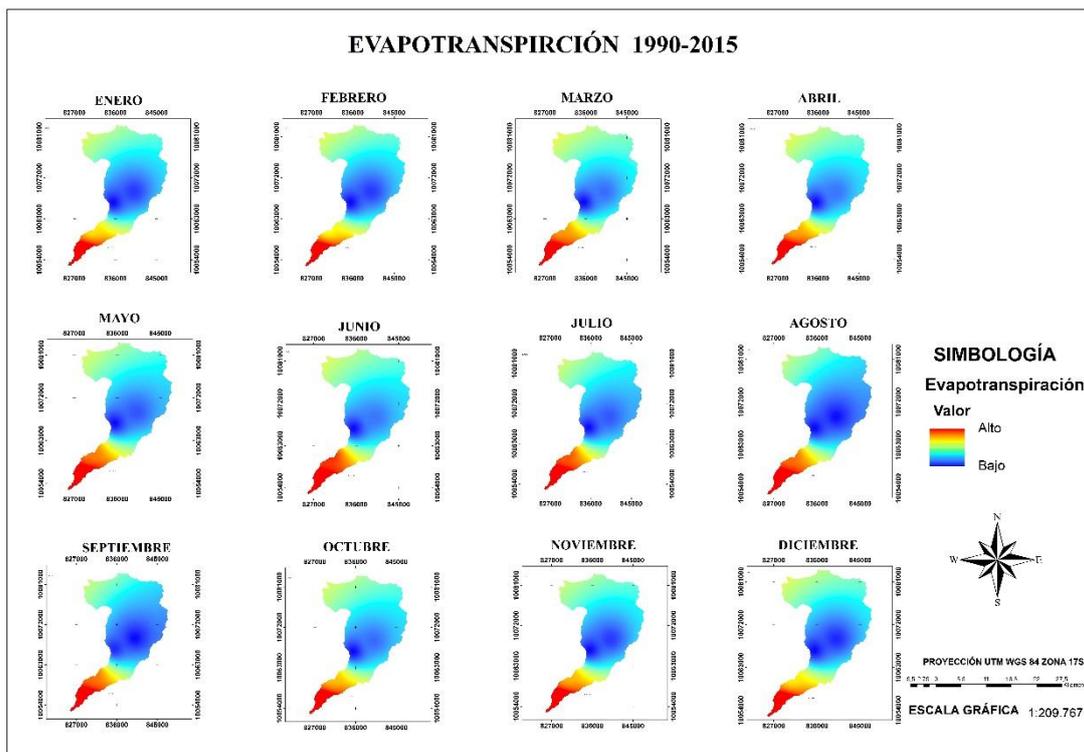


Figura 21. Evapotranspiración Mensual 1990-2015.

La representación de evapotranspiración se realizó con la degradación de colores que varían en tonos de azul a rojo, el análisis consideró los tonos azules como valores bajos y tonos rojos como valores altos.

### 4.3.3 Caudal balance hídrico

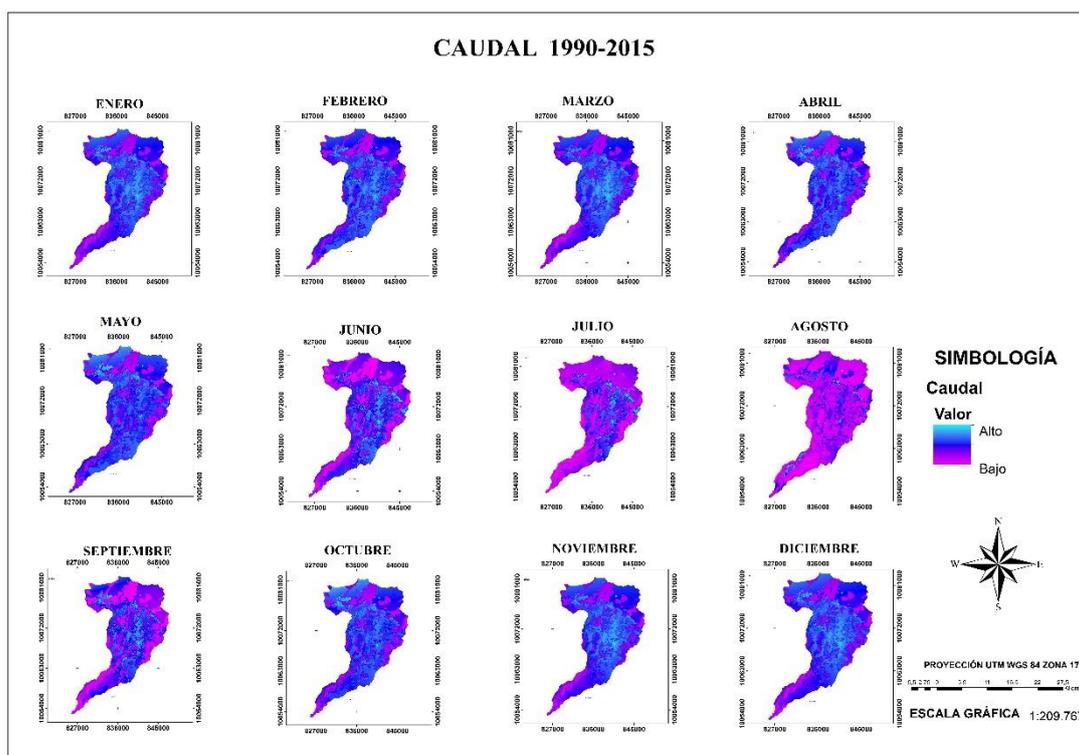
La variable de caudal superficial de la subcuenca del río El Ángel se fijó con el valor promedio 73 de curva número el cual se determinó en el objetivo 2 de esta investigación; Tabla 9. Los cálculos realizados con el valor curva número 73 y la Ecuación 1 de escorrentía directa se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25

*Caudal superficial subcuenca del río El Ángel periodo 1990-2015*

Mes	P (mm)	CN	la	0.8S	Q S (mm)	Q S (m <sup>3</sup> /s)
Enero	88.83	73	18.79	71.15	29.92	3.45
Febrero	80.83	73	18.79	71.15	24.68	2.85
Marzo	95.76	73	18.79	71.15	34.66	4.0
Abril	90.97	73	18.79	71.15	31.36	3.65
Mayo	79.44	73	18.79	71.15	23.79	2.74
Junio	37.25	73	18.79	71.15	3.03	0.34
Julio	26.2	73	18.79	71.15	0.54	0.06
Agosto	21.1	73	18.79	71.15	0.06	0.0
Septiembre	36.5	73	18.79	71.15	2.81	0.34
Octubre	88.16	73	18.79	71.15	29.47	3.4
Noviembre	109.1	73	18.79	71.15	44.26	5.11
Diciembre	107.2	73	18.79	71.15	42.86	4.59
<b>Total</b>	<b>861.34</b>				<b>267.45</b>	<b>2.57</b>

El caudal promedio de acuerdo al método SCS determinó que la escorrentía superficial promedio para el periodo de análisis es de 267.45 mm o 2.57 m<sup>3</sup>/s. Los valores de caudal fluctúa desde 0.006 a 44.26 mm mensuales. La Figura 22 describe los caudales mensuales para el periodo de estudio.



**Figura 22.** Caudal mensual 1990-2015.

La representación del caudal se realizó con la degradación de colores que varían en tonos de azul a violeta, el análisis consideró los tonos azules como valores bajos y tonos violetas como valores altos.

La validación de la variable de caudal se desarrolló con la con la **Ecuación 3** de balance hídrico simplificado; donde se consideró la precipitación y la evapotranspiración para legitimar la escorrentía superficial de la subcuenca del río El Ángel. La Tabla 26 describe el cálculo de la escorrentía superficial con datos de precipitación INAMHI y datos de evapotranspiración método de Thornthwaite.

Tabla 26  
*Validación de escorrentía superficial subcuenca del río El Ángel.*

	INAMHI	Thornthwaite	Ecuación	SCS
	<b>P(mm)</b>	<b>ETP(mm)</b>	<b>Q(mm)</b>	<b>Q(mm)</b>
Enero	88.83	58.49	30.34	29.92
Febrero	80.83	53.02	27.81	24.68
Marzo	95.76	60.03	35.73	34.66
Abril	90.97	58.93	32.04	31.36
Mayo	79.44	60.76	18.68	23.79

Junio	37.25	56.44	0.0	3.03
Julio	26.20	56.69	0.0	0.54
Agosto	21.10	54.84	0.0	0.06
Septiembre	36.50	58.68	0.0	2.81
Octubre	88.16	60.19	27.97	29.47
Noviembre	109.10	57.03	52.07	44.26
Diciembre	107.20	58.85	48.35	42.86
<b>Anual</b>	<b>861.34</b>	<b>693.95</b>	<b>272.99</b>	<b>267.45</b>

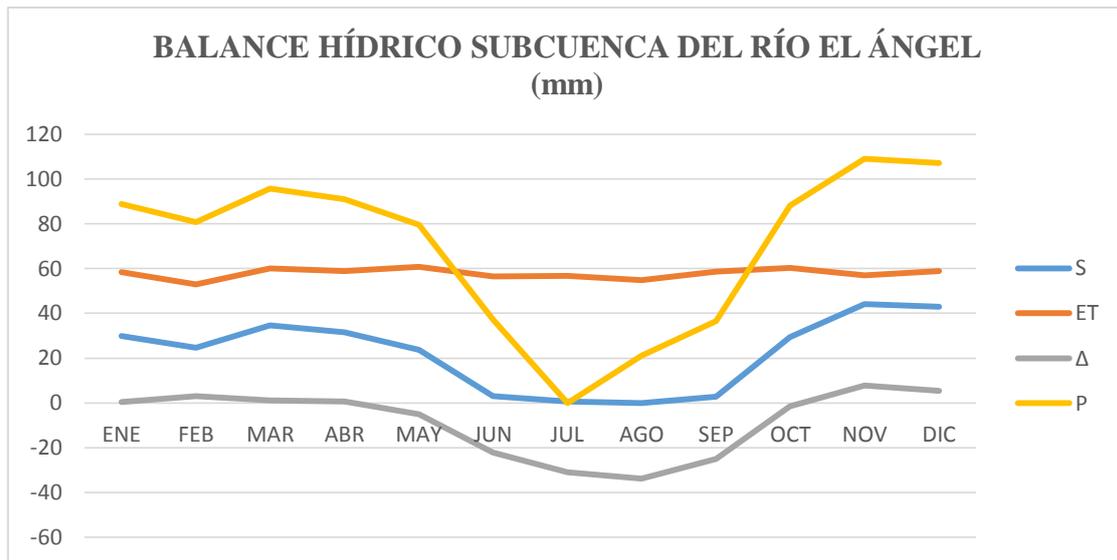
El resultado del cálculo de la Ecuación 3 para la variable de caudal superficial de la subcuenca del río El Ángel presentó semejanza con los valores establecidos por el método curva número SCS empleados en la determinación de caudal. La tabla 27 detalla el balance hídrico superficial de la subcuenca del Río El Ángel.

Tabla 27

*Balace Hídrico superficial subcuenca del río El Ángel.*

	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
<b>P(mm)</b>	88.83	80.83	95.76	90.97	79.44	37.25	26.2	21.1	36.56	88.16	109.1	107.2
<b>S(mm)</b>	29.91	24.67	34.66	31.66	23.79	3.03	0.54	0.05	2.82	29.46	44.23	42.87
<b>ETP(mm)</b>	58.49	53.02	60.03	58.93	60.76	56.44	56.69	54.84	58.68	60.19	57.03	58.85
<b><math>\Delta</math>(mm)</b>	0.43	3.14	1.07	0.68	-5.11	-22.2	-31	-33.8	-24.9	-1.49	7.8	5.49

El análisis de balance hídrico de la subcuenca del río El Ángel los meses con déficit hídrico se presentan en mayo, junio, julio, agosto, y septiembre mientras que los meses con superávit se presentan en noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril. La subcuenca del río El Ángel presenta seis meses de déficit hídrico como se puede observar en la Figura 23.



**Figura 23.** Balance Hídrico de la subcuenca del río El Ángel.

De acuerdo con Santillán (2013) la capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica se define con el balance hídrico, el cual permite definir periodos secos y húmedos del territorio e identificar el mes del año que genera la cantidad mayor de exceso o déficit hídrico como se puede observar en la subcuenca del río El Ángel el meses que registra mayor oferta hídrica es el mes de noviembre, mientras que el mes con mayor déficit hídrico se presenta en agosto.

#### **4.4 Fase 4. Estrategias de conservación del recurso hídrico para la subcuenca del río El Ángel**

Las estrategias de conservación del recurso hídrico para la subcuenca del río El Ángel se realizaron con base al análisis del cambio de cobertura vegetal, variación del caudal y oferta hídrica de la subcuenca. A continuación se pone a consideración las estrategias de conservación del recurso hídrico de la subcuenca del río El Ángel.

**Objetivo:** Proponer estrategias de conservación del recurso hídrico con base a los resultados obtenidos de cambio de uso de suelo, variación de caudal y análisis del balance hídrico de la subcuenca del río El Ángel.

#### **4.4.1 Estrategia protección de la cobertura vegetal de la subcuenca del Río el Ángel**

El estudio de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo generó información del estado de conservación de la vegetación natural de la subcuenca del río El Ángel, este estudio determinó que el año 2017 presentó pérdida áreas naturales de páramo y vegetación arbustiva, ecosistemas importantes para la conservación del recurso hídrico.

- **Causa:** Avance de frontera agrícola.
- **Efectos:** Alteración de la dinámica de los ecosistemas de páramos y vegetación arbustiva, variabilidad de la disposición de precipitación y aumento de la escorrentía superficial.

- **Estrategias:**

Realizar campañas de educación ambiental con las instituciones educativas y comunidades rurales de la subcuenca alta para concienciar sobre la importancia de proteger la vegetación natural que se encuentra fuera del área de influencia de la reserva Ecológica El Ángel.

Emprender prácticas de reforestación con agricultores de la subcuenca con el fin de incentivar el cultivo de especies nativas en prácticas de cercas vivas para divisorias de terrenos. Compensar la pérdida de vegetación

#### **4.4.2 Estrategia 2 Conservación de caudal de la subcuenca del río El Ángel**

El análisis de la variación de caudal de la subcuenca del río El Ángel determinó que para el año 2017 el volumen de agua disminuyó debido a que los eventos de precipitación fueron menores a los efectuados en el año 1999, mientras que la escorrentía superficial se ve afectada por el cambio de cobertura vegetal. Este cambio determinó el aumento de escorrentía para el año 2017 esto debido a que el valor del Número Curva varía de 71.95 a 73.80. La subcuenca del río El Ángel se volvió menos permeable.

- **Causa:** Pérdida de vegetación nativa (Páramo- Arbustos). Avance de la frontera Agrícola.

- **Efectos:** Alteración de la dinámica de precipitación de la cuenca. Variación de Caudal
- **Estrategias:**

Protección de remanentes de páramo que se encuentran fuera de la reserva ecológica de El Ángel. Incentivar a los Gobiernos Autónomos Descentralizados y las comunidades la declaratoria de áreas protectoras comunales o privadas.

Prácticas de recuperación de ecosistemas con plantación de especies nativas en las áreas intervenidas por la agricultura y ganadería.

#### **4.4.3 Estrategia 3 Balance hídrico simplificado de la subcuenca del río El Ángel**

El balance hídrico de la subcuenca del río El Ángel determinó seis meses con déficit hídrico y seis meses húmedos. La información de estaciones meteorológicas evidenció que la generación de agua se produce en la parte alta de la subcuenca territorio ocupado en su mayoría por el ecosistema de páramo y que pertenece a la Reserva Ecológica El Ángel.

- **Causa:** Mala planificación del recurso hídrico.
- **Efectos:** Escases del recurso hídrico en seis meses del año.
- **Estrategias:**

Establecer políticas a nivel institucional con el objeto de mejorar la dotación de agua para la zona media-baja del río El Ángel en los meses de mayo, junio, julio agosto, septiembre y octubre, esto ampliará la productividad y desarrollo económico de la población que se sustenta del abastecimiento de agua.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.5 CONCLUSIONES

- El análisis de cobertura vegetal y uso de suelo de la subcuenca del río El Ángel presenta variaciones para el periodo de estudio, la expansión de la frontera agrícola es la principal causa para el cambio de uso de suelo y pérdida de cobertura vegetal de la microcuenca del río El Ángel, por esta razón el estudio determinó que las actividades antrópicas afectan el estado natural de la cuenca hidrográfica.
- El caudal de la subcuenca del río El Ángel varió para el periodo de estudio, la pérdida de cobertura vegetal y el avance de la frontera agrícola afectó la escorrentía superficial del río, esto demostró que la presencia de vegetación arbustiva reduce la escorrentía superficial para un evento de precipitación dado.
- El estudio demostró que la deforestación, el cambio de uso de suelo, el avance de la frontera agrícola, alteró la disponibilidad de agua del área de estudio, la subcuenca del río El Ángel registró menor precipitación para el año de 2017, lo que indica que el comportamiento hidrológico de la subcuenca depende del estado de conservación de la superficie y cobertura vegetal.
- El régimen de escorrentía superficial de subcuenca del río El Ángel cambió para el año 2017, se observó cambios de eventos de lluvia para los meses de enero, febrero, marzo, con relación al régimen de escorrentía determinado para el análisis de balance hídrico.
- Las estrategias propuestas permitirán promover una conciencia ambiental a temprana edad de la población de la subcuenca y será una herramienta importante para evitar el deterioro ambiental especialmente el que causa la expansión de la frontera agrícola.

#### 4.6 RECOMENDACIONES

- Implementar prácticas de silvicultura en el área de producción agrícola y ganadera en la subcuenca del río El Ángel.
- Proponer planes de reforestación con especies nativas y recuperar áreas destinadas a conservación de la subcuenca del río El Ángel.
- Elaborar un plan de manejo de la subcuenca que integre el marco orientador para articular los planes de ordenamiento territorial de los GADs en el territorio de la subcuenca.
- La disponibilidad de la subcuenca del río El Ángel determinó seis meses de superávit hídrico y seis meses de déficit hídrico por consiguiente es necesario establecer medidas de provisión del recurso agua para la cuenca media y baja en el periodo seco del río El Ángel

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, P., Veliz, F., Muñoz J. (2015). Análisis multi-temporal del cambio de uso de suelo en el cantón Zapotillo, provincia de Loja. *Bosques latitud cero*, (5).
- Arango, M. Branch, J., Botero, B. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “LANDSAT – ETM+”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín*, (54), 2611-2634.
- Cano, C. Andreoli, A., Arumi, y Rivera, D. (2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, (4), 145-151.
- Cajamarca Rivadeneira, R. (2017). *Estudio del balance superficial de las cuencas hidrográficas, sector Jordán y Zhidmad en el área de interceptación con el bosque y vegetación protectora Aguarongo (BVPA)*. (Tesis inmediata de ingeniero ambiental). Universidad Técnica Silesiana, Cuenca, Ecuador.
- Cárcamo A. y Rejas A. (2015) Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987 -2011. *Revista Ciencias Espaciales*, (8): 259 – 271.
- Cárdenas, I. (2014). *Impacto de las prácticas agropecuarias y forestales sobre las propiedades físico- químicas de los suelos andinos del sur del Ecuador*. (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Carbajal y Roldán. (2007) Calibración del modelo lluvia escorrentía agregado GR4J aplicación: cuenca del río Aburrá . *Dyna*. (152) 73 -87.
- Carvajal, A y Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2): 452 – 470.

Cerda J, Villarroel L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79 (1): 54:58.

Comisión Nacional Forestal. (2006). Programa de desarrollo sustentable del Estado de México 2005 -2025. México: Autor.

Constituyente, E, A (2008). *Constitución de la república del Ecuador*.

Córdova, D., Paredes, D., Alulema, R. (2017). Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, (2).

Chávez, A. y Gonzales, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción. *Revista Iberoamericana del Agua*, (2): 3-13.

Cleves, J. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Históricas*, (10): 149-163.

CLIMATE-DATE.ORG (2019). Provincia del Carchi Clima. Recuperado de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-carchi->

Crespo, P., Célleri R., Buytaert W.(2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*. 288-304.

Duque, P., Cajamarca R.,Wemple B. (2019). Estimación del balance hídrico de una cuenca andina tropical. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida*,(1) :56-69.

Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes.

Ferrer M, et al. (1995). Generación Automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del Agua*, (2): 43

- Flores, W. (2015). Determinación del potencial hídrico superficial en los sectores Pongo Pampa y Agrotakesi del municipio Yanacachi provincia Sud Yungas departamento de La Paz. *Revista de la Carrera de Ingeniería Agronómica - UMSA*. (1) 76 -87.
- Gaspari, F., Rodriguez, A., Senisterra, G. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, (4): 143- 158.
- Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Espejo. (2011). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2011 -2031*. Espejo, Ecuador: Autor.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la provincia del Carchi. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2015 -2019*. Tulcán, Ecuador: Autor.
- Gonzales, A., Álvarez, P., Gonzales, M., y Aguirre, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador. *CEDAMAZ*, (6).
- González-Zeas, A. C.-J. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción. *Revista Iberoamericana del Agua* 2, 3-13.
- Insaurralde, J. (2012) Estudio de la evolución de las coberturas espaciales en el suroeste de la provincia del Chaco, entre 1989 y 2010, mediante la Teledetección. *Revista Universitaria de Geografía*, 31-57.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2017). *Encuesta de la producción agropecuaria continua 2017*. Quito: Autor.
- Librada, M. (2004) Evaluación de la relación precipitación escorrentía de largo plazo en la cuenca del río Geul. *Revista de la facultad de ingenierías fisicomecánicas*. 63 - 72.

- Maderey, L. y Jiménez, A. (2001). Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*,(41): 24 – 38.
- Martínez, C. (2009). Dinámica de cambios de uso del suelo en zonas alto andinas del Ecuador. Recuperado de [https://www.academia.edu/8816404/Din%C3%A1mica\\_de\\_cambios\\_de\\_uso\\_de\\_l\\_suelo\\_en\\_zonas\\_altoandinas\\_del\\_Ecuador](https://www.academia.edu/8816404/Din%C3%A1mica_de_cambios_de_uso_de_l_suelo_en_zonas_altoandinas_del_Ecuador)
- Martínez E. y Coello C. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *MASKANA*, (8): 129-144.
- Moreira, C. (2015). Educación ambiental para la conservación del recurso hídrico a partir del análisis estadístico de sus variables. *Tecnología en Marcha*, (28): 74-85.
- Morejón, Y. (2015) Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. (2): 94 -108.
- Morocho, A. P. (2002). Cochabamba: Una propuesta para recuperar un páramo con vista al mar. El manejo comunitario de Paramos. Serie Paramo 11.
- Nieto C. y Jiménez R. (2016) Variación de coberturas forestales y ocupación del territorio en el municipio de Armenia 1939-1999. *Revista Luna Azul*, (42): 319-340.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Balance hídrico superficial*. Recuperado de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf).
- Pinos, N. (2016) Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el Ordenamiento Territorial - Caso cantón Cuenca. *Estoa*. (9): 7-19.

- Pizarro R., Tapia M, Román L. (2006) Coeficientes de escorrentía instantáneos para la cuenca del río Tutuvén, VII Región del Maule, Chile. *Revista Bosque*, 27(2): 83-91.
- Poveda, G. y Mesa, O. (1995). Efectos hidrológicos de la deforestación. *Energía*, (16-91): 91-102.
- Restrepo, J. (2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, (151): 250-267.
- Rodríguez Eraso, N. (2011). Deforestación y Cambio de la Cobertura del Suelo en Colombia: Dinámica Espacial, Factores de Cambio y Modelación (Tesis inédita de Doctor de Filosofía en Ecología Terrestre, Universidad de Ecología).
- Ruíz, O. (2012) Balance hídrico y clasificación climática del estado de tabasco, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*. (1): 1 -14.
- Santillán E., Dávila G., Sánchez G. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Ambiente & Agua*, 8.
- SEMPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021*. Quito.
- Secretaría del Medio Ambiente: Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. (2006). *PROGRAMA ESTRATÉGICO FORESTAL DEL DISTRITO FEDERAL (PEF-DF) 2006 – 2025*. Autor.
- Servicio Geológico de los EE. UU. (2019). Recuperado de <https://www.usgs.gov/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, (2017). Modelamiento hidrológico de la regulación hídrica del Titicaca. Lima: Autor.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2011). Ciclo Hidrológico. Lima: Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez.

Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los próximos 10 años*. Quito, Ecuador: Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends.

Silva, A. y Rubio M. (2014) Análisis de cambios de uso del suelo en la Delegación Municipal de Ingeniero White (Buenos Aires, Argentina): aplicación de geotecnologías. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, (23): 133-146.

Sistemas de Información Nacional (2015). Archivos de Información Geográfica  
Recuperado de: [sin.gob.ec/coberturas](http://sin.gob.ec/coberturas)

Temez, J. (1987). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas cuencas naturales. MOPU.

Universidad Pontificia de Valencia, (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del Agua*, (2).

Valencia, J. (2017) Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 26(2): 10-17.

Vargas, J. (2012, agosto). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *Obras y Proyectos*, (12): 32-41

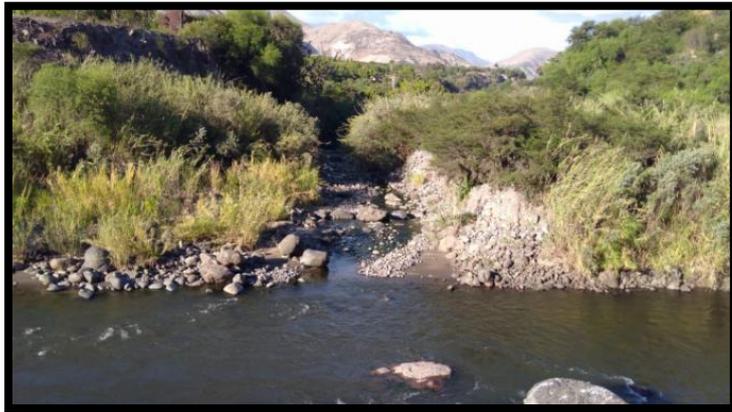
Villarroya, J., Farias, H., Amarilla, M. (2013). Estimación del parámetro hidrológica del número de curva CN: Automatización del cálculo mediante SIGy nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo. *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA*, (1).

## ANEXOS

### Anexo1. Fotografías



Páramo



Vegetación Arbustiva



Cultivos y Pasto

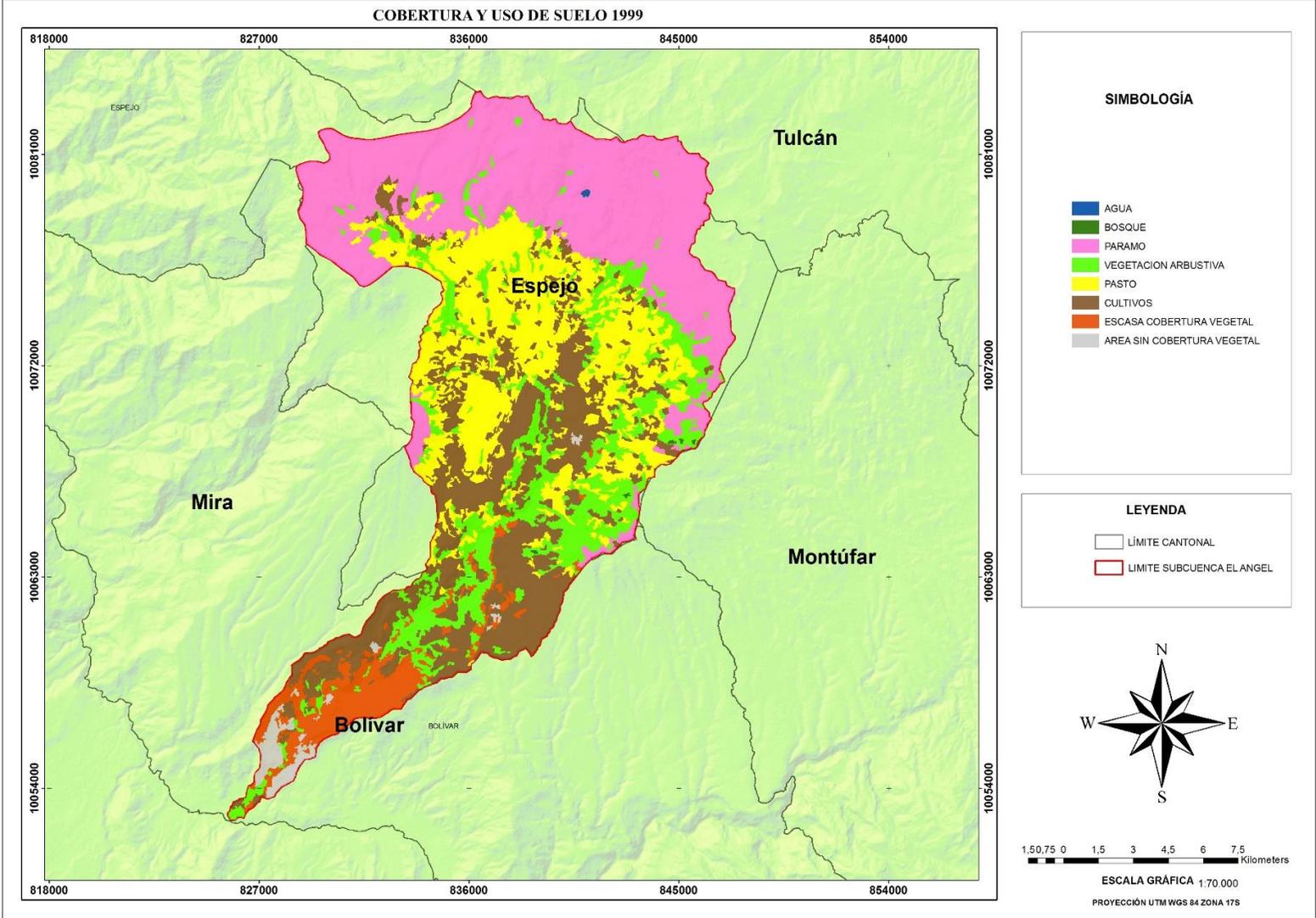


Escasa Cobertura Vegetal

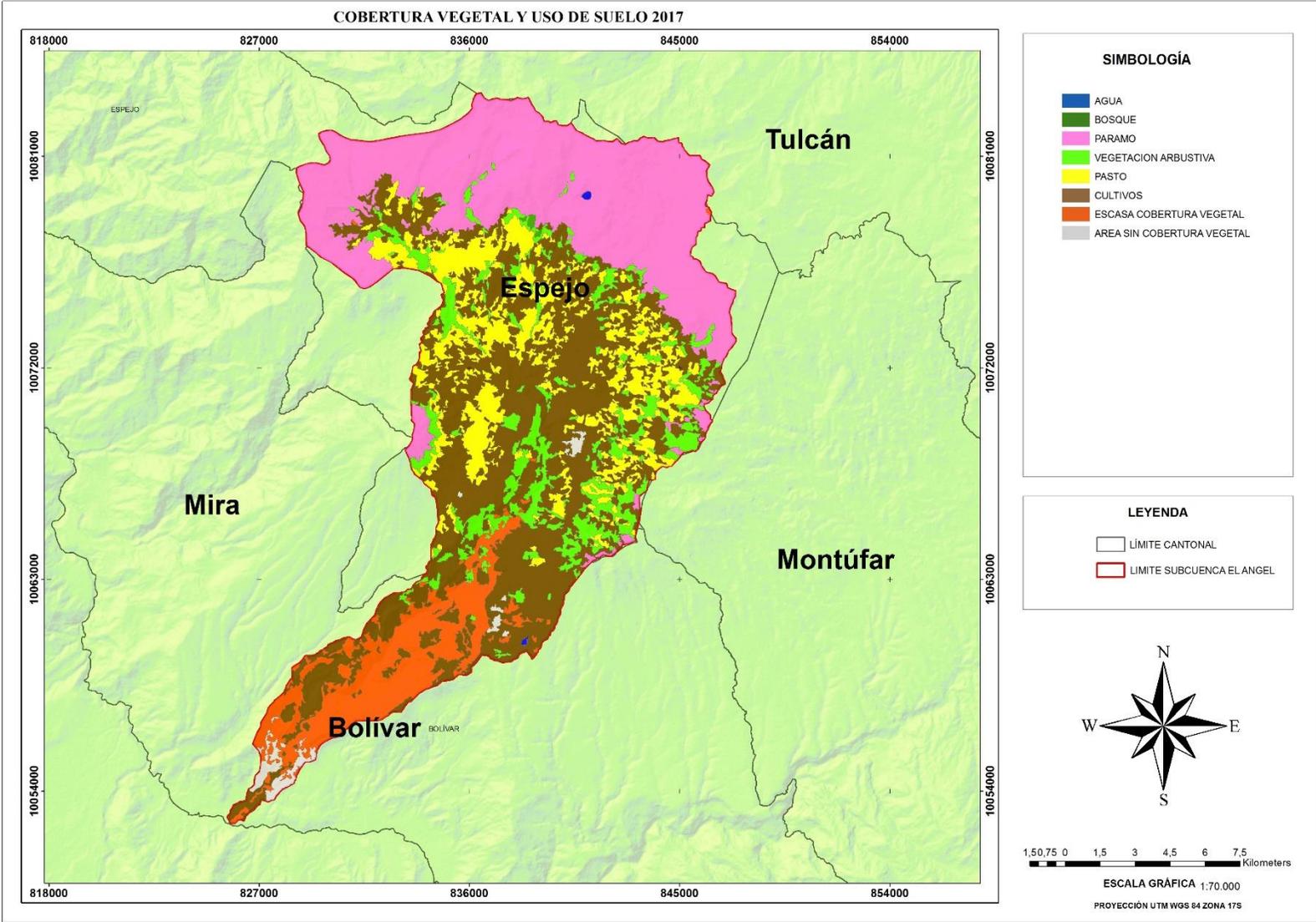


Área sin Cobertura Vegetal

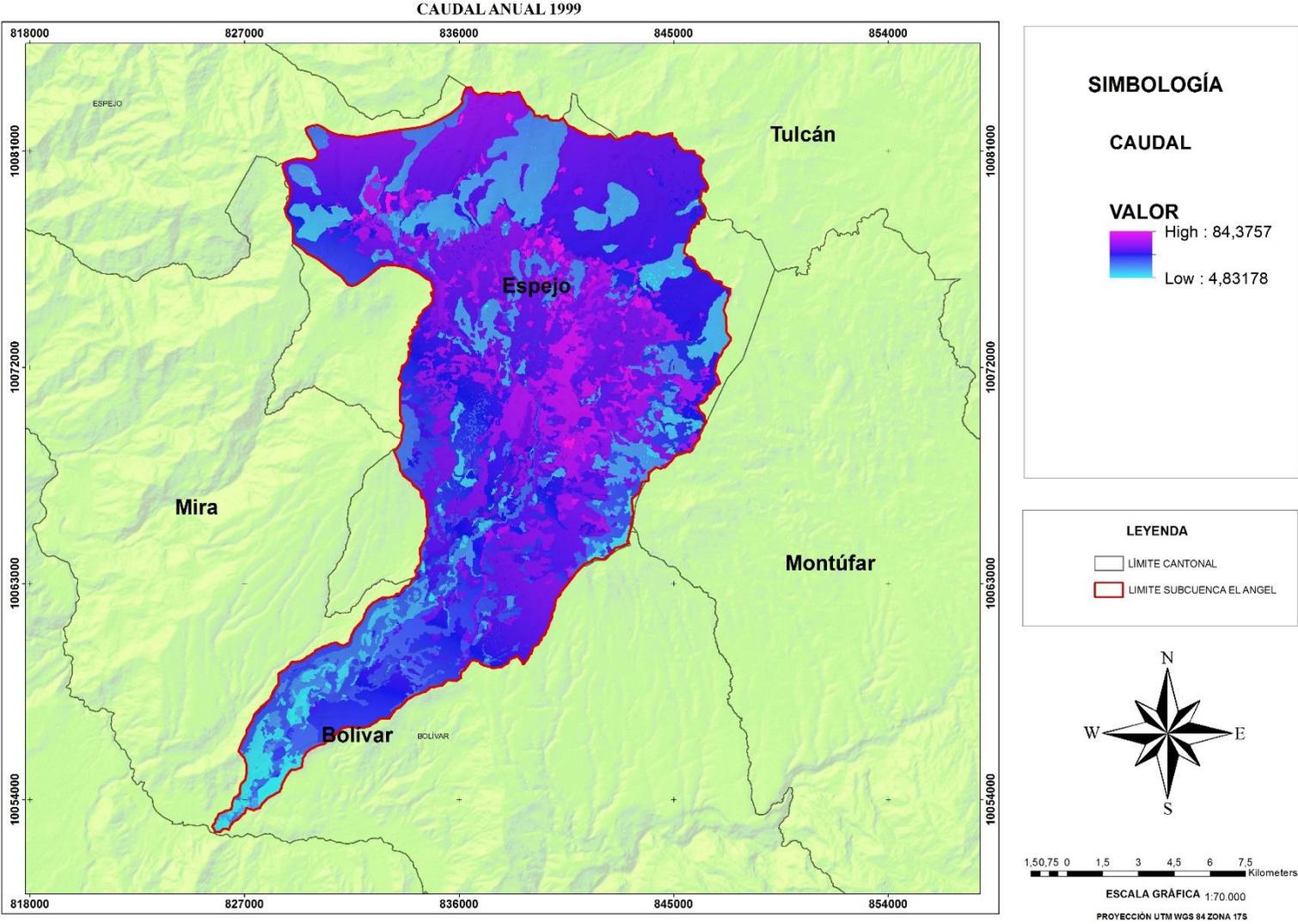
Anexo 2. Mapa de Cobertura Vegetal año 1999.



Anexo 3. Mapa de cobertura Cobertura Vegetal año 2017.



Anexo 4. Mapa de Caudal año 1999.



Anexo 5. Mapa de caudal año 2017.

