



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS

AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**Trabajo de titulación presentado como requisito previo a la obtención del
título de Ingeniero Forestal**

**EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE
CAUDALES EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL
PERÍODO 2000-2014**

AUTOR

Richard Fernando Endara Pabón

DIRECTOR

Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

IBARRA – ECUADOR

2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000 – 2014

Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza la presentación como
requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

APROBADO

Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

Director de trabajo de titulación



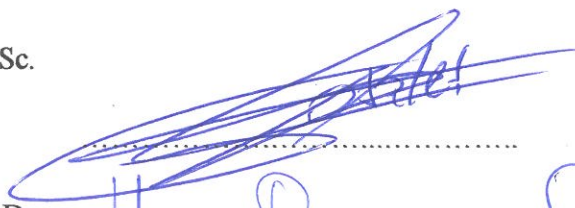
Dra. Patricia Marlene Aguirre Mejía, PhD.

Tribunal de trabajo de titulación



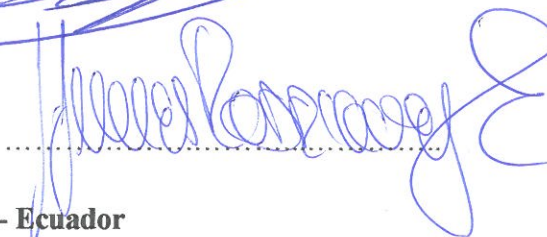
Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

Tribunal de trabajo de titulación



Dr. Jhonn James Rodríguez Echeverry, PhD.

Tribunal de trabajo de titulación



Ibarra - Ecuador

2018

CERTIFICACIÓN

En honor a la verdad, certifico que el presente trabajo de investigación fue desarrollado por el señor **ENDARA PABÓN RICHARD FERNANDO**, portador de la Cedula de Identidad 100364397 – 8, bajo mi supervisión en calidad de Director.

Fecha: 28 de junio del 2018



Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

Director de trabajo de titulación

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA – UTN

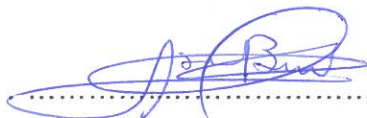
Fecha: 28 de junio del 2018

Richard Fernando Endara Pabón: **EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000-2014** / Trabajo de titulación. Ingeniero Forestal. Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Forestal. Ibarra, 28 de junio del 2018. 132 páginas.

DIRECTOR: Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

El objetivo principal de la presente investigación fue: “Evaluar los efectos de la deforestación en el la producción de caudales de la cuenca media – alta del río Mira para el período 2000 – 2014.” Entre los objetivos específicos se encuentra: Establecer la tasa de deforestación en la cuenca para el período 2000 – 2014; determinar la producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000-2014 y analizar la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de cobertura vegetal de bosque.

Fecha: 28 de junio del 2018



Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

Director de trabajo de titulación



Richard Fernando Endara Pabón

Autor

DEDICATORIA

Primeramente a Dios, por haberme permitido terminar una meta más en mi vida.

A mi familia, en especial a mis padres, quienes me han apoyado incondicionalmente con todo lo necesario para culminar mis estudios, me han brindado su comprensión, su ayuda y sus consejos en los momentos difíciles.

A cada docente que me compartió sus conocimientos invaluableles y a cada una de las personas que estuvieron a mi lado cuando necesité de su ayuda.

Fernando Endara.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la oportunidad de culminar mi carrera.

A mi tutor de tesis, Ing. Paúl Arias MSc., por su gran ayuda, por su paciencia, por cada uno de sus aportes para mejorar el presente trabajo de investigación y por haberme motivado a terminar la tesis.

A mis asesores, Dr. James Rodríguez PhD., Dra. Patricia Aguirre PhD., e Ing. Oscar Rosales Mgs., por sus acertadas observaciones y sugerencias para mejorar los resultados del presente estudio y este trabajo final.

A la Universidad Técnica del Norte, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Agradezco a cada Docente de la carrera de Ingeniería Forestal, por sus valiosos conocimientos y aportes en este trabajo de investigación.

Finalmente, a cada uno de mis compañeros y amigos, por su apoyo moral y por ser parte de este gran reto en mi vida, que ahora se ha terminado.

Fernando Endara.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Págs.
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	General.....	2
1.1.2	Específicos	2
1.2	Pregunta directriz.....	3
1.3	Hipótesis	3
1.3.1	Hipótesis nula	3
1.3.2	Hipótesis alterna	3

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1	Fundamentación legal.....	4
2.1.1	Constitución de la República del Ecuador.....	4
2.1.2	Plan Nacional de Desarrollo	4
2.1.3	Código Orgánico del Ambiente	6
2.1.4	Línea de investigación	6
2.2	Fundamentación teórica.....	7
2.2.1	Ecosistema	7
2.2.2	Cuenca hidrográfica.....	9
2.2.3	Modelos hidrológicos	14
2.2.4	Escorrentía y deforestación.....	20
2.2.5	Aplicación del modelo SWAT para modelación de caudales	23

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Caracterización del área de estudio	25
3.1.1	Ubicación geográfica de la cuenca del río Mira	25
3.1.2	Ecosistemas en la cuenca del río Mira.....	27
3.1	Materiales	30
3.2	Metodología.....	31
3.2.1	Etapa 1: Establecimiento de la tasa de deforestación en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000 – 2014.....	31
3.2.2	Etapa 2: Determinación la producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000-2014	44
3.1.1	Etapa 3: Análisis de la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de cobertura vegetal de bosque.....	57

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Análisis de la tasa de deforestación en la cuenca del río Mira	58
4.2	Producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira.....	61
4.2.1	Resultados de la simulación para la cuenca del río Mira.....	61
4.2.2	Análisis de sensibilidad	62
4.2.3	Validación y calibración de datos.....	64
4.3	Análisis de la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de bosque.....	67
	CONCLUSIONES.....	69
	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

	Págs.
Tabla 1. Coordenadas de ubicación de la cuenca.....	25
Tabla 2. Materiales, equipos y software's	30
Tabla 3. Coberturas para la clasificación.	40
Tabla 4. Valores para Kappa.....	42
Tabla 5. Estaciones para el proceso de simulación.	45
Tabla 6. Parámetros climáticos de SWAT.....	46
Tabla 7. Parámetros edafológicos para la modelación en SWAT.....	49
Tabla 8. Características de los tipos de suelo.....	51
Tabla 9. Cobertura y uso para la simulación de los años 2000, 2007, 2014 y 2017.....	53
Tabla 10. Rango de pendientes para la Cuenca.	54
Tabla 11. Valores referenciales de NSE	57
Tabla 12. Coberturas en la cuenca del río Mira	58
Tabla 13. Tasa de cambio	59
Tabla 14. Caudales simulados.....	61
Tabla 15. Comparación de caudales aforados vs simulados.....	62
Tabla 16. Parámetros sensibles para la calibración.....	64
Tabla 17. Valores aforados y calibrados.....	64
Tabla 18. Variables para el análisis de relación.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
Figura 1. La cuenca como sistema hidrológico	10
Figura 2. Distribución de la precipitación en una cuenca durante una tormenta	11
Figura 3. El ciclo hidrológico	12
Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio	26
Figura 5. Mapa de ecosistemas.	29
Figura 6. Flujograma del proceso de delimitación del área de estudio.....	32
Figura 7. Páramo de frailejones (<i>Espeletia schultzei</i>) de El Ángel.	33
Figura 8. Ejemplo de bosques en la cuenca	34
Figura 9. Vegetación arbustiva – Matorral.	34
Figura 10. Pastos	35
Figura 11. Cultivos.....	35
Figura 12. Zona urbana	36
Figura 13. Cuerpos de agua.	36
Figura 14. Área sin vegetación, producto de la erosión.....	37
Figura 15. Flujograma del proceso de clasificación de las imágenes LANDSAT.	38
Figura 16. Imágenes para la clasificación.....	39
Figura 17. Flujograma del proceso de eliminación de nubes.....	41
Figura 18. Flujograma del proceso de representación del cambio.....	43
Figura 19. Delimitación de la cuenca del río Mira.	44
Figura 20. Mapa de ubicación de las estaciones utilizadas.....	45
Figura 21. Mapa tipo de suelos para las simulaciones.....	50
Figura 22. Mapa de pendientes.	54
Figura 23. Mapa de unidades de respuesta hidrológica	55
Figura 24. Mapas de cambio de bosque en el período 2000 – 2017.....	59
Figura 25. Correlación lineal de caudales para los años 2000, 2007 y 2014.	63
Figura 26. Correlación lineal de datos calibrados para los años 2000, 2007 y 2014.....	65
Figura 27. Correlación lineal entre el bosque y el caudal de la cuenca del río Mira.	67

ÍNDICE DE ANEXOS

	Págs.
Anexo 1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	87
Anexo 2. Mapa base.....	88
Anexo 3. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2000.	89
Anexo 4. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2007.	90
Anexo 5. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2014.	91
Anexo 6. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2017.	92
Anexo 7. Mapa de cambio de cobertura forestal.	93
Anexo 8. Matriz de confusión, cálculo del Índice Kappa.....	94
Anexo 9. Datos climáticos de la estación climatológica completa Inguincho.....	95
Anexo 10. Datos climáticos de la estación Agrometeorológica Izobamba.	97
Anexo 11. Datos climáticos de la estación climatológica completa La Concordia.	99
Anexo 12. Datos climáticos de la estación climatológica completa San Gabriel.....	101
Anexo 13. Datos climáticos de la estación climatológica completa Otavalo.	103
Anexo 14. Criterios de clasificación de suelo.....	105
Anexo 15. Parámetros ingresados al modelo SWAT.....	106
Anexo 16. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2000).....	108
Anexo 17. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2007).....	109
Anexo 18. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2014).....	110
Anexo 19. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2017).....	111
Anexo 20. Mapa de clasificación de suelos - SWAT.	112
Anexo 21. Mapa de pendientes - SWAT.	113
Anexo 22. Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).....	114
Anexo 23. Resultados de la simulación inicial.	115
Anexo 24. Resultados de la simulación de los modelos calibrados.....	116
Anexo 25. Simulación para el año 2017.	117
Anexo 26. Fotografías del trabajo de campo.	118

TITULO: EFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES
EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000-
2014

Autor: Richard Fernando Endara Pabón

Director de trabajo de titulación: Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

Año: 2018

RESUMEN

Los bosques son los ecosistemas terrestres más extensos, estas formaciones ofrecen bienes y servicios como la protección de cuencas hidrográficas, calidad en el agua, regulación hídrica, control de la erosión, entre otros. En el transcurso de los años, el bosque se ha degradado por la deforestación y el cambio de uso de suelo. Estos acontecimientos han alterado la cantidad, la calidad y la temporalidad de los bienes y servicios ecosistémicos.

Debido a lo mencionado, el presente estudio se enfatiza en evaluar los efectos de la deforestación en la producción de caudales de la cuenca media – alta del río Mira para el período 2000 – 2014. La evaluación se llevó a cabo mediante la determinación de la tasa de cambio del bosque, la simulación de la producción de caudales y el análisis de la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de bosque. Basado en los objetivos del estudio, se determinó la cobertura y uso de suelo para los años 2000, 2007, 2014 y 2017 a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales. Seguidamente se realizó el cálculo de diferentes variables meteorológicas, climáticas y edafológicas para determinar los caudales en el modelo hidrológico SWAT. Finalmente, se procedió al análisis de la relación entre el bosque y la producción de caudales.

Los resultados muestran un cambio constante en la cobertura forestal. Las tasas de cambio revelan la deforestación y la reforestación en la cuenca. Por otra parte, los caudales simulados presentan una estrecha relación con los aforados teniendo un R^2 igual o superior a 0.80 y un NSE mayor a 0.70. Esto permite concluir que el modelo tiene una efectividad considerable para predecir caudales. Además, debido a la estrecha relación del bosque y el caudal ($R^2 > 0.90$) se puede concluir que el bosque es un ecosistema esencial en la cuenca para el mantenimiento del caudal, la regulación hídrica y a la producción de agua, principalmente en bosques nublados.

TITLE: DEFORESTATION EFFECTS ON THE PRODUCTION OF FLOWS AT THE MIDDLE - UPPER BASIN OF THE MIRA RIVER IN THE PERIOD 2000-2014

Author: Richard Fernando Endara Pabón

Director of thesis: Ing. Darío Paul Arias Muñoz, MSc.

Year: 2017

ABSTRACT

Forests are the most extensive terrestrial ecosystems; these formations offer goods and ecosystem services such as watershed protection, water quality, water regulation, and erosion control, among others. Over the years, the forest has been degraded by deforestation and changes in land use. These situations have altered the quantity, quality and timing of ecosystem goods and services.

Due to what was mentioned, this study emphasized in evaluating the deforestation effects in the production of streamflows of the upper - middle river basin of the Mira River from 2000 to 2014. The evaluation was carried out by determining the change rate of the forest, the simulation of the production of streamflows and the analysis of the water variability in the river basin facing the loss of forest. Based on the objectives of the study, the coverage and land use for the years 2000, 2007, 2014 and 2017 was determined from the supervised classification of satellite images. Next, the calculation of different meteorological, climatic and soil variables was performed to determine streamflow rates in the hydrological model SWAT. Finally, we proceeded with the analysis of the relation between the forest and streamflow production.

The results show a constant change in forest cover. Exchange rates reveal deforestation and reforestation in the basin. On the other hand, the simulated streamflows have a close relation with the already graduated ones, having a R^2 equal to or greater than 0.80 and an NSE greater than 0.70. This allows us to conclude that the model has considerable effectiveness in predicting streamflows. In addition, due to the close relation between the forest and the streamflow ($R^2 > 0.90$), it can be concluded that the forest is an essential ecosystem in the basin for the maintenance of water streamflow, water regulation and water production, mainly in cloud forests

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los bosques son los ecosistemas terrestres más extensos, ocupan el 30% de la superficie emergida del planeta (FAO, 2007a), estas formaciones ofrecen bienes y servicios como la protección del suelo, la fijación de CO₂, la protección de cuencas hidrográficas, la calidad en el agua, la regulación hídrica, el control de la erosión, entre otros. Adicionalmente proporciona bienes a modo de fuentes energéticas y de construcción como leña y madera, fuentes de alimento y hábitat. Cada uno de los servicios y bienes del bosque son de gran importancia para el bienestar humano (MEA, 2005; De Bièvre *et al.*, 2006; Ruiz *et al.*, 2007 y FAO, 2011).

Adicionalmente, los bosques producen mayor cantidad de agua a largo plazo que plantaciones de rápido crecimiento (Lara *et al.*, 2009), en especial los bosques nublados, montano altos, Montanos bajos y piemontanos (MECN, 2009) que otras vegetaciones y usos de suelo. Esta aseveración se afirma debido que el rendimiento hídrico de los bosques andinos está determinado por precipitación horizontal y vertical (Tobón, 2009). Además, Tobón *et al.* (2008) y Bruijnzeel (2004) mencionan que, la abundante presencia de neblina en los bosques disminuye la radiación solar y el déficit de vapor, e incluso puede suprimir los procesos de evapotranspiración, esto permite una mayor escorrentía por precipitación concebida en el ecosistema. Adicionalmente, Tobón (2009) sugiere que estos bosques mejoran la capacidad de infiltración permitiendo una recarga adecuada de la humedad del suelo y los acuíferos.

Sin embargo, las tierras forestales han sido destinadas a actividades agropecuarias, esto como parte del proceso de desarrollo económico a nivel mundial (FAO, 2016). Principalmente cuando es necesario tierras fértiles para una agricultura y ganadería intensiva y obtención de productos forestales maderables y no maderables (FAO, 2008 y FAO, 2016). Adicionalmente, las personas con menos oportunidades y sin buenas tierras practican una agricultura de corta y quema como estrategia de supervivencia (FAO, 2008). Así, la rápida conversión y degradación de los bosques ha provocado una serie de alteraciones en el balance hídrico (Huber *et al.*, 2008) y significativas modificaciones en los patrones hidrológicos en pequeñas y grandes cuencas hidrográficas (Iroumé *et al.*, 2006 y Little *et al.*, 2009).

En Ecuador, MAE (2012a) muestra que la deforestación en las provincias de Carchi e Imbabura, donde se encuentra la cuenca de estudio, alcanza valores de 92 y 1,240.0 ha. al año respectivamente. Estos bosques tienen un alta pendiente, suelos con baja fertilidad, difícil accesibilidad, entre otras características (Tobón, 2009). Sin embargo, han sido deteriorados por la deforestación para la práctica de agricultura, ganadería intensiva y minería. Estas alteraciones generan una pérdida de suelo por erosión hídrica, contaminación de las fuentes de agua (Tobón, 2009) y altera la cantidad, la calidad y la temporalidad de servicios ecosistémicos (Quetier *et al.*, 2009 e IPCC, 2007). Consecuentemente estos cambios generan alteraciones climáticas y la disminución o aumento de los bienes y servicios ecosistémicos proyectando vulnerabilidad de los ecosistemas y de los sistemas socioeconómicos (MEA, 2005; Quetier *et al.*, 2009 e IPCC, 2007). Esto a su vez repercute en impactos negativos en el rendimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria (IPCC, 2014).

La información obtenida en esta investigación permitirá conocer la importancia de los bosques y ecosistemas forestales en la mantención de los caudales, la provisión y la regulación de la calidad del agua, que constituyen recursos prioritarios para el desarrollo nacional, tanto para las actividades productivas como para la disponibilidad para la población (Little *et al.*, 2010). Además, entender que, como servicios ecosistémicos, estos se generan en el área de una cuenca y pueden desaparecer como consecuencia del mal manejo de los recursos naturales.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Evaluar los efectos de la deforestación en la producción de caudales de la cuenca media – alta del río Mira para el período 2000 – 2014.

1.1.2 Específicos

- Establecer la tasa de deforestación en la cuenca para el período 2000 – 2014.
- Determinar la producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000-2014.
- Analizar la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de cobertura vegetal de bosque.

1.2 Pregunta directriz

¿Cómo afecta la deforestación en la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira?

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis nula

H_0 =La deforestación no afecta la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira en el período de análisis

1.3.2 Hipótesis alterna

H_a : La deforestación afecta la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira en el período de análisis

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación legal

A continuación, la fundamentación legal se sustenta en los siguientes instrumentos legales del país y la carrera de Ingeniería Forestal.

2.1.1 Constitución de la República del Ecuador

La investigación se realizó en el marco de la Constitución de la República del Ecuador vigente, en el título quinto (organización territorial del estado) de la misma, capítulo quinto (Sectores estratégicos, servicios y empresas públicas), el artículo 318 menciona que:

“El agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable e imprescriptible del Estado, y constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos. Se prohíbe toda forma de privatización del agua.” (Asamblea Constituyente, 2008, pág.150).

Así mismo, en el Título séptimo (Régimen del buen vivir), capítulo segundo (Biodiversidad y recursos naturales) sección sexta (Agua), el artículo 411, menciona que:

“El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua” (Asamblea Constituyente, 2008, pág.182).

2.1.2 Plan Nacional de Desarrollo

El presente estudio se enmarca en los objetivos, políticas, ejes y lineamientos estratégicos del Plan Nacional de Desarrollo 2017 – 2021 siguientes:

a) **Objetivo 1.** Garantizar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas.

Política 1.8. Garantizar el acceso a una vivienda adecuada y digna, con pertinencia cultural y a un entorno seguro, que incluya la provisión y calidad de los bienes y servicios públicos vinculados al hábitat: suelo, energía, movilidad, transporte, agua y saneamiento, calidad ambiental, espacio público seguro y recreación.

Política 1.17. Garantizar el acceso, uso y aprovechamiento justo, equitativo y sostenible del agua; la protección de sus fuentes; la universalidad, disponibilidad y calidad para el consumo humano, saneamiento para todos y el desarrollo de sistemas integrales de riego.

b) **Objetivo 3.** Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones.

Intervención emblemática 5 del eje 1. Agua para todos.

c) **Objetivo 6.** Desarrollar las capacidades productivas y del entorno para lograr la soberanía alimentaria y el Buen Vivir Rural.

Política 6.2. Promover la redistribución de tierras y el acceso equitativo a los medios de producción, con énfasis en agua y semillas, así como el desarrollo de infraestructura necesaria para incrementar la productividad, el comercio, la competitividad y la calidad de la producción rural, considerando las ventajas competitivas y comparativas territoriales.

d) **Directriz b.** Gestión del hábitat para la sustentabilidad ambiental y la gestión integral de riesgos

Lineamiento b.3. Promover una gestión integral y corresponsable del patrimonio hídrico para precautelar su calidad, disponibilidad y uso adecuado, con acciones de recuperación, conservación y protección de las fuentes de agua, zonas de recarga, acuíferos y agua subterránea; considerando el acceso equitativo de agua para consumo, riego y producción.

Lineamiento b.4. Garantizar los caudales mínimos requeridos en las cuencas hidrográficas, con énfasis en aquellas en las que exista conflictos entre el aprovechamiento de agua para el consumo humano, los sistemas productivos,

generación hidroeléctrica y el caudal ecológico (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo [SENPLADES], 2017).

2.1.3 Código Orgánico del Ambiente

El Código Orgánico del Ambiente permite afirmar el estudio en los artículos siguientes:

Art. 5.- Derecho de la población a vivir en un ambiente sano. El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende:

La conservación, preservación y recuperación de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico;

Art. 30.- Los objetivos del Estado relativos a la biodiversidad son: Adoptar un enfoque integral y sistémico que considere los aspectos sociales, económicos, y ambientales para la conservación y el uso sostenible de cuencas hidrográficas y de recursos hídricos, en coordinación con la Autoridad Única del Agua;

Art. 38.- Las áreas naturales incorporadas al Sistema Nacional de Áreas Protegidas, cumplirán con los siguientes objetivos: Mantener la dinámica hidrológica de las cuencas hidrográficas y proteger los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas;

Art. 93.- La gestión del Patrimonio Forestal Nacional se ejecutará en el marco de las siguientes disposiciones fundamentales: La Autoridad Ambiental Nacional establecerá los mecanismos de incentivo y fomento para la conservación e incremento de la superficie del Patrimonio Forestal Nacional. Estos mecanismos se concretarán en acciones de uso sostenible, restauración ecológica de tierras degradadas y deforestadas, permitiendo la regeneración natural o realizando actividades de reforestación y el manejo integral de cuencas hidrográficas, en coordinación con las demás autoridades competentes (Código orgánico del ambiente, 2017).

2.1.4 Línea de investigación

El estudio se enmarca en la línea de investigación de la carrera “Desarrollo agropecuario y forestal sostenible”.

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Ecosistema

Lindeman (1942), Odum (1971) y Armenteras *et al.* (2016) definen al ecosistema como una comunidad que está conformada por seres bióticos y abióticos que interactúan entre sí y tiene dos componentes: un componente autótrofo el cual genera sus alimentos propios a través de la fijación de energía de la luz, uso de sustancias inorgánicas simples y la acumulación de sustancias complejas; y un componente heterótrofo el cual se alimenta de otros organismos mediante la descomposición de materiales complejos, utilización y cambio (Odum, 1971).

Ecosistemas forestales

Según Pardos (2010) los ecosistemas forestales se destacan por albergar la mayor parte de la biodiversidad terrestre. Asimismo, tiene un funcionamiento esencial que permite el mantenimiento de esta diversidad y el de proporcionar una amplia gama de bienes y servicios provenientes de bosques y plantaciones forestales.

Bosque

FAO (2004) define al bosque como la extensión de tierra superior a 0.5 ha provistas de árboles con una altura superior a 5 m y una cubierta de copas superior al 10 por ciento.

Los árboles y los bosques sanos son fundamentales para la resiliencia de los medios de vida y de los ecosistemas, suministran materiales para la construcción de viviendas, fibras e infraestructuras, energía para la calefacción y cocinar, son fuente de alimentos y de nutrición para el ser humano y los animales. Además, proveen servicios esenciales como la provisión de agua potable, la fertilidad de los suelos, la agrobiodiversidad y la vida silvestre (Burgeon *et al.*, 2015).

Plantaciones forestales

Otras tierras boscosas de especies introducidas, y en algunos casos de especies indígenas, establecidas mediante la plantación o siembra principalmente para la producción de madera o productos forestales no maderables. Conjuntamente, pueden ser de protección, instauradas para el suministro de servicios ambientales, tales como la

protección de suelos y agua, control de plagas y conservación del hábitat y diversidad biológica (FAO, 2004).

Deforestación

La deforestación es el proceso de conversión de los bosques a otro tipo de cobertura o uso de suelo que destruye la superficie forestal. Esto implica la reducción permanente del dosel para usos alternativos como agricultura, pastizales y áreas urbanas. Estas acciones generalmente son antropogénicas (FAO, 2012).

La demanda de diferentes materias primas agrícolas y del bosque son la causa principal de deforestación y degradación forestal en países tropicales y subtropicales, lo que genera un gran impacto sobre el cambio climático, la provisión de servicios de los ecosistemas y el desarrollo económico a largo plazo (Rautner *et al.*, 2013).

La agricultura comercial es el generador directo más importante de deforestación en países tropicales y subtropicales, seguido de la agricultura de subsistencia. Juntos representan aproximadamente el 80% de la deforestación, mientras que la tala para extracción de madera y papel produce la mayoría de los impactos por degradación forestal (FAO, 2016 y Rautner *et al.*, 2013).

La deforestación extensiva es la principal amenaza para la biodiversidad, la cual se encuentra estrechamente vinculada con el uso del ecosistema, uso que a lo largo de la historia ha tenido diferentes modalidades, en relación con la tecnología disponible para cortar la selva y para usar el suelo. El uso del suelo determina la extensión de la deforestación, el grado de transformación y el tiempo de aprovechamiento. Por lo tanto, la forma de uso del suelo influye directamente en la presencia de especies en el sitio y sus alrededores, en el número, tamaño y distribución de los fragmentos y en el tiempo en que se abandona el sitio (Guevara *et al.*, 2014).

MAE (2012a) describe que, en el Ecuador el remanente de bosque nativo para el año 2008, es de aproximadamente 12'261,997 hectáreas. Este ecosistema sufre una tasa anual de cambio de -0.66% para el período 2000- 2008. Esto corresponde a una pérdida anual 77,647 ha/año. Sin embargo, al analizar los datos provinciales, se puede evidenciar que la provincia del Carchi es una de las provincias con menor tasa de deforestación anual con una pérdida forestal de 92 ha/año. En Imbabura se observa que existe una pérdida de 1,240 ha/año de bosque. Estas hectáreas representan una tasa de cambio de -0.06 % y -0.86 %, respectivamente.

2.2.2 Cuenca hidrográfica

Para Antón (2000) y Cano (2011), la cuenca hidrográfica es un sistema hidrológico donde el agua escurre desde las partes más altas del relieve hacia las deprimidas o partes bajas. En el descenso de elevación se pueden encontrar valles, planicies fluviales, lacustres, humedales, entre otros elementos. Es un área natural que desemboca en un punto común y está compuesta por cuencas de recepción, red hidrográfica y aguas subterráneas (Antón, 2000 y Ordoñez, 2011). Adicionalmente, una cuenca tiene características físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales, particulares e importantes para considerarlas unidades de planificación (Senra, 2005).

Importancia de la cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas ofrecen servicios ambientales, principalmente proveen agua de uso doméstico, agrícola e industrial. Al mismo tiempo, el bosque existente en la cuenca proporciona sedimentos orgánicos fértiles que protegen el suelo de la erosión, permitiendo tener medios de subsistencia y de gran importancia para la agricultura y seguridad alimentaria de la población (FAO, 2009a).

Una cuenca conservada tiene un buen abastecimiento de agua limpia y una tierra rica en nutrientes. Estas características dan paso a una gran cantidad de diversidad biológica. Los árboles y plantas, a lo largo de las riberas de los ríos y arroyos, mejoran la calidad y cantidad de las aguas subterráneas (Guides, 1976). Los páramos ubicados en la parte más alta de la cuenca provee un flujo base sostenido a través del año (De Bièvre *et al.*, 2006). Además, existen diferentes ecosistemas que tienen diversidad de flora y fauna como páramo, bosques nublados, bosques de transición del páramo a partes bajas, bosques tropicales, entre otros, en el caso de la cuenca del río Mira, Ecuador.

La cuenca es un sistema hidrológico que tiene entradas, salidas y almacenamiento de agua. Este proceso se atribuye al balance hídrico o de energías (Chow *et al.*, 1988).

Hidrología de la cuenca

Chow *et al.* (1988) describe que el balance de energía en un sistema hidrológico (figura 1) es un inventario de todas las entradas y salidas de energía en él, tomando la diferencia entre las tasas de entrada (precipitación), de salida (caudal) y la tasa de cambio de almacenamiento.

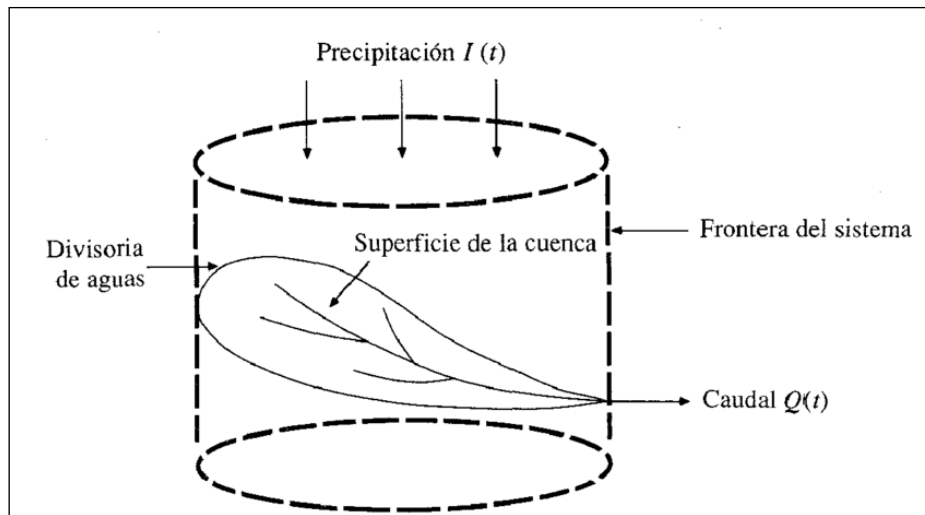


Figura 1. La cuenca como sistema hidrológico
Fuente: Chow *et al.* (1988)

Asimismo, Antón (2000), define al balance hídrico como una ecuación hídrica la cual aplica la ley de la conservación donde existen egresos (evaporación, transpiración, escorrentía, uso del ciclo hidrológico) e ingresos (precipitación) que influyen en el almacenamiento o recarga hídrica.

El balance hídrico permite evaluar cuantitativamente el recurso agua y la influencia de las actividades humanas en el mismo, este cálculo permite mejorar el control y distribución de agua (Heras, 1981).

Heras (1981), detalla que, el balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. La ecuación para el cálculo indica valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada y es la siguiente:

Ecu. (1)

$$P + Q_{sI} + Q_{uI} - E - Q_{sO} - Q_{uO} - \Delta S - V = 0$$

Donde las entradas comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, las aguas superficiales (Q_{st}) y subterráneas recibidas en la cuenca (Q_{ut}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación y transpiración (E) y la salida de corrientes de agua superficial (Q_{so}) y subterránea (Q_{uo}) de la cuenca.

Si las entradas superan a las salidas, existe almacenamiento (ΔS), caso contrario no existe recarga hídrica. Debido a la posibilidad de existir errores de estimación se debe tomar en cuenta un término residual (V) (Heras, 1981).

Escorrentía en la cuenca hidrográfica

La precipitación contribuye a varios procesos de almacenamiento y flujo (Ver figura 2). El agua fluye o se adiciona al almacenamiento. Inicialmente, una proporción grande de la precipitación contribuye al almacenamiento superficial o escorrentía (Chow *et al.*, 1988). La escorrentía es una parte de la precipitación no pérdida por infiltración, interceptación y evaporación que fluye superficialmente sobre un área determinada y se convierte en caudal del río principal (Horton, 1933). A medida que el agua se infiltra en el suelo, también hay almacenamiento de humedad del suelo. Existen dos tipos de almacenamiento: retención y detención; la retención es un almacenamiento que se sostiene por un largo período y después se agota por la evaporación, y la detención es un almacenamiento de corto plazo que se agota por el flujo hacia afuera del lugar de almacenamiento (Chow *et al.*, 1988).

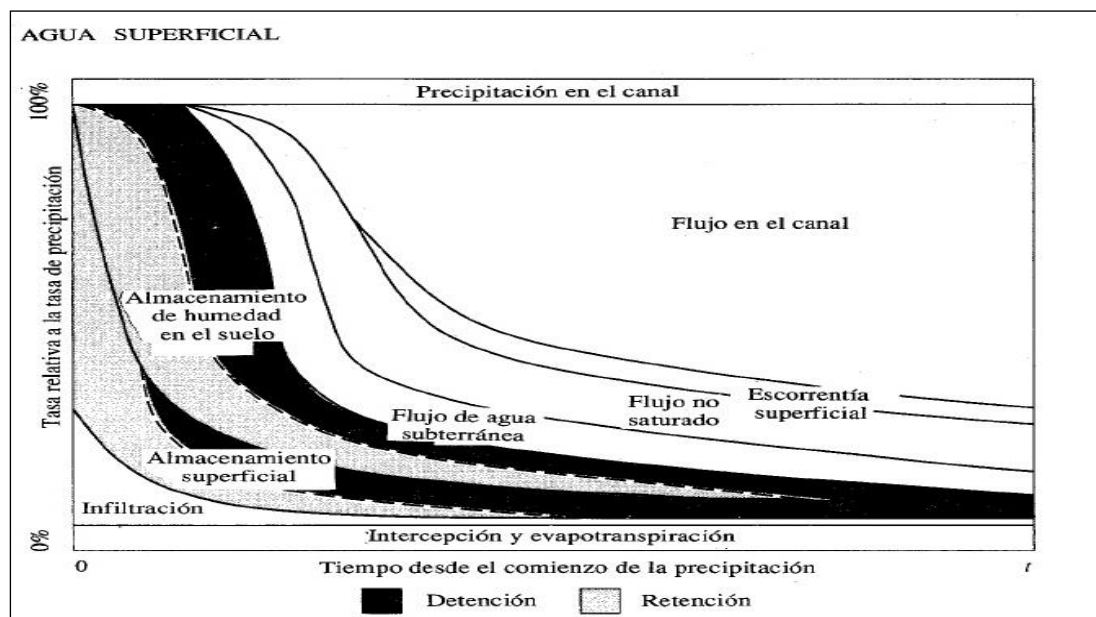


Figura 2. Distribución de la precipitación en una cuenca durante una tormenta.

Fuente: Chow *et al.* (1988).

Los bosques y el recurso hídrico

Según las naciones unidas en FAO (2008) menciona que, los bosques desempeñan un papel clave en la disponibilidad de agua. Como se observa en la figura 3, la precipitación (*rainfall*) son los ingresos que se convertirán en el agua almacenada por la infiltración en aguas subterráneas, esto es posible por la porosidad del suelo y a las raíces existentes (FAO, 2008). También tenemos pérdidas atribuidas a la evapotranspiración y escorrentía o caudal (*evapotranspiration* y *streamflow* respectivamente) que se efectúan por la transpiración de las plantas y la evaporización del agua en el suelo y el agua interceptada por las plantas (Chow, *et. al.* 1988 y; Shaw, 1994) y el flujo hortoniano (Horton, 1933).

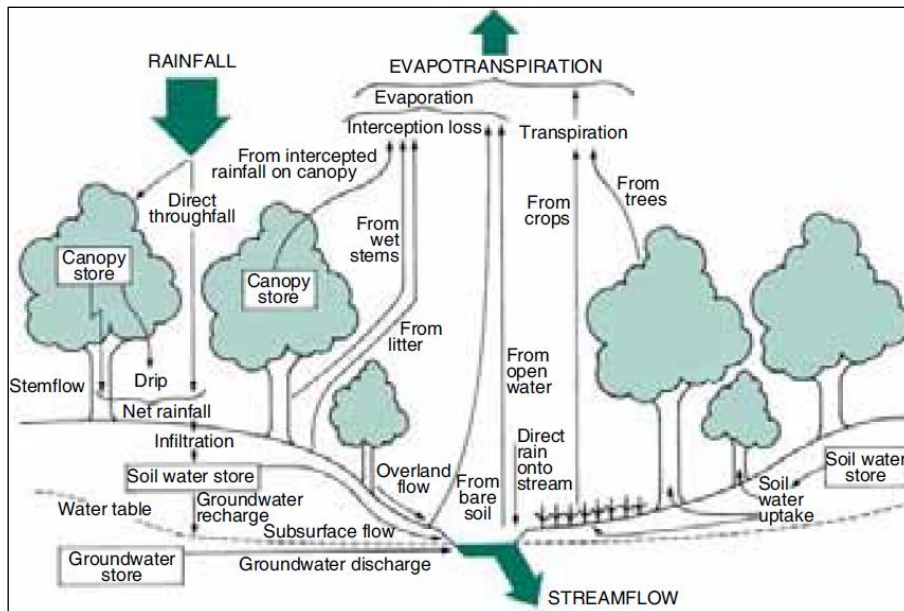


Figura 3. El ciclo hidrológico

Fuente: FAO (2008)

El agua bien puede ser el producto más útil e importante de los bosques (FAO, 2008). Los bosques mantienen el ciclo hidrológico, pero al eliminar el bosque se genera un aumento de recursos hídrico debido a que son usuarios del recurso hídrico y actúan como reguladores. Esta actividad tan importante se traduce en la reducción de catástrofes como inundaciones, deslaves, aguas contenidas de baja calidad para el consumo humano (FAO, 2008). El bosque y otras coberturas vegetales reducen el caudal por la transpiración de la vegetación. Esta empieza por la extracción de agua por las raíces de las plantas, transportada por el tallo y difundida en la atmósfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas (Chow, *et. al.*, 1988).

Según Shaw (1994), el valor varía según el tipo de vegetación, su capacidad de transpirar y la disponibilidad de agua en el suelo.

La cubierta forestal repercute en la proporción de precipitación que es evaporada y transpirada y, por consiguiente, en la cantidad disponible de agua para el almacenaje de humedad de suelo, la recarga de las aguas subterráneas y caudales en período seco (Keppeler *et al.*, 1990). La precipitación que contribuye al caudal varía dependiendo de la interceptación y evapotranspiración que son influenciados por el tipo, desarrollo, profundidad de las raíces y salud de la vegetación (Keppeler *et al.*, 1990). Además, las interacciones de la vegetación con el clima local puede generar el aumento o la disminución del agua disponible, pero el efecto principal de los ecosistemas boscosos es la reducción de la cantidad disponible a través del uso directo del agua por las plantas (Falkenmark, 2000 y Brauman *et al.*, 2007). No obstante, proporciona beneficios enormes a la humanidad como: belleza escénica, madera, medicina, fijación de carbono y productos de la biodiversidad forestal, protección de cuencas hidrográficas, calidad en el agua, regulación hídrica y control de la erosión (FAO, 2009b).

De todas las situaciones forestales, los bosques nublados tienen la interrelación más estrecha con la producción. Estos bosques se localizan en montañas o tierras altas, cuya principal característica es la alta humedad y precipitación durante todo el año. Adicionalmente, están bañadas por niebla frecuente o persistente, especialmente cuando las nubes impulsadas por el viento se cruzan directamente con la superficie, generalmente a la altura del follaje y se encuentra a ambos lados de la cordillera de los andes (FAO, 2008 y MECN, 2009). Además de la precipitación vertical normal, estos bosques tienen otra fuente de agua: la interceptación y el arrastre de agua de la niebla en movimiento horizontal, que puede agregar cientos de milímetros de agua por año al ecosistema y a su cuenca (Bruijnzeel y Hamilton, 2000). En Ecuador los bosques nublados se han señalado como reservorios importantes de biodiversidad, necesarios en el mantenimiento de su funcionalidad hídrica, ya que permiten mayor captación y distribución del agua hacia las zonas bajas (MECN, 2009).

De la misma forma MECN (2009) da a conocer que, los Bosques Nublados, Montano Altos, Montano Bajos y Piemontanos son de importancia para el funcionamiento adecuado del ciclo hidrológico y son fundamentales para la conservación y producción de agua.

Restauración hidrológica forestal

Serrada (2011) afirma que; La restauración hidrológica forestal es un conjunto de actuaciones necesarias para proteger el suelo ante la erosión, preservarlo frente a la sequía y las inundaciones, además de contener la capacidad de aprovechamiento de agua, contribuyendo a la mejora de la biodiversidad mitigando el cambio climático y mejorando el paisaje. Además, la restauración hídrico-forestal tiene por objeto corregir el desequilibrio hidrológico ocasionado por el deterioro del suelo y la cubierta vegetal. Estas acciones son el inicio de procesos erosivos y fenómenos torrenciales. Sin embargo, se pueden corregir con la mejora de la cubierta vegetal, de esta manera se puede asegurar su función protectora, un incremento en el índice de conservación del suelo y el control de la erosión laminar (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2013).

Mintengui y Robredo (1994), aseveran que la cubierta vegetal, fundamentalmente de los bosques y páramos representan factores estabilizadores ante la cuenca por los mecanismos torrenciales; incrementa la infiltración como efecto aumenta la porosidad del suelo; disminuye la velocidad del escurrimiento superficial; favorece el flujo superficial del agua cuando se produce precipitaciones abundantes. También es un mecanismo de defensa contra fenómenos erosivos producidos por las gotas de lluvia sobre el suelo actuando como colchón protector para que no exista erosión.

2.2.3 Modelos hidrológicos

En la década de los sesenta los modelos matemáticos se habían convertido en herramientas generalmente aceptadas en hidrología (Bergström, 1991). En 1966 se elaboró el primer modelo capaz de representar el ciclo hidrológico. El número de aplicaciones ha crecido y los modelos se utilizan ahora para resolver una gran cantidad de problemas en hidrología y recursos hídricos. A partir del desarrollo tecnológico, la modelación en cuencas hidrológicas evolucionó considerablemente, haciendo posible el modelar grandes períodos de tiempo (Singh, 1995).

Chow *et al.* (1988) afirman que, los modelos hidrológicos se han desarrollado con el objetivo de estudiar la operación del sistema y predecir la salida del mismo. Un modelo hidrológico es una aproximación al sistema real. Estos se dividen en modelos físicos y modelos abstractos.

Los modelos físicos se realizan a escala y se representan en tiempo real como el modelo hidráulico del vertedero. Estos se consideran determinísticos y generan pronósticos. Además, estos proveerán como salida la misma cantidad que ingresó al sistema (Chow *et al.*, 1988).

Los modelos abstractos se representan en forma matemática. La operación del sistema se describe mediante ecuaciones matemáticas que relacionan las variables de entrada y salida. Los modelos abstractos son considerados probabilísticos y son adecuados para fenómenos hidrológicos con alta aleatoriedad. Esta clase de modelos generan predicciones (Chow *et al.*, 1988).

SWAT es un modelo hidrológico abstracto o probabilístico, esta denominación se atribuye a que el modelo representa un sistema multivariable tanto de entradas como de salidas. Además, permite la simulación de varios procesos físicos que se presentan en una cuenca hidrográfica mediante ecuaciones matemáticas. Para denominarse modelos abstractos se apoyan en ecuaciones matemáticas para representar los procesos involucrados en el fenómeno a simular (San Isidro, 1998, Uribe, 2010 y Cabrera, 2012).

Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. La simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico que genera como resultado la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas (Oñate y Aguilar, 2003).

Oñate y Aguilar (2003) describen que, la hidrología del modelo está basada en la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca como lo describe la ecuación:

Ecu. (2)

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t: es el contenido final de agua en el suelo

SW: es el contenido inicial de agua en el suelo

t: el tiempo

Ri: la precipitación

Qi: la escorrentía superficial

ETi: evapotranspiración

Pi: cantidad de agua acumulada en la zona no saturada

QRi: cantidad de agua que retorna hacia los ríos como flujo base.

Oñate y Aguilar (2003), Uribe (2010) y Barbudo *et al.* (2016) describen que, para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de cobertura vegetal, tipos de suelo y pendiente. Las HRU son áreas con características similares, debido a esta afirmación, se plantea que zonas con propiedades similares, generan respuestas similares. Aunque la desventaja que se presenta es la falta de conectividad entre áreas (Del Rio, 2010).

La simulación hidrológica se divide en dos fases. La primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico, acción primordial para el presente estudio, ya que en esta fase el modelo controla la cantidad de agua presente en el sistema. La segunda fase de enrutamiento hidrológico define el movimiento del agua, sedimentos, nutrientes y diferentes sólidos o elementos químicos disueltos a través de la red de ríos en la cuenca hidrográfica. (Uribe, 2010 y Barbudo *et al.*, 2016).

Fase terrestre del ciclo hidrológico

Las diferentes entradas necesarias y de interés en este estudio para los procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico se detallan a continuación:

Datos climáticos en SWAT

Barrios y Urribarri (2010), Ortiz *et al.* (2010), Uribe (2010), Urrutia (2016) y Barbudo *et al.* (2016) coinciden que, SWAT tiene variables climáticas necesarias y son: precipitación diaria, temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar o heliofanía, velocidad del viento y humedad relativa. En Ecuador, las variables climáticas, dificultan el proceso de modelación, debido a los múltiples vacíos existentes en la base de datos de la red de estaciones.

Este tipo de vacíos pueden darse debido a que las estaciones meteorológicas se encuentran muy dispersas. Al mismo tiempo, no cuentan con la tecnología necesaria para realizar

mediciones periódicas de todas las variables climáticas. Esta falta de datos climáticos puede ser suplida al aplicar métodos de interpolación espacial.

Métodos de interpolación espacial

La interpolación espacial es “un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio” (Bosque, 2000).

Los diferentes métodos de interpolación espacial se clasifican en dos grandes categorías: determinísticos y probabilísticos (Maune *et al.*, 2001).

Los métodos de interpolación determinísticos calculan un valor para celda de la cuadrícula usando únicamente las propiedades físicas de las muestras de elevación (Goovaerts, 1997). Los métodos determinísticos son modelos considerados muy flexibles y fáciles de usar. Lo más conocidos son (Hengl, 2009):

- Polígonos de Thiessen
- Interpolación inversa a la distancia (IDW)
- Regresión con coordenadas
- Métodos de splines

Inverse Distance Weight (IDW)

Para Hengl (2009) el IDW probablemente es una de las técnicas de predicción espacial más antiguas. Al igual que con muchos otros predictores espaciales, un valor de variable objetivo en una ubicación nueva puede derivarse como un promedio ponderado. El IDW es un método local, que usa la información procedente de las estaciones meteorológicas más cercanas y calcula un valor estimado a partir de las mismas, dando distinto peso a cada una de ellas según la distancia a la que se encuentren del punto estimado, de forma que a mayor distancia de una estación al punto de interpolación menor será su peso (Sánchez, 2007, Andrade y Moreano, 2013 y Hengl, 2009).

Hidrología de SWAT

El volumen de escurrimiento se estima de dos maneras. Una de las técnicas es el número de curva CN. Este método utiliza la ecuación de la curva numérica que proporciona un valor de escurrimiento para diferentes tipos de vegetación y de suelo, además se debe tomar en cuenta la

humedad del suelo. Esta es propuesta por el servicio de conservación del suelo (Soil Conservation Service , 1972).

La segunda forma de calcular la escorrentía es el método de infiltración de Green y Ampt. Este se basa en una ecuación de las tasas de infiltración que dependen de la conductividad hidráulica (Green y Ampt, 1911)

La curva numérica

El número de curva (CN) es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de los EEUU (Soil Conservation Service, 1972).

CN se basa en la relación donde los volúmenes de precipitación neta son equivalentes a los volúmenes de caudal directo. Se toma en cuenta las condiciones de humedad antecedente del suelo (seco, normal y húmedo) determinada a partir de la precipitación total en los cinco días previos (Chow *et al.*, 1988). CN varía entre 0 y 100; donde un área con CN = 0 no tiene escorrentía y otra con CN = 100, donde toda la precipitación genera escorrentía debido a la permeabilidad del suelo.

ArcSWAT genera una curva numérica para cada uso y cobertura de suelo; Sin embargo, Ponce y Hawkins (1996), mencionan que, el CN se puede determinar a partir de la información del uso y tipo de suelo.

Infiltración de Green y Ampt

El método de infiltración de Green y Ampt se basa en una ecuación de las tasas de infiltración que dependen de la conductividad hidráulica (Green y Ampt, 1911). El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de la superficie (Horton, 1933).

Suelos en SWAT

Uribe (2010) menciona que, ArcSWAT necesita datos de cobertura y uso de suelo en el área de estudio, tipo de suelo y pendiente.

El tipo de suelo permite conocer diferentes aspectos como cantidad de materia orgánica, grupo hidrológico, infiltración, entre otros para ingresar mediante un “*raster*”.

La cobertura vegetal a ingresar está definida en un “*raster*” generado en ArcGIS mediante una clasificación supervisada. Puerta, Rengifo y Bravo (2011) afirman que, ArcGIS™ es un “software” de sistema de información geográfica (SIG) integrado, diseñado por la empresa californiana Environmental Systems Research Institute (ESRI) para trabajar a nivel multiusuario. Integra el software ArcGIS Desktop que es un conjunto integrado de aplicaciones SIG avanzadas (ESRI, 2002).

Según Hernández (2012), la clasificación supervisada parte de un conocimiento previo del área en estudio, esto permite una clasificación bajo un parámetro de referencia previa para las firmas espectrales del suelo. Las firmas generan una clasificación con alta probabilidad de coincidencia. En la clasificación supervisada se usan firmas espectrales tomadas de áreas de entrenamiento y adicionalmente requiere intervención del usuario (Puerta, Rengifo y Bravo, 2011).

Fase de enrutamiento hidrológico

Esta fase define el movimiento de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas orgánicas. Además, las sustancias químicas inorgánicas o de pesticidas (Barbudo *et al.*, 2016). Uribe (2010) y Barbudo *et al.* (2016) sugieren que, el enrutamiento en el canal o río principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes, sustancias químicas orgánicas y pesticidas. En este estudio es de interés el enrutamiento del agua o flujo.

Enrutamiento del flujo o agua

Uribe (2010) afirma que, el agua fluye río abajo. En este trayecto una porción se pierde por la evaporación. Otra pérdida potencial es el uso de agua del canal o río para el uso agrícola o humano. Sin embargo, este flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el río o adicionado a las zonas de recarga hídrica.

Finalmente, un modelo es válido si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables (Cabrera, 2012). Realizada la simulación se debe realizar la validación de los datos obtenidos en el proceso, con el fin de verificar la precisión del modelo.

2.2.4 Escorrentía y deforestación

No cabe duda de que el desmonte, aun parcial, incrementa en general el rendimiento hidrológico o escorrentía. Tanto los bosques naturales como los plantados son usuarios del recurso hídrico para la actividad fotosintética y utilizan más agua que casi todas las cubiertas de sustitución, incluidas la agricultura y los pastos. Los aumentos en el rendimiento hidrológico que se han documentado después de un desmonte en las regiones tropicales húmedas pueden oscilar de 110 a 825 mm, de acuerdo con la lluvia local (Nisbet y McKay, 2002 y FAO, 2008).

Efectos de la deforestación en la producción de caudales

En cuanto al tema, es posible afirmar que, la deforestación produce un aumento en el caudal (Likens *et al.*, 1978) debido al aumento de la escorrentía (Meneses *et al.*, 1995) por la reducción de egresos por interceptación (Myers, 1997), transpiración (Likens *et al.*, 1978) y la reducción de la tasa de infiltración (Oyarzún *et al.*, 2011). Esto puede ocasionar la interrupción de la recarga de aguas subterráneas y el aumento de inundaciones en períodos húmedos. Adicionalmente sequías en estaciones secas (Huber y López., 1993 y Myers, 1997).

La estación del año es una variable que afecta directamente la respuesta de los ríos a la deforestación (Keppeler *et al.*, 1990). Generalmente, los caudales anuales aumentan luego de la deforestación (Harr, 1979). La cuenca intervenida produce mayor escorrentía debido a la reducción de la transpiración durante la temporada de crecimiento (época seca) y a la disminución de las pérdidas por interceptación durante el año (Brown *et al.*, 2004).

En invierno, estudios en bosques experimentales en el oeste de Oregon (Rothacher, 1970; Harr *et al.*, 1979; Ingwersen, 1985) indicaron que la mayor parte del aumento en el rendimiento hídrico anual consecuente a la deforestación se produce en la temporada lluviosa. El suelo en cuencas deforestadas presenta un nivel relativamente más alto de humedad en el inicio de las lluvias en comparación a las cuencas sin tala. Douglass y Swank (1972), en su estudio de la respuesta de un bosque a la deforestación en el Oeste de Estados Unidos, plantearon que la mayor humedad inicial del suelo en el comienzo de la temporada húmeda explicaría los mayores caudales.

Eisenbies *et al.*, (2007) plantean que la intensidad de las inundaciones podría aumentar si la perturbación del suelo, como resultado de las actividades de manejo forestal, produce un incremento significativo en la erosión y en el transporte de sedimentos, resultando en la

degradación del arroyo y la disminución de la capacidad de los canales. Se debe considerar que la erosión y la sedimentación varían mucho de acuerdo con las prácticas de manejo, condiciones geológicas, climáticas y escala geográfica (FAO, 2007b). Además, numerosos estudios han demostrado que la influencia de la vegetación, suelos y uso del suelo sobre la generación de caudales disminuye cuando grandes volúmenes de agua son introducidos al sistema (Eisenbies *et al.*, 2007).

Las alteraciones del suelo como la erosión, compactación, formación de surcos, desplazamiento de arena, y el fuego causadas por la construcción de caminos y tráfico posterior a la tala (Hatchel *et al.*, 1970; Greacen y Sands, 1980; Megahan *et al.*, 1995; Lal, 1997 y Megahan *et al.*, 2001) pueden alterar la hidrología de las laderas y cursos naturales de agua hacia los ríos y esteros (Megahan, 1972; Wemple *et al.*, 1996; Sidle y Onda, 2004 y Sidle *et al.*, 2006), así como también, pueden reducir la infiltración a través de cambios físicos o químicos, remoción de materia orgánica, o la creación de suelo desnudo (Worrell *et al.*, 1997; Croke *et al.*, 2001 y Wahl *et al.*, 2003). La compactación del suelo debido al tránsito de maquinarias reduce la capacidad de almacenamiento de agua por disminución de la porosidad total, en especial de los macro poros (Greacen *et al.*, 1980; Kozłowski, 1999 y Miwa *et al.*, 2004). Estas afirmaciones demuestran que todos los cambios del uso de la tierra que compactan el suelo o disminuyen su porosidad, producen el aumento del caudal máximo durante las lluvias, y es posible que incrementen las inundaciones (Kaimowitz, 2004). En este sentido, la presencia o ausencia de la cobertura forestal tiene gran influencia en la escorrentía durante los eventos de precipitación pequeños y durante la temporada de crecimiento (Eisenbies *et al.*, 2007).

En el caso de los caudales de verano, el incremento del caudal base usualmente es directamente proporcional con la intensidad de la cosecha del bosque (Patric, 1978). Esta relación es asumida bajo el supuesto de que el agua no es un limitante del sitio (Hibbert, 1983). Sin embargo, debido a la tala del bosque la capacidad de infiltración del suelo disminuye hasta un nivel en que la cantidad de agua que libera un área en forma de escorrentía superficial es mayor a la ganancia en flujo base por la disminución de la evapotranspiración, entonces, el caudal en época seca debería decrecer (Bosch *et al.*, 1982). En cambio, si la capacidad de infiltración se mantiene, la reducción de evapotranspiración debería producir un aumento en los caudales base (Bosch *et al.*, 1982).

Keppeler *et al.* (1990) analizaron los caudales bajos y el rendimiento hídrico anual, durante 21 años después de la tala selectiva del 67% de la cobertura de un bosque secundario. Los resultados mostraron el aumento de los caudales anuales y de forma menos persistente el aumento de los caudales bajos (período seco). Los incrementos fueron mayores en el año después de la tala y disminuyeron irregularmente en los siete años siguientes. Keppeler *et al.* (1990) plantean que las perspectivas de producción de agua mediante la cosecha selectiva de bosques secundarios a lo largo del norte de la costa de California no son prometedoras, por la dificultad de predecir de forma fiable la oportunidad y alcance del incremento del caudal y porque la calidad del suministro podría verse afectada negativamente por el aumento de sedimentos en suspensión y turbidez.

Un estudio realizado en la cuenca de Fox Creek, Oregón, en el que se detectó una pequeña disminución en el rendimiento hídrico anual posterior a la tala. Después de la cosecha de la madera, el número de días de caudal base incrementó, lo que sugiere que los caudales de verano se redujeron en realidad como resultado de la tala de árboles (Harr, 1980). Harr (1980) planteó la hipótesis de que esta anomalía fue el resultado de la reducción de la interceptación de gotas de niebla después de la tala del bosque. En un estudio posterior, se observó hasta un 44% más de precipitaciones netas durante primavera y verano bajo el dosel del bosque que en un claro (Harr, 1982). Tras el análisis de los datos de caudales recientes se confirmó la teoría de Harr (1980) (Ingwersen, 1985).

Con respecto al incremento del caudal anual, Sahin y Hall (1996) realizaron una regresión lineal sobre el aumento de los caudales anuales en relación a diferentes porcentajes de extracción de madera de distintas coberturas forestales en cuencas pequeñas. Concluyeron que la deforestación de una cuenca con cobertura de eucalipto genera un aumento aproximado de 57%; en coníferas un 40%; en coníferas de madera dura un 13% y en bosques lluviosos un 72% de rendimiento hídrico anual. Para bosques de madera dura calcularon el aumento del rendimiento hídrico con diferentes niveles de precipitación. Con menos de 1500 mm de precipitación el aumento fue aproximado a 64% y con mayores valores de precipitación fue de 93%.

Así, Andraassian (2004) concluye que, aunque en la mayoría de los casos la tala produce un aumento de los caudales anuales. Generalmente, los caudales de verano presentan un aumento

relativo y los caudales de invierno el mayor aumento. Las inundaciones pueden aumentar su intensidad dependiendo de las prácticas forestales utilizadas y la dimensión de la tala.

2.2.5 Aplicación del modelo SWAT para modelación de caudales

Se han realizado gran cantidad de estudios que muestran como la deforestación causada por la actividad antrópica afecta a la producción de caudal, generando un aumento o disminución, dependiendo del plazo en que se realizó.

Urrutia (2016), en su investigación realizada en la cuenca alta del río San Juan en el departamento del Chocó, Colombia; simuló la escorrentía para el período de 1990-2010. Al comparar los resultados de la simulación, se observó un cambio en el escurrimiento superficial de 163.53 mm a 163.58 mm. Además, se simuló la extracción minera excesiva, para esto se afecta en mayor cantidad la cobertura vegetal. Este acontecimiento empírico demostró una disminución en el caudal a 158.28 mm. Concluyendo que el caudal promedio anual disminuyó a largo plazo, por lo que se argumenta que al aumentar el área deforestada disminuye el caudal de escorrentía superficial en la cuenca. Además, se menciona que las variables determinantes de respuesta en una cuenca son la cobertura vegetal. Este acontecimiento es posible debido a que los poros y las propiedades físicas de suelo generadas por la materia orgánica se perdieron conforme a FAO (2008) que afirma que, el bosque regula el ciclo hidrológico y la producción de sedimentación, esto mejora la infiltración y reduce el arrastre de sólidos.

Por otra parte, Ortiz *et al.* (2010) muestran en sus resultados que el bosque en el período 2003 – 2008 disminuyó aproximadamente un 25 % lo que generó un aumento del caudal de 131.84mm a 238.74mm. Asimismo, en el estudio se realizó una validación de datos con el coeficiente de determinación R^2 , este resultado se obtiene de la correlación lineal de Pearson.

El estudio de Ortiz *et al.* (2010) concuerda con Nisbet y McKay (2002) y FAO, (2008 y 2009a) donde afirman que, la extracción del bosque genera un aumento en el caudal debido a que el bosque es un usuario del recurso hídrico para la fotosíntesis, esto genera pérdida de agua en el sistema por evapotranspiración. No obstante, el agua es el producto más importante y útil del bosque, sin olvidar que es un ecosistema clave en la disponibilidad del recurso hídrico.

Finalmente, es necesario mencionar a Oñate y Aguilar (2003), en la cuenca alta del río Catamayo, la investigación buscó determinar la respuesta hidrológica a la aplicación de una

cobertura generada a partir del uso potencial del suelo. Los resultados obtenidos muestran que el modelo SWAT reproduce de manera aproximada el registro histórico, esto hace suponer, que de mejorar las condiciones actuales de la red de estaciones existente, los resultados serían satisfactorios. Se recomienda que antes de realizar investigaciones similares, se deberá en primer lugar ampliar la base de datos climatológica actual. Sin embargo, se demuestra que, el bosque es un usuario del bosque que genera menor cantidad de agua, pero a este acontecimiento se atribuye la disminución en la producción de sedimentos. Esto ayuda a la calidad del agua.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización del área de estudio

3.1.1 Ubicación geográfica de la cuenca del río Mira

La Cuenca del río Mira es una cuenca Binacional ubicada en el extremo norte del país. Sin embargo, el presente estudio se limita a la cuenca media alta que va hasta la estación hidrométrica en Lita (H0011) dentro del territorio ecuatoriano; tiene una superficie de 5042.84 Km², gran parte de las provincias de Carchi e Imbabura (Ver Figura 4), en la parte media – alta del río Mira. Las coordenadas UTM están en el sistema DATUM WGS84, zona 17S (tabla 1).

Los rangos altitudinales se extienden desde los 475 m.s.n.m. en el límite inferior, hasta los picos andinos con una altitud superior a 4000 m.s.n.m. en los volcanes presentes en la cuenca. Sus límites naturales son: por el Norte las cuencas del río San Juan y del río Carchi, por el Sur el Nudo de Mojanda – Cajas; por el Este la Cordillera Oriental de los Andes y por el Oeste la Cordillera Occidental (INAMHI, 2005).

Tabla 1

Coordenadas de ubicación de la cuenca.

Puntos	Lugar	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
Norte	Julio Andrade	865963.15	10073450.39	3005
Sur	Cuicocha	795061.00	10032413.64	3059
Este	Mariano Acosta	835889.58	10032769.52	2976
Oeste	Lita	783792.00	10096102.62	586

La cuenca tiene un caudal promedio de 140.9 m³/s al año, determinado por datos analógicos del INAMHI (1963 – 2015). Además, la superficie de estudio presenta un clima con un patrón complejo y cambiante debido al sistema orográfico existente. Así, la cuenca integrada presenta una precipitación media de 1,884.00 mm al año (CISPDR, 2015). Se reconocen 10 subcuencas y 36 microcuenca, cada una de estas aporta al caudal de salida en la estación Mira – Lita (H0011) (INAMHI, 2005; SENAGUA, 2018).

Mapa de ubicación de la Cuenca media - alta del río Mira

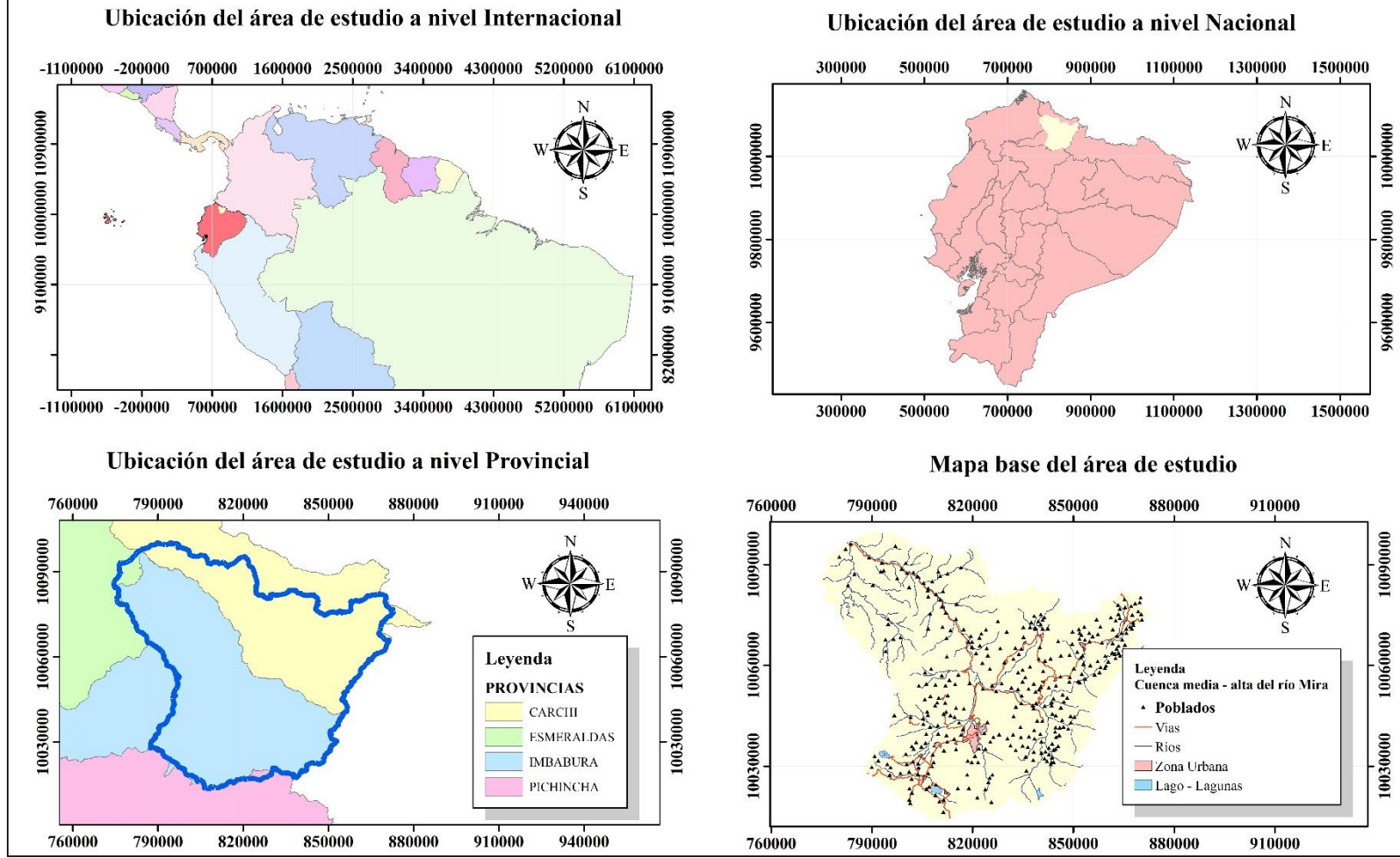


Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio.

3.1.2 Ecosistemas en la cuenca del río Mira

La cuenca cuenta con diferentes ecosistemas (Figura 5) que ayudan a la producción de recursos hídrico como son el páramo, el bosque montano alto de los Andes perteneciente a bosque nublados y bosques de transición de páramo a tierras más bajas, el bosque montano bajo y el bosque piemontano. Estas formaciones además son protectoras de laderas, erosión y calidad y cantidad del recurso hídrico (MECN, 2009).

El Páramo es un ecosistema de alta montaña. Este se ubica discontinuamente en el Neotrópico desde altitudes de aproximadamente 2500 a 4500 m.s.n.m., hasta la línea de nieves perpetuas (Sklenář *et al.*, 2005). Josse *et al.* (2003), destaca a tres Sistemas Ecológicos de páramo: Páramo norteandino herbáceo de almohadillas (4000-4100 m.), caracterizado por la dominancia de grupos compactos de forma plana o almohadillada; Páramo norteandino de pajonal arbustivo (3000-4300 m.), caracterizado por pajonales generalmente altos y con pocas plantas herbáceas no gramíneas, sin estrato arbustivo; y Páramo norteandino arbustivo (3000-4300 m.), caracterizado por la presencia de árboles de *Polylepis* además por los Frailejones (*Espeletia schultzii*). MECN (2009) afirma que, la principal amenaza a este ecosistema es la quema para apertura de pastizales y cultivos, esta actividad se puede observar en la cuenca, principalmente en los páramos da pajonal de Mariano Acosta y en los páramos de pajonal y frailejones de El Ángel y San Isidro donde se ha destinado para cultivos de papa, haba y pastos.

De todas las situaciones forestales, los bosques nublados tienen la interrelación más estrecha con la producción. Estos bosques se localizan en montañas o tierras altas, cuya principal característica es la alta humedad y precipitación durante todo el año (FAO, 2008). Según Valencia *et al.* (1999), los bosques nublados se ubican entre los 1800 y 3000 m de altitud, dominado por vegetación particularmente rica, dominada por epífitas como líquenes, orquídeas, helechos y bromelias. Una característica son los bosques bajos a medios, generalmente densos, cuyos árboles están cargados de abundante musgo y presentan suelos húmedos y bien drenados (Josse *et al.*, 2003). Los tallos de los árboles se vuelven cada vez más torcidos y nudoso, los helechos arborescentes y el bambú son comunes, las rocas cubiertas de musgos y los tallos caídos. El aumento puede atribuido por este ecosistema puede ser del 15 al 20 por ciento de las precipitaciones, aproximadamente de 2 000 a 3 000 mm por año (FAO, 2008). La materia orgánica del suelo es particularmente importante porque puede retener casi

20 veces su peso en agua. Adicionalmente, el contenido de materia orgánica del suelo mejora la infiltración y retención de agua (FAO, 2015).

A estos bosques se suman los Bosques Montano Altos, según Valencia *et al.* (1999) y Baquero *et al.* (2004), incluyen vegetación de transición entre bosques montanos y el páramo, caracterizada por densas capas de musgo y árboles con ramificaciones desde su base y se extiende desde los 3.000 hasta los 3.400 m. Según Josse *et al.* (2003), pertenece a los Sistemas Ecológicos de: Bosque de Polylepis (3000-3200m.) y Bosque pluvial de los Andes del norte (3000-3200m.), en donde se encuentran los humedales altoandinos y altimontanos. Se caracterizan por presentar gran cantidad de musgos y plantas epifitas, característica que lo hace parecido a los Bosques nublados. La temperatura mínima anual es de 6° C, y la máxima anual de 17° C, con una precipitación anual de 922 mm (Baquero *et al.*, 2004). Para MECN (2009), estos ecosistemas ofrecen servicios hidrológicos que garantizan la calidad y cantidad del agua por su gran capacidad de retención. No obstante, se ven amenazados por la extracción excesiva de madera para convertirla en carbón.

Los Bosque Montano Bajos, según Valencia *et al.* (1999) y Baquero *et al.* (2004), pertenece a la clasificación de Bosque siempre verde montano bajo, ubicado desde los 1300 hasta los 1800m.s.n.m., dominados por árboles con un dosel de 25 a 30m. Adicionalmente, Josse *et al.* (2003) describe a estos ecosistemas como Bosque pluvial Montano Bajo de los Andes del norte (1900-2200 m.), caracterizados por ser selvas siempreverdes, son muy diversas, crecen en pendientes y crestas de serranías subandinas. La preservación de este ecosistema depende del uso racional del mismo, evitando la extracción excesiva de madera y la apertura de pastizales para la crianza de ganado vacuno (MECN, 2009).

Para concluir, MECN (2009) describe al Bosque Piemontano como un ecosistema de tierras bajas, ubicado en las estribaciones de la Cordillera occidental y oriental de los Andes. Valencia *et al.* (1999) y Baquero *et al.* (2004), lo ubican en la clasificación de Bosque siempre verde piemontano, ubicado entre altitudes que van desde los 600 a 800 m.s.n.m., caracterizados por presentar árboles de más de 30 m de altura.

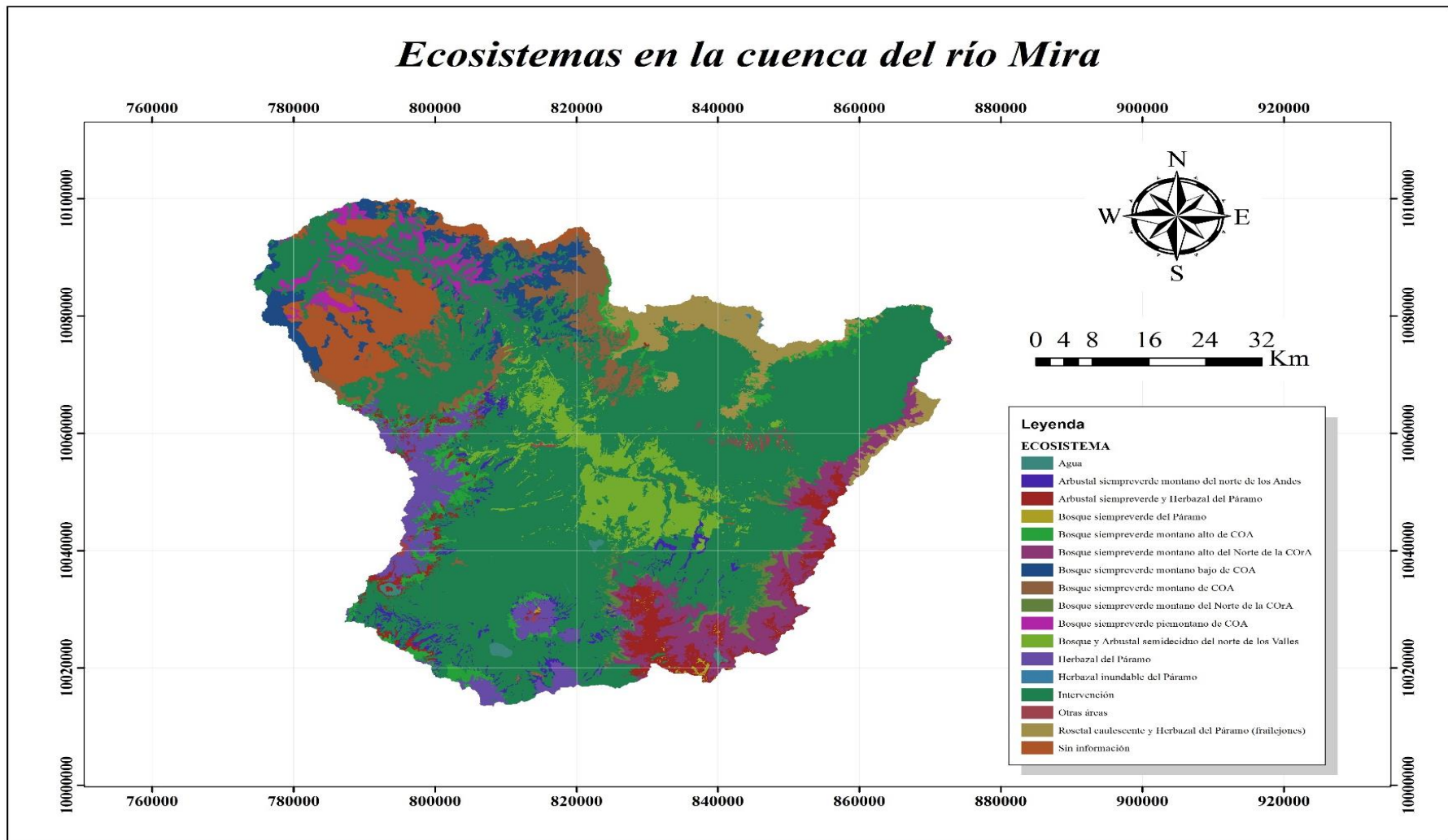


Figura 5. Mapa de ecosistemas.
Fuente: MAE (2014).

3.1 Materiales

A continuación, se detallan los materiales, equipos y softwares necesarios y usados para el cumplimiento de la investigación (tabla 2).

Tabla 2

Materiales, equipos y softwares

Equipos	GPS TOPCON – GRS-1
	Cámara fotográfica Nikon
	Camioneta
Materiales	Libreta de campo
	Poncho de agua
	Mochila
	Base de datos analógica Hidro – meteorológica del INAMHI
	Imágenes multiespectrales
Softwares	ArcGIS 10.3 de licencia temporal
	Extension Soil and Water Assessment Tool (SWAT) de licencia temporal
	Soil water characteristics
	Num – Curv
	SWAT CUP

3.2 Metodología

La presente investigación se llevó a cabo en la cuenca media – alta del río Mira. La metodología aplicada consistió en separar la investigación por etapas. Para iniciar se realizó la caracterización de la cobertura del área de estudio. Esta caracterización tuvo la finalidad de obtener las variables de entrada que requiere el modelo hidrológico SWAT. A continuación, se procedió a simular los caudales producidos en tres períodos diferentes (1998 – 2002, 2005 – 2009 y 2011 – 2015). Finalmente, a partir de la información obtenida de las etapas anteriores, se analizó la variabilidad hídrica frente a la variación de la cobertura del bosque.

3.2.1 Etapa 1: Establecimiento de la tasa de deforestación en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000 – 2014

En esta etapa se desarrollaron los siguientes pasos metodológicos:

Paso 1: Delimitación física de la cuenca

Se realizó la delimitación física de la cuenca media – alta del río Mira mediante el uso del software ArcGIS de licencia temporal y su extensión ArcSWAT de licencia temporal como se observa en flujograma (figura 6).

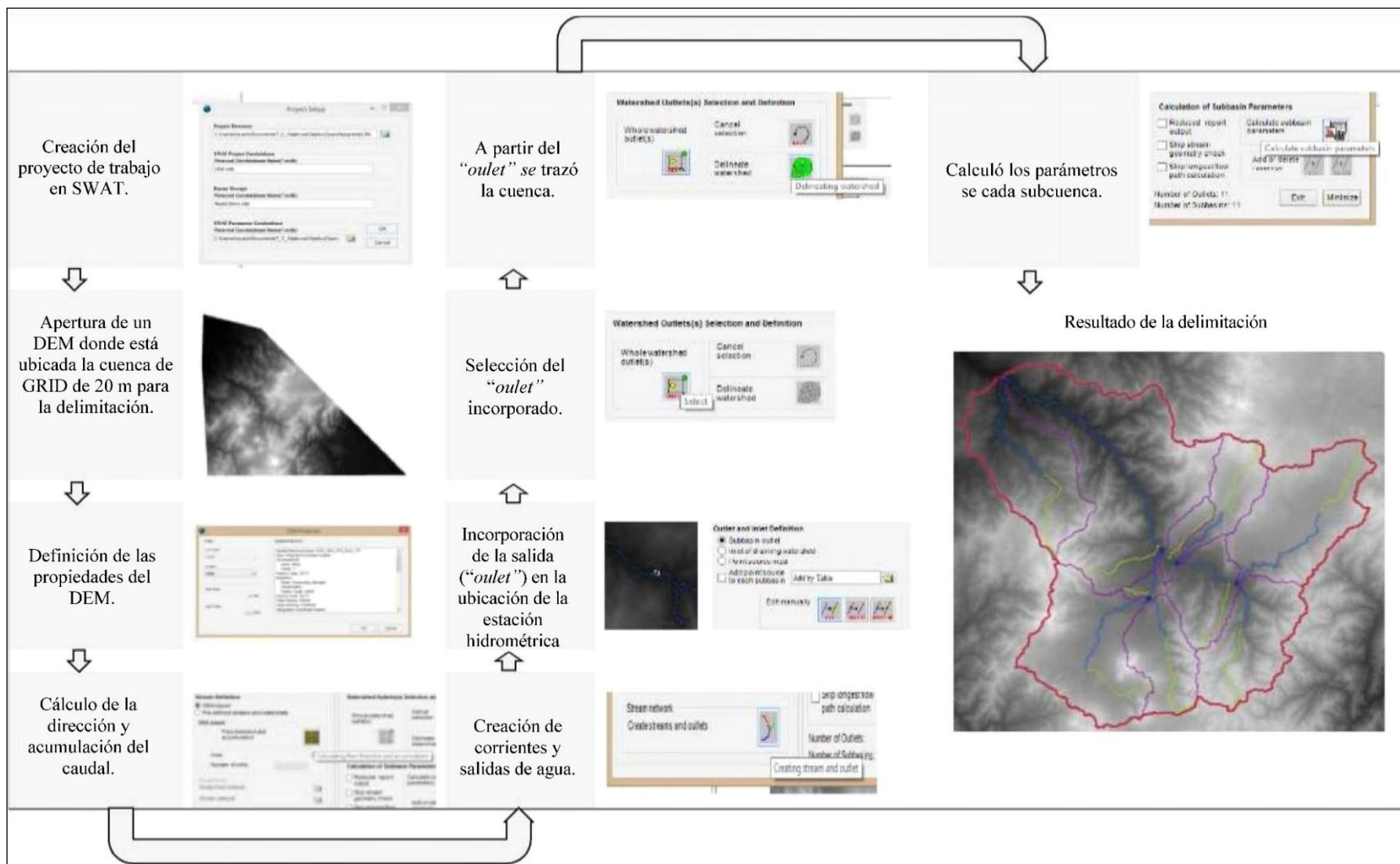


Figura 6. Flujoograma del proceso de delimitación del área de estudio.

Paso 2: Levantamiento de información en terreno

Se procedió a las visitas de campo necesarias de la cuenca del río Mira para registrar las diferentes coberturas vegetales y usos de suelo mediante polígonos GPS. La cobertura vegetal y usos de suelo se observaron e ingresaron a la base de datos mediante su levantamiento.

Considerando las características de la cuenca se georreferenciaron polígonos de entrenamiento para las coberturas de páramo, bosque, vegetación arbustiva – matorral, pastos, cultivos, zona urbana, cuerpos de agua y área sin vegetación de superficie.

Páramo

En la cuenca existe gran cantidad de páramo de paja y de frailejones (figura 7), estas áreas se caracterizan por la baja temperatura, presencia de humedad y potencial hídrico.

Frailejones.



Captura de agua por las plantas de frailejón.



Figura 7. Páramo de frailejones (*Espeletia schultzei*) de El Ángel.

Bosque

Los bosques son ecosistemas de regulación hídrica de gran importancia. En el área de estudio se encuentra gran cantidad de bosques de diferente tipo de vegetación. Como ejemplo, el bosque de *Polylepis* en la Reserva Ecológica El Ángel y bosque protector golondrinas (Figura 8). Cabe mencionar que, las plantaciones forestales son tomadas como área forestal, parte de los bosques de la cuenca.

Bosque de *Polilepys** (3500 msnm)



Bosque las golondrinas* (2200 msnm)



Figura 8. Ejemplo de bosques en la cuenca.

Nota: *Bosque nativo

Vegetación arbustiva – Matorral

Según Cortés (2003), son formaciones vegetales constituidas principalmente por arbustos; de acuerdo con su altura y hábito de crecimiento en el área de estudio se pueden diferenciar matorrales bajos, rosetosos y altos. Estas formaciones van de 1 a 5 metros de altura y se lo puede observar en vegetación arbustiva observada en la cuenca (figura 9).

Vegetación arbustiva en Mariano Acosta



Vegetación arbustiva cerca al páramo de El Ángel



Figura 9. Vegetación arbustiva – Matorral.

Pastos

Los pastos (figura 10) son unidades productivas en área intervenida, son producto del avance de la frontera agrícola y pecuaria, principalmente para la crianza de ganado vacuno. Esta actividad productiva es uno de los principales cambios de uso de suelo del bosque.

Pastos en Yuracruz *



Pastos en el páramo de Mariano Acosta**



Figura 10. Pastos.

Nota: * Pasto natural, **Pasto cultivado.

Cultivos

Este uso del suelo se presenta a lo largo y ancho de la cuenca, desde pequeñas parcelas agro productivas hasta fincas agro productivas. Se evidencio la presencia de cultivos de ciclo corto entre los que se encuentra maíz, cebolla, papa, haba, frejol, entre otros (figura 11). El incremento de esta práctica agrícola es también una de las causas del avance de la frontera agrícola.

Cultivo de papas en Mariano Acosta



Cultivo de Maíz



Figura 11. Cultivos.

Zona urbana

En la cuenca se encuentran gran cantidad de zonas urbanas (figura 12) que van desde ciudades como Ibarra, Otavalo, San Gabriel, entre otras hasta pequeños poblados y asentamientos urbanos y poblados como Ibarra, San Gabriel, El Ángel, Mariano Acosta, entre otros. Cabe mencionar que estos asentamientos son usuarios del recurso hídrico.

Cotacachi



Pimampiro



Figura 12. Zona urbana

Cuerpos de agua

Dentro de la cuenca se encuentran cuerpos de agua, cada uno con diferentes características de flora y fauna debido a los pisos climáticos característicos de la zona. Podemos encontrar la laguna de Cuicocha (figura 13), la laguna de Yahuarcocha (figura 13), entre otros dentro de la cuenca.

Cuicocha



Yahuarcocha



Figura 13. Cuerpos de agua.

Área sin vegetación

En el área se encuentra gran cantidad de área sin cobertura vegetal y sin ningún uso de suelo debido a la degradación y erosión, además, por la escasa disponibilidad del recurso hídrico que se presenta en esas áreas (figura 14).

Aloburo



Ambuqui



Figura 14. Área sin vegetación, producto de la erosión.

Paso 3: Procesamiento de datos en SIG

De acuerdo a la metodología aplicada en el estudio de Lozano y Villarroel (2009), el cual utiliza imágenes satelitales de los sensores LANDSAT, en estas imágenes se puede diferenciar los tipos de cobertura vegetal: bosque, vegetación arbustiva, pastos, páramo, cultivos, áreas pobladas, áreas no vegetadas y cuerpos de agua. Las imágenes tienen una temporalidad de los años 2000, 2007, 2014 y 2017 con diferentes niveles de cobertura espacial y grado de nubosidad. El flujograma de los procesos adicionales se describe en la (Figura 15).

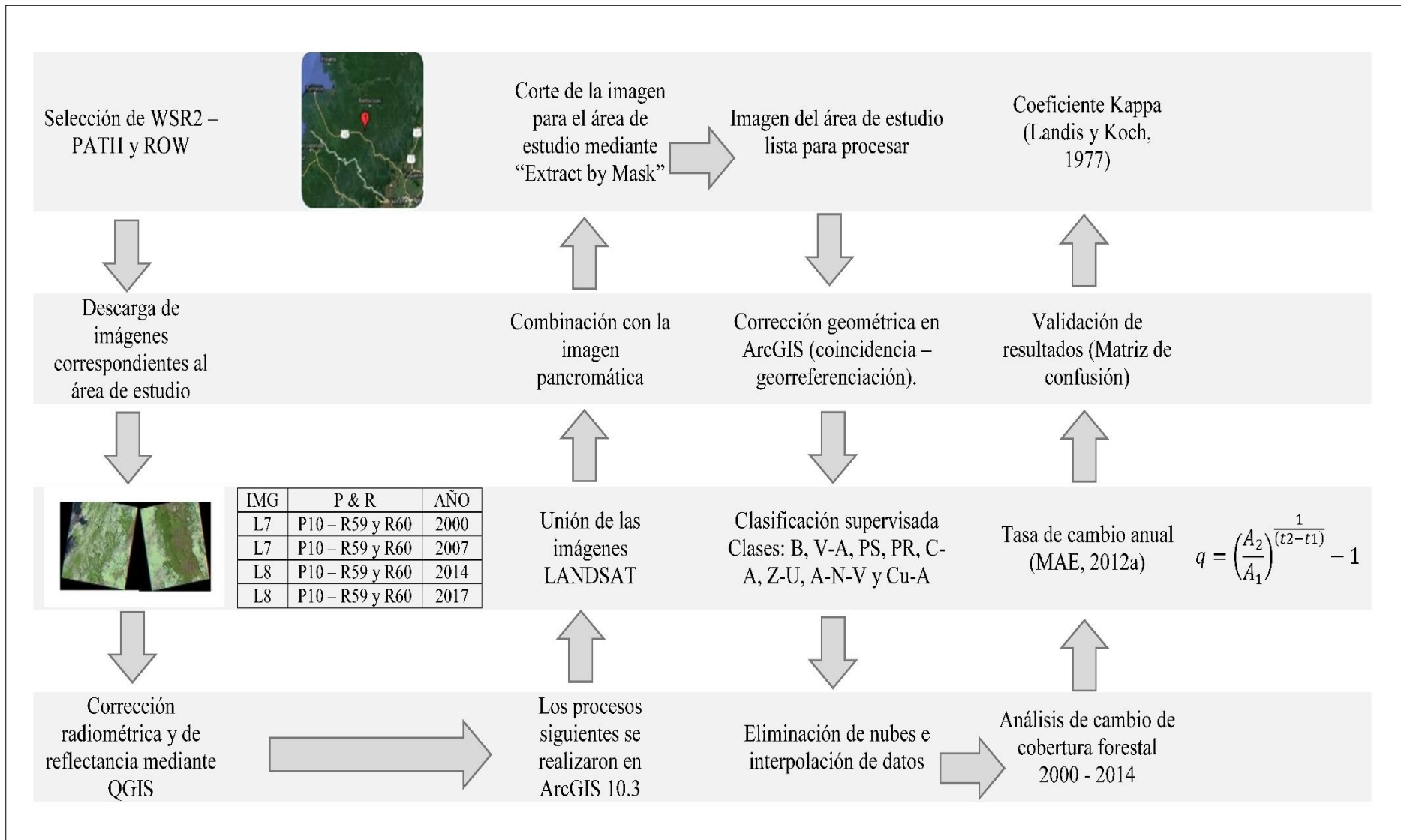


Figura 15. Flujoograma del proceso de clasificación de las imágenes LANDSAT.

Paso 4: Análisis multitemporal

Chuvieco (1996 y 2002) propone comparar las imágenes disponibles en donde se presentan los cambios que se producen en los períodos de tiempo a estudiar, lo que permitirá clasificar superficies.


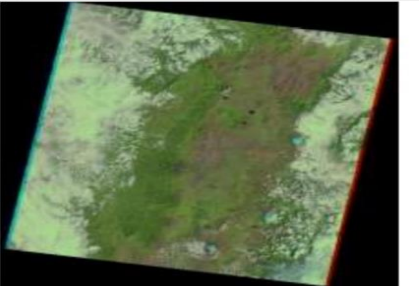

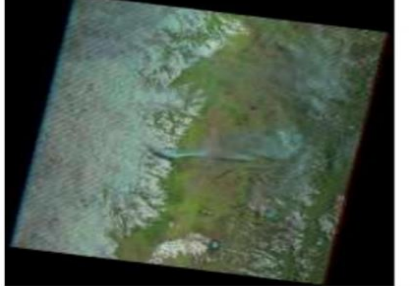
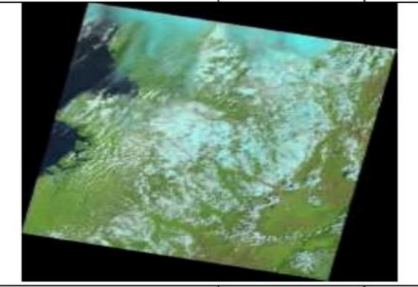
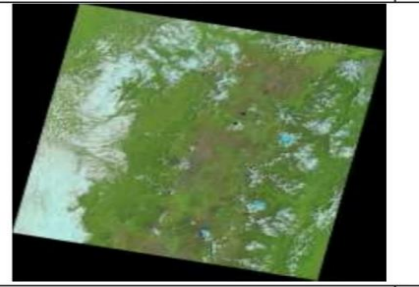
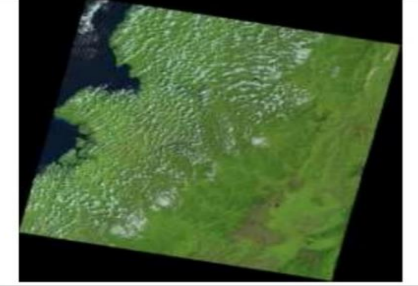
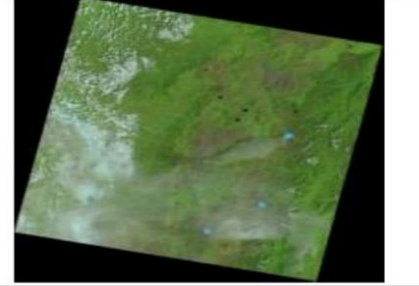
Nro.	Sensor	Path y Row	Nubosidad	ID	Fecha		
1	LANDSAT 7 ETM+	P010R059	30%	LE07_L1TP_010059_20000218_20170213_01_T1	18/02/2000		
		P010R060	40%	LE07_L1TP_010060_20001218_20170208_01_T1	18/12/2000		
							
2	LANDSAT 7 ETM+	P010R059	40 %	LE07_L1TP_010059_20070205_20170105_01_T1	05/02/2007		
		P010R060	40 %	LE07_L1TP_010060_20070205_20170105_01_T1	05/02/2007		
							
3	LANDSAT 8	P010R059	70%	LC08_L1TP_010059_20141030_20170418_01_T1	30/10/2014		
		P010R060	40%	LC08_L1TP_010060_20141030_20170418_01_T1	30/10/2014		
							
4	LANDSAT 8	P010R059	20%	LC08_L1TP_010059_20170123_20170311_01_T1	23/01/2017		
		P010R060	40%	LC08_L1TP_010060_20170123_20170311_01_T1	23/01/2017		
							

Figura 16. Imágenes para la clasificación.

Se seleccionó imágenes de los satélites Landsat 7 para los años 2000 y 2007 y Landsat 8 para los años 2014 y 2017 (figura 16), cada imagen con los porcentajes más bajos de nubosidad disponibles, proporcionadas por el servicio geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, Earthexplorer, 2018), a través del sitio web de Earth Explorer.

La corrección geométrica consiste en proyectar la imagen satelital en un sistema de coordenadas determinado, con el propósito de eliminar cualquier distorsión geométrica. Para esta investigación se proyectó la imagen satelital en el sistema de coordenadas UTM, DATUM WGS84, 17 Sur. Adicionalmente las imágenes fueron sometidas a una corrección radiométrica y corrección de reflectancia. Una vez realizadas las correcciones geométricas, radiométricas, de reflectancia y la composición de bandas extrajo el área necesaria para la investigación en la cuenca hidrográfica.

Se aplicó una clasificación supervisada en las imágenes mediante firmas espectrales, con el fin de formar “clusters” de píxeles con características similares a fin de identificar las categorías de cobertura vegetal (Hernández, 2012). Dentro de la cuenca se identificaron 9 tipos de cobertura (tabla 3).

Tabla 3

Coberturas para la clasificación.

Coberturas	ID
Bosque	1
Vegetación arbustiva	2
Pastos	3
Páramo	4
Cultivos	5
Zona urbana	6
Área sin vegetación	7
Cuerpos de agua	8
Nubes **	9

** Nubes eliminadas mediante “Copy Raster”

Las nubes se eliminaron usando un proceso espacial (figura 17) con la herramienta “Copy Raster”. Las áreas de nubes eliminadas fueron rellenadas a partir de la herramienta “Focal Statistics”. Así, se generó una clasificación total del área de estudio. Finalmente se aplicó la herramienta “Reclassify”, para crear un “raster” con 8 clases de cobertura vegetal. Una vez definido el uso de suelo y cobertura vegetal para cada muestra satelital, se procedió a determinar los cambios multitemporales (Lozano y Villarroel, 2009).

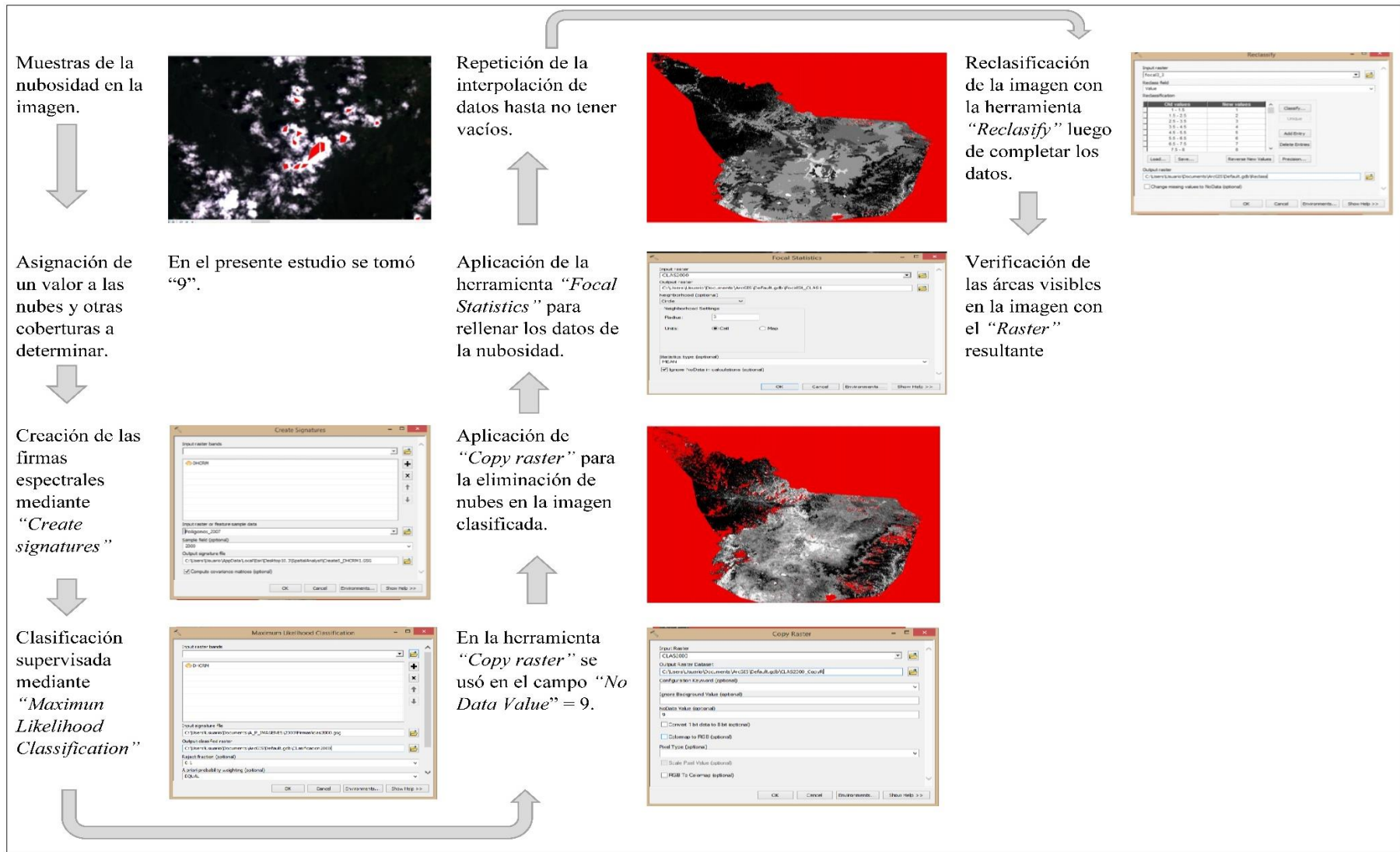


Figura 17. Flujoograma del proceso de eliminación de nubes.

Paso 5: Tasa de cambio

Para el análisis de la cobertura se aplicó la fórmula de la tasa anual de cambio de cobertura vegetal. Para esta tasa se usó el área del ecosistema Bosque del año 2000, 2007, 2014 y 2017.

Este indicador mide la variación anual del área boscosa de una región en dos épocas diferentes (Puyravaud, 2003).

Ecu. (3)

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{1}{(t_2-t_1)}} - 1$$

Donde Q: Tasa de pérdida de cobertura vegetal en el Ecuador continental (%), A1: Área de vegetación inicial (ha), A2: Área de vegetación final (ha), t1: Año inicial y t2: Año final.

El área para determinar la tasa de cambio se obtuvo de los “*shapes*” mediante la herramienta “*calculate geomtry*” y “*sumarize*”.

Paso 6: Validación de los datos en campo

Se realizó la validación mediante una verificación en campo de 400 puntos de uso actual del suelo para realizar la matriz de confusión. Luego de tabular los puntos de verificación, se realizó el análisis de los datos mediante una “matriz de confusión”, para esta matriz se procesaron los datos en ArcGIS mediante una frecuencia para la obtención de una tabla Pivote.

La matriz estableció la confiabilidad del mapa y los errores de omisión. La tabla pivote se ingresó a Excel para calcular la fuerza de acuerdo según la estadística Kappa (Tabla 4).

Tabla 4

Valores para Kappa.

Estadística Kappa	Fuerza de acuerdo
< - 0.00	Pobre
0.00 - 0.20	Escaso
0.21 - 0.40	Razonable
0.41 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Sustancial
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Fuente: The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data Landis y Koch (1977).

Paso 7: Representación del cambio de cobertura

Para observar los cambios en la cuenca se realizó el proceso en ArcGIS mediante la herramienta “*Raster Calculator*” (figura 18). Este proceso permitió ejemplificar los cambios del bosque y determinar las áreas donde se efectuaron cambio de uso de suelo y cobertura en cada período. Este proceso permitió ver áreas con presencia de deforestación, reforestación y sin cambio.

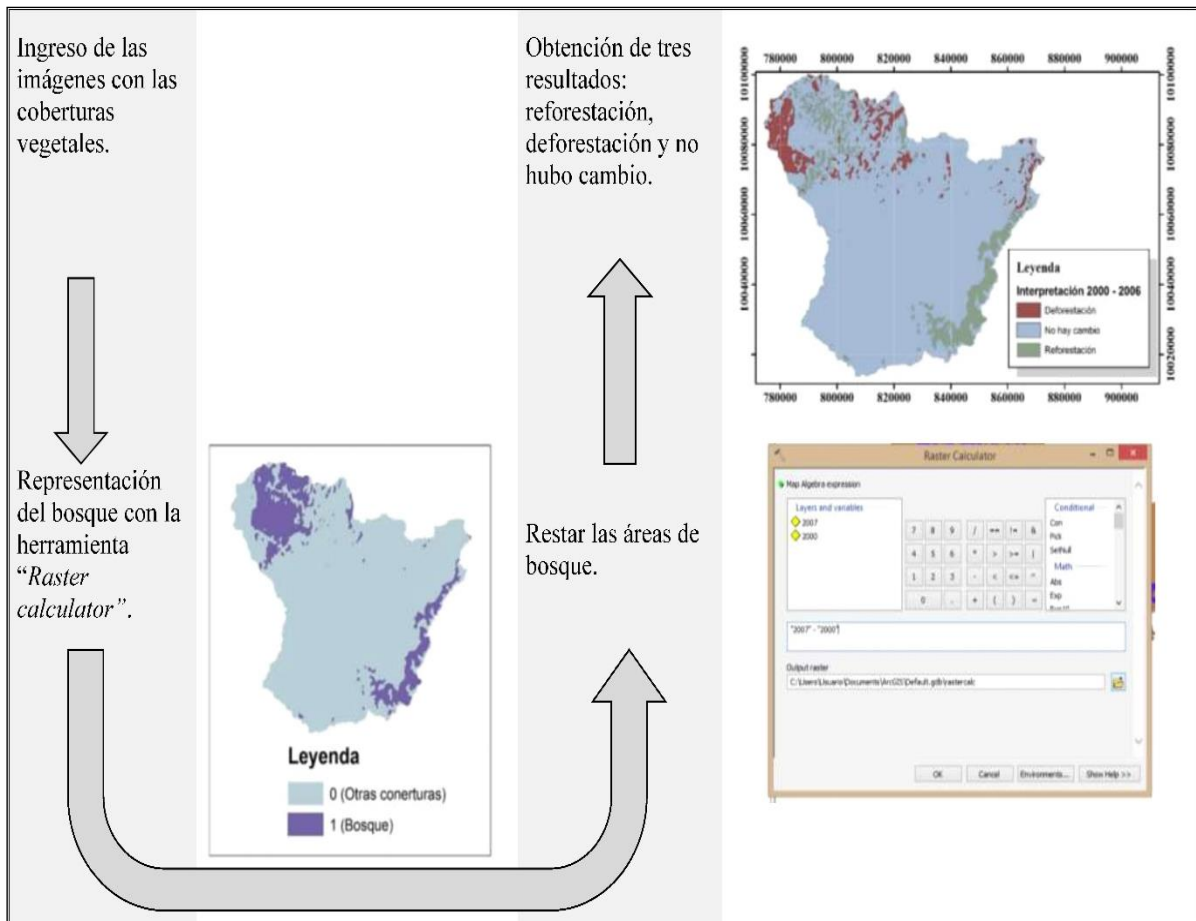


Figura 18. Flujograma del proceso de representación del cambio.

3.2.2 Etapa 2: Determinación la producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira para el período 2000-2014

La producción del caudal del área de estudio se determinó mediante la herramienta SWAT. Los pasos metodológicos que siguió esta etapa son: a) determinación del área de estudio, b) ingreso y clasificación de variables al modelo de clima, c) edáficas y de textura, d) uso de suelo, e) y pendiente, f) cálculo del caudal de tres períodos diferentes, g) calibración y h) validación del modelo con datos de caudal tomados en campo por el INAMHI.

Esta determinación se realizó en tres períodos: primer período de 1998 – 2002, Segundo período de 2005 – 2009 y tercer período 2011 – 2015.

a) *Determinación del área de estudio*

Se utilizó la delimitación de la cuenca realizada en el paso uno de la etapa uno, a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) en ArcSWAT (figura 19).

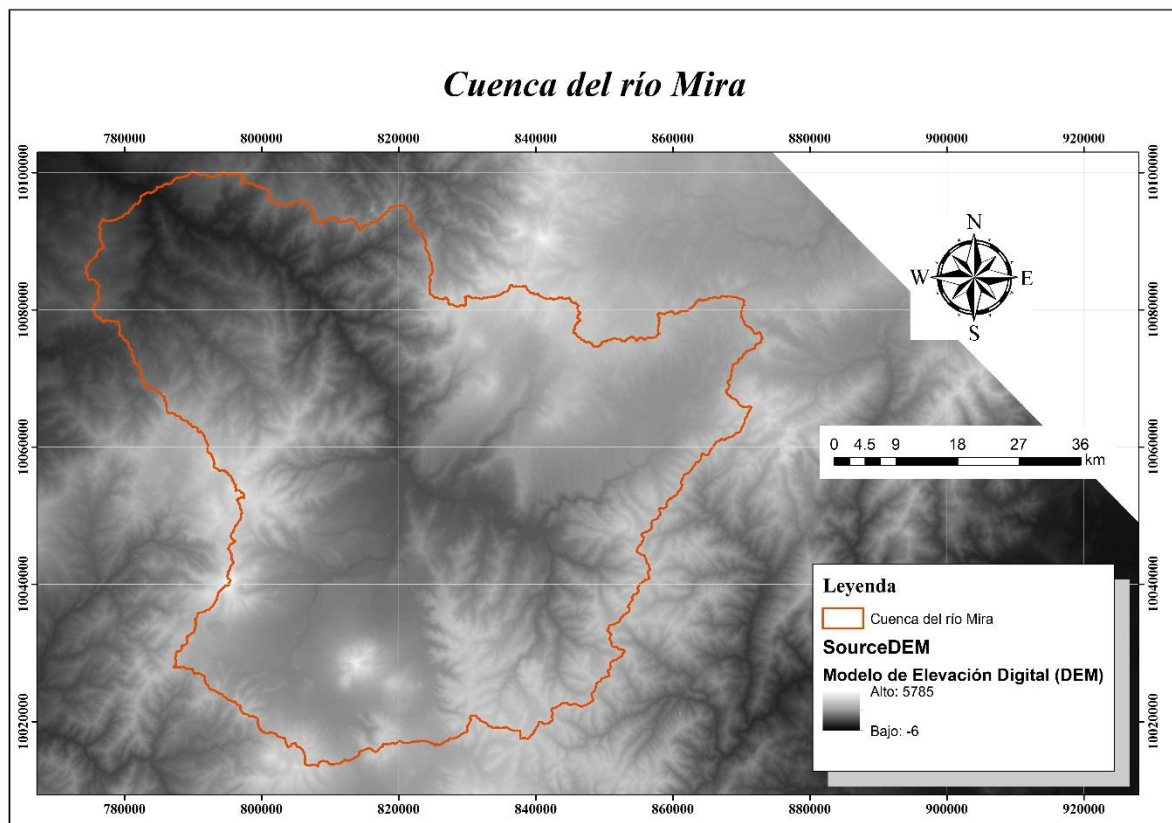


Figura 19. Delimitación de la cuenca del río Mira.

b) Ingresos de variables climáticas.

Se obtuvo los datos climáticos de INAMHI (2017) tomados en estaciones meteorológicas completas (tabla 5).

Tabla 5

Estaciones para el proceso de simulación.

Código	Nombre	Tip o**	Altitud (msnm)	Longitud	Latitud	Distancia respecto a la cuenca desde Ibarra (km)
M0001	Inguincho	CP	3140	-78.4008	0.2583	En la cuenca
M0003	Izobamba	AP	3058	-78.5500	-0.3667	93.48
M0025	La Concordia	CP	379	-79.3714	0.0267	144.46
M0103	San Gabriel	CP	2860	-77.8194	0.6042	En la cuenca
M0105	Otavalo	CP	2550	-78.2500	0.2433	En la cuenca

** : CP: Climatológica Principal; AP: Agrometeorológica.

Las estaciones Inguincho, San Gabriel y Otavalo están dentro de la cuenca y La Concordia e Izobamba se encuentran fuera de la cuenca (figura 20).

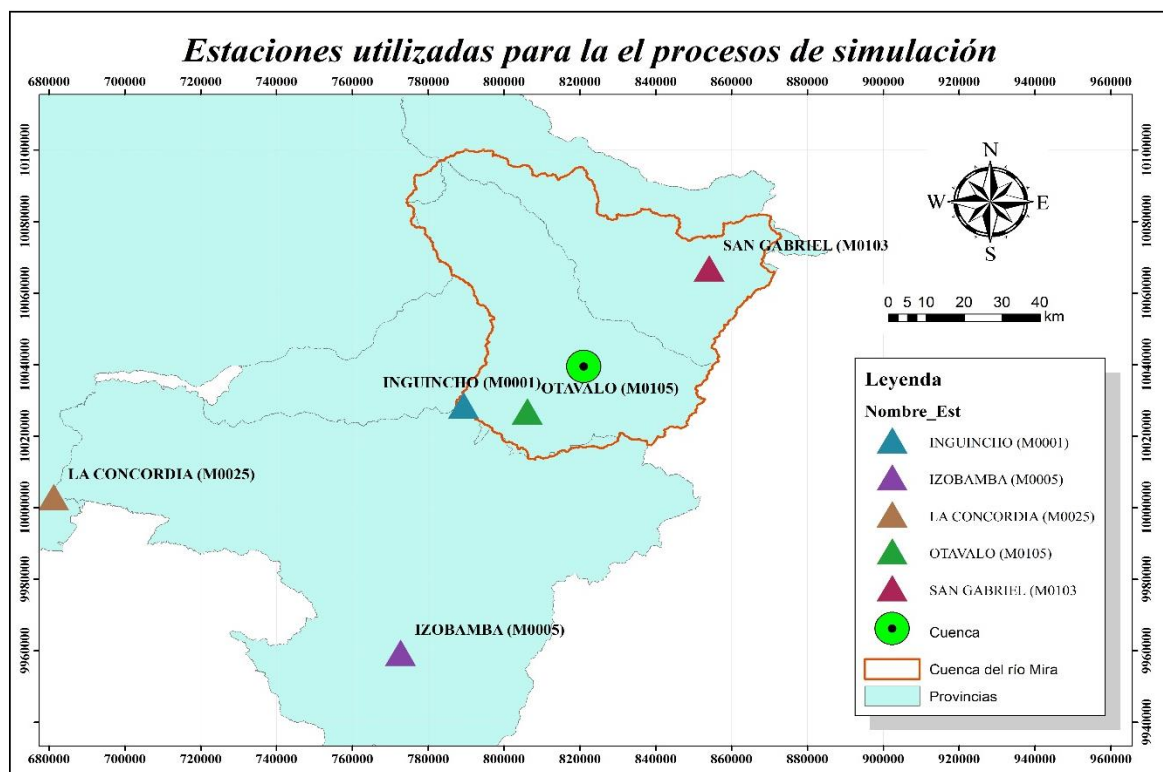


Figura 20. Mapa de ubicación de las estaciones utilizadas.

Luego de tener el área de estudio, las variables climatológicas fueron ingresadas manualmente, junto con la ubicación geográfica de cada estación meteorológica. Las variables requeridas se muestran en la tabla 6.

Tabla 6*Parámetros climáticos de SWAT.*

VARIABLES	DESCRIPCIÓN
WLATITUDE	Latitud de la Estación a emplear en grados
WLONGITUD	Longitud de la estación en grados
WELEV	Elevación de la estación climática
RAIN_YRS	Número de días máximo para la media hora de lluvia mensual usada para los valores de RAIN_HHMX(1)-RAIN_HHMX(12)
TMPMX(mon)	Promedio mensual de la temperatura (T)máxima (°C)
TMPMN(mon)	Promedio mensual de la T mínima (°C)
TMPSTDMX(mon)	Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)
TMPSTDMN(mon)	Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)
PCPMM(mon)	Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)
PCPSTD(mon)	Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)
PCPSKW(mon)	Coefficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria
PR_W(1.mon)	Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)
PR_W(2.mon)	Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)
PCPD(mon)	Promedio mensual del número de días de lluvia
RAINHHMX(mon)	Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)
SOLRAV(mon)	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m ² /día).
DEWPT(mon)	Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C), o la humedad relativa en fracción. Estos valores fueron tomados del registro histórico para cada estación
WNDV(mon)	Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)

En la cuenca existe poca información, esta información tiene vacíos que deben ser suplidos a partir de la interpolación de datos. Para la interpolación, las variables meteorológicas pueden ser agrupadas por su relación con la gradiente altitudinal (Arias, 2015).

La interpolación se realizó de forma mensual para los períodos 1998 – 2000, 2005 – 2009 y 2011 – 2014. Fries *et al.* (2012) y Arias, (2015) sugieren seguir los siguientes pasos metodológicos para la interpolación:

Determinación de valores mensuales.

La información climática mensual y diaria fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Selección de estaciones climáticas con disponibilidad de datos para la interpolación

Fries *et al.* (2012) señalan que, deben existir tres estaciones como mínimo para la interpolación. Estas se seleccionaron de acuerdo a datos disponibles. De acuerdo con los autores, no se deben considerar estaciones con más de tres meses de información pérdida. A partir de la información se procedió a determinar la relación existente entre las variables climáticas y la altitud mediante un análisis de correlación lineal.

Homologación de variables climáticas a una misma altitud

La homologación se realizó a un nivel de referencia de mil metros debido a que es el valor promedio de la altitud en el área de estudio. Posteriormente se interpoló los datos climáticos a nivel de referencia y correlación previamente determinada a través de la fórmula sugerida por Arias (2015).

Ecu. (4)

$$VcDet = Vcmensual + (r * (zdet - zestación))$$

Donde; VcDet: son los valores climáticos obtenidos a nivel de referencia; VC: mensual son los valores mensuales de las variables climáticas; r: es el gradiente altitudinal correspondiente al valor del coeficiente (x) en la ecuación de regresión lineal; zdet: es el nivel de referencia planteado y; zestación es el valor de la altitud al cual se ubica cada estación climática.

Interpolación de datos climáticos homologados.

La interpolación se realizó mediante la aplicación del método determinístico de interpolación Inverse Distance Weighted IDW.

Interpolación de variables climáticas a su nivel altitudinal real.

El procedimiento se lo realizó mediante la herramienta Excel. Una vez obtenidos los valores mensuales se procedió a calcular el valor real de cada variable. Para lo cual se aplicó la siguiente ecuación:

Ecu. (5)

$$Vc(x, y) = VcDet + (r * (zx, yDEM - zDET))$$

Donde; $Vc(x, y)$ es el resultado del promedio mensual de las variables climáticas interpoladas; $VcDet$: es el valor de las variables climáticas a un nivel de referencia; r : es el gradiente altitudinal; $zx, y DEM$ es la altitud de la estación; $Zdet$: es el valor nivel de referencia determinado (1000 msnm).

c) Ingresos y clasificación de variables edafológicas.

El tipo de suelo se obtuvo del mapa de textura de suelo del Sistema Nacional de Información (SIN, 2014), de este mapa se obtuvieron datos necesarios para el cálculo de variables ingresadas al modelo.

Consecutivamente se ingresó los datos de tipo de suelo y sus características según el requerimiento del modelo. Los parámetros edáficos para el modelo se describen en la tabla 7, se obtuvieron a partir de la capa de textura de suelo generada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) a escala 1:50000, posteriormente se utilizó el software libre Soil water characteristics y Num Curv.

Tabla 7*Parámetros edafológicos para la modelación en SWAT.*

Código SWAT	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
SNAM	Corresponde al nombre del suelo.	Nombre de la clasificación taxonómica del suelo por Gran grupo taxonómico.
HYDGRP	Grupo hidrológico de cada grupo taxonómico.	Se calculó con el software libre Num Curv (Hospital, Martínez y Rivas, 2006).
SOL_ZMX	Es la profundidad máxima de enraizamiento en el suelo (mm).	Los datos de la profundidad de enraizamiento del perfil del suelo se tomó del mapa de suelos (SNI, 2014)
ANION_EXCL	Es una fracción de la porosidad donde los aniones son excluidos.	Si no se ingresa valores a ANION_EXCL, el modelo asume un valor de 0.50.
SOL_CRK	El volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo se expresa como una fracción del volumen total de suelo.	Es un dato opcional que puede o no ser ingresado a las características del suelo.
TEXTURE	La textura de la capa de suelo.	Es un dato opcional.
SOL_Z	Es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).	Fuente: SNI (2014).
SOL_BD	La densidad aparente del suelo (Mg/m ³ o g/cm ³), expresa la relación de la masa de partículas sólidas respecto al volumen total de suelo, $p_b = M_s/V_t$.	Se calculó utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton, y Rauls, 2009).
SOL_AWC	El agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible AWC.	Se calculó de acuerdo a la clase textural de los suelos presentes, los datos de FC y WP se obtuvieron con la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton y Rauls, 2009).
SOL_K	La conductividad hidráulica saturada (mm/hr), relaciona la proporción del flujo de agua (densidad del fluido y el gradiente hidráulico. Es una medida de la facilidad del movimiento de agua a través del suelo.	Se calculó utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton y Rauls, 2009).
SOL_CBN	Es el contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo.	Se utilizó la siguiente formula: $C.org = \text{Materia orgánica \%} / 1.724$
CLAY	Es el contenido de arcilla (% del peso del suelo).	
SILT	Es el contenido de limo (% del peso del suelo).	Se calculó utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton y Rauls, 2009).
SAND	Es el contenido de arena (% del peso del suelo).	
ROCK	Es el contenido de fragmento de roca (% del peso total).	Este valor fue tomado de los mapas de suelo (SNI, 2014).
SOL_ALB	El albedo es la relación entre cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre éste.	(Baumer, 1990) propone estimar el albedo en la superficie del suelo en función de la materia orgánica.
USLE_K	Es el factor K de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo.	Wischmeier <i>et al.</i> (1971) desarrollaron una ecuación general para calcular el factor de erodabilidad del suelo cuando el contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo.

Los parámetros edafológicos requeridos por SWAT se determinaron a partir de dos softwares libres; Soil Water Characteristics (Saxton y Rawls, 2009) y Num Curv (Hospital, Martínez y Rivas, 2006) y uno comercial de licencia temporal (Microsoft Excel). El software Soil Water Characteristics se utilizó para obtener datos de: Contenido de materia orgánica, Conductividad hidráulica, densidad aparente, entre otros, a partir de datos de contenido (en porcentaje) de arena y arcilla presentes (Saxton y Rawls, 2009) y con el software libre Num Curv (Hospital, Martínez y Rivas, 2006) se determinó el grupo hidrológico de cada tipo de suelo. Las variables restantes se calcularon mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes. Las variables ingresadas al modelo se muestran en el anexo 4. Esto mediante el vínculo a un archivo tipo “*raster*”, generado en el software ArcGIS 10.3, de licencia temporal.

Finalmente se generó una clasificación de la textura de suelo. Esta textura se agregó a SWAT a partir del “*raster*” de textura (MAG, 2002) y se generó una clasificación en SWAT para cada simulación (figura 21).

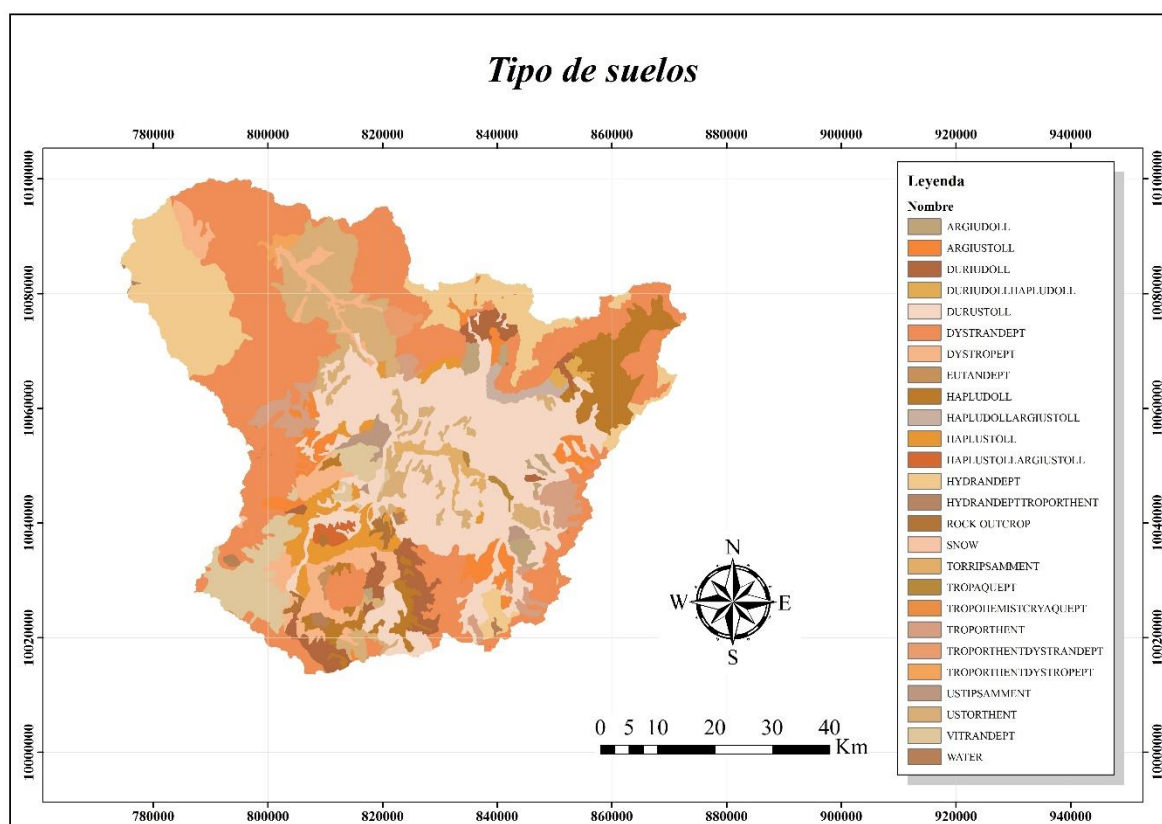


Figura 21. Mapa tipo de suelos para las simulaciones.

Los tipos de suelo presentados en la clasificación de la figura 21, en la tabla 8 se describen algunas de sus características importantes.

Tabla 8

Características de los tipos de suelo.

Tipo de suelo	Características generales
SNOW	Corresponde a las áreas cubiertas por hielo y nieve.
DYSTROPEPT	Son suelos que tienen baja saturación de bases, texturas finas y pesadas, compacta, muy lixiviada, con altos contenidos de aluminio intercambiable y de muy baja fertilidad (Valdivieso, 2005).
HAPLUSTOLL	Suelos negros, franco arenosos, profundos, drenaje bueno, pH neutro, fertilidad mediana, de áreas secas (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito [EPMAPS], 2017).
HAPLUDOLL	Son suelos que se encuentran en climas húmedos y templados, están desarrollados a partir de cenizas volcánicas recientes, suaves y permeables, se presentan de color negro, de texturas arcillo-arenosas o limosas con arena y a veces con gravas y piedras, pH ligeramente ácido y buena fertilidad (Valdivieso, 2005).
HAPLUSTOLL ARGIUSTOLL	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
ARGIUSTOLL	Son suelos negros de textura arcillo arenosa a limo arenosa, a veces mezclada con gravas; pH neutro; alta saturación en bases y buena fertilidad natural. Se encuentran bajo climas templados y secos. Su mejor aprovechamiento es en cultivos anuales y frutales (Valdivieso, 2005).
TROPOHEMISTCR YAQUEPT	Son suelos orgánicos, francos, saturados con agua, mal drenados y pantanosos, de áreas frías a muy frías, superficiales, drenaje lento, inundabilidad permanente, capa freática superficial, pH ácido, fertilidad alta (EPMAPS, 2017). Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
VITRANDEPT	Son suelos caracterizados por la presencia de grandes cantidades de materiales piroclásticos. De texturas arenosas francas, franco arenosas y a veces gravillosos; Son profundos, con bajo contenido de materia orgánica en su horizonte superficial; pH ligeramente ácido a neutro y baja retención de humedad (Valdivieso, 2005).
DURUSTOLL	Son suelos de color oscuro, rico en bases de cambio, con niveles altos de materia orgánica y de consistencia y estructura favorables al desarrollo radicular. Son suelos profundos (INSTITUTO ESPACIAL ECUATORIANO y MAG, 2013 y; Valdivieso, 2005).
TORRIPSAMMENT	Son suelos muy jóvenes, desarrollados sobre arenas que todavía no han desarrollado una estructura ni características adecuadas para la agricultura. Presentan altos contenidos de materia orgánica pero muy baja capacidad de intercambio catiónico (Martinez, Etxaleku, Gómez y Pavón, 2005).

Tipo de suelo	Características generales
HYDRANDEPT	Suelos negros con alta retención de agua, franco a franco arenoso. Estos suelos son derivados de materiales piroclásticos (INERHI-PREDESUR-CONADE, 1994).
ARGIUDOLL	Son suelos de texturas arcillosas o arcillo arenosas, pH ligeramente ácido y buena fertilidad natural. Se han desarrollado sobre proyecciones volcánicas de cenizas recientes suaves y permeables, en climas húmedos y templados. Son suelos muy aptos para la agricultura y ganadería (Valdivieso, 2005).
TROPORTHENT	Suelos superficiales, franco arenosos, sobre roca dura, drenaje variable de rápido a moderado, pH ligeramente ácido, fertilidad muy baja (EPMAPS, 2017).
USTORTHENT	Se ubican en zonas secas, frías, templadas o cálidas. Se distribuyen sobre relieves accidentados de las vertientes de la cordillera andina o colinas costeras o también sobre relieves de pendientes suaves cerca de los volcanes (Valdivieso, 2005).
TROPAQUEPT	Los suelos son fértiles, casi neutros, con drenaje imperfecto, nivel freático alto y texturas medias. (Chávez, 1994).
TROPORTHENT DYSTRANDEPT	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
DURIUDOLL	Suelos franco arcillo arenosos, poco profundos, drenaje moderado, pH ligeramente ácido a neutro, fertilidad media, de áreas húmedas (EPMAPS, 2017).
USTIPSAMMENT	Son de áreas secas y templadas. Son suelos arenosos, de colores pardos claro, con pH neutro a ligeramente alcalino; en la mayoría de los casos se presentan bajo vegetación de pastizales (Valdivieso, 2005).
DYSTRANDEPT	Son suelos que poseen una retención de humedad inferior al 100%, gran cantidad de carbono orgánico y materiales amorfos y un bajo contenido de bases. Se han desarrollado en climas húmedos, pero con estaciones secas. Los minerales normalmente han sido alterados, existiendo gran cantidad de vidrio volcánico dentro del primer metro de profundidad (Valdivieso, 2005).
EUTRANDEPT	Suelos negros, franco, profundos, drenaje bueno, pH ligeramente ácido, fertilidad alta, de áreas húmedas (EPMAPS, 2017).
DURIUDOLLHAPL UDOLL	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
HYDRANDEPTTRO PORTHENT	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
HAPLUDOLLARGI USTOLL	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
TROPORTHENTDY STROPEPT	Tiene características de los dos grupos debido a que ambos están presentes (Valdivieso, 2005).
WATER	Representa el agua en la cuenca.
ROCK OUTCROP	Se identifica a las ciudades y áreas urbanas.

d) Clasificación del uso de suelo

Se obtuvo los datos necesarios de uso de suelo para la modelación de SWAT de los resultados del objetivo anterior con la clasificación de bosque, cultivos, pastos, vegetación arbustiva, páramo, urbanización, cuerpos de agua, áreas no vegetadas.

A partir de la clasificación de coberturas vegetales mencionadas, se realizó un “*intersect*” entre las coberturas del SIGAGRO 2002 (SNI, 2017) con la clasificación del año 2000 y 2007 y el mismo proceso para los años 2014 y 2017 con las coberturas del Instituto Espacial Ecuatoriano 2014; este proceso permitió ampliar la clasificación de uso y cobertura del suelo. Cabe mencionar que los datos del “*shape*” son validados en campo. Consecuentemente a los procesos mencionados se procedió al ingreso manual de variables y a la clasificación de acuerdo a los requerimientos de SWAT.

Para los años 2000, 2007, 2014 y 2017 se usó las coberturas y uso de suelo mostrados en la tabla 9. Esta clasificación se ingresó al modelo SWAT y se generó un “*raster*” de coberturas para los años mencionados.

Tabla 9

Cobertura y uso para la simulación de los años 2000, 2007, 2014 y 2017.

Valor del “<i>Raster</i>”	Cobertura vegetal Clasificación supervisada	Código SWAT
1	Bosque nativo	FRSE
2	Vegetación arbustiva	RGNE
3	Pastos	PAST
4	Páramo	RGNB
5	Cultivos	AGRC
6	Zona urbana	URBN
7	Área sin vegetación	BARR
8	Cuerpos de agua	WATR
10	Frutales	ORAN
11	Cereales	CORN
12	Papa	POTA
14	Infraestructura agrícola	AGRL
19	Caña de azúcar	SUGC

e) Ingreso de parámetros de relieve

Se ingresaron 5 rangos de pendientes (tabla 10) al modelo para su posterior reclasificación.

Tabla 10

Rango de pendientes para la Cuenca.

Numero de pendientes	Rango de la pendiente (%)
1	0 – 12 %
2	12 – 25 %
3	25 – 50 %
4	50 – 75 %
5	> 75 %

La reclasificación dio como resultado un “*raster*” de pendientes generado por SWAT (Figura 22).

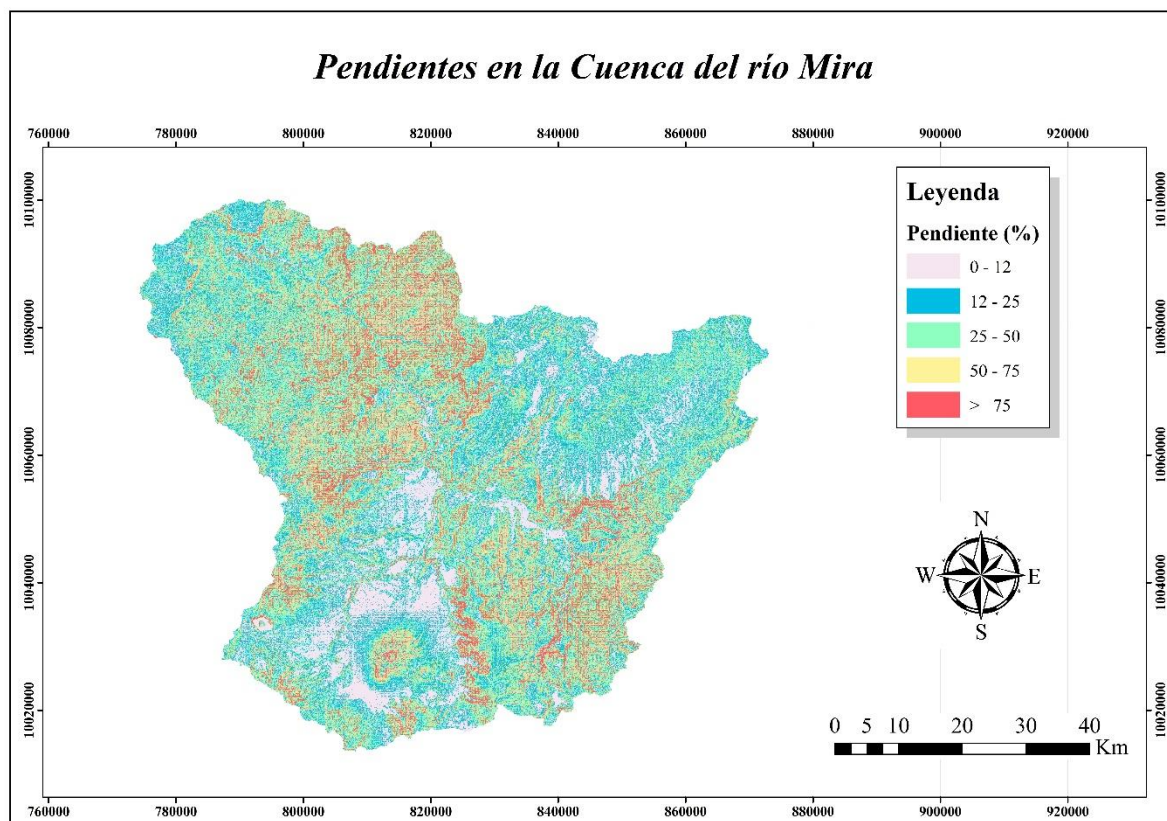


Figura 22. Mapa de pendientes.

f) Cálculo del caudal de tres períodos diferentes

Para realizar el cálculo de caudales se procedió a crear el HRU (figura 23) de cada simulación de los períodos de 1998 – 2002, de 2005 – 2009, de 2011 – 2015 y finalmente el 2017. Estas simulaciones generaron 2078 unidades de respuesta hidrológica (HRU) diferente como resultado del ingreso de todas las variables anteriores.

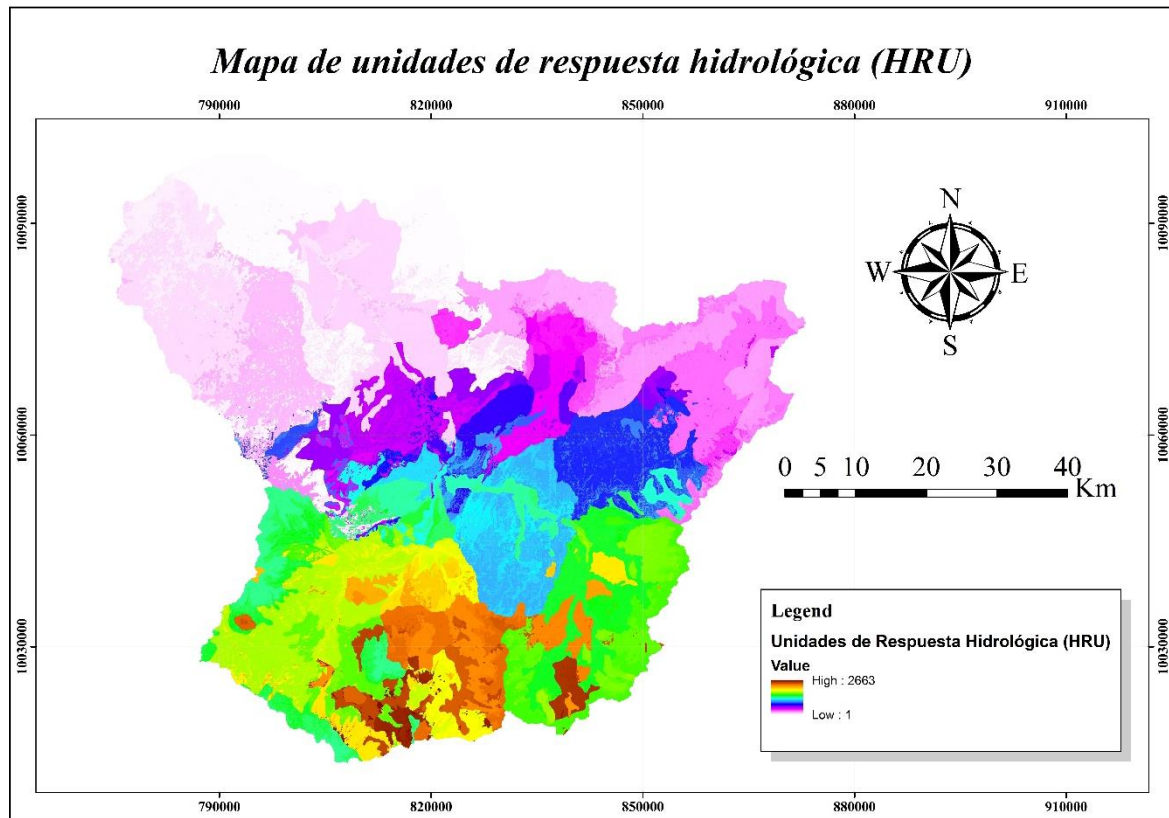


Figura 23. Mapa de unidades de respuesta hidrológica

g) Ajuste de sensibilidad del modelo (Calibración del modelo)

La calibración se realizó luego de la simulación con el objetivo de mejorar la relación entre los datos tomados en campo y los simulados. Los resultados de la simulación mostraron valores de caudal mensual inferiores a los valores reales. Por esta razón fue necesario calibrar los datos de mayor sensibilidad del modelo.

SWAT permite la calibración de algunos valores de alta sensibilidad que se pueden modificar hasta lograr que los datos sean similares a los que se tomaron en el campo, tomando en cuenta que los parámetros modificados cumplan con las características físicas (Benavides, González, López y Valdez, 2008). En este contexto los pasos metodológicos aplicados fueron los siguientes:

- a) Comparación de caudales simulados vs caudales reales: Se analizó la correlación entre los caudales y se obtuvo el coeficiente de determinación respectivo (R^2).
- b) Calibración de datos: Se realizó de forma manual como sugerencia de Valenzuela (2005) y Proaño *et al.* (2006), donde se menciona que se puede realizar la calibración hasta ajustar a la curva de los caudales actuales. Para una mejor calibración se tomó

valores de Pereira *et al.* (2014), en el que los parámetros calibrados, de mayor sensibilidad, fueron: el factor de compensación de evaporación solar (ESCO), factor alfa del flujo base (ALPHA_BF), curva número promedio (CN2) y dotación del valor para el canal principal (CH_N2). Estos valores fueron aplicados en una simulación con coberturas similares a este estudio.

- c) Comparación de caudales calibrados vs caudales reales: Se analizó la correlación lineal de ambos tipos de caudales y se determinó nuevo coeficiente de determinación (R^2). Adicionalmente fue calculado la variación de los coeficientes de determinación calculados.

h) Validación del modelo

Después de obtener los resultados de la simulación del modelo se procede a la validación de datos. La validación de datos se realizó con el fin de evaluar la precisión y eficiencia del modelo en el proceso de simulación. Para este proceso fue necesario comparar los datos simulados con los datos observados. Los resultados se validaron mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), este coeficiente informa la efectividad del modelo en la predicción de caudales. La ecuación del coeficiente NSE es:

Ecu. (6)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

Q_{simi} = Caudal simulado.

Q_i =Caudal observado.

\bar{Q} =Caudal medio observado.

Ritter *et al.* (2011) resaltan que, no existen criterios globalmente aceptados sobre los rangos utilizados en la interpretación de los valores del coeficiente, por tanto, es pertinente considerar criterios de diferentes autores. Para la presente investigación se consideraron los criterios de Van Liew *et al.* (2007). De acuerdo a esta clasificación cuando el valor de $NSE = 1$, la simulación es perfecta; cuando el valor de $NSE > 0.75$, el modelo es apto o bueno; cuando el valor de NSE

> 0.36 y < 0.75 , la simulación es satisfactoria; finalmente si la simulación tiene un $NSE < 0.36$ es considerada insatisfactoria (tabla 11).

Tabla 11

Valores referenciales de NSE

Valor de coeficiente NSE	Fuerza de acuerdo
NSE > 1	Simulación perfecta
NSE > 0.75	Simulación buena
NSE > 0.36 y < 0.75	Simulación satisfactoria
NSE < 0.36	Simulación insatisfactoria

Fuente: Van Liew *et al.* (2007).

3.1.1 Etapa 3: Análisis de la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de cobertura vegetal de bosque

Como se menciona en Ortiz *et al.* (2010), luego de la simulación se puede analizar y determinar la relación entre caudal y bosque mediante una correlación lineal de Pearson. Adicionalmente Oñate y Aguilar (2003) afirman una relación entre la cobertura y uso de suelo con la producción de caudal. Pearson mide la relación entre dos variables Paramétricas y se obtuvo como resultado un R^2 de determinación. Este análisis se aplicó en el proceso de aceptación las hipótesis nula o alternativa, planteadas en el presente estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de la tasa de deforestación en la cuenca del río Mira

En la clasificación supervisada se obtuvo la cobertura vegetal y uso de suelo de la cuenca media – alta del río Mira y su distribución espacial para los años 2000, 2007, 2014 y 2017 (anexo 2) con una confiabilidad Kappa de 0.83. Este valor representa una clasificación casi perfecta en la matriz de confusión (anexo 2) en representación a lo existente en campo (Landis y Koch, 1977).

Para el cálculo de la tasa de deforestación se usó las áreas presentadas en la tabla 12. Las áreas son el producto de la clasificación supervisada y el cálculo mediante ArcGIS.

Tabla 12

Coberturas en la cuenca del río Mira

Uso	Superficie del año 2000 (ha)	Superficie del año 2007 (ha)	Superficie del año 2014 (ha)	Superficie del año 2017 (ha)
Bosque	132322.75	124503.13	127633.52	121015.05
Vegetación Arbustiva	51855.72	45202.34	39397.33	33340.54
Pastos	83672.75	86949.25	79099.32	76434.13
Páramo	62817.65	64045.50	66119.28	48846.68
Cultivos	143682.54	152889.75	144354.27	201576.68
Zona urbana	3081.01	3969.29	4165.34	4392.09
Área sin vegetación	25266.74	25139.93	41930.08	17093.99
Cuerpos de Agua	1584.75	1584.71	1584.77	1584.76
Área total en hectáreas (ha)	504283.91	504283.91	504283.91	504283.91
Área total en Km ²	5042.84	5042.84	5042.84	5042.84

De acuerdo al cálculo de la tasa de cambio se obtuvo un valor referente para cada período de evaluación (tabla 13). Según la tasa de cambio del bosque, existió una disminución de la cobertura boscosa en el período 2000 – 2007 que representa la deforestación existente en la cuenca. En el espacio de tiempo 2007 – 2014 estuvo presente un incremento en el bosque teniendo así reforestación. Finalmente, del espacio de tiempo 2014 – 2017 se determinó deforestación en la cuenca como interpretación de una tasa de cambio negativa.

Tabla 13

Tasa de cambio

Nro.	Período	Tasa de cambio del Bosque	Actividad en el período
1	2000 – 2007	-0.009	Deforestación
2	2007 – 2014	0.004	Reforestación
3	2014 – 2017	-0.018	Deforestación
*4	2000 – 2014	-0.003	Deforestación

Nota*: Período de análisis según el objetivo 1.

Al representar los cambios de cobertura del bosque se observa áreas afectadas y áreas restauradas en cada período de evaluación (figura 24). A pesar del aumento de bosque en los años 2007 al 2014, se puede inferir que la cuenca está en constante cambio en lo que respecta a bosque, esto se debe a que en todos los períodos evaluados existen áreas deforestadas y reforestadas. Esta aseveración es pertinente debido que existe manejo de rebrotes en áreas degradadas, como son las plantaciones de eucalipto. Además, en los bosques nativos se da lugar a la regeneración natural.

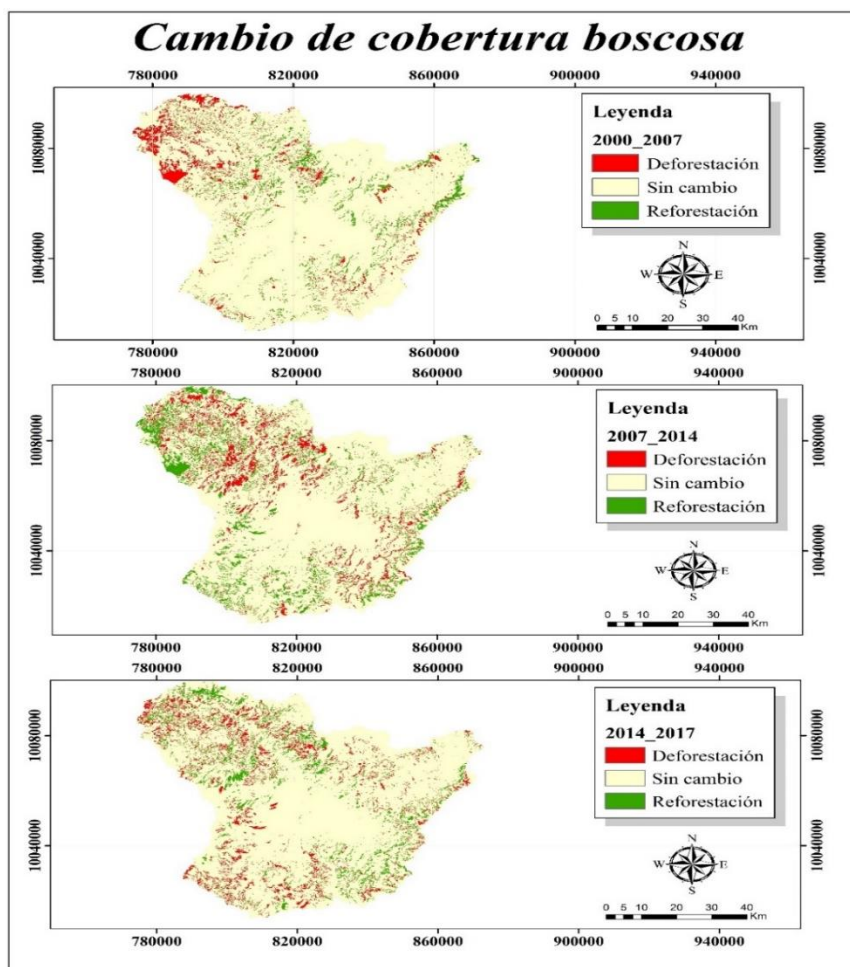


Figura 24. Mapas de cambio de bosque en el período 2000 – 2017.

El presente estudio, en el período de análisis 2000 – 2014 se evidenció que la cuenca experimenta una deforestación de 0.3 % anual. La tasa de cambio (-0.003) representa una pérdida de 334.945 hectáreas por año. Esto se debe a que en el período 2000 – 2007 la cuenca sufrió una pérdida que no pudo ser recuperada con reforestación. Este acontecimiento es afirmado por este estudio y MAE (2012a).

MAE (2012a) presenta una tasa de cambio de significativa pérdida de bosque en la cuenca para los años 2000 – 2008. Este acontecimiento se imputa al aprovechamiento forestal y tiene un impacto de 1332 hectáreas de pérdida al año. En la presente investigación se analizó el período 2000 – 2007. En acuerdo con lo mencionado se evidencia en la cuenca un aproximado de 1117 hectáreas deforestadas al año. Este valor corresponde a una tasa de cambio negativa de -0.009, este valor representa una pérdida de 0.9 % anual en la cuenca.

A diferencia del período anterior, para los años 2007 – 2014 se acreditó que, el área de estudio concurre en un aumento considerable de bosque. Este acontecimiento es de 3130.39 hectáreas y se atribuye a una tasa de cambio anual positiva de 0.004, la tasa figura una crecida de 0.4 %. El acontecimiento se carga en Socio Bosque (Programa de protección de bosques) iniciado en el 2008 (MAE, 2013) y al Proyecto Establecimiento de 120.000 hectáreas de plantaciones forestales con fines comerciales a nivel nacional iniciado en el 2012 y el programa incentivos forestales con fines comerciales (MAGAP, 2014 y 2016).

Hasta la actualidad el programa socio bosque conserva 41381.13 ha en Imbabura y Carchi (Socio Bosque, 2018). Estas hectáreas conservadas no permiten el decremento de la cobertura forestal en la cuenca debido a los incentivos entregados por la conservación de los ecosistemas forestales. Este incentivo permite manejar y mejorar las condiciones del bosque nativo dentro del programa.

Adicionalmente, el proyecto del MAG ha establecido 2652 hectáreas en Imbabura y Carchi (MAGAP, 2016 y MAGAP, 2017). Estas hectáreas de plantación forestal justifican el incremento del bosque en la cuenca para el segundo período de análisis.

Finalmente, el último período de evaluación 2014 – 2017 presentó pérdida de bosque en la cuenca hidrográfica del río Mira. La tasa de cambio negativa de -0.018 da a conocer una pérdida de 6618.47 hectáreas. Esto se interpreta como deforestación en la cuenca con un detrimento de 1.8 % por año. Esta es atribuida al aprovechamiento de plantaciones forestales y bosque nativo en la cuenca.

Cabe mencionar que la simulación tiene una representación casi perfecta de 0.83 con lo existente en la superficie para los años 2000, 2007, 2014 y 2017. Este acontecimiento del estudio coincide con Landis y Koch (1977) que describen que un valor Kappa mayor a 0.81 corresponde a una clasificación casi perfecta.

4.2 Producción de caudales en la cuenca media-alta del río Mira

A continuación, se muestran los caudales de la cuenca determinados mediante el modelo hidrológico SWAT. Estos caudales simulados se sometieron a un análisis de sensibilidad, validación y calibración de datos para obtener una relación adecuada con lo observado en campo.

4.2.1 Resultados de la simulación para la cuenca del río Mira

Una vez realizada la simulación del caudal para la cuenca media – alta del río Mira en los años 2000, 2007, 2014 y 2017 se obtuvieron datos mensuales presentados en la anexo 5.

Las simulaciones generaron datos de precipitación (PREC), caudal superficial (SURQ), caudal lateral (LATQ), caudal subterráneo (GWQ), percolación (PERCOLATE), contenido inicial de agua en el suelo (SW), evapotranspiración real (ET), evapotranspiración potencial (ETP), y caudal total mensual (WATER YIELD). De los datos mencionados no se presentan SURQ, LATQ y GWQ, la suma de estos valores es un aproximado al WATER YIELD.

Tabla 14

Caudales simulados.

Meses	Caudal simulado (año 2000)	Caudal simulado (año 2007)	Caudal simulado (año 2014)	Caudal simulado (año 2017)
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Enero	206.37	109.93	202.20	203.33
Febrero	191.42	81.95	158.93	184.67
Marzo	195.36	153.21	240.38	158.00
Abril	189.83	240.38	156.58	131.84
Mayo	343.53	178.62	95.68	135.11
Junio	150.99	106.76	69.94	101.66
Julio	80.52	43.21	90.22	61.70
Agosto	26.73	10.55	55.28	32.75
Septiembre	22.36	8.44	22.20	24.51
Octubre	20.45	66.30	90.71	55.02
Noviembre	55.91	173.59	159.72	101.96
Diciembre	85.12	234.53	140.04	115.69
Promedio	130.72	117.29	123.49	108.85

Los caudales mensuales (tabla 14) fueron usados para el análisis de sensibilidad, la validación y la calibración del caudal mensual para el año 2000, 2007 y 2014. Se realizaron regresiones lineales para determinar la relación de los datos. Finalmente, se aplicó el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe y se simuló el año 2017 con el fin de conocer la proyección de los caudales para este año. Se debe esclarecer que el año 2017 por su parte no tiene caudales para su calibración. Los caudales de este año aún no están disponibles para el público por parte del INAMHI.

4.2.2 Análisis de sensibilidad

Los caudales simulados para los años 2000, 2007 y 2014 fueron transformados de unidades, de mm a m³/s. Después se comparó en una correlación lineal los caudales aforados y simulados y se evaluó el grado de relación y asociación con la aplicación de regresión lineal (tabla 15).

Tabla 15

Comparación de caudales aforados vs simulados.

Meses	Caudal aforado (año 2000)	Caudal simulado (año 2000)	Caudal aforado (año 2007)	Caudal simulado (año 2007)	Caudal aforado (año 2014)	Caudal simulado (año 2014)
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Enero	305.85	206.37	130.13	109.93	185.86	202.20
Febrero	274.07	191.42	97.20	81.95	137.21	158.93
Marzo	283.66	195.36	131.93	153.21	234.67	240.38
Abril	247.10	189.83	196.06	240.38	127.07	156.58
Mayo	264.34	343.53	176.59	178.62	200.84	95.68
Junio	189.72	150.99	168.09	106.76	147.79	69.94
Julio	126.18	80.52	81.67	43.21	101.02	90.22
Agosto	99.80	26.73	86.52	10.55	72.48	55.28
Septiembre	82.20	22.36	64.27	8.44	56.10	22.20
Octubre	84.92	20.45	117.60	66.30	105.83	90.71
Noviembre	67.66	55.91	134.03	173.59	163.04	159.72
Diciembre	115.75	85.12	201.76	234.53	174.28	140.04
Promedio	178.44	130.72	132.15	117.29	142.18	123.49

Las regresiones mostraron una relación (R^2 de determinación) de 0.77 para el año 2000, 0.83 para el año 2007 y 0.68 para el año 2014 (figura 25). Para mejorar la relación de los datos simulados versus los datos aforados se procedió a calibrar los parámetros, factor de compensación de evaporación solar (ESCO), factor alfa del flujo base (ALPHA_BF), curva número promedio (CN2) y valor para el canal principal (CH_N2) (Pereira *et al.*, 2014).

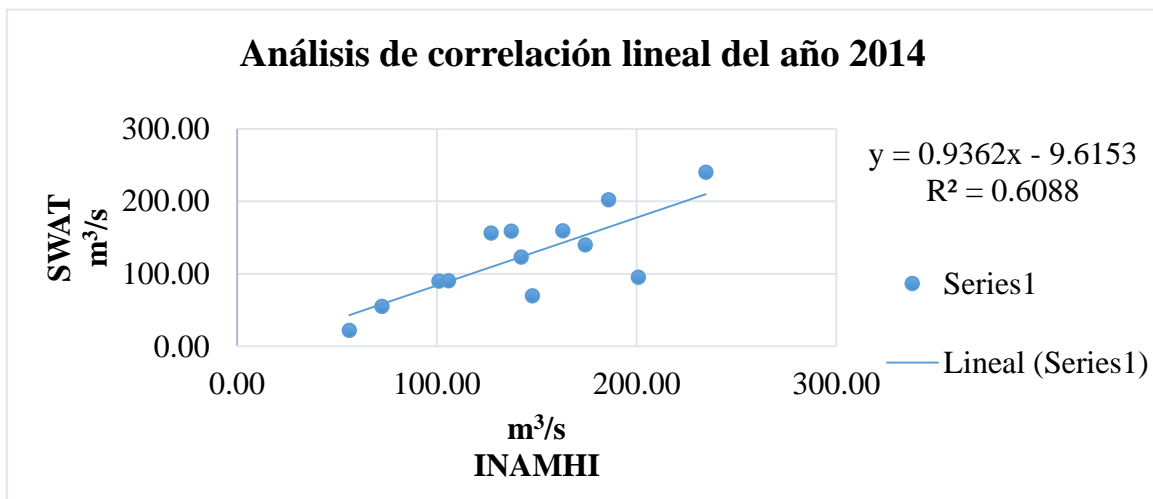
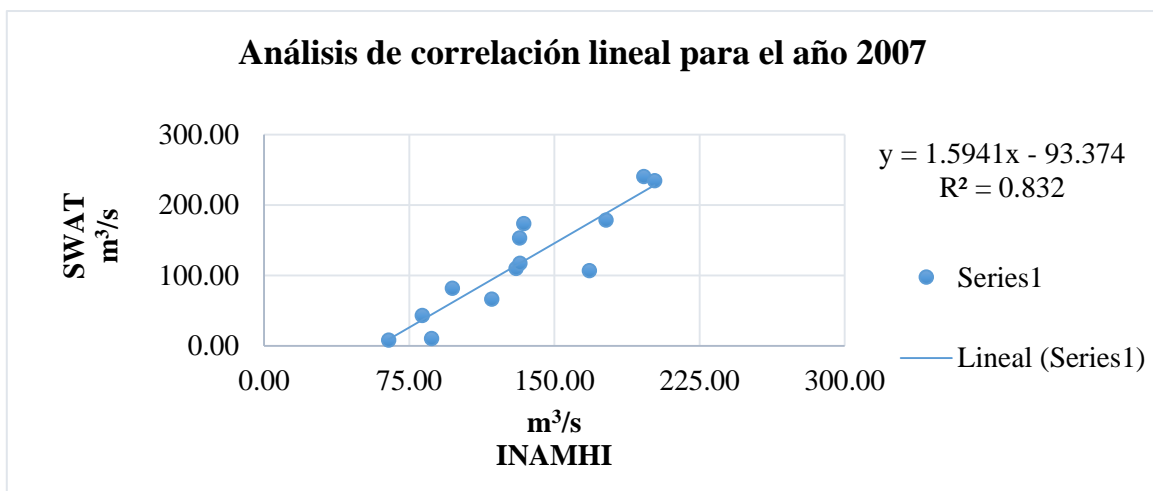
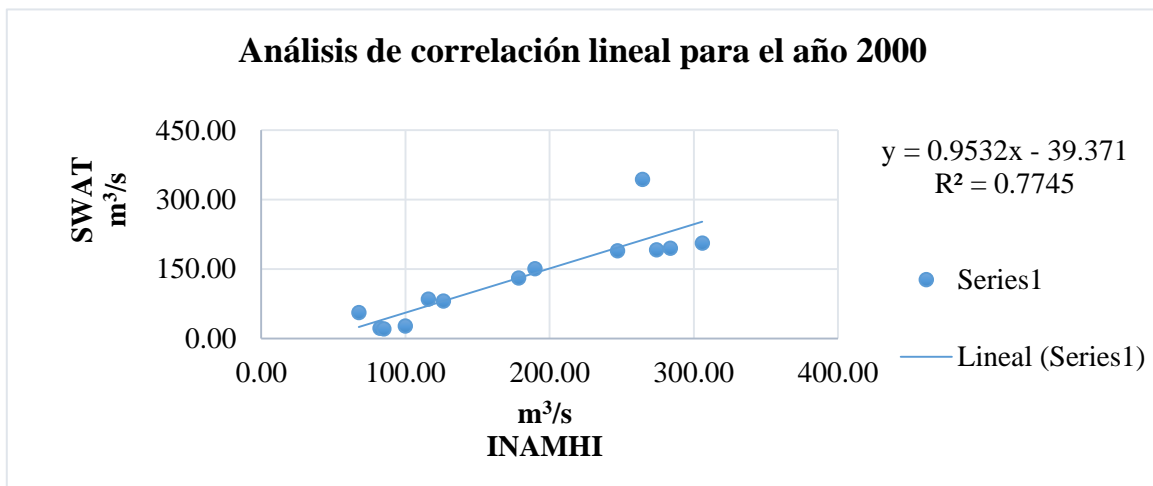


Figura 25. Correlación lineal de caudales para los años 2000, 2007 y 2014.
Nota: Caudales aforados y simulados

4.2.3 Validación y calibración de datos

La calibración de los parámetros sensibles (tabla 16) se realizó con valores propuestos por Pereira *et al.* (2014) ya que utiliza una clasificación similar de cobertura y uso de suelo al presente estudio para la simulación de caudales con el modelo hidrológico SWAT.

Tabla 16

Parámetros sensibles para la calibración.

Parámetro	Simulación (año 2000)	Calibrado (año 2000)	Simulación (año 2006)	Calibrado (año 2006)	Simulación (año 2015)	Calibrado (año 2015)
CN2.mgt	70	35	70	35	83	70
ALPHA_BF.gw	0.048	0.004	0.048	0.004	0.048	0.004
ESCO.hru	0.95	0.9	0.95	0.9	0.95	0.9
CH_N2.rte	0.014	0.011	0.014	0.011	0.014	0.011

El cambio relativo en los valores mencionados permitió tener valores más cercanos a los datos aforados (tabla 17) y como resultado de la similitud una mayor relación.

Tabla 17

Valores aforados y calibrados.

Meses	Caudal aforado (año 2000)	Caudal calibrado (año 2000)	Caudal aforado (año 2007)	Caudal calibrado (año 2007)	Caudal aforado (año 2014)	Caudal calibrado (año 2014)	Caudal simulado (año 2017)
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Enero	305.85	231.51	130.13	123.86	185.86	185.99	203.33
Febrero	274.07	195.72	97.20	95.51	137.21	128.33	184.67
Marzo	283.66	200.62	131.93	133.85	234.67	188.24	158.00
Abril	247.10	195.55	196.06	181.69	127.07	119.99	131.84
Mayo	264.34	267.64	176.59	141.86	200.84	159.46	135.11
Junio	189.72	204.49	168.09	112.02	147.79	93.16	101.66
Julio	126.18	140.77	81.67	101.76	101.02	96.34	61.70
Agosto	99.80	81.42	86.52	87.47	72.48	70.37	32.75
Septiembre	82.20	53.86	64.27	76.98	56.10	42.91	24.51
Octubre	84.92	35.60	117.60	105.10	105.83	72.02	55.02
Noviembre	67.66	53.43	134.03	139.64	163.04	156.35	101.96
Diciembre	115.75	81.15	201.76	168.29	174.28	158.14	115.69
Promedio	178.44	145.15	132.15	122.34	142.18	122.61	108.85

Al proceder al análisis de la correlación lineal se puede evidenciar que los caudales simulados sometidos a la calibración versus los aforados muestran una relación igual o mayor a 0.80 en los tres años (figura 26).

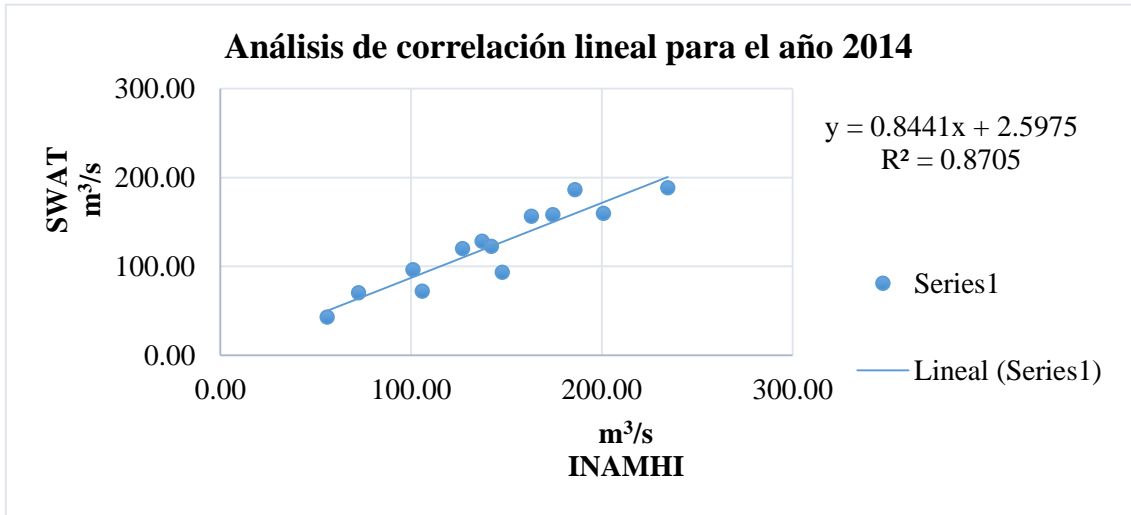
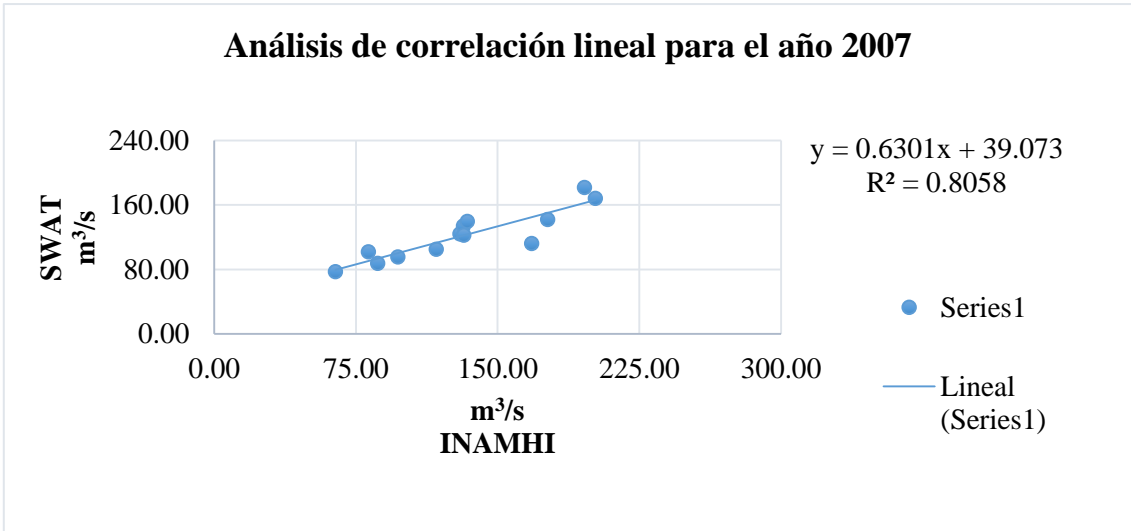
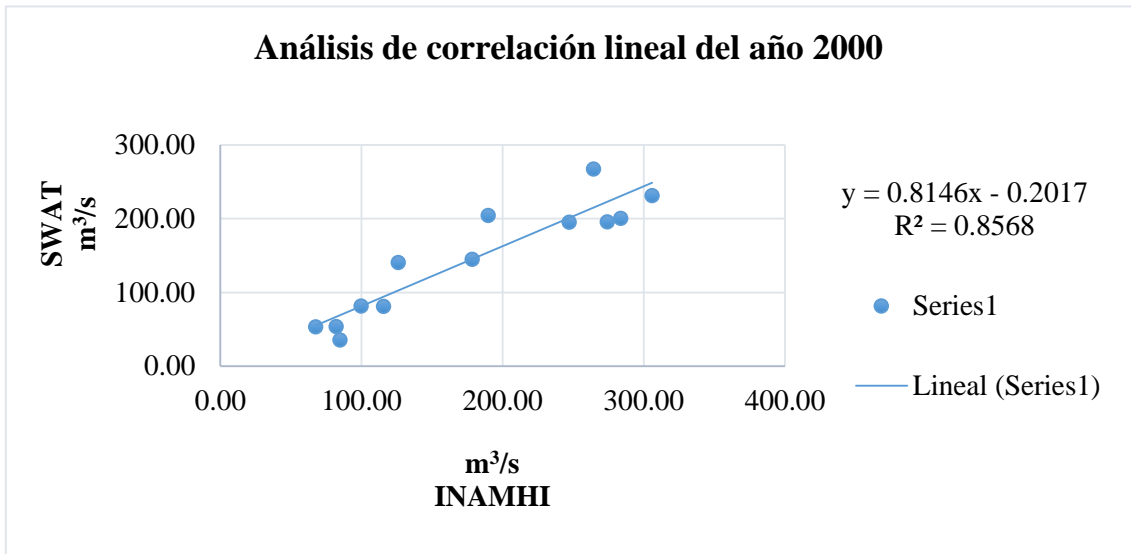


Figura 26. Correlación lineal de datos calibrados para los años 2000, 2007 y 2014.

Oñate y Aguilar (2003), concluyen que el modelo se asemeja a los datos aforados. Sin embargo, la carencia de una red de estaciones meteorológicas impide conocer los parámetros de clima en algunas zonas de la cuenca. Este acontecimiento permite inferir que al tener mayor cantidad y distribución de datos climáticos en la cuenca las simulaciones tendrían una alta similitud con los datos de campo. En similitud a lo mencionado, la presente investigación generó resultados que muestran una alta relación con los aforados. Cabe señalar que la cuenca es un área de gran magnitud, esta área de estudio tiene una gran cantidad de ecosistemas donde varían la temperatura, la incidencia de precipitación, la heliofanía, entre otros parámetros para el cálculo de caudal en SWAT (MAE, 2012b). El área de estudio tiene una red de estaciones climatológicas reducida. La red fue de cinco estaciones de medición completa. Se puede inferir que con una red de mayor amplitud se tendría una simulación similar a los datos aforados.

Las correlaciones muestran alta relación de los datos con un coeficiente $R^2 \geq 0.80$. Adicionalmente, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) informa la efectividad del modelo en la predicción de caudales. La presente investigación se sometió al coeficiente de eficiencia sugerido por los autores con el fin de conocer la efectividad de SWAT en la cuenca del río Mira. No obstante, para NSE (Nash-Sutcliffe), no existen criterios globalmente aceptados sobre rangos utilizados en la interpretación de los valores del coeficiente (Ritter *et al.*, 2011). Debido a lo citado se puede considerar criterios de diferentes autores. Van Liew *et al.* (2007) proponen que, un NSE entre 0.36 y 0.75 proyecta datos aceptables para la simulación. La simulación con un NSE cercano a uno se traduce en una predicción buena o perfecta. Al aplicar la fórmula de NSE se percibió 0.71 de eficiencia para el año 2000. El año 2007 tuvo mayor éxito con un NSE de 0.72. Finalmente, en el año 2014 se obtuvo 0.72.

Maldonado de León *et al.* (2001) y Benavides *et al.* (2005a) afirman que el modelo SWAT es versátil y eficiente con un uso mundial para el apoyo en toma de decisiones sobre el manejo del agua. Además, el modelo se ha ajustado a la realidad en la mayoría de los casos, siendo una buena alternativa para figurar ciclos hidrológicos y prever la cantidad de agua superficial (Benavides *et al.*, 2005b). El presente estudio no es la excepción, los valores de relación entre simulados y aforados y el coeficiente NSE obtenidos en la investigación demuestran la eficiencia y versatilidad del modelo SWAT.

4.3 Análisis de la variabilidad hídrica de la cuenca ante la pérdida de bosque

En análisis de correlación lineal se determinó una relación proporcional entre las variables de la tabla 18 (figura 27).

Tabla 18

Variables para el análisis de relación.

Tasas de cambio		
Período	Tasa de cambio del bosque	Tasa de cambio de caudal
2000/2007	-0.009	-0.024
2007/2014	0.004	0.000
2014/2017	-0.018	-0.039

Hectáreas de bosque vs. Caudal m ³ /s		
Año	Superficie (ha)	Caudal (m ³ /s)
2000	132322.75	145.15
2007	124503.13	122.34
2014	127633.52	122.61
2017	121015.05	108.85

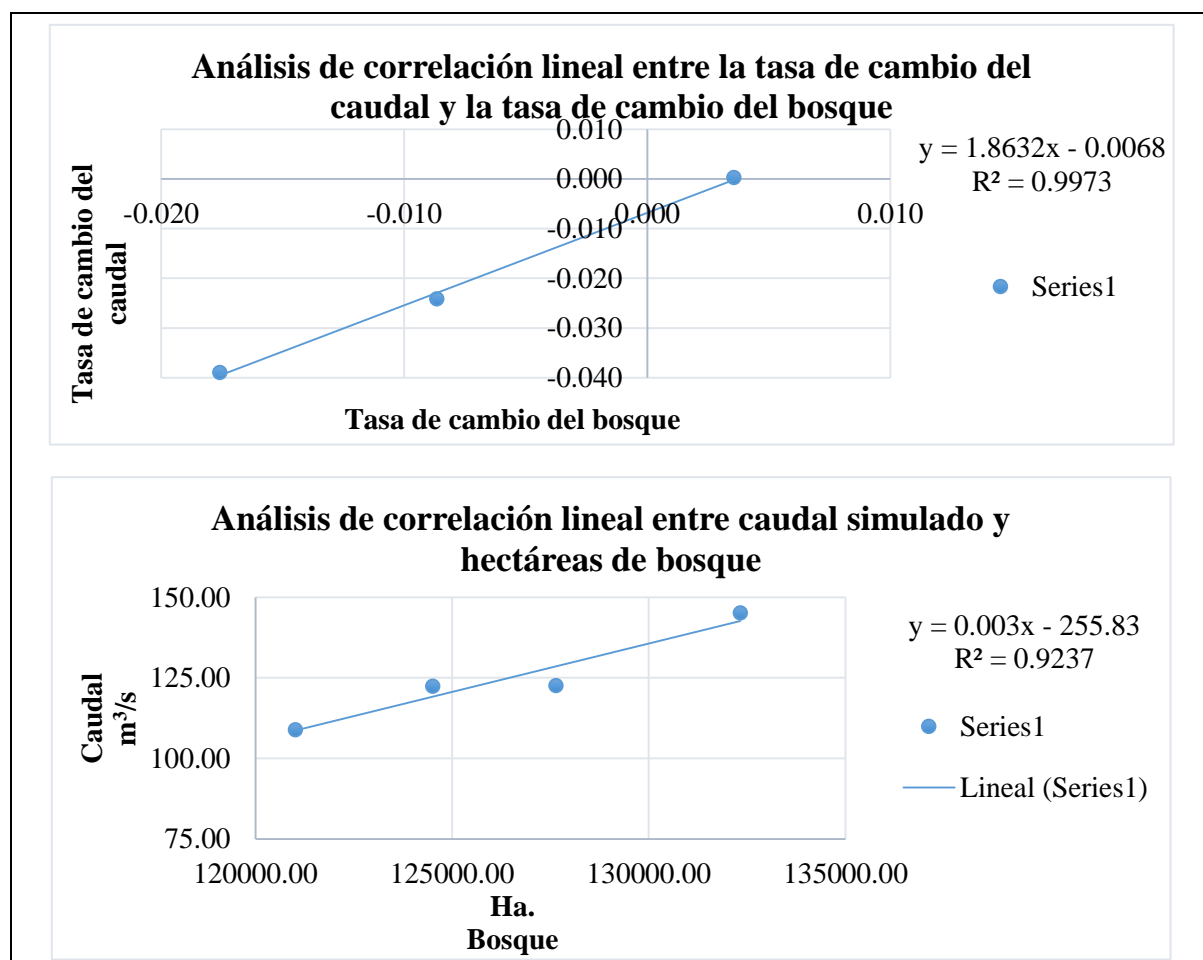


Figura 27. Correlación lineal entre el bosque y el caudal de la cuenca del río Mira.

Los valores del área boscosa y caudal de la cuenca muestran que el incremento y decremento del ecosistema forestal se relaciona con el aumento y la disminución de la producción de agua.

Ortiz *et al.* (2010) señala que la correlación entre escurrimiento y bosque cerrado fue negativa. Esta aseveración concuerda con Likens *et al.* (1978) donde afirman que la deforestación produce un aumento en el caudal. Este acontecimiento se debe a la crecida de esorrentía (Meneses *et al.*, 1995) por disminución de pérdidas por interceptación (Myers, 1997), transpiración (Likens *et al.*, 1978) y disminución de la infiltración (Oyarzún *et al.*, 2011). Esta investigación difiere de lo mencionado debido que en el estudio se pudo observar una correlación positiva entre el caudal y el bosque ($R^2 > 0.90$). Esta relación permite asegurar que en la cuenca del río Mira al aumentar el bosque se produce un incremento en el caudal. Por lo contrario, si el caudal disminuye se debe a la deforestación de ecosistemas forestales.

Los bosques andinos son ecosistemas potencialmente hidrológicos y están influenciados por dos factores importantes: i) precipitaciones relativamente altas y ii) baja evapotranspiración (Tobón *et al.*, 2008). Además, la topografía y las masas de aire muy húmedas como aquellas provenientes de la cuenca del Pacífico aportan al funcionamiento hidrológico de estos ecosistemas (Tobón, 2009). De tal manera que, dependiendo de su gradiente altitudinal y su grado de exposición a la nubosidad los bosques acogen precipitación vertical y horizontal que aporta al rendimiento hídrico. Consecuentemente, Valencia *et al.* (1999); Josse *et al.* (2003) y Baquero *et al.* (2004) presentan al bosque como un regulador hídrico y mencionan que el bosque participa directamente en la producción de agua. Así, en acuerdo con lo propuesto se expone que las formaciones boscosas presentes en la cuenca ayudan a la preservación e incremento de caudales. El bosque incrementa la producción de agua y hace posible el caudal superficial de la cuenca. Esto permite concordar adicionalmente con FAO (2008) que afirma que los bosques tienen una estrecha relación con la producción de agua, en especial el bosque nublado.

Finalmente, a estos ecosistemas se suman formaciones vegetales nativas como el páramo y su vegetación arbustiva que generan caudales base durante todo el año (De Bièvre *et al.*, 2006). En la cuenca se ha percibido una gran cantidad de bosque y paramo, siendo el bosque la segunda cobertura y uso de suelo de con mayor extensión en el área de estudio. En todos los años de clasificación la cobertura forestal fue mayor a 120.000 ha.

CONCLUSIONES

1. La tasa de cambio de -0.003 muestra una disminución del 0.3% anual en la cobertura de bosque del período 2000 – 2014. Esta disminución se debe principalmente a la tala indiscriminada del tiempo 2000 – 2007.
2. A pesar de la pérdida de bosque se han implementado estrategias y políticas nacionales de estado como socio bosque y reforestación con fines comerciales con incentivos forestales. Estas políticas de estado han provisto una iniciativa de conservación de bosques nativos y disminución de la degradación de los ecosistemas naturales.
3. Los datos obtenidos de los diferentes usos de suelo al ser validados en campo y aplicados a una matriz de confusión mostraron un Kappa de 0.83 dando una interpretación casi perfecta respecto a lo existente en la superficie analizada.
4. La eficiencia NSE es superior a para las simulaciones de los años 2000, 2007 y 2014; es un NSE que proyecta datos aceptables para la simulación. Esto permite afinar que el modelo tiene una efectividad considerable para predecir caudales.
5. A pesar de tener un NSE inferior a 0.75, el modelo se asemeja a los datos aforados. Debido a lo mencionado se puede concluir que el modelo tiene alta eficiencia y versatilidad.
6. El bosque es un ecosistema esencial en la cuenca para el mantenimiento del caudal. La deforestación en la cuenca afecta la producción de caudales teniendo una relación directamente proporcional a la extensión de bosque. Esto se debe a la gran cantidad de bosques de transición de paramos a partes bajas que aportan a la regulación hídrica y a la producción de agua, principalmente el bosque nublado.

RECOMENDACIONES

1. Luego de la clasificación es necesario aplicar una matriz de confusión con la mayor cantidad de puntos posibles para conocer la confiabilidad de la clasificación supervisada. En adición a este proceso se recomienda realizar una observación detallada de la imagen ya que las coberturas naturales no están dispuestas en formas totalmente uniformes.
2. La simulación tiene datos aceptables, sin embargo, es necesario generar una red de estaciones meteorológicas completas en diferentes zonas climáticas de la cuenca o en su defecto una estación por Subcuenca.
3. Se debe continuar con la investigación en modelamiento hidrológico ya que a pesar de las limitaciones es posible lograr resultados positivos y de gran importancia.
4. A pesar del éxito inmediato en la simulación se debe realizar el análisis de la sensibilidad, la calibración y la validación del modelo aplicado. Esta recomendación se debe a que estas actividades permiten conocer la cercanía a la realidad.
5. Conservar los diferentes ecosistemas forestales en la cuenca del río mira ayuda a incrementar y preservar el caudal debido que la cuenca cuenta con gran cantidad de precipitación horizontal.
6. Finalmente, se recomienda realizar investigaciones en las subcuencas y microcuencas de la cuenca del río Mira. Esto permitirá tener un conocimiento más amplio de la relación de los ecosistemas naturales con la producción de recurso hídrico de calidad para el consumo de los pobladores inmersos en el área estudiada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, L. y Moreano, R. (2013). Sistema de Información para la Interpolación de datos de Temperatura y de Precipitación del Ecuador. *Revista Politécnica*, vol. (32)-Nr. 1, 70-75.
- Andreassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal Hydrology* 291:1–27
- Armenteras, D., González, T., Vergara, L., Luque, F., Rodríguez, N. y Bonilla, M. (2016). Revisión del concepto de ecosistema como “unidad de la naturaleza” 80 años después de su formulación. *Ecosistemas* 25 (1): 83 – 89.
- Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Quito, Ecuador. Pp. 150, 182.
- Arias, P. (2015). Vulnerabilidad al cambio climático e inseguridad hídrica: el caso de la cuenca del pichaví (Cotacachi-Ecuador) (Tesis de Maestría). Universität Heidelberg - Heidelberg Center Lateinamerika.
- Asner, G., Knapp, D., Balaji, A. y Paez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing* 3:033543.
- Antón, D. (2000). El ciclo del agua. En Antón, D. & Díaz, C. (Ed.). *Sequía en un mundo de agua*. San José, Costa Rica: Piriguazú ediciones.
- Baumer, O. (1990). Prediction of soil hydraulic parameters. In: WEPP Data Files for Indiana. SCS National Soil Survey Lab. Lincoln, Nebraska, United States.
- Benavidez, J., González, M., López, C. y Valdez, J. (2008). Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales. *Madera bosques vol.14 (2)*, pp. 5 – 28.
- Benavides, J., Flores, J., González, M., Moreno, D., Valdez, J. y Ruiz, J. (2005a). Modelaje hidrológico aplicando el modelo SWAT en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco. In: Almanza *et al.* (eds.) (2005). *Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos*

Forestales, Chihuahua, Chihuahua. Universidad Autónoma Chihuahua, Delicias, Chihuahua, 280-292p.

Benavides, J., Flores, J., Baker, M., Medina, A. y Talavera, E. (2005b). Producción de agua en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, un análisis para los servicios ambientales. In: Benavides, J. *et al.* (eds.). Contribución al estudio de los servicios ambientales. Libro Técnico No. 1. SAGARPA - INIFAP - CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. 93-111p.

Bergström, S. (1991). Principles and confidence in hydrological modeling. *Nordic Hidrology*, 22(2), 123-136

Barrios, A. y Urribarri, L. (2010). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 51(1), 11-29.

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

Barbudo, L., Ochoa, J., y Verbel, E. (2016). *Aplicación del modelo SWAT en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca de la quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, departamento del Cesar* (tesis de pregrado). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.

Bosque, J. (2000). *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp, Madrid.

Bosch, J. y Hewlett, J. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapo-transpiration. *J. Hydrol.* 55:3–23

Brauman, k., Daily, G., Duarte, T. y Mooney, H. (2007). The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *The Annual Review of Environment and Resources.* 32: 67–98.

- Brown, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A. y Vertessy, R. (2004). A Review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alteration in vegetation. *Journal of Hydrology*. 310: 28_61.
- Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture Ecosystems and Environment* 104.
- Bruijnzeel, L. y Hamilton, L. (2000). *Decision time for cloud forests*. IHP Humid Tropics Programme Series No. 13. Paris, UNESCO.
- Burgeon, D., Hofer, T., Lierop, P. y Wabbes, S. (2015). Árboles y bosques, salvavidas que aseguran la resiliencia. *Unasylva* 243/244, vol. (66), 87.
- Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos*. IMEFEN, Perú.
- Cano. (2011). *Geodinámica reciente del relieve: geo pronóstico de desastres naturales y de cambios geo ecológicos seculares*. En: Geodinámica y riesgos naturales, IV encuentro de geógrafos de américa latina, Mérida, Venezuela
- Chávez, E. (1994). *Maderables Como Alternativa Para la Sustitución de Sombra en Cacaotales Establecidos Manejo Y Crecimiento*. CATIE.
- Chapin, F., Zaveleta, E., Eviner, V., Naylor, R., Vitousek, S., Lavoirel, M., Reynolds, H., Hooper, D., Sala, O., Hobbie, S., Mack, M. y Diaz, S. (2000). Consequences of changing biotic diversity. *Nature* 405: 234-242
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. USA: McGraw-Hill, Inc
- Chuvieco, E. (1996) *Fundamentos de teledetección espacial*. Tercera edición. Ediciones RIALP S.A., Madrid.
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental.
- Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research (CISPDR). (2015). *Plan Hidráulico Regional de Demarcación Hidrográfica MIRA*. Ecuador: SENAGUA.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. (03 de 12 de 2013). *Junta de Andalucía*. Obtenido de Restauración hidrológico- forestal: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46dd>

f59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=1ce88dc3ad98a210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=d142de0eb9dc5310VgnVCM2000000624e50aRCRD&rating=1

- Cortés, S. (2003). Estructura de la vegetación arbórea y arbustiva en el costado oriental de la serranía de chía (Cundinamarca, Colombia). *Caldasia* 25(1): pp. 119-137.
- Croke, J., Hairsine, P. y Fogarty, P. (2001). Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion, and delivery rates with time. *Forest Ecology Management* 143: 3–12
- De Bièvre, B., Íñiguez, V. y Buytaert, W. (2006). *Hidrología del páramo: Importancia, propiedades y vulnerabilidad*. En Ortiz, D. y Mena, P. (Ed.). Páramo. Quito, Ecuador: Editorial Abya Yala.
- Del Río, J. (2010). *Introducción al tratamiento de datos espaciales en la hidrología*. España: Bubok
- Douglass, J., y Swank, W. (1972). *Streamflow modification through management of eastern forests*. *Southeastern Forest and Range*. Experiment Station, Department of Agriculture, Ashville, NC. Res. Pup. SE-94
- Eisenbies, M.; Aust, W., Burger, J. y Adams, M. (2007). Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians—A review. *Forest Ecology and Management* 242: 77–98
- Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). (2017). Estudios de impacto ambiental. Expost de los sistemas de agua. Potable: centro occidente-el placer. Noroccidente y Pita Puengas. EPMAPS. Quito.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2002). *Qué es ArcGIS?* ESRI, New York, USA.
- Falkenmark, M. (2000). Competing freshwater and ecological services in the river basin perspective: an expanded conceptual framework. *Water Int.* 25:172–77
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). *El estado de los bosques del mundo 2016*. Roma, Italia: FAO.

- Food and Agriculture Organization (FAO). (2015). *2015, año internacional de los suelos*. Roma, Italia: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *El estado de los bosques del mundo*. Roma, Italia: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *FRA 2015 Términos y Definiciones*. Roma, Italia: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). Servicios Ambientales. *Unasylva* 237, vol. (62), 33-56.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal*. Roma, Italia: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2009a). *¿Por qué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas?*. Roma, Italia: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2009b). *Los bosques y el agua*. Roma, Italia: FAO
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2008). *Forest and water*. Roma, Italia: FAO
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2007a). *Situación de los bosques del mundo*. Roma, Italia: FAO
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2007b). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. FAO. Roma. 154 p.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2006. *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible*. FAO. Roma.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2004). *Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005: términos y definiciones*. Roma, Italia: FAO.
- Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). (2012). *Actividades sobre uso de la tierra, cambio del uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)*. USA: Professional Graphics Printing Co.

- Fries, A., Rollenbeckb, R., Nauß, T. y Bendixb, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology* 152, 17– 30.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Greacen, E. y Sands, R. (1980). Compaction of forest soils—a review. *Aust. Journal Forestry Res.* 18, 163–189
- Green, W. y Ampt, G. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:1-24.
- Guevara, S., Sánchez, G. y Landgrave, R. (2014). *La Deforestación*. INECOL.
- Guides, H. (1976). *Funciones dentro de una cuenca hidrológica*. Global reach, 59.
- Harr, R. (1979). *Effects of streamflow in the rain-dominated portion of the Pacific Northwest*, in Proceedings of Workshop on Scheduling Timber Harvest for Hydrologic Concerns. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Department of Agriculture, Portland, Oregon. 1 - 45 pp
- Harr, R. (1980). *Streamflow after patch logging in small drainages within the Bull Run municipal watershed, Oregon*. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Department of Agriculture, Portland, Oregon. *Res. Pap. PNW-268*,
- Harr, R. (1982). Fog drip in the Bull Run municipal watershed, Oregon. *Water Resources Bull.* 18(5): 785-788
- Hatchel, G., Ralston, C. y Foil, R. (1970). Soil disturbances in logging. *Journal Forestry* 68: 772–775
- Hengl, T. (2009). A practical guide to geostatistical mapping. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Heras, R. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico*. París, Francia: UNESCO.

- Hernández, O. (2012). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal del municipio del distrito central años 1987 y 2006* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- Hibbert, A. (1983). Water yield improvement potential by vegetation management on western rangelands. *Water Resources. Bull.* 19: 375–381.
- Horton, R. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, 446-460.
- Hospital, J., Martínez, A. y Rivas, J. (2006). *Determinación de números de curva: programa de apoyo a MODIPÉ (NumCur)*. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Huber, A. y López, D. (1993). Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don), Valdivia, Chile. *Bosque* 14 (2): 11-18
- Huber, A., Iroumé, A. y Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantation on water balance in Chile. *Hydrological Process* 22: 142-148
- INAMHI. (2017). Datos Analógicos hidrológicos y meteorológicos.
- INAMHI. (2005). *Estudio hidrológico del río Mira*. Quito – Ecuador.
- INERHI-PREDESUR-CONADE. (1994). *Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja*. Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos Washington D.C.
- Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) y Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2013). “*Generación de geo información para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000*”. Memoria técnica. Cantón Antonio Ante.
- Ingwersen, J. (1985). Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon, *Water Resources. Res.* 21(3): 469-473
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático Resumen para responsables de políticas*. Ginebra, Suiza: OMM.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014) *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Ginebra, Suiza: OMM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: OMM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate Change 2001. Robert T. Watson. (ed.) Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. INTERNET: www.grida.no/climate/ipcc.tar/
- Iroumé, A., Mayen, O. y Huber, A. (2006). Runoff and peakflow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes* 20: 37–50.
- Josse, C., Navarro, G., Comer, P., Evans, R., Faber-Langendoen, D., Fellows, M., Kittel, G., Menard, S., Pyne, M., Reid, M., Schuld, K., Snow, K. Y Teague, J. (2003). *Ecological Systems of Latin America and the Caribbean: A Working Classification of Terrestrial Systems*. Nature Serve. Arlington.
- Kaimowitz, D. (2004). Useful myths and intractable truths: the politics of the link between forests and water in Central America. In: Bonell, M. Bruijnzeel L.A (eds.). *Forests – Water – People in the Humid Tropics*. Cambridge, Cambridge University Press
- Keppeler, E. y Ziemer, R. (1990). Logging Effects on Streamflow: Water Yield and Summer Low Flows at Caspar Creek in Northwestern California. *Water Resources Research*. 26: 1669 – 1679.
- Kozlowski, T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scand. Journal Forestry Res.* 14: 596–619
- Lal, R. (1997). Deforestation effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria IV. Hydrology and water quality. *Land Degradation. Dev.* 8: 95–126
- Landis, R. y Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics, Vol. 33, No. 1.* 159-174.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., Macphee, J., Alvarez, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M. y Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as

- an opportunity for the conservation and Management of native forest in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258: 415-424
- Likens, G., Bormann, F., Pierce, R. y Reiners, W. (1978). Recovery of a deforested Ecosystem. *Science, New Series*, 199: 492-496.
- Lindeman, R. (1942). The trophic – dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23:399 – 418.
- Little, C. y Lara, A. (2010). RE para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque (Chile)* 31(3): 175-178
- Little, C., Lara, A., McPhee, J. y Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large-scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology* 374: 162–170
- Lozano, P., y Villarroel, V. (2009). Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal Reserva de Biosfera Sumaco. Cooperación Técnica entre Ecuador y la República Federal de Alemania.
- Maldonado de León, O., Palacios O., Oropeza, J., Springall, R. y Fernández, D. (2001). Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345p.
- Martinez, J., Etxaleku, N., Gómez, N. y Pavón, F. (2005) Descripción, caracterización y cartografía de los suelos de rioja baja: Termino municipal de Aldeanueva de Ebro. *Zubía Monográfico* 16 – 17.
- Maune, D., Kopp, S., Crawford, C. y Zervas, C. (2001). “Introduction”. En Maune, D. F. (coord.). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual*. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2012a). *Línea Base de Deforestación del Ecuador Continental*. Quito-Ecuador.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2012b). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.

- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2013). *Proyecto Socio Bosque*. Quito – Ecuador.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ex Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). (2016). Ficha informativa del proyecto 2016: Establecimiento de 120.000 hectáreas de plantaciones forestales con fines comerciales a nivel nacional. Subsecretaría de producción forestal.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ex Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). (2017). Ficha informativa del proyecto 2017: Establecimiento de 120.000 hectáreas de plantaciones forestales con fines comerciales a nivel nacional. Subsecretaría de producción forestal.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ex Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). (2014). Programa de Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales. Guayaquil – Ecuador.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ex Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). (2002). *Cuencas.shp*. Ecuador. Recuperado de: <http://geoportal.magap.gob.ec/inventario.html>
- Megahan, W. (1972). Logging, erosion, sedimentation: are they dirty words? *Journal Forestry* 70: 403–407
- Megahan, W., King, J. y Seyedbagheri, K. (1995). Hydrologic and erosional responses of a granitic watershed to helicopter logging and broadcast burning. *For. Sci.* 41, 777–795.
- Megahan, W., Wilson, M. y Monsen, S. (2001). Sediment production from granitic cut slopes on forest roads in Idaho, USA. *Earth Surface Process Land*. 26: 153–163
- Meneses, M. y Gayoso, J. (1995). Estudio de impacto ambiental proyecto forestal de los predios Tepuhueico y El Canelo. Goleen Spring Forestal (Chile) CIA Ltda. Informe de convenio N° 221. Serie técnica Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia 105 p.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington D. C., USA: Island Press.

- Mintengui, J. y Robredo, J. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico- forestal, mediante modelos hidrológicos. *Universidad Politécnica de Madrid*, 82.
- Miwa, M., Aust, W., Burger, J., Patterson, S. y Carter, E. (2004). Wet weather timber harvesting and site preparation effects on coastal plain sites: a review. *South. Journal Applied Forestry* 28, 137–151.
- Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN). (2009). *Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)*. Publicación Miscelánea No. 6. Serie de Publicaciones del Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN) - Fondo Ambiental del MDMQ. 1 - 51 pp. Imprenta Nuevo Arte. Quito - Ecuador.
- Myers, N. (1997). *The world's forests and their ecosystem services*. 215-235 pp. En: G.C. Daily, ed. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press. Washington, D.C. 416 p.
- Nash, J. y Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282–290.
- Nisbet, T. y McKay, H. (2002). *Sustainable forestry and the protection of water in Great Britain*. En *Proceedings, International Expert Meeting on Forests and Water*, pp. 101–112. Shiga, Japón.
- Odum, E. (1971). *Fundamentals of ecology*. (3rd. Ed.). Philadelphia, USA: W.B. Saunders Company.
- Oñate, F. y Aguilar, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. 3er Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográfica. Arequipa-Perú (8-13, junio). [On line]: http://www.academia.edu/15039973/APLICACION_DEL_MODELO_SWAT_PARA_LA_ESTIMACION_DE_CAUDALES_Y_SEDIMENTOS_EN_LA_CUENCA_ALTA_DEL_RIO_CATAMAYO.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla técnica: Balance hídrico superficial*. Lima, Perú: Global Water Partnership.

- Ortiz, A., Mendoza, M. E., y Bravo, M. (2010). *Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la Cuenca del lago de Cuitzeo*. Instituto Nacional de Ecología: Distrito Federal, México.
- Oyarzún, C., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A. y Hervé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas. *Bosque 32: 10-19*
- Patric, J. (1978). Harvesting effects on soil and water in the eastern hardwood forest. *South. Journal Applied Forestry 2: 66-73*
- Pereira, D., Martinez, M., De Almeida, A., Pruski, F., Da Silva, D. y Zonta, J. (2014). Hydrological simulation using swat model in headwater basin in southeast Brazil. *Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.4, p.789-799*.
- Ponce, V. y Hawkins, R. (1996). Runoff curve number: has it reached maturity?. *Journal of Hydrologic Engineering.1 (1), 11-19*.
- Puerta, R., Rengifo, J. y Bravo, N. (2011). *ArcGIS básico*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú.
- Pardos, J. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Madrid
- Puyravaud J. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management 177(1-3), 593-596*.
- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P. y Cisneros, C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Corporación Grupo RANDI RANDI; Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ); Challenge Program Water & Food. Quito, Ecuador: Internal report. 42 p.
- Quétier, F., Lavorel, S., Daigney, S. y De Chazal, J. (2009). Assessing ecological and social uncertainty in the evaluation of land-use impacts on ecosystem services. *Journal of Land Use Science, Vol. 4 (3):173-199*
- Rafferty, J. (2011). *Climate and climate change. (1st. Ed.)*. NY, USA: Britannica Educational Publishing.

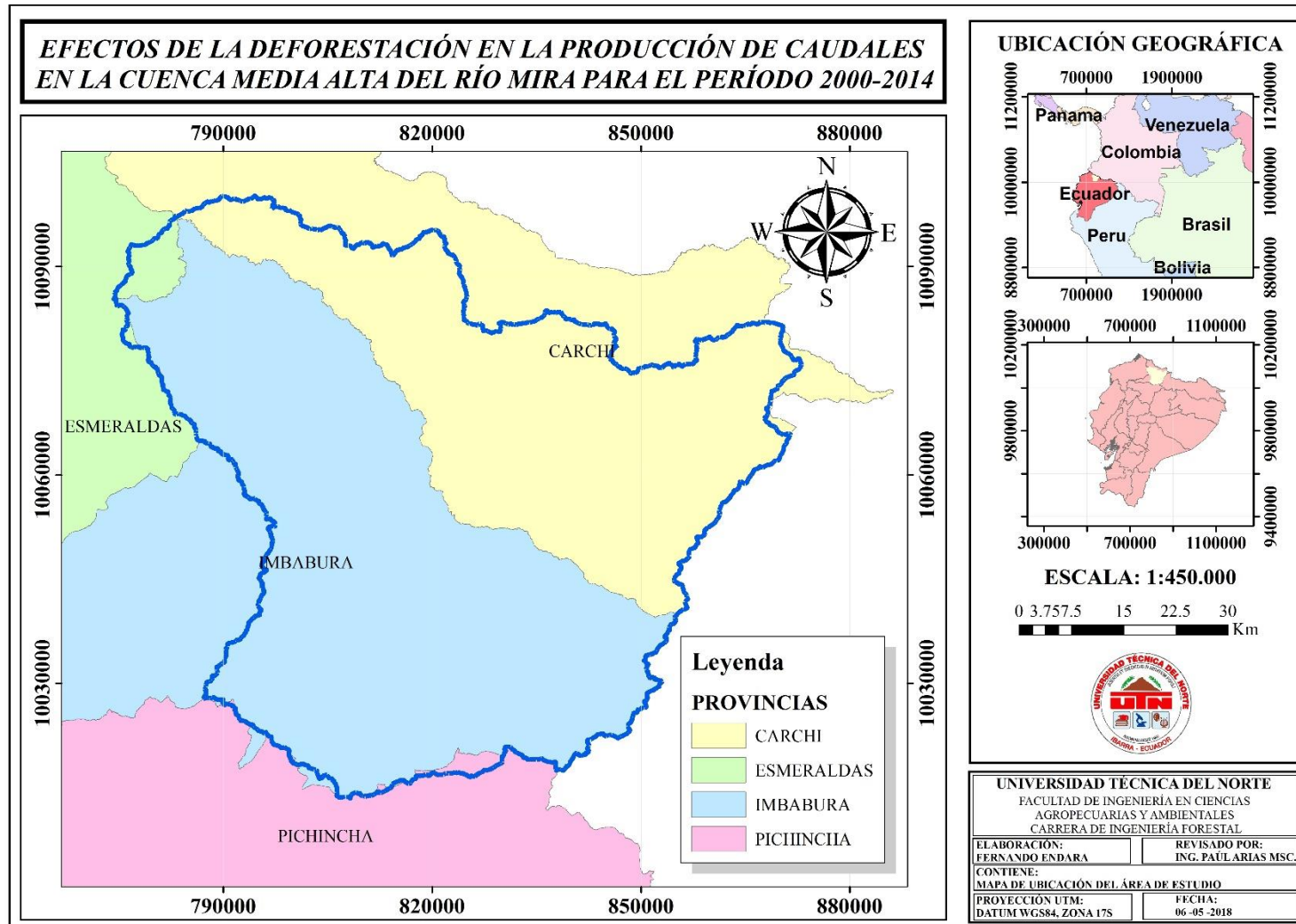
- Rautner, M., Leggett, M. y Davis, F. (2013). *El Pequeño Libro de las Grandes Causas de la Deforestación*, Programa Global Canopy: Oxford.
- Rothacher, J. (1970). Increases in water yield following clear cut logging in the Pacific Northwest, *Water Resources. Res.* 6(2): 653-658
- Ritter, A, Muñoz, R. y Regalado, C. (2011). Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad-de-ajuste con significación estadística. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol X*, pp. 259 – 264.
- Ruiz, M., García, C. y Sayer, J. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas* 16, vol. (3), 81-90.
- Sahin, V. y Hall, J. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal Hydrology* 178:293–309
- San Isidro, J. (1998). *Proceso de Validación de Modelos de Simulación*. CIEMAT:Madrid, España.
- Sánchez, F. (2007). *Cálculo de la precipitación areal mediante sistemas de información geográfica*. Madrid, España: EOI.
- Saxton, K. y Rawls, W. (2009). *Introducción al programa “Soil Water Characteristics”Hydraulic Properties Calculator*. Tutorial creado para la Maestría de Cuencas Hidrográficas de la Escuela de Bosques. Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires. Argentina.
- Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo (SEMPLADES). (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021*. Quito, Ecuador.
- SENAGUA. (2018). Unidades hidrográficas del Ecuador, niveles 5 escala 1:50000, año 2014 (Shape). Revisado el 20 de abril del 2018 en: <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/>
- Senra, J. (2005). *Gestión de los recursos hídricos en las cuencas transfronterizas. Plan nacional de recursos hídricos en Perú*. Lima: Limusa

- Serrada, R. (2011). Restauración hidrológico-forestal. *Situación de los bosques: Retos y oportunidades* (pág. 93). Santander: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Shaw, E. (1994). *Hydrology in Practice*. London, UK: Mater e-book.
- Sidle, R., Ziegler, A., Negishi, J., Nik, A., Siew, R. y Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain—truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecologic Manage.* 224: 199–225
- Sidle, R. y Onda, Y. (2004). Hydrogeomorphology: an overview of an emerging science. *Hydrology Process* 18: 597–602.
- Singh, V. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Colorado.
- Sistema Nacional de Información (SNI). (2014). Mapas de suelos.
- Sistema Nacional de Información (SNI). (2014). Criterios de clasificación de suelos.
- Sistema Nacional de Información (SNI). (2017). Mapa de coberturas y usos de la tierra.
- Sklenář, P., Luteyn, J., Ulloa, C., Jørgensen, P. y Dillon, M. (2005). Flora Genérica de los Páramos. Guía Ilustrada de las Plantas Vasculares. *Memoirs of the New York Botanical Garden* 92: 3-499.
- Socio Bosque. (2018). Resultados de Socio Bosque. Revisado el 15 de marzo del 2018 en: <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/node/44>
- Tobón, C., y Arroyave, F. (2008). *Hidrología de los bosques alto-andinos*. En: Ecología de Bosques Andinos, Universidad Nacional de Colombia. J.D. León Ed. 213 p
- Unites States Geological Survey. (2018). Earthexplorer, Imágenes satelitales LANDSAT. Revisado el 16 de abril del 2018: de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2007). *Manglares y Dunas de Veracruz*. México. Recuperado de: <http://www3.inecol.edu.mx/maduver/index.php/servicios-ambientales/6-nuestro-proyecto.html>
- Uribe, N. (2010). *SWAT: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. CIAT.

- Urrutia, M. (2016). *Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan bajo la influencia de la actividad minera*. (Tesis de posgrado). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá
- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *Section: 4, Hydrology*. National Engineering Handbook. SCS, USDA. Washington, DC.
- Valdivieso, J. (2005). Propuesta para la gestión integral del suelo no urbanizable del distrito metropolitano de Quito. Flacso. Quito, Ecuador.
- Valencia, R., Cerón, C., Palacios W. y Sierra, R. (1999). *Las Formaciones Naturales de la Sierra del Ecuador*. En: Sierra, R. (Ed.). Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN/ GEF-BIRF y EcoCiencia. Quito, Ecuador. pp. 79-108.
- Valenzuela, P. (2005). *Aplicación del Modelo Hídrico SWAT 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro* (Tesis de Pregrado). Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. ESPE. Sede Sangolquí
- Van Liew, M., Veith, T., Bosch, D. y Arnold, J. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA - ARS watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, Reston, v.12, n.2, p.173 – 189.
- Wahl, N., Bens, O., Schafer, B. y Huttl, R. (2003). Impact of changes in land use management on soil hydrologic properties: hydraulic conductivity, water repellency, and water retention. *Physic Chemistry Earth 28: 1377–1387*
- Wemple, B., Jones, J. y Grant, G. (1996). Channel network extension by logging roads in two basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Bull 32: 1–13*.
- Wischmeier, W, Johnson, C. y Cross, B. (1971). Soil credibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation 26:189-193*.
- Worrell, R., Hampson, A. (1997). The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review. *Forestry 70: 61–85*.

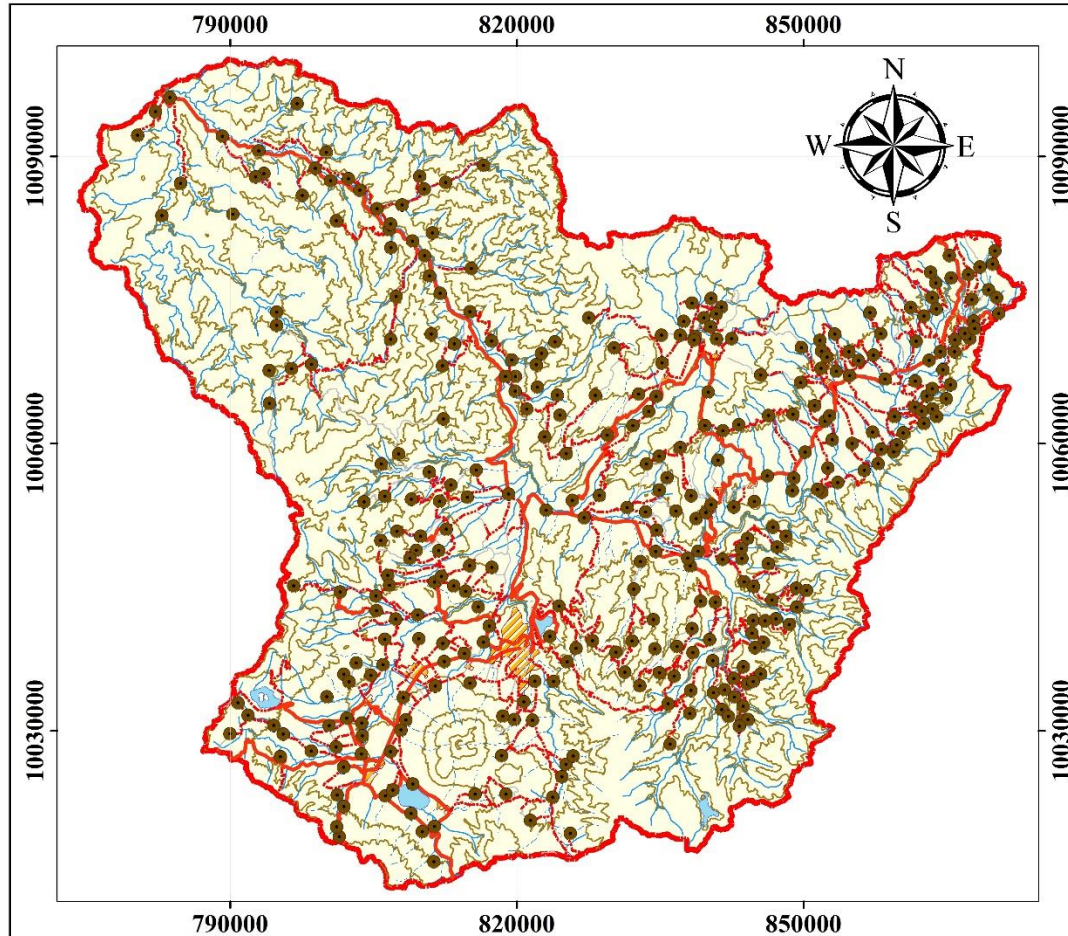
ANEXOS

Anexo 1. Área de estudio

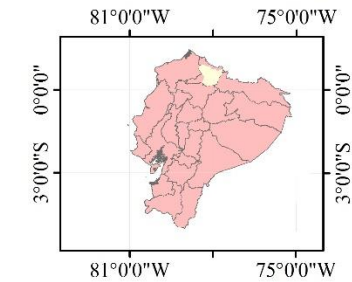


Anexo 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

**EFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES
EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000-2014**



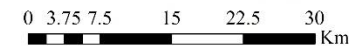
UBICACIÓN GEOGRÁFICA



SIMBOLOGÍA

- Leyenda**
- Poblados
 - Vías
 - RUTA PRIMARIA
 - RUTA SECUNDARIA
 - RUTA LOCAL
 - Ríos
 - INTERMITENTE
 - PERENNE
 - Curvas de nivel
 - INDICE
 - INTERMEDIA
 - Zona Urbana
 - Lagunas

ESCALA 1:380.000

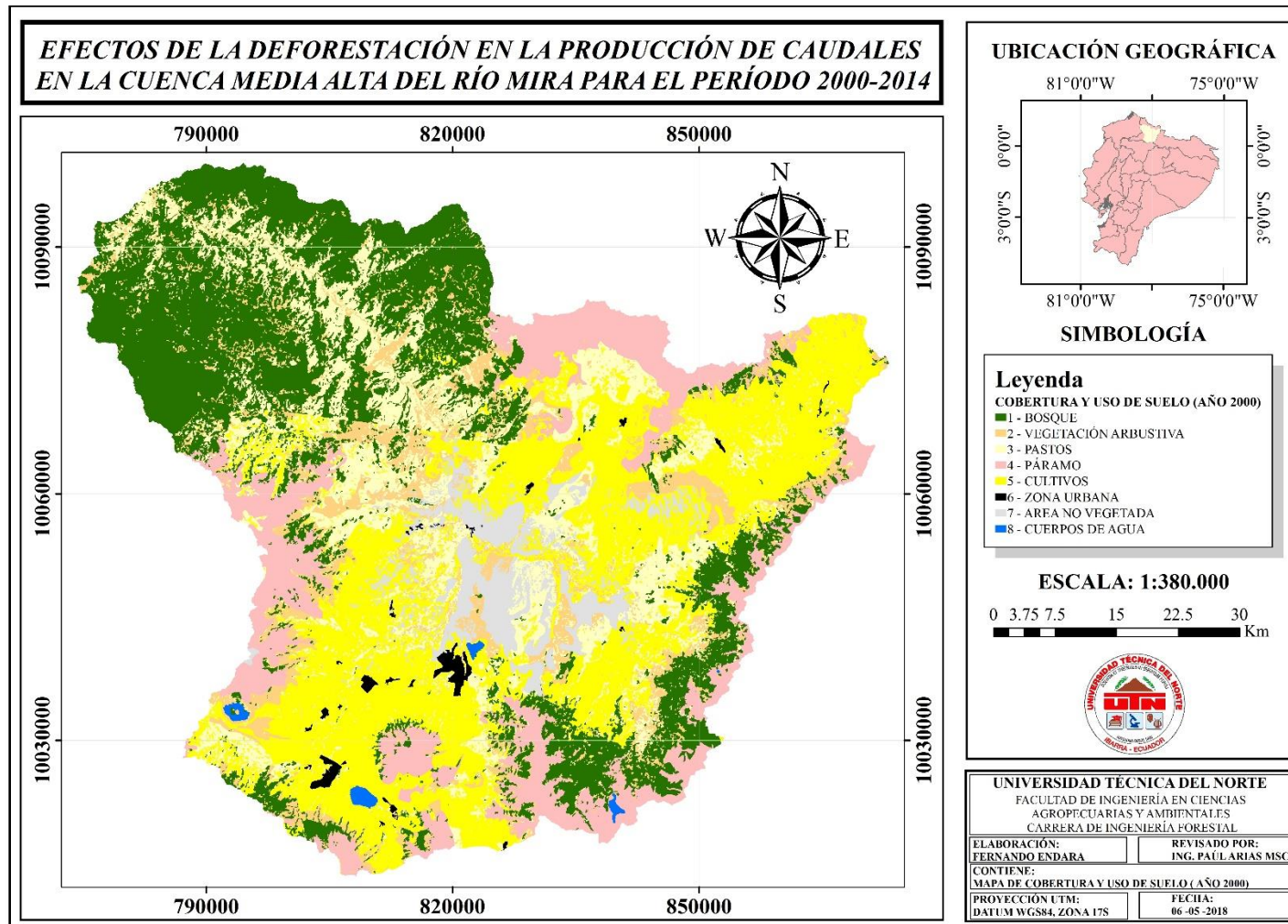


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

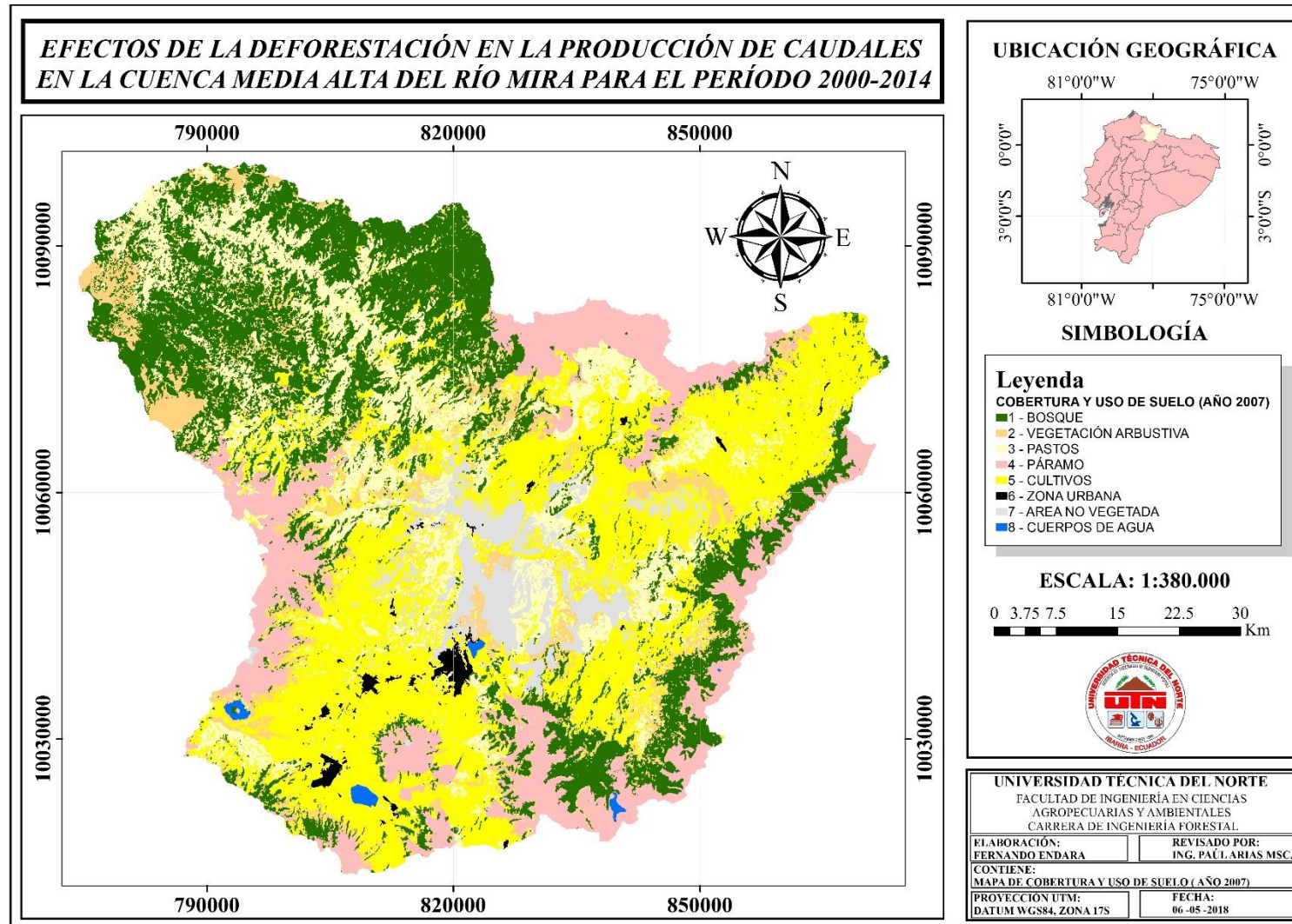
ELABORACIÓN: FERNANDO ENDARA	REVISADO POR: ING. PAULARIAS MSC.
CONTIENE: MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO	
PROYECCIÓN UTM: DATUM WGS84, ZONA 17S	FECHA: 06-05-2018

Anexo 2. Mapa base.

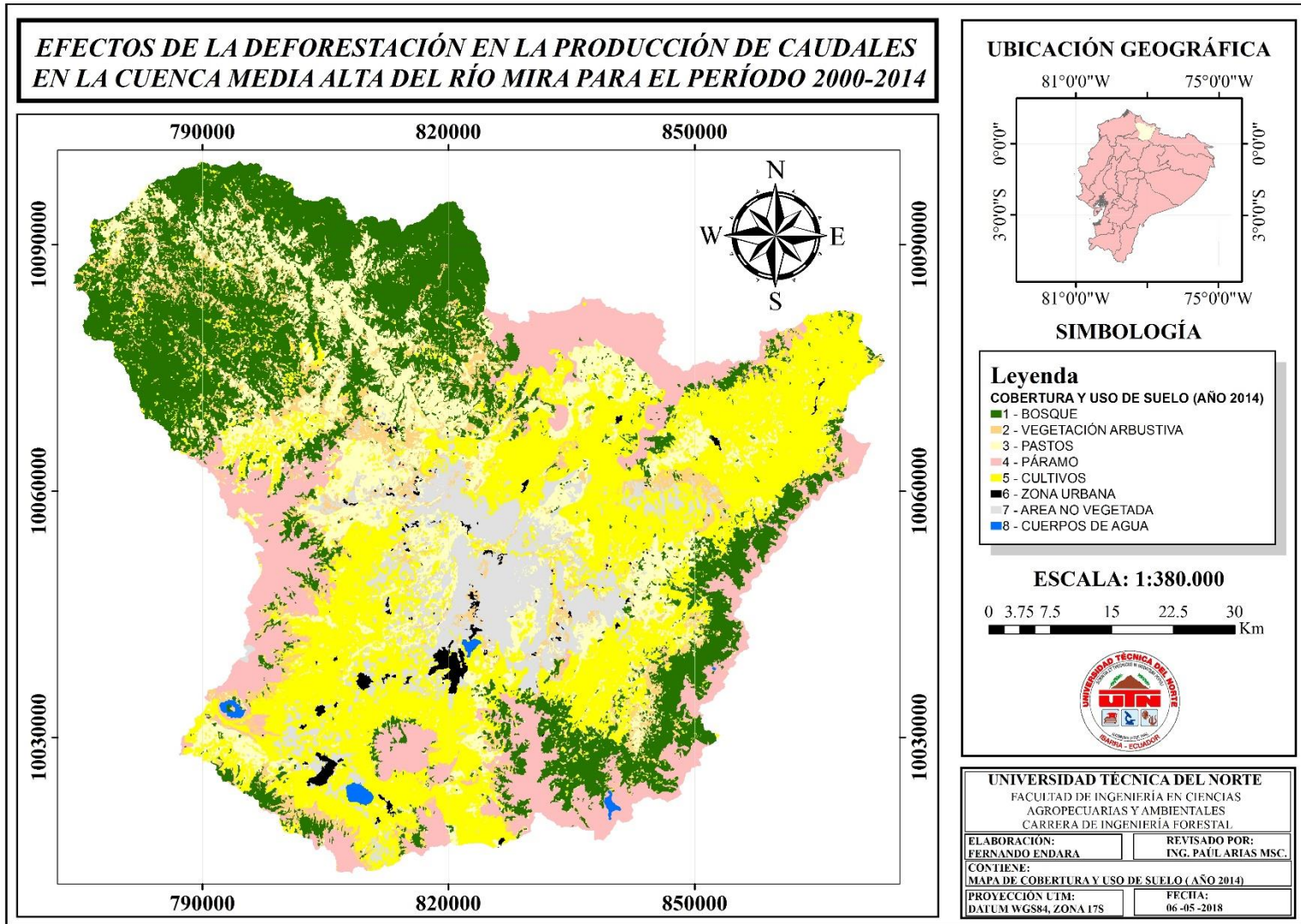
Anexo 2. Mapas de cobertura y uso de suelo en la cuenca.



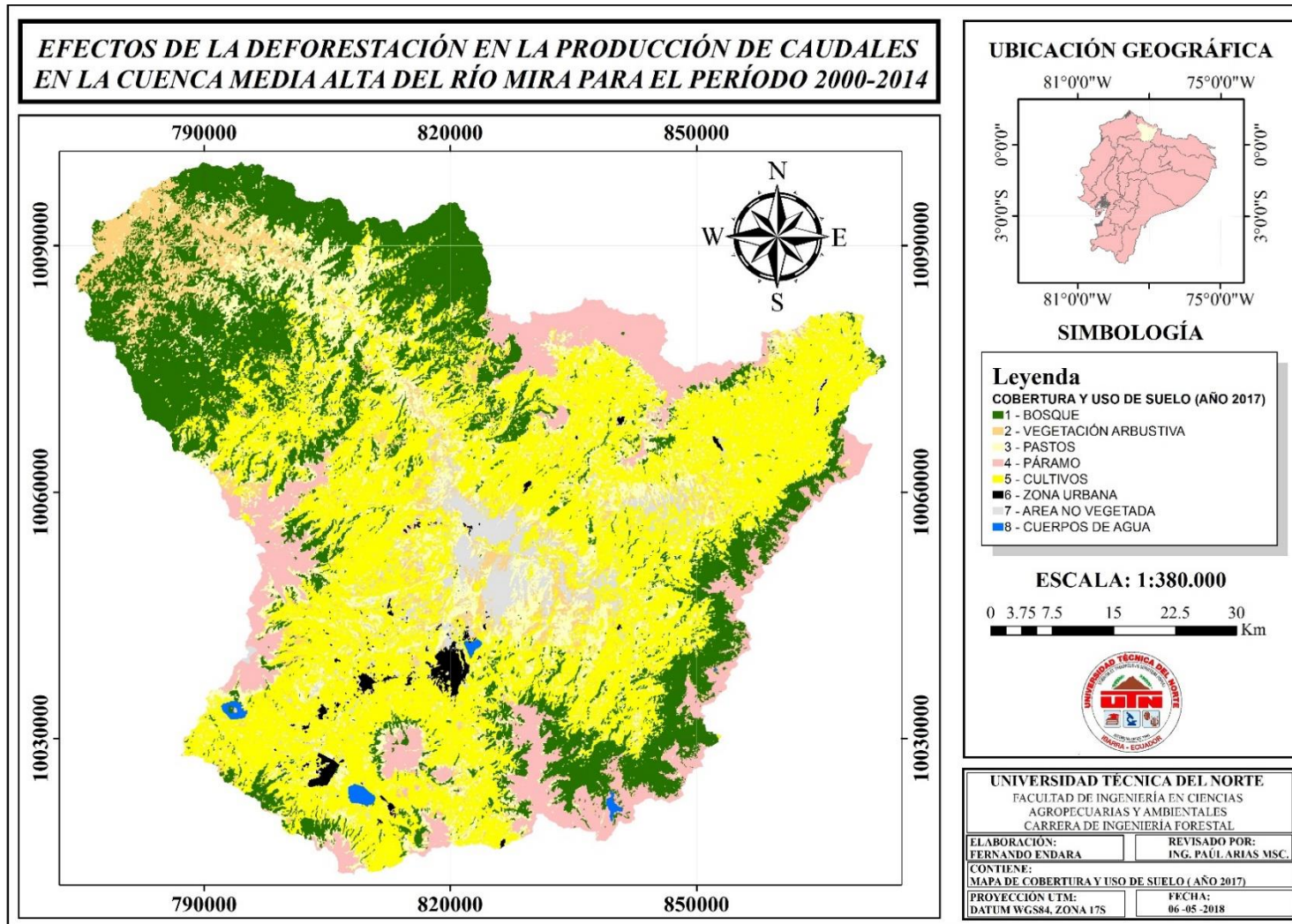
Anexo 3. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2000.



Anexo 4. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2007.

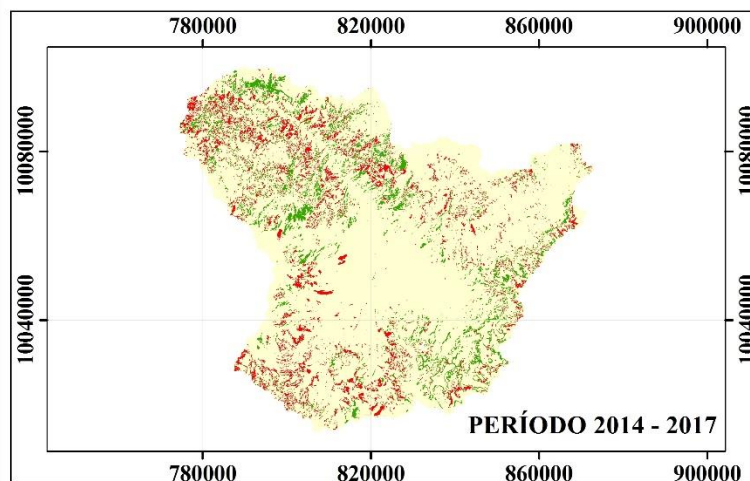
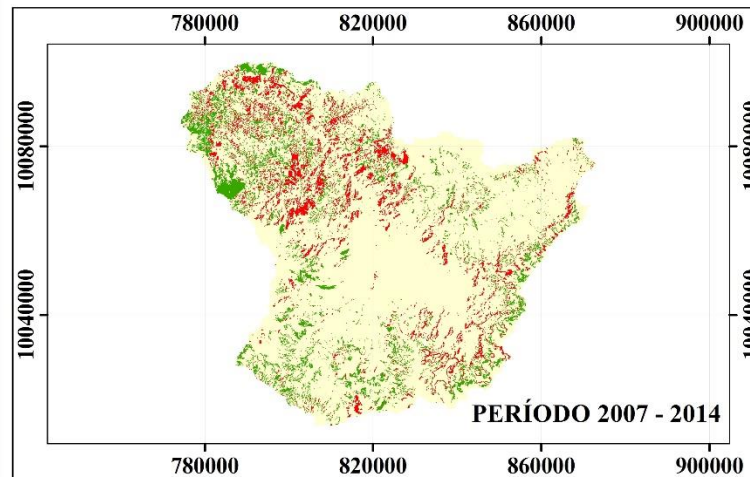
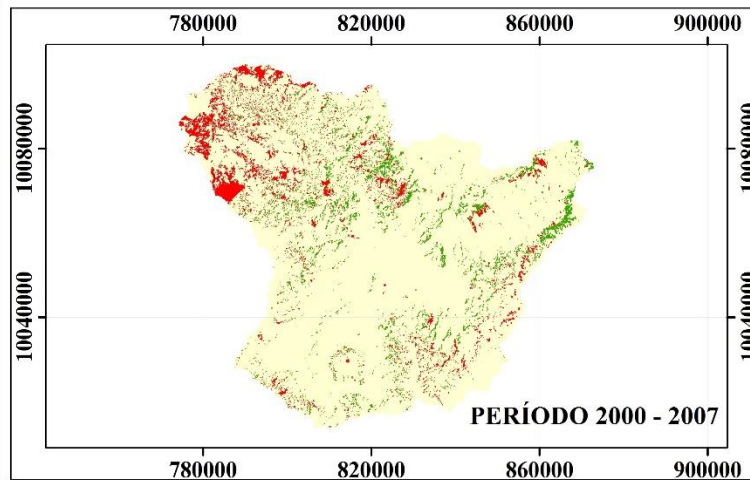


Anexo 5. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2014.

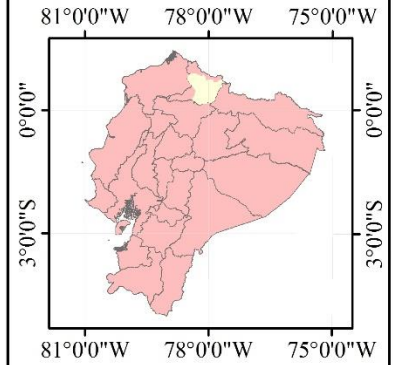


Anexo 6. Mapa de cobertura y uso del suelo para el año 2017.

EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000-2014



UBICACIÓN GEOGRÁFICA

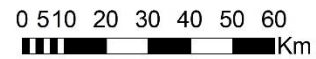
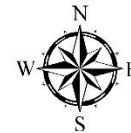


SIMBOLOGÍA

Leyenda

- Deforestación
- Sin cambio
- Reforestación

ESCALA: 1:960.000



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

ELABORACIÓN:
FERNANDO ENDARA

REVISADO POR:
ING. PAÚLARIAS MSC.

CONTIENE:
CAMBIO DE COBERTURA BOSCOSA
(PERÍODO 2000 - 2017)

PROYECCIÓN UTM:
DATUM WGS84, ZONA 17S

FECHA:
06-05-2018

Anexo 7. Mapa de cambio de cobertura forestal.

Anexo 8. Matriz de confusión, cálculo del Índice Kappa.

		Datos verdaderos									
Resultado clasificado	Coberturas y usos de suelo	Bosque	Vegetación arbustiva	Pastos	Páramo	Cultivos	Zona urbana	Área sin vegetación	Cuerpos de agua	Clasificación general	Precisión del Productor
	Bosque	39	0	0	3	0	0	0	0	42	92.86
	Vegetación arbustiva	0	48	0	0	0	0	1	0	49	97.96
	Pastos	4	0	39	12	1	0	4	0	60	65.00
	Páramo	1	1	0	34	0	0	2	0	38	89.47
	Cultivos	6	1	11	1	49	3	0	0	71	69.01
	Zona urbana	0	0	0	0	0	40	0	0	40	100.00
	Área sin vegetación	0	0	0	0	0	7	43	0	50	86.00
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	50	50	100.00
	Verdad general	50	50	50	50	50	50	50	50	400	
Precisión del Usuario	78	96	78	68	98	80	86	100			
Acuerdos observados	0.86										
Acuerdos esperados	0.12										
Índice Kappa	Error Estándar	I.C 95%					Fuerza de la concordancia				
0.83	0.02	(0.80	,	0.87)	Casi perfecto				

Fuente: Landis y Koch (1977).

Anexo 3. Datos climatológicos para el modelo hidrológico SWAT

Anexo 9. Datos climáticos de la estación climatológica completa Inguincho.

Estación	Longitud			Latitud			Altura					
INGUINCHO	-78.40			0.26			3140.00					
Promedio mensual de la temperatura (T) máxima (°C)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1998 - 2002	14.63	14.59	14.79	14.84	14.70	14.21	14.45	15.02	15.27	15.87	15.03	15.24
2005 - 2009	16.43	16.23	16.65	16.51	16.69	15.98	15.88	16.15	16.99	17.19	17.30	16.43
2011 - 2015	15.12	14.55	14.82	15.22	15.01	15.11	15.13	15.52	16.04	15.70	15.78	15.72
Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)												
1998 - 2002	1.42	1.41	1.35	1.35	1.55	1.13	1.26	1.37	1.41	1.49	1.63	1.54
2005 - 2009	1.50	1.79	1.59	1.65	1.51	1.47	1.47	1.44	1.39	1.59	1.54	1.45
2011 - 2015	1.35	1.26	1.24	1.17	1.22	1.24	1.27	1.17	1.32	1.61	1.51	1.19
Promedio mensual de la T mínima (°C)												
1998 - 2002	6.19	6.11	6.51	6.58	6.44	5.97	5.45	5.06	5.59	6.10	6.29	6.45
2005 - 2009	6.32	6.28	6.54	6.80	6.74	6.27	5.48	5.41	5.30	6.14	6.35	6.21
2011 - 2015	6.68	6.62	6.82	7.00	6.87	6.32	5.89	5.55	5.87	6.53	6.51	6.62
Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)												
1998 - 2002	0.73	0.66	0.64	0.64	0.67	0.73	0.98	0.98	0.81	0.65	0.87	0.70
2005 - 2009	1.21	1.17	0.96	1.01	1.05	0.99	1.14	1.02	0.95	1.07	1.27	1.14
2011 - 2015	0.79	0.79	0.69	0.76	0.79	0.88	0.91	1.07	1.02	1.01	1.18	1.11
Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)												
1998 - 2002	100.00	110.88	116.78	181.72	132.10	70.52	10.50	16.94	66.34	74.00	117.40	100.78
2005 - 2009	132.16	134.98	199.28	182.98	129.80	62.74	13.72	25.62	28.68	115.34	130.32	163.50
2011 - 2015	143.70	139.04	134.64	161.04	99.22	24.82	33.58	25.68	38.30	114.24	130.54	81.56
Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)												
1998 - 2002	6.02	6.96	6.22	9.53	8.27	6.40	0.83	2.75	5.03	4.70	7.05	5.60
2005 - 2009	7.72	8.67	9.18	8.90	7.72	5.16	1.33	2.42	3.34	6.85	6.84	7.39
2011 - 2015	8.75	7.22	7.05	9.07	6.44	2.14	4.12	4.10	5.97	6.23	7.93	6.02
Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria												
1998 - 2002	2.13	2.54	2.11	1.76	3.13	4.18	2.70	7.81	3.63	2.21	2.26	2.35
2005 - 2009	2.41	2.74	1.78	2.00	2.57	3.75	4.12	3.59	4.50	2.43	2.00	2.07
2011 - 2015	2.25	1.64	2.27	1.94	2.67	3.51	6.33	6.61	9.11	1.89	2.51	3.34

Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)												
1998 - 2002	0.23	0.24	0.29	0.38	0.24	0.22	0.18	0.15	0.31	0.21	0.24	0.31
2005 - 2009	0.30	0.22	0.43	0.49	0.30	0.30	0.13	0.19	0.13	0.27	0.30	0.33
2011 - 2015	0.27	0.37	0.41	0.33	0.26	0.20	0.19	0.14	0.15	0.31	0.32	0.25
Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)												
1998 - 2002	0.67	0.72	0.63	0.69	0.71	0.51	0.42	0.31	0.58	0.58	0.72	0.72
2005 - 2009	0.73	0.81	0.81	0.79	0.71	0.62	0.54	0.50	0.43	0.71	0.72	0.85
2011 - 2015	0.73	0.74	0.71	0.77	0.71	0.54	0.49	0.31	0.61	0.65	0.73	0.58
Promedio mensual del número de días de lluvia												
1998 - 2002	13.40	14.20	14.60	17.20	15.40	10.20	7.20	6.40	13.00	10.60	15.00	16.60
2005 - 2009	17.20	17.20	21.60	21.40	16.80	14.20	7.40	8.80	6.00	15.20	17.40	22.40
2011 - 2015	16.20	18.00	18.80	18.40	15.60	10.00	8.60	5.80	8.20	14.80	16.40	12.40
Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)												
1998 - 2002	23.62	27.64	22.76	28.90	29.80	21.58	3.40	9.98	21.82	15.54	25.82	19.84
2005 - 2009	29.64	35.92	33.88	32.56	28.10	19.84	4.92	7.96	12.38	22.56	23.70	29.10
2011 - 2015	31.00	22.34	23.98	25.62	23.18	5.88	12.44	9.88	22.54	22.46	31.98	22.94
Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día)												
1998 - 2002	15.53	15.31	15.05	14.67	14.35	15.16	16.30	18.03	16.47	17.64	15.75	15.65
2005 - 2009	15.60	15.51	14.77	14.46	15.17	15.51	17.05	17.17	18.09	15.64	16.08	14.75
2011 - 2015	15.55	14.71	15.06	15.51	14.52	15.46	15.99	17.73	17.74	15.45	16.08	15.13
Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)												
1998 - 2002	8.54	8.60	8.84	8.94	8.78	8.20	7.92	7.36	7.80	8.20	8.30	8.72
2005 - 2009	8.06	7.92	8.00	8.36	8.12	7.58	6.82	6.68	6.68	7.66	8.36	8.22
2011 - 2015	8.42	8.38	8.54	8.54	8.42	7.84	7.34	7.08	7.34	8.14	8.58	8.38
Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)												
1998 - 2002	1.27	1.26	1.19	1.10	1.28	1.33	1.44	1.65	1.43	1.39	1.14	1.38
2005 - 2009	1.44	1.44	1.36	1.32	1.38	1.46	1.98	2.03	2.01	1.46	1.37	1.41
2011 - 2015	1.13	1.00	1.01	1.03	1.04	1.43	1.67	1.48	1.65	1.17	0.98	1.28

Anexo 10. Datos climáticos de la estación Agrometeorológica Izobamba.

Estación	Longitud			Latitud			Altura					
IZOBAMBA	-78.55			-0.37			3058.00					
Promedio mensual de la temperatura (T) máxima (°C)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1998 - 2002	17.95	17.61	17.62	17.82	17.78	18.00	18.65	19.11	18.61	19.12	18.40	18.35
2005 - 2009	18.15	17.98	17.62	17.82	18.27	18.13	18.77	18.87	19.58	18.70	18.28	17.92
2011 - 2015	18.53	17.95	18.06	18.38	18.44	19.03	19.45	19.60	19.81	18.87	18.80	19.14
Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)												
1998 - 2002	1.57	1.95	1.51	1.35	1.78	1.51	1.36	1.44	1.66	1.63	1.71	1.55
2005 - 2009	1.62	1.81	1.51	1.43	1.39	1.40	1.45	1.52	1.61	1.82	1.61	1.46
2011 - 2015	1.66	1.46	1.41	1.34	1.58	1.27	1.22	1.09	1.41	1.53	1.67	1.40
Promedio mensual de la T mínima (°C)												
1998 - 2002	6.93	7.11	7.37	7.23	6.97	6.15	5.53	5.49	5.26	6.20	6.41	6.62
2005 - 2009	6.78	6.59	7.14	6.95	6.31	6.45	5.89	5.65	5.73	6.27	6.42	6.81
2011 - 2015	6.34	6.75	6.83	6.29	6.31	6.00	5.79	5.56	5.81	6.15	6.32	6.33
Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)												
1998 - 2002	1.43	1.47	1.27	1.26	1.29	1.34	1.33	1.56	1.39	1.59	1.82	1.69
2005 - 2009	1.33	1.66	1.19	1.23	1.57	1.26	1.43	1.47	1.34	1.58	1.93	1.62
2011 - 2015	1.51	1.40	1.30	1.35	1.42	1.44	1.29	1.33	1.43	1.51	1.73	1.59
Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)												
1998 - 2002	115.30	168.14	234.38	206.00	182.22	85.94	30.14	33.72	99.32	96.82	140.72	149.42
2005 - 2009	167.98	181.48	226.70	217.78	147.84	75.68	32.38	47.60	52.98	129.60	174.94	157.54
2011 - 2015	141.82	172.00	188.96	175.48	137.20	27.14	28.00	39.34	43.24	161.28	110.30	80.90
Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)												
1998 - 2002	5.48	7.90	9.37	8.40	8.50	5.67	2.49	3.22	5.51	5.26	7.21	6.52
2005 - 2009	8.03	9.11	10.16	9.26	6.99	4.87	2.99	3.85	4.62	6.99	7.55	6.81
2011 - 2015	7.07	8.24	7.56	7.50	6.65	2.98	2.71	4.17	3.56	8.24	6.46	4.84
Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria												
1998 - 2002	2.18	1.56	1.57	1.87	1.94	3.06	3.22	5.50	3.02	2.47	2.11	1.62
2005 - 2009	1.75	1.54	3.58	1.53	2.09	2.61	4.07	4.00	4.49	2.96	1.50	1.62
2011 - 2015	2.13	2.18	1.21	1.89	2.14	5.66	3.69	5.55	3.18	2.15	2.63	2.49

Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)												
1998 - 2002	0.44	0.35	0.63	0.65	0.33	0.28	0.22	0.16	0.37	0.24	0.27	0.39
2005 - 2009	0.38	0.34	0.57	0.76	0.42	0.29	0.20	0.30	0.22	0.33	0.30	0.42
2011 - 2015	0.36	0.43	0.38	0.44	0.32	0.19	0.15	0.16	0.24	0.39	0.33	0.24
Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)												
1998 - 2002	0.69	0.79	0.79	0.83	0.83	0.68	0.48	0.53	0.76	0.76	0.76	0.77
2005 - 2009	0.73	0.75	0.86	0.79	0.73	0.69	0.53	0.54	0.52	0.81	0.81	0.79
2011 - 2015	0.77	0.81	0.83	0.83	0.84	0.45	0.50	0.56	0.54	0.77	0.72	0.67
Promedio mensual del número de días de lluvia												
1998 - 2002	18.60	19.00	24.00	24.80	22.00	15.60	9.60	8.00	19.20	16.80	17.60	20.20
2005 - 2009	18.80	17.60	25.40	24.20	20.00	15.40	9.80	12.60	10.00	20.60	20.00	22.00
2011 - 2015	19.20	21.20	23.20	22.80	22.20	8.40	8.00	8.60	10.40	20.80	16.60	14.40
Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)												
1998 - 2002	22.44	27.66	36.62	32.86	33.24	25.22	9.90	13.32	19.74	14.60	26.98	21.32
2005 - 2009	24.30	29.58	42.26	32.62	23.92	18.50	10.84	15.92	18.14	30.54	23.98	25.12
2011 - 2015	23.10	32.64	25.20	27.96	24.98	11.90	11.16	18.06	15.26	32.04	22.62	17.80
Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día)												
1998 - 2002	16.42	15.82	15.13	15.41	14.83	16.01	17.83	19.24	16.91	18.23	16.99	16.39
2005 - 2009	15.89	16.15	14.63	14.93	15.93	16.04	17.80	17.72	18.33	16.64	16.55	15.61
2011 - 2015	16.18	15.03	14.65	15.28	14.83	16.49	17.63	18.52	17.22	15.72	15.63	15.27
Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)												
1998 - 2002	8.32	8.46	9.00	9.10	8.58	7.40	6.56	6.02	7.14	7.62	8.28	8.58
2005 - 2009	8.88	8.76	8.90	9.16	8.58	7.96	6.80	6.72	6.78	8.14	8.64	8.84
2011 - 2015	9.00	9.32	9.42	9.28	9.28	7.80	7.02	6.60	6.90	8.58	9.14	8.88
Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)												
1998 - 2002	0.46	0.51	0.41	0.43	0.49	0.61	0.62	0.88	0.53	0.48	0.48	0.40
2005 - 2009	0.48	0.41	0.49	0.42	0.46	0.49	0.66	0.76	0.72	0.36	0.46	0.37
2011 - 2015	0.47	0.34	0.53	0.45	0.41	0.64	0.69	0.77	0.67	0.47	0.36	0.46

Anexo II. Datos climáticos de la estación climatológica completa La Concordia.

Estación	Longitud			Latitud			Altura					
LA CONCORDIA	-79.37			0.03			379.00					
Promedio mensual de la temperatura (T)máxima (°C)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1998 – 2002	29.18	30.00	30.77	30.56	29.53	28.30	27.96	28.42	28.35	28.05	27.99	28.25
2005 – 2009	28.95	29.39	30.21	30.30	28.85	27.97	28.24	28.28	28.51	28.15	28.59	28.60
2011 – 2015	28.46	29.35	30.19	30.14	29.44	28.75	28.21	28.29	29.07	28.35	28.18	29.02
Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)												
1998 – 2002	1.80	1.46	1.39	1.58	1.62	1.67	1.49	1.76	2.05	1.88	1.85	2.15
2005 – 2009	1.67	1.57	1.43	1.52	1.70	1.72	1.66	1.77	1.98	1.97	2.09	1.89
2011 – 2015	1.61	1.76	1.40	1.52	1.41	1.53	1.74	1.57	1.86	1.95	1.90	2.04
Promedio mensual de la T mínima (°C)												
1998 – 2002	21.86	22.19	22.33	22.37	22.51	21.63	21.15	20.76	20.97	21.18	21.05	21.59
2005 – 2009	21.42	21.48	21.57	21.57	21.46	20.78	20.22	19.98	20.31	20.24	20.24	20.63
2011 – 2015	21.84	21.84	22.15	22.35	22.33	22.14	21.34	20.95	20.96	21.14	21.01	21.63
Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)												
1998 – 2002	0.70	0.63	0.62	0.59	0.63	0.61	0.59	0.67	0.49	0.47	0.63	0.51
2005 – 2009	0.51	0.63	0.65	0.99	0.66	0.54	0.55	0.66	0.77	0.54	0.73	0.58
2011 – 2015	0.51	0.55	0.58	0.56	0.57	0.61	1.00	0.63	0.70	0.60	0.71	0.67
Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)												
1998 – 2002	394.52	496.94	671.98	795.86	468.94	199.50	101.70	21.22	82.74	49.82	27.58	164.50
2005 – 2009	479.94	477.42	638.44	559.48	260.70	85.84	53.68	42.88	53.12	27.84	92.62	172.66
2011 – 2015	643.10	461.90	610.48	604.40	372.24	149.70	69.88	18.54	31.60	122.14	31.58	181.46
Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)												
1998 – 2002	20.68	24.86	29.17	31.52	26.92	17.33	11.35	2.40	8.60	5.13	2.46	11.59
2005 – 2009	22.23	25.05	27.70	32.10	18.40	10.54	7.23	4.42	8.12	2.84	13.83	15.54
2011 – 2015	24.80	23.04	30.55	28.74	22.56	10.87	6.14	1.69	4.17	13.72	3.65	13.51
Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria												
1998 – 2002	2.54	2.40	2.40	1.49	2.84	3.78	5.45	6.42	4.80	5.77	4.21	3.41
2005 – 2009	2.34	3.05	1.91	3.29	2.70	5.77	7.11	6.95	9.92	6.51	8.32	4.03
2011 – 2015	1.65	2.67	2.35	1.96	2.75	3.19	4.84	4.75	7.43	6.11	6.38	2.94

Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)												
1998 – 2002	0.64	0.92	0.83	0.75	0.45	0.52	0.28	0.31	0.51	0.45	0.31	0.54
2005 – 2009	0.74	0.93	1.00	0.54	0.44	0.38	0.31	0.32	0.43	0.39	0.29	0.28
2011 – 2015	1.00	0.81	0.68	0.86	0.51	0.51	0.31	0.34	0.39	0.33	0.26	0.45
Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)												
1998 – 2002	0.84	0.88	0.90	0.92	0.86	0.63	0.68	0.49	0.68	0.66	0.57	0.72
2005 – 2009	0.87	0.85	0.88	0.85	0.72	0.61	0.58	0.55	0.56	0.50	0.62	0.80
2011 – 2015	0.92	0.85	0.88	0.88	0.83	0.62	0.58	0.52	0.50	0.66	0.55	0.66
Promedio mensual del número de días de lluvia												
1998 – 2002	26.00	25.80	28.60	28.40	25.20	18.00	16.00	12.20	19.00	19.00	13.40	21.00
2005 – 2009	27.20	25.20	28.40	24.40	20.20	15.20	13.20	12.80	15.60	14.40	13.60	19.00
2011 – 2015	29.60	25.00	27.20	27.20	24.00	17.80	14.40	12.80	13.20	15.80	11.60	18.60
Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)												
1998 – 2002	66.18	100.24	111.42	123.22	103.92	63.78	25.60	8.14	36.50	20.16	9.66	29.70
2005 – 2009	80.20	95.94	102.30	145.44	63.64	31.24	29.94	16.10	25.00	12.26	36.02	54.62
2011 – 2015	101.34	91.04	131.74	111.26	74.94	44.52	21.34	7.06	14.60	53.20	10.48	45.22
Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día)												
1998 – 2002	12.27	13.37	14.38	14.35	11.77	11.04	10.92	11.92	11.77	11.62	10.94	10.93
2005 – 2009	11.49	12.19	13.63	14.03	11.62	10.45	11.37	11.92	12.36	11.90	11.71	11.05
2011 – 2015	11.68	13.40	14.70	14.34	12.56	11.38	11.63	15.01	17.10	15.31	14.20	15.93
Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)												
1998 – 2002	22.30	22.72	23.06	23.04	23.00	22.00	21.52	21.24	21.46	21.64	21.50	22.08
2005 – 2009	22.04	22.20	22.48	22.74	22.38	21.84	21.28	21.18	21.18	20.96	20.96	21.34
2011 – 2015	22.10	22.12	22.54	22.82	22.72	22.40	21.74	21.16	21.08	21.14	21.06	21.62
Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)												
1998 – 2002	0.87	0.89	0.83	0.93	0.96	1.01	1.09	1.01	0.91	0.93	0.82	0.88
2005 – 2009	0.89	0.89	0.92	0.88	0.75	1.01	1.06	0.89	0.87	0.91	0.93	0.89
2011 – 2015	1.03	1.02	1.05	1.15	0.99	1.13	1.04	0.94	1.03	1.01	0.91	0.93

Anexo 12. Datos climáticos de la estación climatológica completa San Gabriel.

Estación	Longitud			Latitud			Altura					
SAN GABRIEL	-77.82			0.60			2860.00					
Promedio mensual de la temperatura (T)máxima (°C)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1998 – 2002	18.19	18.46	18.32	18.24	17.36	16.69	16.73	16.11	17.84	18.83	18.93	18.92
2005 – 2009	17.52	17.77	17.83	17.99	17.74	16.73	16.55	16.63	16.90	18.58	18.87	18.29
2011 – 2015	18.12	17.67	17.95	17.80	17.47	16.43	16.09	16.26	16.85	18.41	18.98	18.07
Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)												
1998 – 2002	1.63	1.90	1.72	1.38	1.43	1.44	1.33	1.83	1.69	2.00	1.78	1.83
2005 – 2009	1.50	1.83	1.47	1.51	1.51	1.38	1.29	1.40	1.54	1.68	1.63	1.65
2011 – 2015	1.54	1.65	1.62	1.42	1.52	1.38	1.26	1.54	1.75	1.61	1.55	1.53
Promedio mensual de la T mínima (°C)												
1998 – 2002	6.69	6.80	6.94	7.28	7.39	6.20	5.84	5.80	4.99	5.97	6.41	6.57
2005 – 2009	7.34	7.16	7.38	7.72	7.33	7.28	6.72	6.71	6.21	7.18	7.61	7.66
2011 – 2015	7.33	7.31	7.67	7.32	7.40	7.28	7.40	6.74	6.55	7.11	7.51	7.58
Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)												
1998 – 2002	1.99	2.12	1.73	1.58	1.64	1.80	1.87	2.08	1.89	2.15	1.96	1.81
2005 – 2009	1.75	2.07	1.75	1.58	1.85	1.65	1.98	1.84	2.03	1.87	1.86	1.78
2011 – 2015	1.94	1.66	1.61	1.73	1.68	1.83	1.71	2.05	2.17	2.00	1.78	1.87
Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)												
1998 – 2002	91.32	94.18	105.18	94.66	123.40	80.94	45.46	50.44	38.64	110.36	97.72	110.56
2005 – 2009	126.64	106.54	125.34	130.92	75.62	63.74	43.60	47.66	39.82	133.97	107.64	159.59
2011 – 2015	71.68	109.10	92.96	96.74	102.04	57.58	56.80	36.12	27.64	78.20	121.48	85.88
Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)												
1998 – 2002	5.64	5.97	7.47	5.99	8.26	4.67	2.82	4.21	2.65	10.49	6.74	6.27
2005 – 2009	7.28	6.70	7.36	7.03	4.30	5.01	3.72	3.17	2.86	8.07	6.57	8.31
2011 – 2015	4.74	6.06	5.15	5.45	6.72	2.63	3.14	2.14	2.05	4.91	6.51	5.04
Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria												
1998 – 2002	3.49	2.80	3.50	2.90	3.56	2.91	3.08	5.67	3.25	6.42	2.83	2.23
2005 – 2009	2.64	2.71	3.02	3.29	2.88	4.23	6.45	3.75	3.51	2.68	3.10	3.10
2011 – 2015	3.14	2.24	2.98	2.62	4.18	2.51	2.92	3.61	3.87	3.27	2.25	2.52

Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)												
1998 – 2002	0.34	0.41	0.43	0.51	0.54	0.61	0.46	0.36	0.37	0.27	0.43	0.40
2005 – 2009	0.39	0.42	0.48	0.54	0.41	0.40	0.46	0.50	0.32	0.45	0.40	0.43
2011 – 2015	0.34	0.45	0.59	0.51	0.66	0.69	0.48	0.42	0.35	0.44	0.44	0.46
Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)												
1998 - 2002	0.70	0.63	0.65	0.68	0.72	0.71	0.60	0.69	0.54	0.62	0.64	0.66
2005 - 2009	0.77	0.69	0.68	0.78	0.67	0.67	0.63	0.57	0.66	0.64	0.66	0.81
2011 - 2015	0.69	0.72	0.66	0.68	0.69	0.77	0.76	0.72	0.61	0.66	0.67	0.67
Promedio mensual del número de días de lluvia												
1998 - 2002	17.40	16.40	17.60	19.40	21.00	21.20	17.20	17.80	13.80	13.00	17.40	17.40
2005 - 2009	19.60	16.80	19.00	22.20	18.40	17.40	18.40	17.40	15.40	17.60	17.40	22.60
2011 - 2015	16.80	18.40	20.20	19.00	21.60	23.60	21.40	19.60	15.20	18.20	17.40	18.80
Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)												
1998 - 2002	20.16	22.36	31.12	21.58	25.38	18.36	12.26	15.76	7.60	37.20	24.98	21.06
2005 - 2009	28.08	25.98	27.68	30.06	16.40	19.24	15.89	10.86	11.06	29.96	28.08	30.90
2011 - 2015	18.60	22.92	19.10	23.10	24.24	9.06	11.50	9.16	8.08	20.86	24.60	15.94
Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día)												
1998 - 2002	16.18	15.89	15.06	15.14	14.23	14.40	15.20	16.12	16.96	17.73	16.23	16.34
2005 - 2009	14.55	15.76	14.22	14.98	15.36	14.29	15.27	15.42	15.78	16.13	15.98	15.32
2011 - 2015	15.22	14.59	14.71	14.91	14.18	14.05	14.75	15.59	15.54	15.65	15.77	14.66
Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)												
1998 - 2002	9.18	9.28	9.52	9.90	9.52	8.82	8.34	7.84	8.12	8.80	9.38	9.58
2005 - 2009	9.20	8.82	9.22	9.36	9.14	9.10	8.44	8.22	7.80	8.58	9.08	9.26
2011 - 2015	9.66	9.82	10.24	10.02	10.26	9.78	9.10	8.78	8.58	9.50	9.96	9.92
Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)												
1998 - 2002	0.68	0.62	0.65	0.67	0.71	0.76	0.72	0.81	0.71	0.82	0.69	0.78
2005 - 2009	0.68	0.77	0.72	0.73	0.64	0.78	0.88	0.93	0.77	0.78	0.67	0.72
2011 - 2015	0.99	0.86	1.01	1.08	1.03	1.12	1.23	1.25	1.29	1.13	1.09	1.02

Anexo 13. Datos climáticos de la estación climatológica completa Otavalo.

Estación	Longitud			Latitud			Altura					
OTAVALO	-78.25			0.24			2550.00					
Promedio mensual de la temperatura (T)máxima (°C)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1998 – 2002	20.92	21.13	20.99	21.23	20.95	20.99	21.46	22.09	22.13	22.45	21.48	21.56
2005 – 2009	21.40	21.60	21.40	21.68	21.97	21.53	22.13	22.34	22.63	22.79	22.30	21.76
2011 – 2015	21.33	20.92	21.37	21.50	21.34	21.49	21.80	22.05	22.59	21.92	22.17	21.84
Desviación estándar mensual de la T. máxima diaria (°C)												
1998 – 2002	1.41	1.46	1.60	1.46	1.66	1.59	1.27	1.59	1.57	1.41	1.42	1.45
2005 – 2009	1.48	1.67	1.63	1.56	1.58	1.76	1.60	1.54	1.60	1.75	1.48	1.45
2011 – 2015	1.43	1.46	1.55	1.53	1.59	1.55	1.48	1.28	1.54	1.67	1.55	1.39
Promedio mensual de la T mínima (°C)												
1998 – 2002	8.71	8.44	8.49	8.14	7.98	7.57	6.94	6.44	7.62	8.36	9.15	9.17
2005 – 2009	8.55	8.51	9.33	9.37	8.78	7.96	6.45	6.90	6.57	8.34	8.79	9.22
2011 – 2015	8.67	9.26	9.40	9.01	9.14	8.31	7.75	7.17	7.03	8.89	9.27	8.76
Desviación estándar mensual de la T mínima diaria (°C)												
1998 – 2002	1.96	1.98	1.70	1.68	1.67	1.95	1.87	2.01	2.06	2.30	2.00	1.83
2005 – 2009	1.98	2.22	1.79	1.49	1.79	1.76	2.05	2.00	1.96	1.93	2.09	1.75
2011 – 2015	1.96	1.72	1.60	1.66	1.66	1.83	1.90	2.16	2.16	2.03	1.94	2.00
Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH ₂ O)												
1998 – 2002	71.52	100.30	106.38	121.52	116.38	49.26	13.78	10.12	59.98	67.76	74.78	75.80
2005 – 2009	82.30	82.10	170.84	138.96	84.04	54.79	16.06	19.78	18.32	91.62	114.06	111.06
2011 – 2015	87.86	101.41	105.72	137.56	99.38	18.36	22.82	16.82	30.54	103.68	85.74	61.98
Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)												
1998 – 2002	4.43	7.15	7.20	6.68	6.47	4.07	1.76	1.40	4.51	5.14	5.27	5.11
2005 – 2009	5.22	6.36	7.88	7.80	4.94	4.55	1.92	1.77	2.49	5.30	6.88	5.53
2011 – 2015	7.91	5.77	5.76	7.87	7.06	1.75	2.77	2.17	4.56	6.10	5.39	4.87
Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria												
1998 – 2002	2.42	3.01	3.15	2.22	2.86	4.61	7.26	8.38	3.23	3.99	3.41	3.32
2005 – 2009	2.64	3.49	1.77	3.28	2.34	4.26	6.02	3.78	6.37	2.42	2.79	1.91
2011 – 2015	4.90	1.81	2.27	2.84	3.70	4.06	6.33	4.65	7.97	2.27	2.65	3.79

Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)												
1998 – 2002	0.22	0.24	0.28	0.45	0.30	0.24	0.11	0.11	0.29	0.23	0.27	0.29
2005 – 2009	0.32	0.23	0.43	0.45	0.27	0.24	0.13	0.19	0.13	0.33	0.31	0.33
2011 – 2015	0.19	0.37	0.28	0.29	0.29	0.15	0.13	0.09	0.12	0.30	0.32	0.21
Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)												
1998 - 2002	0.59	0.65	0.67	0.66	0.74	0.54	0.38	0.35	0.57	0.58	0.55	0.58
2005 - 2009	0.65	0.66	0.74	0.76	0.66	0.58	0.32	0.38	0.38	0.62	0.69	0.72
2011 - 2015	0.68	0.62	0.74	0.77	0.61	0.47	0.51	0.35	0.44	0.60	0.68	0.58
Promedio mensual del número de días de lluvia												
1998 - 2002	11.80	12.60	15.20	17.60	17.60	11.20	4.80	4.60	12.00	11.40	12.00	12.80
2005 - 2009	14.80	12.20	19.40	19.80	14.60	11.40	5.60	7.40	5.20	14.60	16.00	17.80
2011 - 2015	12.00	14.80	16.80	17.40	14.20	7.20	7.00	4.00	5.40	13.60	14.80	10.60
Máxima lluvia de media hora por mes (lluvia máxima para 24 horas)												
1998 - 2002	14.26	28.88	29.42	21.82	24.32	13.96	6.86	4.64	16.64	19.00	23.66	18.74
2005 - 2009	19.02	26.38	29.80	35.96	16.16	19.19	7.66	7.68	11.92	17.34	25.18	17.77
2011 - 2015	34.78	17.26	19.74	30.42	21.36	6.62	9.60	6.44	18.50	23.68	21.24	17.96
Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día)												
1998 - 2002	15.96	15.70	15.71	15.31	14.51	15.67	16.71	17.67	16.53	17.73	16.54	16.45
2005 - 2009	14.88	15.81	14.73	14.30	15.04	14.57	16.20	16.06	16.83	16.15	16.23	15.68
2011 - 2015	15.50	14.97	14.62	13.70	13.75	14.37	15.06	15.87	16.83	16.15	16.56	16.24
Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)												
1998 - 2002	11.06	11.14	11.48	11.76	11.30	10.32	9.50	8.60	9.94	10.54	11.28	11.72
2005 - 2009	11.30	11.26	11.70	12.06	12.00	10.98	9.38	9.34	8.72	10.68	11.32	11.56
2011 - 2015	11.10	11.46	11.58	11.50	11.44	10.14	9.36	8.92	8.98	10.96	11.66	11.14
Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)												
1998 - 2002	1.07	0.97	0.99	1.03	1.07	1.16	1.31	1.31	1.17	1.13	1.12	1.08
2005 - 2009	1.16	1.14	1.09	1.04	1.16	1.21	1.35	1.29	1.32	1.11	1.09	1.12
2011 - 2015	0.98	0.84	0.80	0.92	0.86	1.12	1.33	1.27	1.10	0.93	0.94	0.91

Anexo 4. Datos edafológicos para el modelo hidrológico SWAT

Anexo 14. Criterios de clasificación de suelo.

PARÁMETROS	CÓDIGO	RANGO	DESCRIPCIÓN
PENDIENTE (%)	1	0-5	Llano
	2	5-12	Ondulado
	3	12- 25	Fuertemente Ondulado
	4	12-25 (micro relieve)	Ligeramente Montañoso
	5	25-50	Moderadamente montañoso
	6	50-70	Montañoso
	7	>70	Escarpado
Textura	1	Arenoso	Gruesa
	2	franco arenoso	Moderadamente Gruesa
		franco limoso	
	3	Franco	Media
		Limoso	
		franco arcilloso arenoso	
	4	franco arcilloso	Fina
		arcilloso arenoso	
		arcillo limoso	
	5	Arcilloso	Muy fina
PROFUNDIDAD (cm)	1	0-20	Superficial
	2	20-50	Poco profundidad
	3	50-100	Moderadamente profunda
	4	>100	Profunda
PEDREGOSIDAD (%)	1	<10	Sin
	2	10-25	Pocas
	3	25-50	Frecuentes
	4	50-75	Abundantes
	5	>75	Pedregoso o rocoso
DRENAJE	1	A	Excesivo
	2	B	Bueno
	3	C	Moderado
	4	D	Mal drenado (imperfecto)
Ph	1	<4,5	Muy ácido
	2	4,5- 5,5	Ácido
	3	5,6- 6,5	Ligeramente ácido
	4	6,6 - 7,4	Neutro
	5	7,5- 8,5	Moderadamente alcalino
	6	> 8,5	Alcalino
MATERIA ORGÁNICA (%)	1	<1	Muy bajo
	2	1-2	Bajo
	3	2-4	Medio
	4	4-10	Alto
	5	>10	Muy alto
SALINIDAD (mmhos/cm)	1	0-2	Sin
	2	2-4	Ligera
	3	4-8	Media
	4	8-16	Alta
	5	>16	Muy alta
NIVEL DE FERTILIDAD	1	Mb	Muy baja
	2	B	Baja
	3	M	Mediana
	4	A	Alta

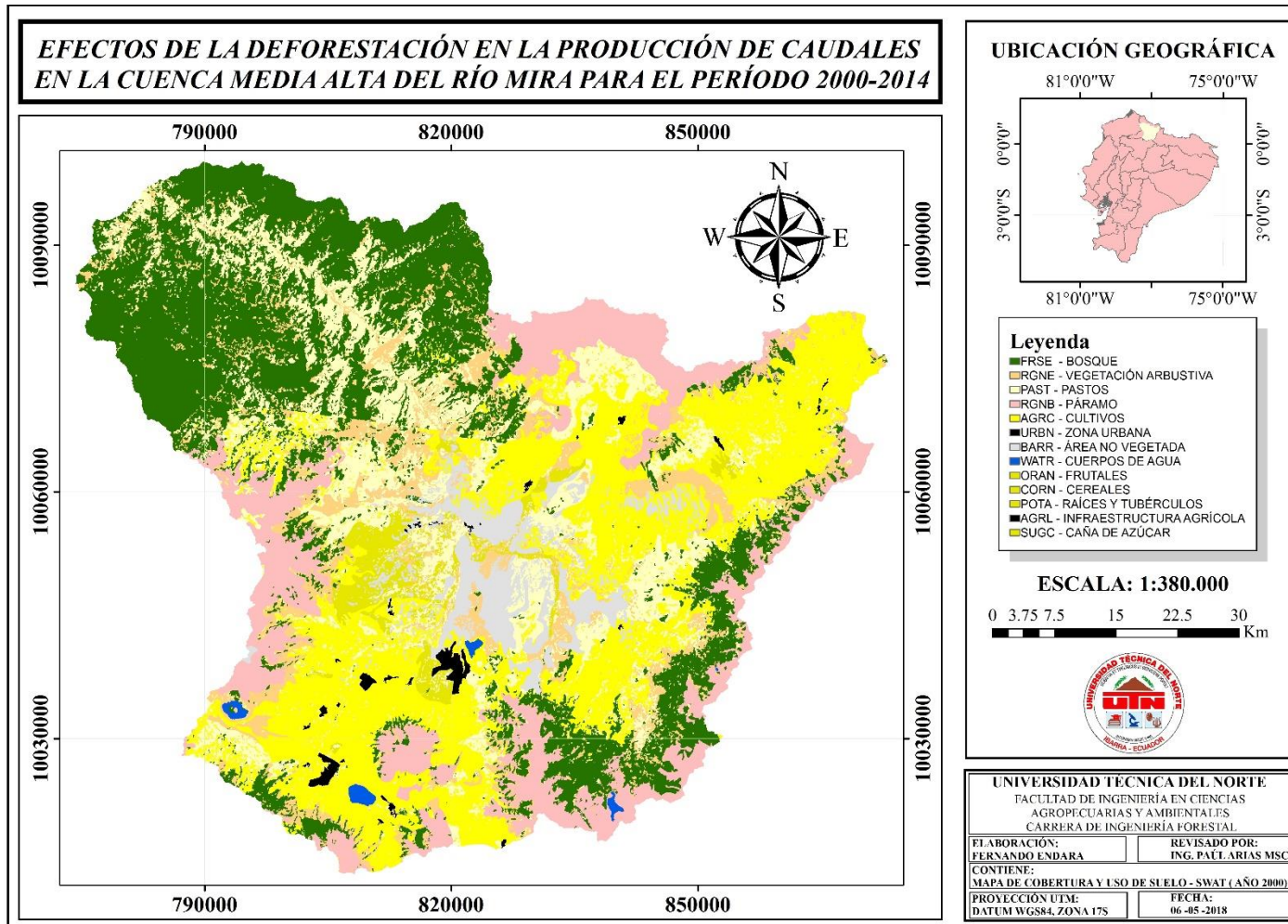
Fuente: SNI (2014).

Anexo 15. Parámetros ingresados al modelo SWAT.

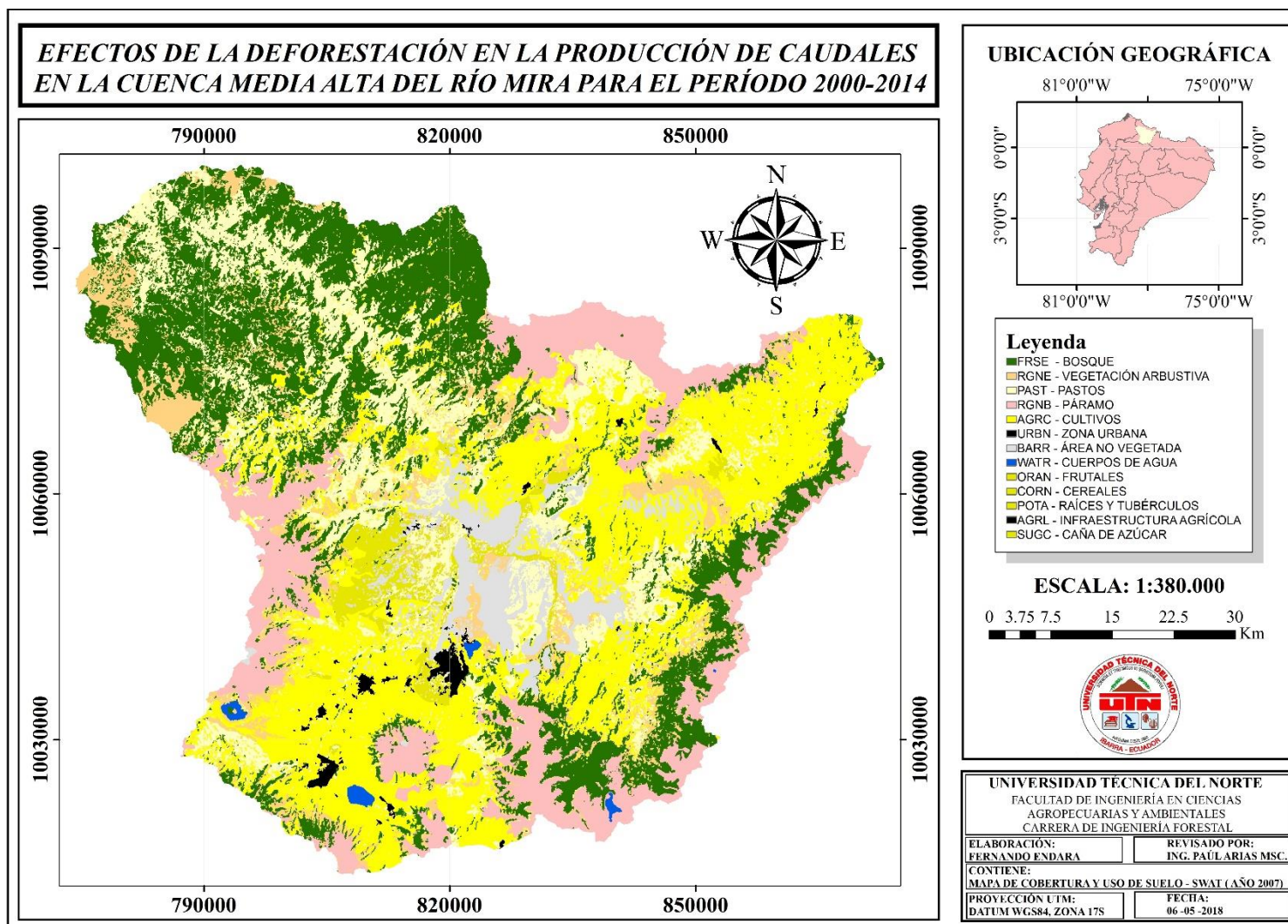
Nro.	SNAM	Textura	HYDGRP	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_CBN	SOL_K	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_A LB	USLE_K
1	BASEOn	Nieve y hielo	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT
2	DYSTROPEPT	Franco arenoso	B	1000	1.46 g/cm3	0.1	2.32	50.34	10	25	65	8	0.121	0.487
3	HAPLUSTOLL	Franco arenoso	B	1000	1.46 g/cm3	0.1	1.74	50.34	10	25	65	8	0.181	0.547
4	HAPLUDOLL	Franco arenoso	B	1000	1.46 g/cm3	0.1	2.32	50.34	10	25	65	8	0.121	0.487
5	HAPLUSTOLL (ARGIUSTOLL)	Franco arenoso	B	1000	1.46 g/cm4	0.1	1.74	50.34	10	25	65	8	0.181	0.547
6	ARGIUSTOLL	Arcilloso	D	750	1.28 g/cm3	0.11	1.74	0.44	60	18	22	8	0.181	0.16
7	TROPOHEMIST (CRYAQUEPT)	Franco	C	350	1.44 g/cm3	0.14	2.32	18.6	18	40	42	8	0.121	0.42
8	VITRANDEPT	Arenoso	A	1000	1.42 g/cm3	0.04	1.16	114.05	5	3	92	8	0.27	0.686
9	DURUSTOLL	Franco arcillo arenoso	C	350	1.51 g/cm3	0.1	1.74	7.84	28	12	60	8	0.181	0.382
10	TORRIPSAMMENT	Arenoso	A	1000	1.42 g/cm3	0.04	1.16	114.05	5	3	92	8	0.2H7	0.686
11	HYDRANDEPT	Franco limoso	C	1000	1.40 g/cm3	0.19	1.74	24.1	10	65	25	80	0.181	0.572
12	ARGIUDOLL	Arcilloso	D	750	1.28 g/cm3	0.11	1.74	0.44	60	18	22	8	0.181	0.16
13	TROPORTHENT	Arenoso	A	100	1.42 g/cm3	0.04	1.74	114.05	5	3	92	37	0.181	0.618
14	USTORTHENT	Arcillo arenoso	C	100	1.48 g/cm3	0.11	0.58	0.84	42	6	52	8	0.402	0.317
15	TROPAQUEPT	Franco Acillo limoso	C	1000	1.30 g/cm3	0.17	1.74	5.93	34	56	10	8	0.181	0.324
16	TROPORTHENT + DYSTRANDEPT	Arenoso	A	1000	1.42 g/cm3	0.04	1.74	114.05	5	3	92	8	0.181	0.618
17	DURIUDOLL	Arcillo arenoso	C	350	1.48 g/cm3	0.11	1.74	0.84	42	6	52	8	0.181	0.273
18	USTIPSAMMENT	Arenoso	A	1000	1.42 g/cm3	0.04	0.58	114.05	5	3	92	8	0.402	0.754
19	DYSTRANDEPT	Franco limoso	C	1000	1.40 g/cm3	0.19	1.74	24.1	10	65	25	8	0.181	0.572

Nro.	SNAM	Textura	HYDGRP	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_CBN	SOL_K	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
20	EUTRANDEPT	Franco limoso	C	1000	1.40 g/cm3	0.19	2.32	24.1	10	65	25	8	0.121	0.512
21	DURIUDOLL + HAPLUDOLL	Arcillo arenoso	C	350	1.48 g/cm3	0.11	1.74	0.84	42	6	52	37	0.181	0.273
22	HYDRANDEPT + TROPORTHENT	Franco	C	1000	1.44 g/cm3	0.14	1.74	18.6	18	40	42	37	0.181	0.469
23	HAPLUDOLL + ARGIUSTOLL	Franco arcilloso	C	750	1.40 g/cm3	0.14	2.32	4.56	34	33	33	8	0.121	0.287
24	TROPORTHENT (DYSTROPEPT)	Arcillo arenoso	C	750	1.48 g/cm3	0.11	1.74	0.84	42	6	52	8	0.181	0.273
25	BASEEr	Afloramiento rocoso	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT
26	BASEWn	Cuerpos de Agua	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT
27	BASEUDD	Zona urbana (Poblaciones)	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	SWAT

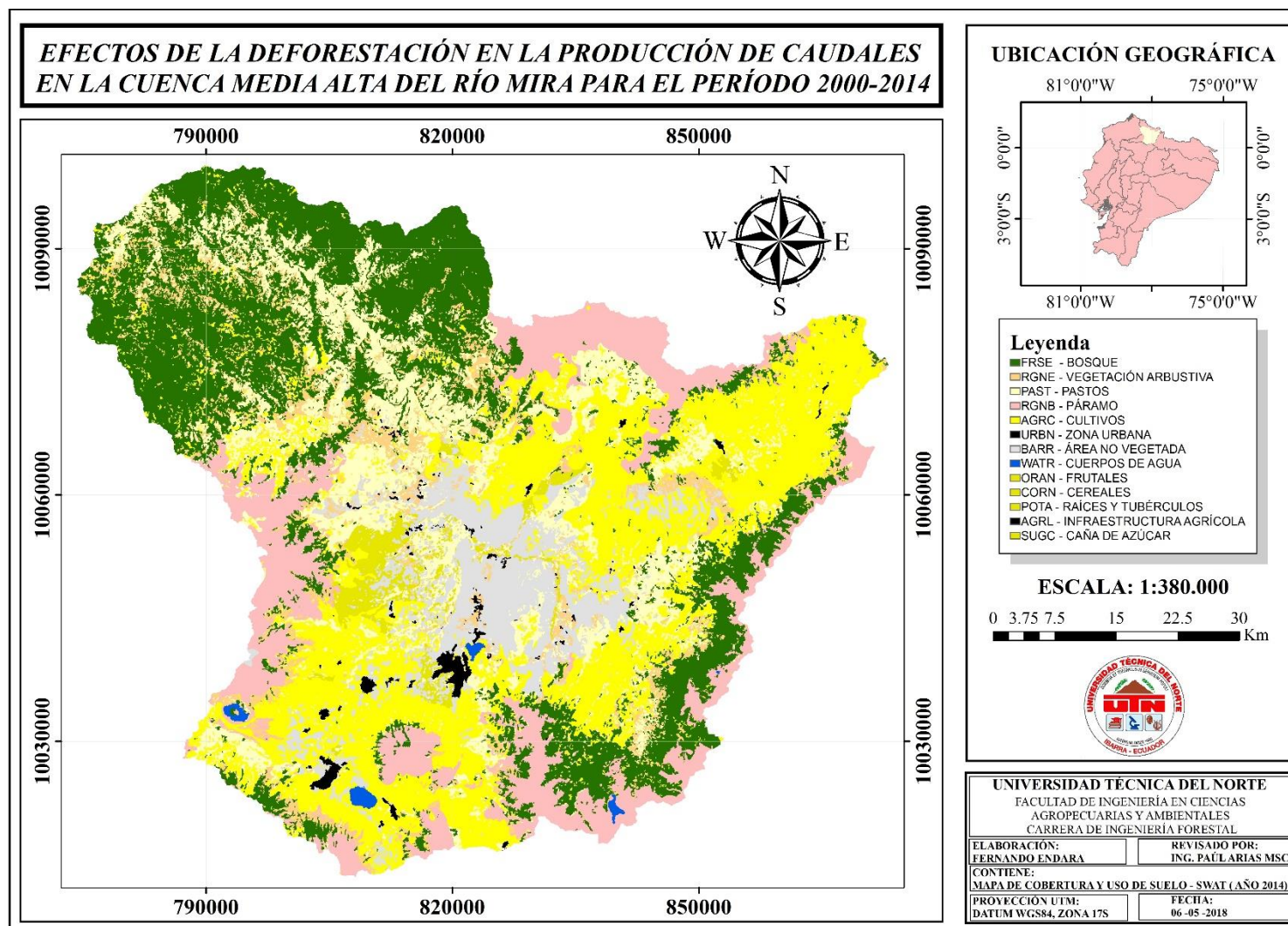
Anexo 5. Mapas del modelo hidrológico SWAT



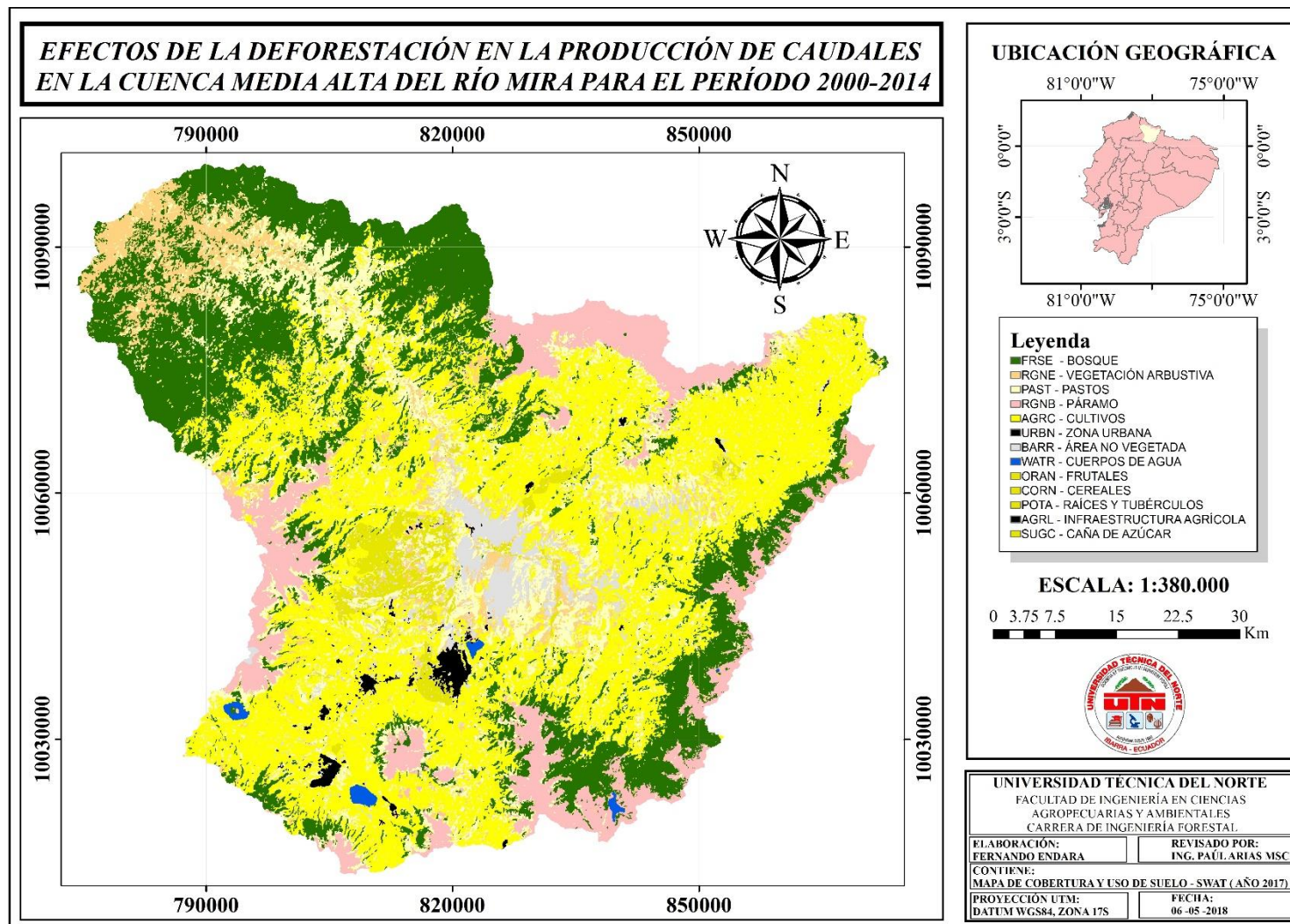
Anexo 16. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2000).



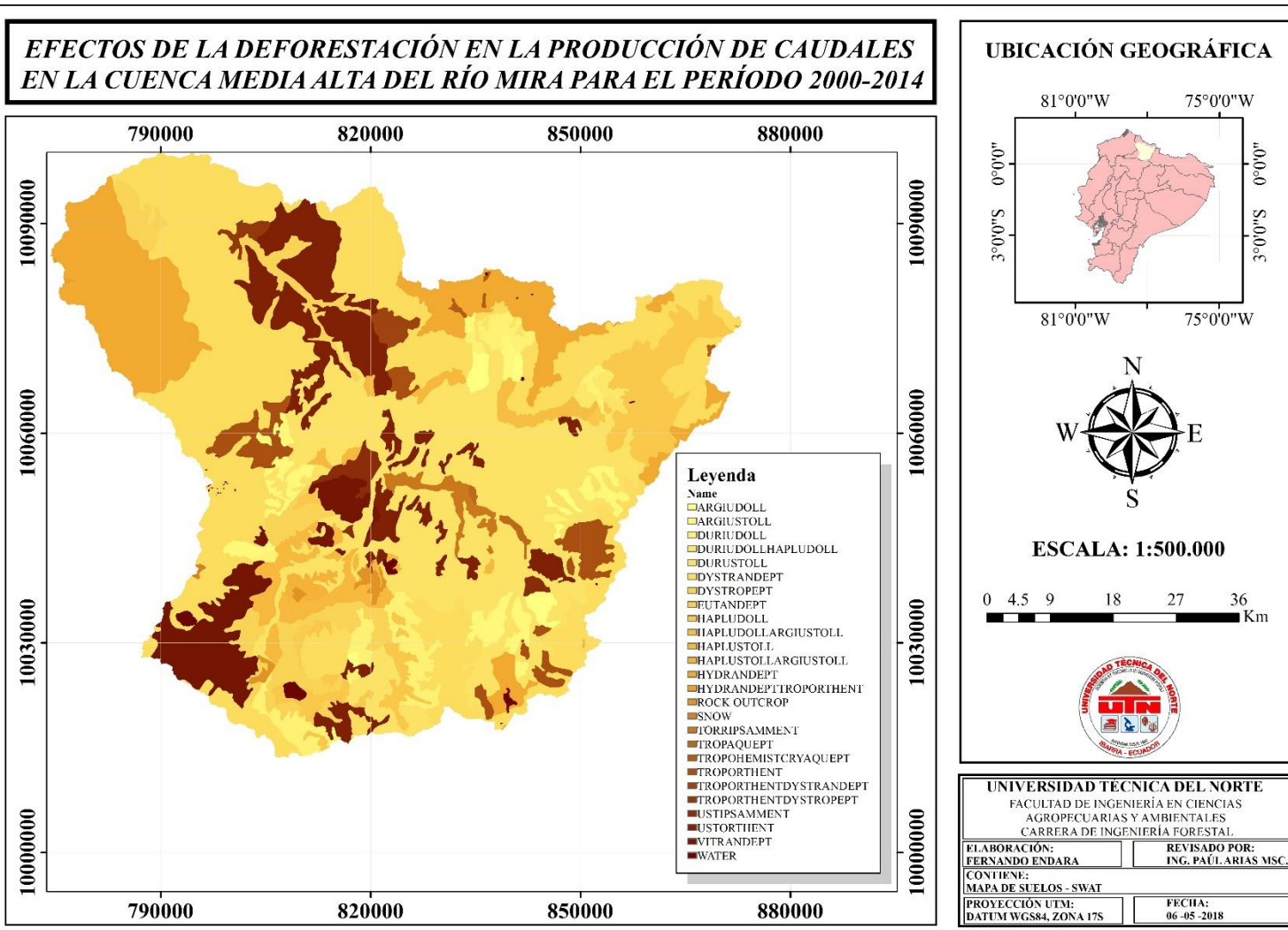
Anexo 17. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2007).



Anexo 18. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2014).

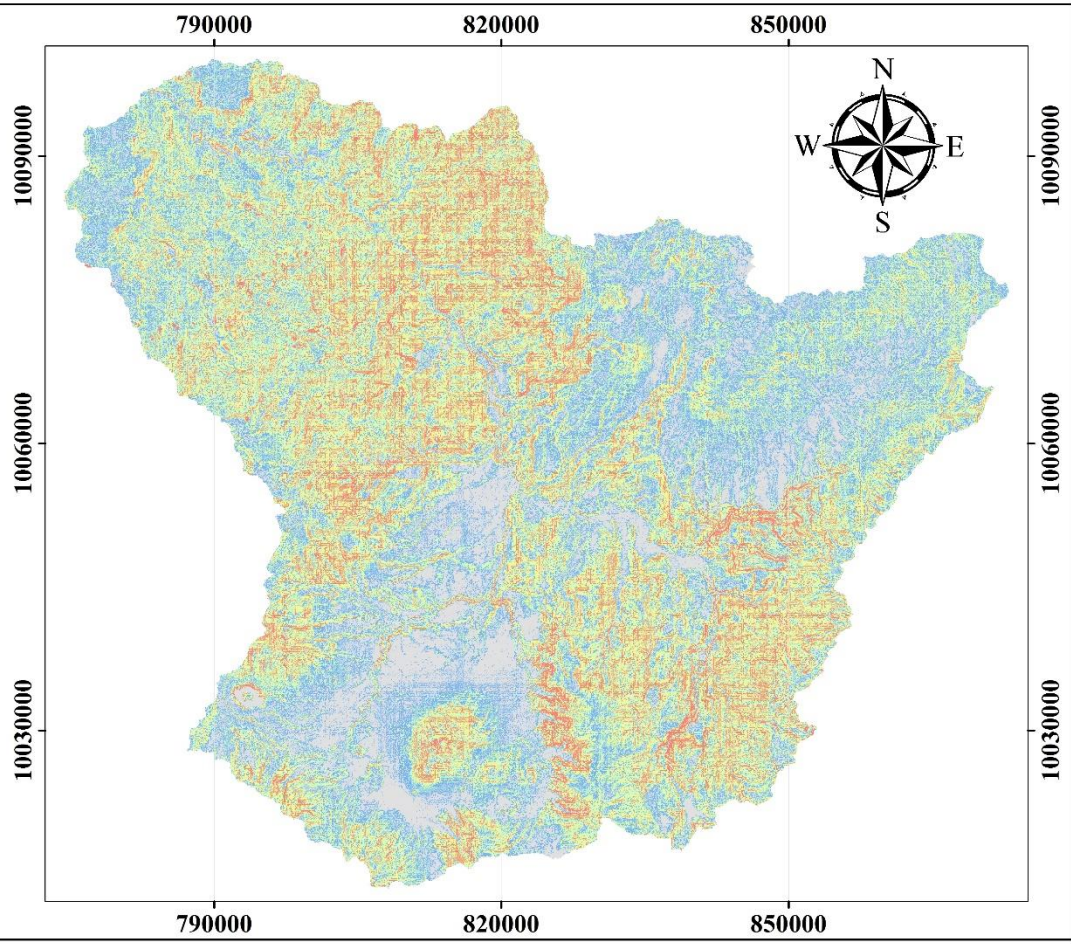


Anexo 19. Cobertura y uso del suelo - código SWAT (año 2017).

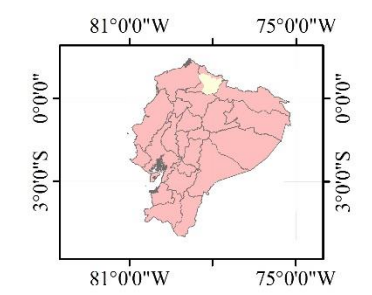


Anexo 20. Mapa de clasificación de suelos - SWAT.

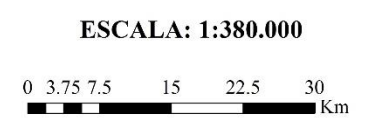
EFFECTOS DE LA DEFORESTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES EN LA CUENCA MEDIA ALTA DEL RÍO MIRA PARA EL PERÍODO 2000-2014



UBICACIÓN GEOGRÁFICA

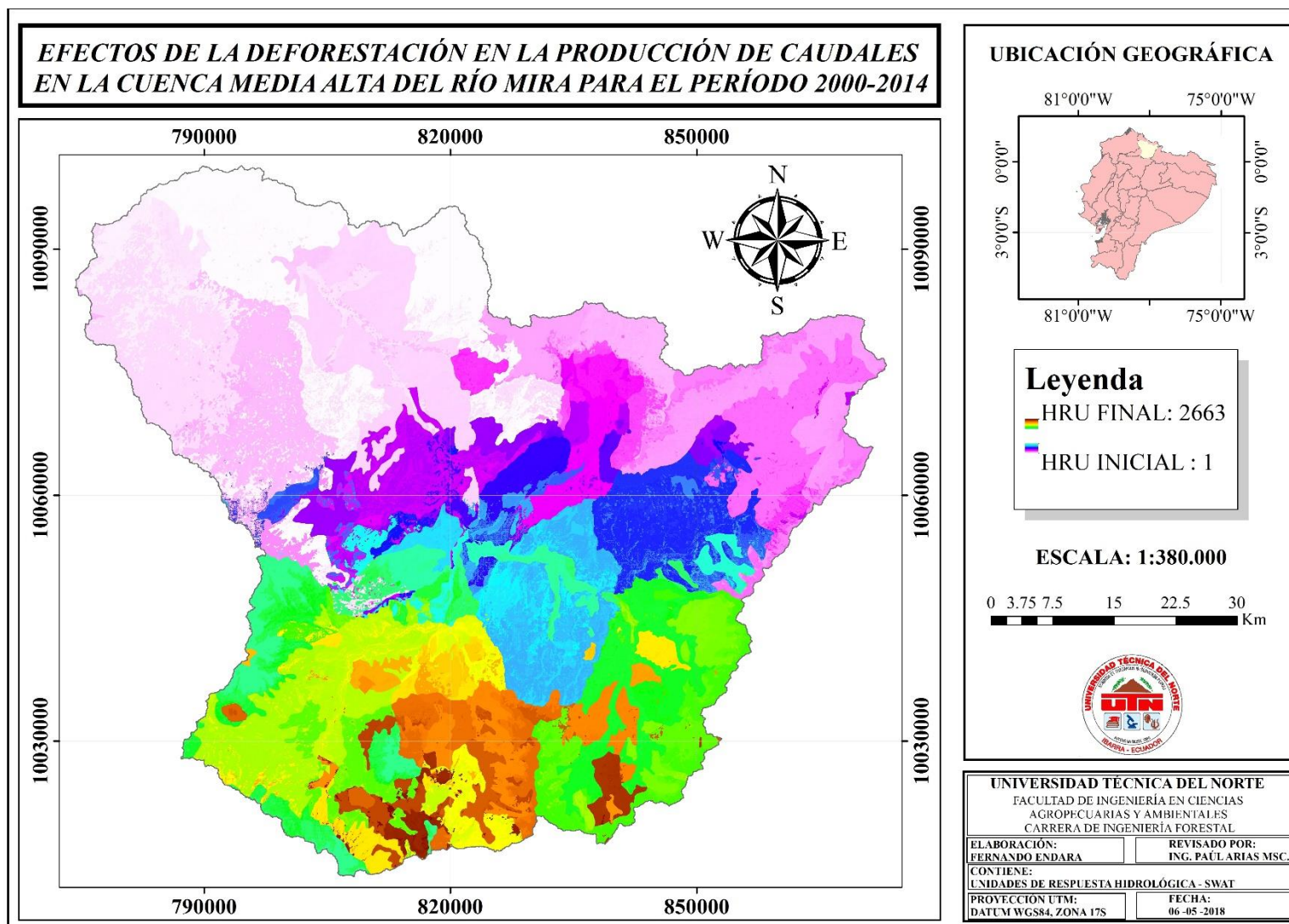


- Leyenda**
- 00 - 12 LLANO - ONDULADO
 - 12 - 25 FUERTEMENTE ONDULADO
 - 25 - 50 MODERADAMENTE MONTAÑOSO
 - 50 - 75 MONTAÑOSO
 - > 75 ESCARPADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL	
ELABORACIÓN: FERNANDO ENDARA	REVISADO POR: ING. PAÚL ARIAS MSC.
CONTIENE: MAPA DE PENDIENTES - SWAT	
PROYECCIÓN UTM: DATUM WGS84, ZONA 17S	FECHA: 06-05-2018

Anexo 21. Mapa de pendientes - SWAT.



Anexo 22. Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

Anexo 6. Resultados del modelo SWAT.

Anexo 23. Resultados de la simulación inicial.

Caudales simulados para el año 2000						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET Eva. Potencial	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	65.91	19.55	97.81	42.13	76.08	62.38
Febrero	89.46	27	102.19	35.15	59.79	57.86
Marzo	106.74	32.28	102.15	48.53	68.12	59.05
Abril	112.47	31.57	100.08	57.7	72.37	57.38
Mayo	176.32	50.09	102.68	57.11	72.01	103.84
Junio	64.91	7.32	103.23	48.35	59.63	45.64
Julio	30.41	1.28	83.69	45.78	77.15	24.34
Agosto	23.62	0.46	73.34	31.78	75.96	8.08
Septiembre	48.92	0.93	78.81	37.57	75.82	6.76
Octubre	27.51	2.05	63.75	37.03	99.68	6.18
Noviembre	96.72	16.91	88.98	37.77	72.67	16.9
Diciembre	81.77	18.91	90.9	47.34	80.81	25.73
Σ (2000)	924.75	208.36	90.9	526.24	890.08	474.14

Caudales simulados para el año 2007						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET Eva. Potencial	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	94.57	25.82	94.39	44.21	72.06	33.23
Febrero	52.96	11.05	97.23	31.36	72.29	24.77
Marzo	132.24	33.03	101.66	63.52	89.31	46.31
Abril	163.96	63.01	98.58	56.99	69.08	72.66
Mayo	74.24	16.32	89.19	55.74	70.34	53.99
Junio	32.2	1.37	71.84	44.86	72.74	32.27
Julio	21.75	0.21	58.33	33.3	82.44	13.06
Agosto	15.87	0.35	49.91	22.82	90.47	3.19
Septiembre	10.98	0.43	40	19.9	93.27	2.55
Octubre	104.11	18.17	68.43	38.29	80.35	20.04
Noviembre	170.79	48.8	96.61	51.57	71.9	52.47
Diciembre	158.8	62.18	103.56	49.24	66.92	70.89
Σ (2007)	1032.47	280.75	103.56	511.79	931.17	425.43

Caudales simulados para el año 2014						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET (Eva. Potencial)	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	69.2	18.66	98.83	45.34	70.45	61.12
Febrero	85.87	23.88	104.36	39.45	62.3	48.04
Marzo	159.75	69.28	102.19	42.66	57.8	72.66
Abril	101.81	26.82	93.18	57.89	75.59	47.33
Mayo	65.53	8.16	88.05	53.67	70	28.92
Junio	58.92	9.02	86.83	43.48	59.54	21.14
Julio	71.87	18.53	87.69	38.21	59.78	27.27
Agosto	34.78	3.56	77.6	37.68	75.6	16.71
Septiembre	19.31	0.03	65.18	30.39	84.31	6.71
Octubre	132.72	28.74	98.75	43.33	73.86	27.42
Noviembre	120.37	49.39	93.86	48.73	72.45	48.28
Diciembre	79.5	11.85	100.33	59.98	82.54	42.33
Σ (2014)	999.63	267.92	102.19	540.81	844.23	447.94

Anexo 24. Resultados de la simulación de los modelos calibrados.

Caudales simulados para el año 2000						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET Eva. Potencial	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	65.91	22.09	97.91	42.16	76.08	69.98
Febrero	89.46	34.77	102.63	35.23	59.79	59.16
Marzo	106.74	41.36	102.4	48.61	68.12	60.64
Abril	112.47	39.25	100.33	57.75	72.37	59.11
Mayo	176.32	84.15	102.85	57.19	72.01	80.9
Junio	64.91	8.28	103.43	48.41	59.63	61.81
Julio	30.41	1.51	83.85	45.87	77.15	42.55
Agosto	23.62	0.47	73.42	31.86	75.96	24.61
Septiembre	48.92	0.97	79	37.66	75.82	16.28
Octubre	27.51	2.55	63.92	37.22	99.68	10.76
Noviembre	96.72	20.12	89.04	37.89	72.67	16.15
Diciembre	81.77	21.12	91.12	47.45	80.81	24.53
Σ (2000)	924.75	276.64	91.12	527.29	890.08	526.48

Caudales simulados para el año 2007						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET Eva. Potencial	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	94.57	28.98	94.44	44.29	72.06	37.44
Febrero	52.96	11.89	97.43	31.4	72.29	28.87
Marzo	132.24	43.38	102.16	63.71	89.31	40.46
Abril	163.96	80.85	98.8	57.06	69.08	54.92
Mayo	74.24	18.32	89.24	55.8	70.34	42.88
Junio	32.2	1.5	71.83	44.92	72.74	33.86
Julio	21.75	0.21	58.4	33.25	82.44	30.76
Agosto	15.87	0.49	50.1	22.8	90.47	26.44
Septiembre	10.98	0.49	40.08	19.99	93.27	23.27
Octubre	104.11	23.53	68.72	38.43	80.35	31.77
Noviembre	170.79	63.99	97.67	51.78	71.9	42.21
Diciembre	158.8	76.29	103.84	49.42	66.92	50.87
Σ (2007)	1032.47	349.92	103.84	512.85	931.17	443.75

Caudales simulados para el año 2014						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET (Eva. Potencial)	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	69.2	19.44	98.57	46.42	70.45	56.22
Febrero	120.37	55.47	93.58	49.61	72.45	38.79
Marzo	159.75	78.48	102.23	43.32	57.8	56.9
Abril	65.53	9.12	87.86	54.28	70	36.27
Mayo	101.81	31.98	93.25	58.64	75.59	48.2
Junio	58.92	9.73	86.54	43.9	59.54	28.16
Julio	71.87	22.28	87.48	38.74	59.78	29.12
Agosto	34.78	3.71	77.04	38.31	75.6	21.27
Septiembre	19.31	0.03	64.32	30.72	84.31	12.97
Octubre	132.72	35.45	99.01	44.01	73.86	21.77
Noviembre	85.87	27.16	104.46	40.39	62.3	47.26
Diciembre	79.5	12.95	100.23	60.94	82.54	47.8
Σ (2014)	999.63	305.8	102.23	549.29	844.23	444.72

Anexo 25. Simulación para el año 2017.

Caudales simulados para el año 2017						
MES	PREC (Precipitación)	PERCOLATE (Percolación)	SW Contenido de agua	ET (Eva. Real)	PET (Eva. Potencial)	WATER YIELD (Caudal mensual)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Enero	102.15	37.01	101.52	46.29	69.47	61.46
Febrero	106.94	48.47	98.85	42.04	60.77	55.82
Marzo	61.94	12.26	83.97	57.2	80.67	47.76
Abril	117.33	28.69	102.77	52.41	70.6	39.85
Mayo	93.29	30.13	92.52	59.17	75.06	40.84
Junio	33.87	1.99	78.16	43.24	65.52	30.73
Julio	30.76	0.39	68.39	37.63	78.35	18.65
Agosto	29.42	1.1	67.26	26.85	78.06	9.9
Septiembre	29.12	2.06	63.53	28.3	74.59	7.41
Octubre	102.26	24.7	88.11	38.83	81.88	16.63
Noviembre	101.65	30.53	94.9	48.59	75.82	30.82
Diciembre	90.64	24.39	101.34	47.52	78.64	34.97
Σ (2014)	899.36	41.72	101.34	528.08	889.41	394.86

Anexo 7. Registro fotográfico de la fase de campo

Anexo 26. Fotografías del trabajo de campo.



Fotografía 1. GPS para georreferenciación de la cobertura y uso de suelo.



Fotografía 2. Georreferenciación de cobertura vegetal de Páramo



Fotografía 3. Georreferenciación de cobertura vegetal de Pasto



Fotografía 4. Georreferenciación de cobertura vegetal de Vegetación arbustiva



Fotografía 5. Georreferenciación de cobertura vegetal de Cultivos



Fotografía 6. Georreferenciación de cobertura vegetal de Cultivos



Fotografía 7. Georreferenciación de cobertura vegetal de Cultivos



Fotografía 8. Georreferenciación de cobertura vegetal de Bosque



Fotografía 11. Georreferenciación de cobertura vegetal de Bosque



Fotografía 12. Georreferenciación de Cuerpos de agua



Fotografía 11. Georreferenciación de Cuerpos de agua



Fotografía 12. Georreferenciación de Zona urbana