



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS
Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES**

**“IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS ÁREAS
PRODUCTORAS DE AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO
MAGDALENA, CANTÓN COTACACHI.”**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

AUTORA: MISHEL ESTEFANY GONZALES VARGAS

DIRECTOR: ING. OSCAR ROSALES, Msc

Ibarra-Ecuador

2017

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES

**"IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LAS ÁREAS
PRODUCTORAS DE AGUA DE LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA,
CANTÓN COTACACHI"**

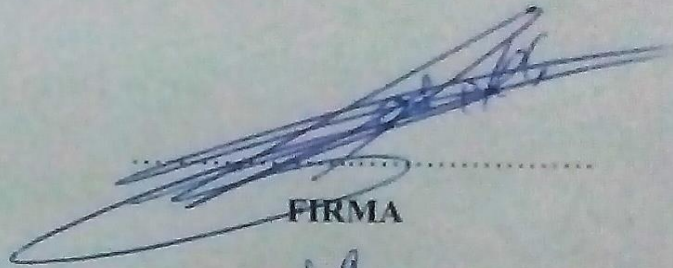
Trabajo de titulación revisado por el Comité Asesor previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADO:

MSc. Óscar Rosales

DIRECTOR



.....

FIRMA

Blgo. Renato Oquendo

ASESOR



.....

FIRMA

MSc. Mónica León

ASESORA

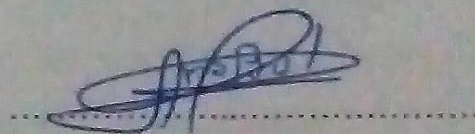


.....

FIRMA

MSc. Paúl Arias

ASESOR



.....

FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1719009720		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gonzales Vargas Mishel Estefany		
DIRECCIÓN:	Av. Vicente Rocafuerte y Tobías Mena		
EMAIL:	mishelstefany92@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	612-253	TELÉFONO MÓVIL:	0988930152

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Impacto del cambio de uso del suelo en las áreas productoras de agua de la cuenca del río Magdalena, cantón Cotacachi.
AUTORA:	Gonzales Vargas Mishel Estefany
FECHA:	2017-10-20
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Óscar Rosales MSc.

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, **Mishel Estefany Gonzales Vargas**, con cédula de identidad Nro. 1719009720, en calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 20 días del mes de octubre de 2017

LA AUTORA:



Mishel Estefany Gonzales Vargas



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, **Mishel Estefany Gonzales Vargas**, con cédula de identidad Nro. **1719009720**, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autora de la obra o trabajo de grado denominado: **Impacto del cambio de uso del suelo en las áreas productoras de agua de la cuenca del río Magdalena, cantón Cotacachi**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniera en Recursos Naturales Renovables** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 20 días del mes de octubre de 2017

Nombre: **Mishel Estefany Gonzales Vargas**

Cédula: **1719009720**

DEDICATORIA

Con todo mi amor, a mi abuelita, que cuida y guía mis pasos desde el cielo.

A mis padres Dani y José, mi hermana Jenny y mi sobrina Amelia.

A los amores de mi vida, Ashley y Alex.

Mishel

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme culminar una etapa más de mi vida académica, su bendición y guía.

A mis padres y hermana, por su apoyo incondicional.

A las dos personas más importantes de mi vida, Ashley y Alex, por motivarme y apoyarme en cada decisión, por el amor y la felicidad que me brindan.

Al ingeniero Óscar Rosales, director de tesis, por su tiempo y apoyo durante todo este proceso, por brindarme su amistad y compartirme sus conocimientos.

A mi familia en general, amigos, y demás personas que aportaron en la culminación de este trabajo.

Muchas Gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2. Pregunta directriz.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1.Cambio de uso del suelo en la cuenca hidrográfica.....	4
2.1.1. Impactos del cambio de uso del suelo sobre la cuenca hidrográfica	4
2.2. Modelos hidrológicos como herramientas para determinar los efectos del uso del suelo en la producción de agua de la cuenca hidrográfica	5
2.2.1. Clasificación de los modelos hidrológicos	5
2.2.2. Modelo Hidrológico SWAT	7
2.2.3. Interpolación de datos.....	9
2.2.4. Aplicación del modelo SWAT en cuencas hidrográficas	10
2.3. Manejo de cuencas hidrográficas para la producción de agua	10
2.4. Marco Legal.....	11
2.4.1. Constitución de la República del Ecuador.....	11
2.4.2. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua	12
2.4.3. Plan Nacional del Buen Vivir	14
CAPÍTULO III	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Materiales	15
3.2. Descripción del área de estudio	15
3.2.1. Caracterización de la microcuenca	17

3.3 Métodos	21
3.3.1. Análisis de la dinámica de cambio entre los años 1986, 2000 y 2014	21
3.3.2. Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT.....	26
3.3.3. Estrategias de conservación de las áreas productoras de agua	40
CAPÍTULO IV	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. Análisis del cambio de uso del suelo y áreas productoras de agua de los años 1986, 2000 y 2014	41
4.1.1. Uso del suelo	41
4.1.2. Áreas productoras de agua.....	43
4.2. Simulación hidrológica de SWAT.....	45
4.2.1. Análisis de variación de caudal y percolación de los años simulados.....	45
4.2.2. Validación de caudales simulados.....	47
4.2.3. Relación entre el cambio de uso del suelo en las áreas productoras y las variables de caudal y percolación	49
4.3. Estrategias de conservación de las áreas productoras de agua	51
4.3.1. Identificación y descripción del problema.....	52
4.3.2. Aplicación de una Matriz FODA	52
4.3.3. Identificación y análisis de involucrados	54
4.3.4. Estrategias de ejecución.....	56
CAPÍTULO V	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1. Conclusiones.....	60
5.2. Recomendaciones	61
CAPÍTULO VI.....	62
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Materiales utilizados.....	15
Tabla 3.2. Ubicación geográfica de la cuenca.	17
Tabla 3.3. Comunidades ubicadas en la microcuenca del río Magdalena.	17
Tabla 3.4. Promedio mensual de precipitación y temperatura de la estación Chontal Bajo DJ Alambí.....	18
Tabla 3.5. Tipos de suelo presentes en la microcuenca del río Magdalena.....	19
Tabla 3.6. Categorías de uso del suelo	20
Tabla 3.7. Principales actividades económicas de la población	20
Tabla 3.8. Ponderación de la capacidad de producción de agua según la pendiente.....	23
Tabla 3.9. Ponderación de la capacidad de producción según el tipo de suelo de la cuenca.	23
Tabla 3.10. Ponderación de la capacidad de producción de agua según la cobertura vegetal de la cuenca.....	24
Tabla 3.11. Ponderación de la capacidad de producción de agua según la litología de la cuenca.	24
Tabla 3.12. Posibilidad de producción de agua según la ecuación de Matus.	25
Tabla 3.13. Datos de tipo de suelo requeridos por SWAT.....	26
Tabla 3.14. Parámetros edafológicos ingresados a SWAT.	28
Tabla 3.15. Coberturas vegetales ingresadas a SWAT.....	29
Tabla 3.16. Rango de pendientes ingresados a SWAT.	30
Tabla 3.17. Estaciones climatológicas seleccionadas para la interpolación.....	33
Tabla 3.18. Estaciones utilizadas en el ingreso de variables climáticas a SWAT.....	34
Tabla 3.19. Variables climáticas requeridas por SWAT.	35
Tabla 3.20. Coordenadas del punto de aforo.	36
Tabla 3.21. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.....	38
Tabla 3.22. Comparación de variables simuladas para cada drenaje de la cuenca.....	39
Tabla 4.1. Tasa de variación de uso del suelo.	42
Tabla 4.2. Tasa de variación de las áreas productoras de agua.	44
Tabla 4.3. Percolación de la cuenca en los 2 años.....	45
Tabla 4.4. Variación de caudales en los 2 años.	46
Tabla 4.5. Caudales simulados vs caudales medidos	47
Tabla 4.6. Problemas asociados al cambio de uso del suelo sobre el recurso hídrico....	52

Tabla 4.7. Análisis FODA de la microcuenca del río Magdalena.....	53
Tabla 4.8. Análisis de involucrados.	55
Tabla 4.9. Actividades valoradas para el proyecto de protección participativa del bosque.....	57
Tabla 4.10. Actividades valoradas para el proyecto de buenas prácticas ambientales...	58
Tabla 4.11. Talleres de capacitación.	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Ubicación del área de estudio	16
Figura 3.2. Diagrama ombrotérmico de la estación Chontal Bajo DJ Alambí.....	18
Figura 3.3. Texturas del suelo ingresado a SWAT para los 2 escenarios.....	29
Figura 3.4. Cobertura vegetal ingresada de los años 1986 y 2014	30
Figura 3.5. Rango de pendientes del área de estudio.....	31
Figura 3.6. Estaciones climáticas y pluviométricas cercanas al área de estudio	32
Figura 3.7. Medición de caudales en la parte baja del río Magdalena.	37
Figura 3.8. Drenajes menores de la cuenca del río Magdalena	39
Figura 4.1. Uso del suelo de la cuenca en los años 1986, 2000 y 2014.	41
Figura 4.2. Bosques Protectores Los Cedros y El Chontal dentro de la cuenca del río Magdalena.	43
Figura 4.3. Áreas productoras de agua según el uso y cobertura vegetal en los años 1986, 2000 y 2014.	43
Figura 4.4. Caudales (1986) vs caudales (2014)	46
Figura 4.5. Tendencia de caudales simulados y medidos.....	47
Figura 4.6. Análisis de correlación entre caudales simulados y caudales medidos.....	48
Figura 4.7. Comparación entre variables simuladas para cada drenaje en los años 1986 y 2014.	50
Figura 4.8. Involucrados estratégicos: “Poder Vs. Interés”	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa de ubicación del área de estudio.	69
Anexo 2. Mapa base del área de estudio.	70
Anexo 3. Mapa de pendientes.....	71
Anexo 4. Mapa de texturas del suelo.....	72
Anexo 5. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal (1986)	73
Anexo 6. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal (2000)	74
Anexo 7. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal (2014)	75
Anexo 8. Mapa de áreas productoras (1986).....	76
Anexo 9. Mapa de áreas productoras (2000).....	77
Anexo 10. Mapa de áreas productoras (2014).....	78
Anexo 11. Interpolación de datos climaticos de las estaciones pluviométricas (M0318, M0325, M0326 y M0327)	79
Anexo 12. Formato de encuesta aplicada dentro de las comunidades de la cuenca.....	87
Anexo 14. Georeferenciación de categorías de uso del suelo del año 2014.....	88
Anexo 15. Medición de caudales y aplicación de encuestas en la microcuenca.	89

RESUMEN

La microcuenca del río Magdalena se encuentra ubicada en la zona de Íntag, cantón Cotacachi en la provincia de Imbabura. Dentro del cantón existen varios estudios ambientales relacionados al recurso hídrico, sin embargo, no se dispone de información referente a áreas productoras de agua dentro del territorio, ni de los posibles impactos asociados a los cambios de cobertura vegetal. Por esta razón, la presente investigación tuvo como finalidad determinar el impacto del cambio de uso del suelo sobre la producción de agua de la cuenca del río Magdalena, considerando tres años de referencia (1986, 2000 y 2014); y de esta forma, proponer estrategias de manejo sustentable que permitan la protección y conservación de estas áreas. A partir de esta investigación, se identificaron tres categorías de uso del suelo y las tres categorías más altas de producción de agua (muy alta, alta y moderada). Mediante el modelamiento hidrológico de la cuenca, se determinó un incremento del 12,72% y una disminución de 49,69 m³/s a 32,86 m³/s de la percolación en el período 1986-2014, demostrando la importancia del bosque (áreas de mayor producción de agua) en la disponibilidad del recurso hídrico. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se elaboraron dos estrategias de manejo sustentable de las áreas productoras de agua asociadas a la conservación del bosque y a la educación ambiental a la población.

Palabras clave: áreas productoras, agua, cambio de uso del suelo, estrategias.

SUMMARY

The Magdalena's watershed is located in the area of Íntag, Cotacachi Canton, inside Imbabura province. Within the canton there are several environmental studies related to the water resource, however, there is no information regarding water producing areas within the territory, or the possible impacts associated with changes in vegetation cover. For this reason, the purpose of this research was to determine the impact of land use change on the production of water in the Magdalena's watershed, considering three years of reference (1986, 2000 and 2014); and in this way, to propose sustainable management strategies that allow the protection and conservation of them. From this research, three categories of land use and the three highest categories of water production (very high, high and moderate) were identified in the watershed. By means of the hydrological modeling of the watershed, the river runoff would increase by 12.72% and the percolation would decrease from 49,69 m³/s to 32.86 m³/s for period 1986-2014, showing the importance of the forest (highest areas of water production) in the availability of water resources. Finally, based on the results, two strategies were developed for the sustainable management of water-producing areas associated with forest conservation as the main production area and environmental education for the population.

Keywords: producing areas, water, land use change, strategies.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los ecosistemas han sufrido grandes transformaciones asociados a la conversión de la cobertura vegetal y uso del suelo (Lambin,1997). Los efectos de estos cambios ocurren principalmente sobre el ciclo hidrológico y sus procesos de precipitación, evaporación, transpiración, infiltración y escorrentía (McColl y Aggett, 2007). Por tanto, para entender los efectos producidos dentro de una cuenca hidrográfica, se debe considerar la relación entre el clima, el uso del suelo y los diferentes procesos hidrológicos que ocurren dentro de la cuenca (Tang, Yang, Hu y Gao, 2011).

Hibbert (1997) mediante un análisis comparativo de estudios sobre de los efectos del cambio de cobertura vegetal sobre el rendimiento hídrico, logró demostrar que el caudal es proporcional a la cubierta forestal, es decir que a medida que el bosque aumenta, se disminuye el flujo de agua de escorrentía; esta disminución varía en cada cuenca en relación a la tasa de recuperación del bosque, la cual puede ser inmediata o retrasada dependiendo de las condiciones del clima, suelo, topografía, entre otros factores. De esta forma, el uso del suelo destinado a la agricultura, ganadería, minería y urbanización afecta la calidad y disponibilidad de agua. El impacto producido por estas actividades depende de las características del lugar, incluidas las prácticas agrícolas y ganaderas de la población (Martínez, Montoya, Calderón y Camacho, 2006). La variación de la escorrentía puede aumentar hasta en un 40% cuando los pastos y cultivos predominan dentro de la cuenca hidrográfica en relación a la escorrentía producida con una cubierta vegetal natural (Siriwardena, Finlayson y McMahan, 2006)

Ecuador es el país con la mayor tasa de deforestación mundial relativo al área, con (-1,7%) del área de bosque existente, siendo la principal causa el incremento de la población en los últimos años, principalmente en la región Sierra cuya cobertura natural de bosque está siendo amenazada por tierras agrícolas (Food and Agriculture Organization, 2006). Íntag, es una zona rural ubicada dentro de la provincia de Imbabura. Su territorio de aproximadamente 500.000 Ha se encuentra inmerso dentro de 2 de las 34 áreas biológicas más importantes del planeta: los Andes Tropicales y el Tumbes-Chocó-Magdalena (Latorre, Walter y Larrea, 2015). La zona no cuenta con un

adecuado ordenamiento territorial, lo que ha producido transformaciones aceleradas del ecosistema y variaciones en las capacidades productivas del área (Gualotuña, 2012).

Según Knee y Encalada (2012), dentro del territorio de Íntag existen 21 bosques protectores y 37 reservas hídricas pertenecientes a comunidades o a personas particulares que constituyen la principal fuente de agua de las comunidades de la zona. La población de Íntag, se encuentra agrupada en 76 comunidades rurales dispersas cuya base económica es la pequeña agricultura (Kocian, Batker & Harrison-Cox, 2011). En la zona existen dos tipos de bosques: bosques nublados y bosques estacionales; los cuales están siendo amenazados por problemas asociados al cambio climático, la tala y el incremento acelerado de la agricultura (Latorre, Walter y Larrea, 2015).

A pesar de la diversidad biológica de Íntag, las investigaciones sobre las problemáticas ambientales son escasas. Los estudios ambientales asociados a los impactos del cambio de uso del suelo dentro de las cuencas hidrográficas de la zona, son esenciales para impulsar la adecuada conservación y manejo del recurso hídrico existente. Por tal motivo, la presente investigación pretende demostrar los efectos del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo sobre los recursos hídricos, y a su vez, sugerir alternativas de conservación de los bosques como principales áreas productoras de agua de la microcuenca. El estudio realizado se inscribe dentro del proyecto “Valoración Ecológico-Económica de los servicios Ecosistémicos hídricos en condiciones de cambio climático en los Ecosistemas sub-tropicales y andinos del Ecuador (V5E)”, el cual busca responder al vacío científico de estudios sobre los efectos del cambio de uso de suelos en la biodiversidad y su aporte a la sustentabilidad de los recursos hídricos en el Cantón de Cotacachi.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de los cambios de uso de suelo en las áreas productoras de agua de la cuenca del río Magdalena, cantón Cotacachi.

1.1.2 Objetivos específicos

- Establecer la variación de uso del suelo y áreas productoras de agua en los años 1986, 2000 y 2014.
- Determinar la relación del cambio de uso del suelo en las áreas productoras de agua y la variación del caudal del río Magdalena.
- Proponer estrategias de conservación de las áreas productoras de agua con base a los efectos indicados.

1.2. Pregunta directriz

¿Qué efectos se han producido por el cambio de uso del suelo en la producción de agua de la cuenca?

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo muestra una recopilación bibliográfica de términos y estudios asociados al tema de investigación, además de un marco legal con leyes que rigen el manejo de los recursos hídricos en el Ecuador.

2.1.Cambio de uso del suelo en la cuenca hidrográfica

El cambio de uso del suelo constituye la variación de los elementos naturales que forman parte de una cuenca hidrográfica. Este cambio puede generar alteraciones a menor o mayor escala dentro del ecosistema, y puede ser determinado mediante comparaciones históricas del lugar a lo largo de un periodo de tiempo (Chuvieco, 2010).

2.1.1. Impactos del cambio de uso del suelo sobre la cuenca hidrográfica

Los efectos del cambio de uso del suelo dentro del régimen hidrológico de una cuenca están relacionados principalmente con la agricultura, ganadería, actividad forestal y acuicultura (FAO, 2000). Además, se incluyen las presiones del crecimiento poblacional, el calentamiento global, las tasas de deforestación y el deterioro de vertientes, generando situaciones extremas como inundaciones y sequías (CEPAL, 2013).

2.1.1.1. Degradación de áreas productoras y fuentes de agua

Un área productora es el lugar donde el agua procedente de las precipitaciones atmosféricas y de aguas superficiales ingresa al suelo por gravedad ocupando los vacíos en el estrato geológico y se almacena (Faustino, 2006). Según Losilla (1986) la intensificación de actividades humanas como la deforestación, construcción de infraestructura y el aumento de explotación de las aguas subterráneas son las causantes de la disminución de descargas naturales, el menor potencial de los acuíferos, el aumento de la escorrentía superficial y la erosión en las áreas productoras de agua. El desarrollo de actividades agrícolas, industriales, construcción de viviendas y demás usos del suelo dentro de una cuenca hidrográfica, aceleran la degradación y disponibilidad de las fuentes de agua superficial y subterránea. A esto se suma el grado de erosión y compactación del suelo en zonas deforestadas y con pendientes pronunciadas que favorecen la escorrentía (Carrillo, Cardona, Huízar, & Graniel, 2008). Los principales

factores que determinan la cantidad de agua disponible de una cuenca son la precipitación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración y percolación, siendo la última la de mayor influencia en el proceso de recarga y producción de agua de una cuenca. El agua que ingresa al suelo provee a las plantas y animales en su mayoría, alimenta la cantidad de agua subterránea y mantiene las corrientes durante el período de estiaje, reduciendo las inundaciones y la erosión de los suelos (Maderey, 2005).

La tasa de infiltración respecto al total de precipitación dentro de la cuenca depende a su vez de varios factores geológicos y morfológicos como la litología, (naturaleza del material geológico que aflora en la superficie) que influye mediante la permeabilidad, porosidad y minerología del sustrato; la pendiente del terreno, ya que mientras menor sea el grado de inclinación se retiene por mayor tiempo el agua y se favorece la infiltración; la cobertura vegetal y la textura del suelo (Peñuela, 2007). La presencia de cobertura vegetal densa reduce la fracción de la escorrentía y aumenta la infiltración, esto debido a que reduce el contacto directo del agua precipitada con el suelo, y la desprende de a poco del follaje mojado (Faustino, 2006).

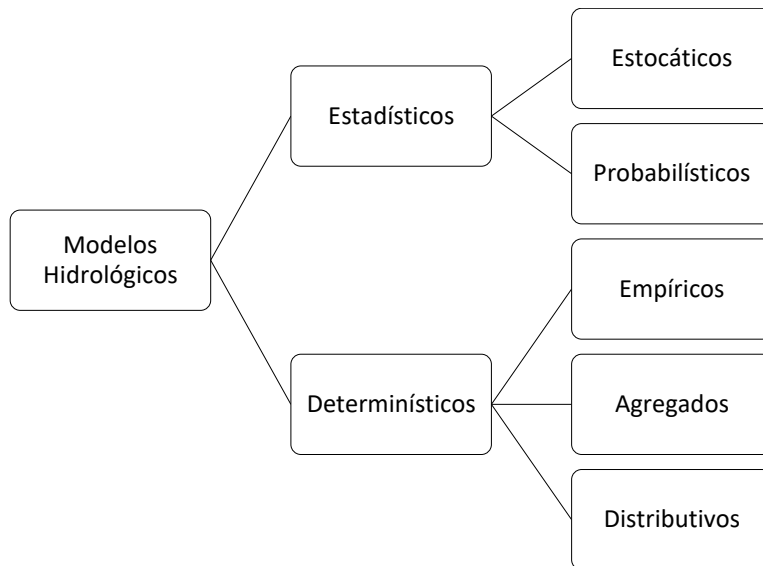
2.2. Modelos hidrológicos como herramientas para determinar los efectos del uso del suelo en la producción de agua de la cuenca hidrográfica

Un modelo hidrológico es una herramienta que permite comprender de mejor manera el comportamiento de los distintos componentes del ciclo hidrológico en una cuenca. Estos modelos juegan un papel muy importante en la evaluación de la disponibilidad estacional de agua, necesaria para tomar decisiones en la gestión de los recursos hídricos, además permiten obtener las relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en el sistema real (Dwarakish y Ganasri, 2015).

Los modelos hidrológicos ayudan a mejorar la predicción del balance hídrico y la dinámica de la cuenca, y de a poco se han convertido en herramientas cada vez más útiles para la gestión de los recursos hídricos de cada país (Sarkar y Kumar, 2012).

2.2.1. Clasificación de los modelos hidrológicos

Cabrera, 2012, clasifican a los modelos hidrológicos en 2 grandes grupos como se detalla a continuación.



Fuente: Cabrera, 2012

2.2.1.1. Modelos estadísticos

Estos modelos se basan en técnicas estadísticas para determinar la relación entre las entradas y salidas. El uso de estos modelos permite la exportación racional de la información disponible a corto y mediano plazo. Su uso es posible cuando se dispone de series suficientemente grandes de información.

Estos modelos a su vez se clasifican en modelos probabilísticos y modelos estocásticos.

- **Probabilísticos:** se formulan siguiendo las leyes de probabilidad para analizar el comportamiento de un proceso hidrológico por lo que la información utilizada para la calibración debe ser independiente del tiempo.
- **Estocásticos:** se utilizan frecuentemente para la predicción a corto y largo plazo de series hidrológicas.

2.2.1.2. Modelos determinísticos

Son formulados en términos de grupo de variables y parámetros relacionados e implican una relación causa-efecto entre los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de ecuaciones.

Un modelo determinístico no considera aleatoriedad, una entrada produce siempre una misma salida. Este tipo de modelo es utilizado cuando se dispone de poca información;

por ejemplo en la generación de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria.

Los modelos determinísticos a su vez se clasifican en: empíricos, agregados y distributivos.

- **Empíricos:** se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicados.
- **Agregados:** son modelos que pueden reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia- escurrimiento, por lo tanto pueden modelar en continuo la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación.
- **Distributivos:** son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas o sub-drenajes a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca. Se basan únicamente en parámetros físicos, por lo que son aplicables a cuencas no aforadas.

La aplicación de uno u otro modelo depende de los objetivos de la simulación, es así que cuando se trata de representar parámetros físicos en la cuenca y se dispone información completa de variables espaciales como la precipitación, la temperatura y la cobertura vegetal, es recomendable el empleo de modelos distributivos (Oropeza, 1999). Los modelos distributivos Mike-Basin, Hidrotel, VIC, SWAT, HEC-HMS, Watflood y Topmodel tienen como desventaja general la precisión de los resultados en cuencas grandes, y en el caso del modelo Mike-Basin el principal impedimento es su elevado costo, ya que de acuerdo a los requerimientos es necesario la adquisición de varios módulos. En cuanto a las ventajas de los modelos se puede considerar que SWAT presenta una alta precisión de resultados en comparación a los otros modelos, además de poder realizar la simulación de varios procesos hidrológicos a la vez para determinar los efectos de las actividades humanas como el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (Salgado y Güitrón, 2012).

2.2.2. Modelo Hidrológico SWAT

Este modelo fue desarrollado por el USDA-ARS (Agricultural Research Service) en conjunto con la universidad de Texas para predecir el impacto dentro de una cuenca hidrográfica a causa de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas (Neitsch, Arnold, & Kiniry, 2005).

La simulación hidrológica de la cuenca en SWAT, puede ser separada en 2 partes, la primera es la fase del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que ingresan al canal principal de cada subcuenca, y la segunda, que define el movimiento del agua, sedimentos, entre otros, a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia la salida (Uribe, 2010).

El ciclo hidrológico simulado por SWAT esta basado en la ecuación del balance hídrico (Neitsch et al., 2005).

$$SW_t = SW_0 + R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}$$

Donde:

SW_t = contenido final de agua en el suelo (mm H₂ O)

SW₀ = contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂ O)

t = tiempo (días)

R_{day} = cantidad de precipitación en un día i (mm H₂ O)

Q_{surf} = cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mmH₂ O)

E_a = cantidad de evapotranspiración en un día i (mmH₂ O)

W_{seep} = cantidad de agua que entra a la zona no saturada del perfil del suelo en un día i (mmH₂ O)

Q_{gw} = cantidad de flujo de retorno en un día i (mmH₂O).

Para emplear la herramienta SWAT es necesario obtener datos del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y uso del suelo, los cuales son utilizados como datos de entrada. Es importante que la información climática requerida por el modelo contenga series de datos completas del periodo de tiempo del que se desea realizar la simulación, (Uribe, 2010). Debido a que en muchos de los casos no se dispone de una base de datos climáticos completa, se debe considerar la aplicación de un método que permita la estimación de los datos faltantes, ya sea mediante promedios de los datos existentes cuando los vacíos son mínimos, o por medio de métodos más exactos como la interpolación para cuando el vacío de datos es mayor (Guerrero, 2015).

2.2.3. Interpolación de datos

Este método se basa en observaciones cuantitativas y permite conocer valores desconocidos. Para realizar una interpolación existen 2 condiciones: la primera es que los valores registrados no deben ser aleatorios y la segunda es que debe existir una correlación positiva, es decir, que cuanto más próximas estén las observaciones más parecidos serán sus valores (García y Cebrián, 2015).

Los métodos de interpolación son: IDW, Spline y Kriging. Estos algoritmos son usados para estudios de modelos digitales, climatología o relieve. El método de interpolación adecuado depende de la correlación que exista entre los valores utilizados, si la correlación es débil o menor a 0.7, el método geostatístico kriging sería más idóneo, sin embargo si la correlación es fuerte o más cercana a 1, se pueden utilizar métodos más simples como IDW (Royo, 2012).

2.2.3.1. Interpolación lineal con ponderación de la distancia inversa (IDW)

El objetivo principal del método IDW es el de obtener valores donde no los hay. Se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia (García y Cebrián, 2015). Desde el punto de vista metodológico, cada valor tiene una correspondencia con un punto determinado e influye sobre los demás de forma local disminuyendo proporcionalmente su efecto con la distancia. Es decir que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Murillo, et al., 2012).

Los mejores resultados con IDW se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular, ya que si la ubicación de los puntos de entrada es dispersa, los resultados pueden no representar en forma suficiente la superficie deseada. La interpolación ponderada con base al inverso de la distancia se basa en la siguiente fórmula (Watson & Philip, 1985).

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

En el cual $Z(S_o)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos.

Los pesos de los puntos vecinos están dados por:

$$\lambda_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}}$$

En el cual “d” es la distancia entre el lugar de predicción (So) y el lugar muestral (Si); P es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

2.2.4. Aplicación del modelo SWAT en cuencas hidrográficas

Khan y Rushton (1996), utilizaron el modelo SWAT para cuantificar el efecto del uso del suelo sobre el rendimiento de sedimentos y escorrentía en una cuenca hidrográfica con varios tipos de cobertura vegetal en una región subhúmeda tropical de la India. A partir de su estudio demostraron que, las subcuencas con cobertura forestal alta mostraron significativamente menos escorrentía y sedimentos (310,36 Mm y 0,84 T / ha), mientras que una subcuenca con mayor área de cultivo produjo mayor escorrentía (393,5 Mm) y mayor generación de sedimentos (11,65 T / ha).

Según Crespo, et al. (2008), una microcuenca forestada presenta un caudal mínimo mayor en comparación a una con alteración humana; y de igual forma para el caso de caudales máximos, las microcuencas intervenidas presentan un aporte mínimo o nulo en la época de estiaje (25% del flujo total); mientras que la microcuenca forestada aporta considerablemente al flujo base (63% del flujo total).

Según Cacoango (2014), en las cuencas con conservación de bosque se presenta una distribución anual uniforme del caudal promedio y los sedimentos simulados, y una disminución en comparación a los escenarios propuestos de agricultura y ganadería, demostrando la importancia del bosque en la retención del agua de la cuenca.

2.3. Manejo de cuencas hidrográficas para la producción de agua

El manejo de cuencas se realiza con la finalidad de contrarrestar y disminuir los impactos o efectos ambientales negativos evaluados mediante varios factores que inciden dentro de la cuenca como la cantidad, calidad y disponibilidad de los recursos existentes en ella. El objetivo principal del manejo de una cuenca hidrográfica es alcanzar un equilibrio entre conservación y aprovechamiento de los recursos existentes;

es decir lograr un desarrollo sostenible de los recursos naturales y mejorar la calidad de vida de las personas (FAO, 2007).

La iniciativa de un manejo integrado dentro de una cuenca hidrográfica puede surgir a partir de la necesidad de resolver problemas locales graves de uso de los recursos naturales o a partir de adoptar un enfoque de conservación en una fase temprana de planificación en una cuenca hidrográfica no afectada. Puede iniciarse como una gestión dentro el plano local, o puede desarrollarse por medio de la aplicación de una política nacional (RAMSAR, 2010).

La determinación de los cambios producidos año a año dentro de la cuenca, es indispensable para la generación de datos que posteriormente permitirán proponer y desarrollar posibles estrategias de recuperación, conservación y mitigación (Pineda, Bosque, Gómez y Plata, 2009). Una adecuada planificación de uso del suelo dentro de la cuenca, permitirá mejorar las condiciones ambientales de una zona, tales como la disponibilidad de agua y la recuperación de especies nativas. Los agricultores, al igual que el resto de la población inmersa dentro del área de influencia de la cuenca hidrográfica, pueden ser capacitados e incentivados para realizar la adecuada explotación de los recursos naturales, de tal manera que de la propia comunidad puedan surgir alternativas como la creación de viveros de especies endémicas, la reforestación y seguimiento en zonas altamente intervenidas (MAE, 2006).

2.4. Marco Legal

El estudio realizado se fundamenta en leyes y artículos detallados en la Constitución de la República del Ecuador 2008, en la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua, y en los objetivos del Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017.

2.4.1. Constitución de la República del Ecuador

En el régimen de los derechos ambientales de la Constitución se encuentra el Título VII, Capítulo Segundo, denominado Biodiversidad y Recursos Naturales, el cual consta de 20 artículos que regulan las acciones humanas frente al ambiente. La presente investigación aporta al cumplimiento de los artículos 395 y 411, los cuales se detallan a continuación.

Artículo 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

Principios 1 y 3.

1. El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

3. El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales.

Artículo 411.- 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.

2.4.2. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua

Esta ley fue establecida con el fin de garantizar el derecho humano al agua de forma accesible y asequible para uso personal y doméstico en cantidad, calidad, continuidad y cobertura. El Título I, II y III de esta ley, denominados Disposiciones preliminares, Recursos Hídricos, Institucionalidad y Gestión de los recursos hídricos hacen referencia a principios, definiciones y gestión dentro de los artículos 3, 4, 13, 14 y 32 sobre los cuales se sustenta esta investigación

Artículo 3. Objeto de la Ley. El objeto de la presente Ley es garantizar el derecho humano al agua así como regular y controlar la autorización, gestión, preservación, conservación, restauración, de los recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua, la gestión integral y su recuperación, en sus distintas fases, formas y estados físicos, a fin de garantizar el *sumak kawsay* o buen vivir y los derechos de la naturaleza establecidos en la Constitución.

Artículo 4. Principios de la Ley. Esta Ley se fundamenta en los siguientes principios:

- a) La integración de todas las aguas, sean estas, superficiales, subterráneas o atmosféricas, en el ciclo hidrológico con los ecosistemas;
- b) El agua, como recurso natural debe ser conservada y protegida mediante una gestión sostenible y sustentable, que garantice su permanencia y calidad;
- c) El agua, como bien de dominio público, es inalienable, imprescriptible e inembargable;
- d) El agua es patrimonio nacional y estratégico al servicio de las necesidades de las y los ciudadanos y elemento esencial para la soberanía alimentaria; en consecuencia, está prohibido cualquier tipo de propiedad privada sobre el agua;
- e) El acceso al agua es un derecho humano;
- f) El Estado garantiza el acceso equitativo al agua;
- g) El Estado garantiza la gestión integral, integrada y participativa del agua; y,
- h) La gestión del agua es pública o comunitaria.

Artículo 13.- Formas de conservación y de protección de fuentes de agua. Constituyen formas de conservación y protección de fuentes de agua: las servidumbres de uso público, zonas de protección hídrica y las zonas de restricción. Los terrenos que lindan con los cauces públicos están sujetos en toda su extensión longitudinal a una zona de servidumbre para uso público, que se regulará de conformidad con el Reglamento y la Ley.

Para la protección de las aguas que circulan por los cauces y de los ecosistemas asociados, se establece una zona de protección hídrica. Cualquier aprovechamiento que se pretenda desarrollar a una distancia del cauce, que se definirá reglamentariamente, deberá ser objeto de autorización por la Autoridad Única del Agua, sin perjuicio de otras autorizaciones que procedan. Las mismas servidumbres de uso público y zonas de protección hídrica existirán en los embalses superficiales.

Artículo 14.- Cambio de uso del suelo. El Estado regulará las actividades que puedan afectar la cantidad y calidad del agua, el equilibrio de los ecosistemas en las áreas de protección hídrica que abastecen los sistemas de agua para consumo humano y riego;

con base en estudios de impacto ambiental que aseguren la mínima afectación y la restauración de los mencionados ecosistemas.

Artículo 32.- Gestión pública o comunitaria del agua. La gestión del agua es exclusivamente pública o comunitaria. La gestión pública del agua comprende, de conformidad con lo previsto en esta Ley, la rectoría, formulación y ejecución de políticas, planificación, gestión integrada en cuencas hidrográficas, organización y regulación del régimen institucional del agua y control, conocimiento y sanción de las infracciones así como la administración, operación, construcción y mantenimiento de la infraestructura hídrica a cargo del Estado.

La gestión comunitaria la realizarán las comunas, comunidades, pueblos, nacionalidades y juntas de organizaciones de usuarios del servicio, juntas de agua potable y juntas de riego. Comprende, de conformidad con esta Ley, la participación en la protección del agua y en la administración, operación y mantenimiento de infraestructura de la que se benefician los miembros de un sistema de agua y que no se encuentre bajo la administración del Estado.

2.4.3. Plan Nacional del Buen Vivir

El Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 constituye una guía de 12 objetivos que el Ecuador aspira cumplir y aplicar dentro de este período de tiempo. El objetivo del Plan que permite sustentar esta investigación con base a sus políticas y lineamientos es el objetivo 7, el cual se enfoca en garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global.

Este objetivo a su vez consta de 12 políticas, de las cuales una se relaciona directamente con la investigación.

Política 7.6: Gestionar de manera sustentable y participativa el patrimonio hídrico, con enfoque de cuencas y caudales ecológicos para asegurar el derecho humano al agua.

Lineamiento estratégico:

7.6.b. Establecer mecanismos integrales y participativos de conservación, preservación, manejo sustentable, restauración y reparación integral de la funcionalidad de las cuencas hidrográficas, con criterios de equidad social, cultural y económica.

7.6.c. Establecer incentivos para aumentar la eficiencia en el uso de las fuentes hídricas y mejorar la sustentabilidad de los reservorios de agua subterráneas y superficiales.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se mencionan los materiales utilizados, y de igual forma, se detallan las diferentes etapas y métodos aplicados en el proceso investigativo.

3.1. Materiales

Los materiales utilizados dentro de todo el proceso de investigación fueron los siguientes.

Tabla 3.1. *Materiales utilizados.*

Materiales	Equipos	Software
Libreta de campo	Computador	ArcGIS 10.4 extensión Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
Anuarios hidrológicos y meteorológicos del INAMHI	GPS Garmin	
Cartografía temática a escala 1:50000	Molinete Electrónico	
Imágenes satelitales Landsat	Cámara fotográfica	
Cuerda de 30 m	Flexómetro de 30 m	
Botas de caucho	Vehículo 4x4	

Elaboración: La autora.

3.2. Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte norte del Ecuador, en la provincia de Imbabura, cantón Cotacachi, parroquia rural García Moreno, zona de Íntag, en la microcuenca del río Magdalena. Figura 3.1.

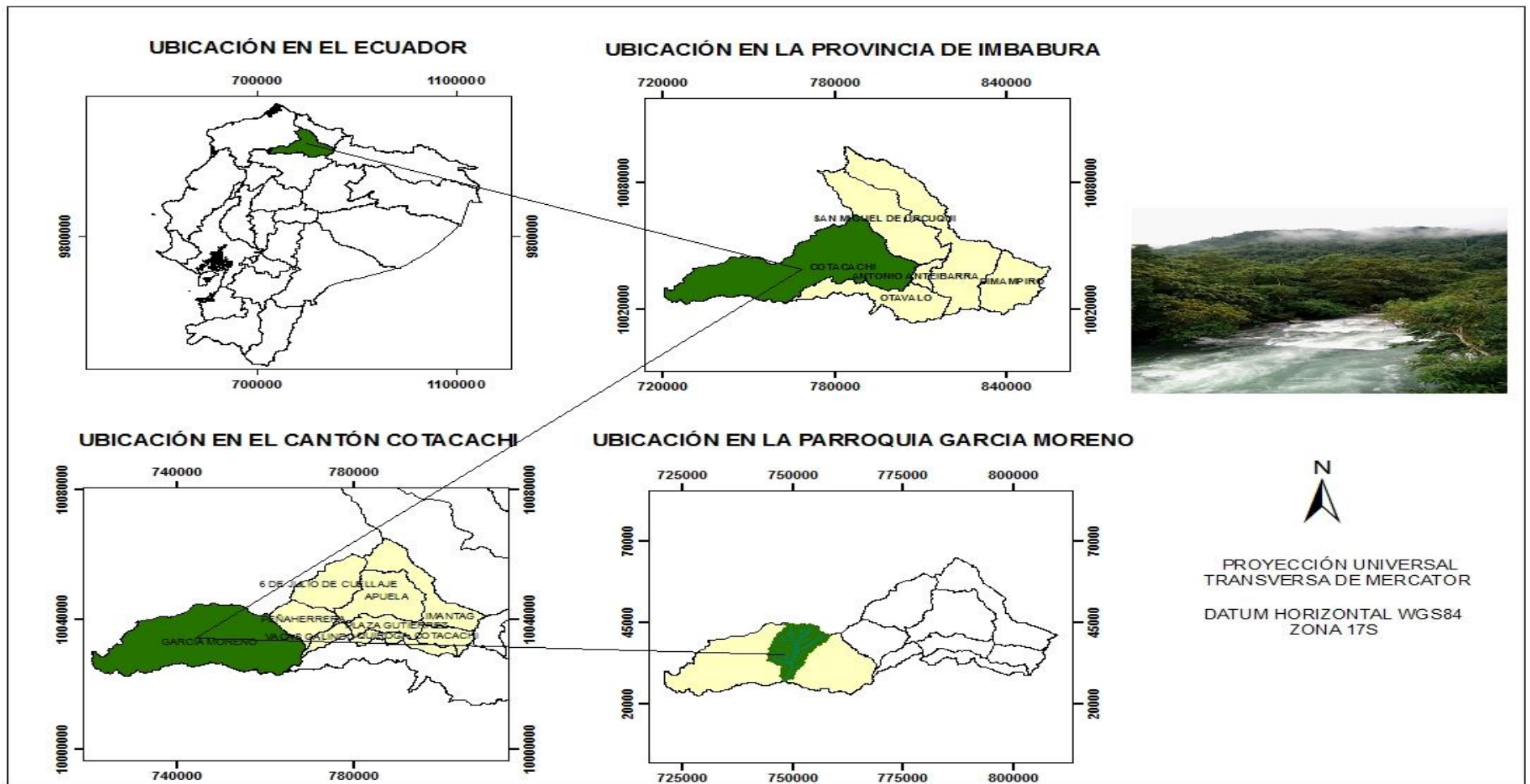


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio

Elaboración: La autora.

Geográficamente el área de estudio está enmarcada dentro de las siguientes coordenadas:

Tabla 3.2. *Ubicación geográfica de la cuenca.*

Punto	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)
	X	Y	
Norte	750427	10044246	3000
Sur	748575	10027654	600
Este	752286	10035029	1450
Oeste	748574	10035028	1200

Elaboración: La autora.

La cuenca del río Magdalena tiene una superficie de 13492,64 has, con un rango de altitudes entre los 600 y 3000 msnm y una longitud del río de 14,67 km. Dentro de la cuenca existen 3 comunidades como se detalla en la tabla 3.3

Tabla 3.3. *Comunidades ubicadas en la microcuenca del río Magdalena.*

Comunidad	Extensión (Has)
San José de Magdalena	858,84
Magdalena Alto	2141,58
Brillasol	8942,68

Elaboración: La autora.

Fuente: PDOT García Moreno, 2011

3.2.1. Caracterización de la microcuenca

- **Clima**

Según la clasificación de Holdrige, la cuenca del río Magdalena tiene una formación ecológica o zona de vida: bosque muy húmedo Pre-Montano (bmhPM), las lluvias se concentran en un período único, de octubre a mayo, siendo el resto del año considerado como época seca. La temperatura promedio es 24°C y la humedad relativa varía entre 70 y 90 % según la época (Pourrut, Róvere, Romo y Villacreses, 1990).

Los factores climáticos de mayor influencia en el área de estudio son la precipitación y la temperatura, los cuales fueron obtenidos de la estación Chontal Bajo DJ Alambí (M0327) debido a la mayor cercanía con la microcuenca. Para determinar la época seca

y lluviosa del área de estudio se realizó el diagrama ombrotérmico de la estación (M0327) utilizando los promedios mensuales de temperatura y precipitación del período (2010-2014) como se muestra en la Tabla 3.4 y en la Figura 3.2

Tabla 3.4. Promedio mensual de precipitación y temperatura de la estación Chontal Bajo DJ Alambí.

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura (°c)
Enero	58,8	22,4
Febrero	45,9	22,5
Marzo	35,4	23,0
Abril	42,7	23,1
Mayo	43,4	22,5
Junio	4,5	21,5
Julio	13,4	21,3
Agosto	1,1	21,7
Septiembre	1,8	20,9
Octubre	16,6	22,1
Noviembre	32,1	22,0
Diciembre	38,0	21,7

Elaboración: La autora

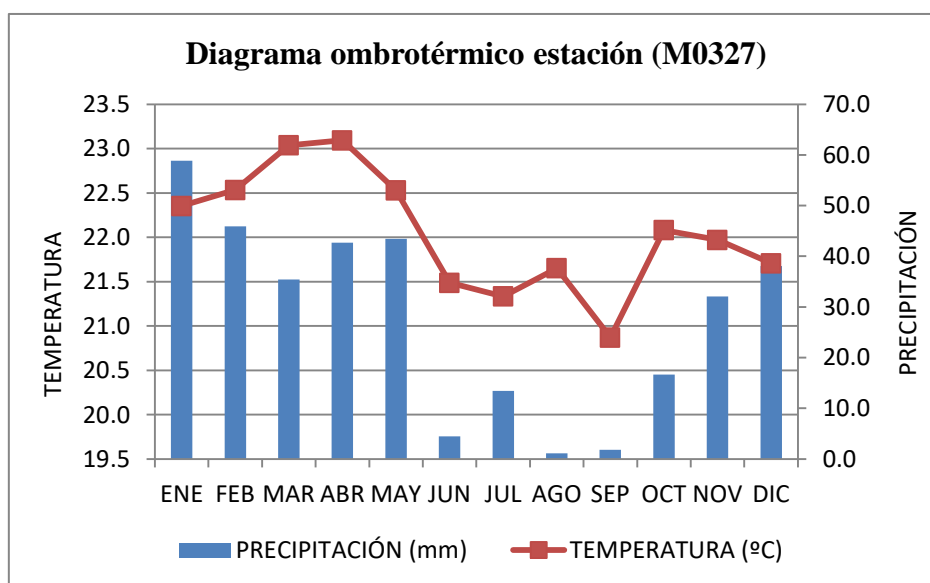


Figura 3.2. Diagrama ombrotérmico de la estación Chontal Bajo DJ Alambí.

A partir del diagrama ombrotérmico se determinó que los meses de mayor precipitación son enero y febrero, mientras los de mayor temperatura corresponden a los meses de marzo y abril. Los meses con menor registro de precipitación o de época seca son junio,

julio, agosto y septiembre, y a su vez son los meses con la menor temperatura registrada.

- **Tipo de suelo**

Los tipos de suelo presentes en la cuenca del río Magdalena son inceptisol y entisol, siendo el más representativo el orden Inceptisol como se detalla en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. *Tipos de suelo presentes en la microcuenca del río Magdalena.*

Orden	Grupo	Área (has)	Porcentaje (%)
Inceptisol	Dystrandept	2095,68	15,53
Inceptisol	Hydrandept	11396,32	84,46
Entisol	Tropofluent	0,64	0,005
TOTAL		13492,64	100

Elaboración: La Autora

Los suelos del orden Inceptisol se caracterizan por tener textura limosa y francosa y una profundidad de moderadamente profunda a profunda. Este tipo de suelo ocupa la mayor área dentro de la cuenca con un total de 13492 has y un porcentaje de 99,99 %, y se halla distribuido a lo largo de toda la cuenca, parte alta, media y baja. Los suelos del orden Entisol se caracterizan por ser suelos minerales derivados tanto de materiales aluviónicos como residuales, de textura moderadamente gruesa a fina, de pendiente plana a extremadamente empinada. Este tipo de suelo se halla en una mínima proporción en la parte baja de la cuenca con un área de 0,64 Has y un porcentaje de 0,005 %.

- **Uso del suelo y cobertura vegetal**

Las áreas y porcentajes de las categorías de uso del suelo se encuentran detalladas en la siguiente tabla.

Tabla 3.6. *Categorías de uso del suelo*

Uso del suelo	Area (has)	Porcentaje %
Bosque	10966,88	81,28
Pastos	383,34	2,84
Cultivo semipermanente	4,75	0,04
Mosaico agropecuario	1540,58	11,42
Cultivo anual	597,08	4,43
Area total	13492,64	100

Elaboración: La autora

El uso del suelo predominante en la microcuenca corresponde a la categoría bosque con un total de 10966,88 Has correspondiente al 81,28% del área total, seguido de cultivo anual (cultivos de cereales y leguminosas) con un total de 597,08 Has y 4,43%, y en menor porcentaje las categorías de mosaico agropecuario en la que se encuentran varios cultivos de ciclo corto y cultivos semipermanentes.

- **Actividades económicas de la población.**

Tabla 3.7. *Principales actividades económicas de la población*

Comunidad	Actividad			
	Agricultura	Minería	Comercio	Transporte
San José de Magdalena	10	7	3	2
Magdalena Alto	6	3	1	0
Total de encuestas	16	10	4	2

Elaboración: La Autora

Fuente: Trabajo de campo

A partir de la aplicación de 32 encuestas en las comunidades de San José de Magdalena y Magdalena Alto, se identificaron 4 actividades económicas de la población, siendo la actividad principal, la agricultura, con un total de 16 personas, lo cual representa que el 50% de encuestados se dedica a esta actividad, seguido de la minería, el comercio y el transporte en menor proporción. En cuanto a la minería, cabe resaltar que esta actividad se realiza en la comunidad El Corazón, ubicada fuera de los límites de la microcuenca.

- **Áreas de conservación.**

En la cuenca hidrográfica del río Magdalena existen 2 bosques protectores: Los Cedros, con una extensión de 6400 Has y El Chontal con un total de 6935 Ha. El Bosque Los

Cedros se halla compartido entre las cuencas hidrográficas del río Magdalena y el río Manduriacu, mientras que el Bosque El Chontal se halla inmerso en las cuencas hidrográficas de los ríos Chalguayacu, Chontal y Magdalena (CARE, 2014).

3.3 Métodos

- **Limitaciones metodológicas**

Durante el desarrollo de la investigación se presentaron varias limitaciones en relación a los datos climáticos utilizados, como se describe a continuación.

Debido al bajo número de estaciones y a la cantidad y calidad de datos climáticos disponibles de la zona de estudio, se utilizó la técnica de interpolación lineal (IDW) para lograr una mejor calidad en los valores de entrada del modelo hidrológico. Mediante esta técnica, se simularon 2 de los 3 escenarios propuestos inicialmente (año 1986 y año 2014) descartándose el escenario del año 2000 debido a la falta de datos para realizar la interpolación.

Otra limitante, es la imposibilidad de realizar técnicas de calibración y validación del modelo para los dos escenarios estudiados. La validación fue realizada únicamente para el año 2014, para lo cual se utilizaron valores de caudal aforados en la parte baja de la cuenca; los aforos fueron realizados durante los meses julio-octubre de 2014 (época seca) y noviembre-febrero de 2015 (época lluviosa), debido a que durante los meses de lluvia del año 2014 no se realizaron las respectivas mediciones por el cierre temporal del paso de ingreso a la zona de estudio. En el escenario del año 1986 no fue posible la calibración y validación debido a la falta de registros climáticos históricos del área de estudio.

3.3.1. Análisis de la dinámica de cambio entre los años 1986, 2000 y 2014

Partiendo de la metodología propuesta por Chuvieco sobre análisis multitemporal, se realizó una comparación histórica entre tres fechas de referencia para determinar la evolución de la cuenca hidrográfica en relación al uso del suelo y áreas productoras. Los pasos metodológicos fueron los siguientes:

3.3.1.1. Identificación y cuantificación de las categorías de uso del suelo

La identificación de los diferentes usos del suelo se realizó mediante análisis e interpretación de 3 imágenes satelitales Landsat de los años 1986, 2000 y 2014 en el

software arcGIS 10.4, siguiendo los pasos metodológicos que se detallan a continuación.

a) Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales fueron obtenidas de manera digital del sitio web de la NASA earthexplorer.usgs.gov; y corresponden a los satélites Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+SLC y Landsat 8 OLI/TIRS respectivamente. Cada una fue seleccionada considerando la baja presencia de nubes, lo cual es indispensable en la identificación de las diferentes categorías de la cuenca.

b) Combinación de bandas multiespectrales

La combinación de bandas de las imágenes fue realizada para obtener una mayor reflectancia de la vegetación en el infrarrojo, y de esta manera, poder identificar las categorías. Las bandas seleccionadas para generar las imágenes del año 1986 y 2000 fueron B1,B2,B3 y B4; mientras que para el año 2014 se seleccionaron las bandas B2,B3,B4 y B5, con el fin de obtener imágenes en falso color RGB (Red, Green and Blue).

c) Clasificación supervisada

Se aplicó una clasificación supervisada en las imágenes mediante la definición de firmas espectrales formando clusters de píxeles con características similares para identificar las categorías. De esta manera, los píxeles con un color rojo intenso, fueron agrupados para la categoría de bosque, mientras que los de menor intensidad para pasto y cultivos. En la cartografía del año 2014 se realizó además una verificación en campo mediante puntos GPS de las diferentes categorías.

3.3.1.2. Identificación y cuantificación de las áreas productoras de agua

Mediante la herramienta SIG se determinaron cartográficamente las áreas productoras de agua a través de una sobreposición de las variables de pendientes, texturas del suelo, tipo de roca y cobertura vegetal usando el geoproceto de álgebra de mapas en el software ArcGIS 10.4. Para identificar las áreas de la microcuenca de estudio, se asignaron valores de ponderación en una escala de 1 a 5 a cada variable en función de la importancia de cada una en el proceso de infiltración del agua según los criterios desarrollados por Matus Silva (2007) como se detalla a continuación:

- a. Pendientes.-** Para determinar las pendientes de la microcuenca se realizó un modelo digital de elevación (DEM), el cual fue convertido posteriormente en formato raster y shapefile para su identificación. Dentro de la cuenca se encontraron 5 rangos de pendientes a los cuales se estableció la ponderación como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. *Ponderación de la capacidad de producción de agua según la pendiente.*

Tipo de relieve	Pendiente (%)	Producción de agua	Ponderación
Débil, plano o casi plano.	0-5	Muy alta	5
Inclinación regular, suave o ligeramente ondulada.	5-12	Alta	4
Irregular, ondulación moderada.			
Fuertes colinados.	12-25	Alta	4
Montañoso	25-50	Moderada	3
Muy montañoso.	50-70	Baja	2
Escarpado	>70	Baja	1

Elaboración: La autora.

Fuente: Matus, 2007

- b. Textura del suelo.-** Para determinar esta variable se utilizó información cartográfica digital del Sistema Nacional de Información, mediante la cual se determinaron 3 tipos de texturas en la microcuenca como se detalla en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. *Ponderación de la capacidad de producción según el tipo de suelo de la cuenca.*

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Franco arenoso	Muy alta	5
Franco	Alta	4
Franco limoso	Alta	3

Elaboración: La autora.

Fuente: Matus, 2007

- c. Cobertura vegetal.-** Para determinar esta variable se utilizó la cartografía desarrollada previamente en el análisis multitemporal para los 3 años de estudio como se muestra en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. *Ponderación de la capacidad de producción de agua según la cobertura vegetal de la cuenca.*

Cobertura vegetal	Producción de agua	Ponderación
Bosque nativo	Muy alta	5
Pastizales	Media	3
Cultivos	Baja	1

Elaboración: La autora.

Fuente: Matus, 2007

d. Litología.- Para esta variable se indentificaron los tipos de roca y la profundidad de los suelos del área de estudio a partir de la cartografía digital del Sistema Nacional de Información como se detalla en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. *Ponderación de la capacidad de producción de agua según la litología de la cuenca.*

Descripción	Posibilidad de recarga	Ponderación
Lutitas	Alta	4
Granodiorita	Moderada	3
Lavas basálticas	Moderada	3

Elaboración: La autora.

Fuente: Matus, 2007

A partir de la asignación de valores relativos a cada variable, se identificaron las áreas productoras de la cuenca de acuerdo a una adaptación de la fórmula de Matus-Silva en la que se unificaron las variables de uso del suelo y cobertura vegetal.

$$ZR = 0.27(Pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.38(Cve)$$

Donde:

Zr = potencial de recarga/ producción

Tr = litología (tipo de roca)

Pend = pendiente

Cve= cobertura vegetal

Ts = tipo de suelo

La sumatoria obtenida por todas las variables, arroja un valor que representa las posibilidades de recarga o producción de agua de cada área como se indica en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. *Posibilidad de producción de agua según la ecuación de Matus.*

Posibilidad de producción	ZR
Muy alta	4,01 – 5
Alta	3,01 – 4
Moderada	2,01 – 3
Baja	1,01 – 2
Muy Baja	<1

Elaboración: La autora

Fuente: Matus, 2007.

3.3.1.3. Cálculo de la tasa de cambio de uso del suelo y áreas productoras

La tasa de cambio mide la variación anual del área de un tipo de cobertura de una región en dos épocas diferentes (Puyravaud, 2003). Se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$q = \left[\left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/(t_2-t_1)} - 1 \right] \times 100$$

Donde:

Q= Tasa de cambio (%).

A₁ = Área de cobertura inicial (has)

A₂ = Área de cobertura final (has)

t₁ = Año inicial

t₂ = Año final

3.3.2. Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT

Para realizar el modelamiento hidrológico en SWAT se establecieron 2 escenarios para comparar el impacto del cambio de uso del suelo sobre el caudal del río Magdalena y las áreas productoras de agua de la cuenca. Para el primer escenario se consideró el año 1986, y para el segundo, el año 2014.

3.3.2.1. Ingreso de datos a SWAT

El ingreso de variables al modelo empieza con la delimitación automática de la cuenca a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Los datos ingresados para realizar el modelamiento hidrológico, corresponden a las variables de: tipo de suelo, cobertura vegetal y datos climáticos del área de estudio como se detalla a continuación:

- **Tipo de suelo**

Para esta variable se ingresaron los valores obtenidos para cada parámetro según los campos detallados en la siguiente tabla.

Tabla 3.13. *Datos de tipo de suelo requeridos por SWAT.*

Campo	Descripción	Observaciones
Snam	Nombre del suelo	Nombre de la clasificación taxonómica del suelo por Gran grupo.
Sol_zmx	Profundidad máxima de enraizamiento en el perfil del suelo (mm)	Los datos fueron tomados del mapa de suelos. (SNI, 2013)
Anion_excl	Fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos.	Si no se ingresa un valor, 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 del suelo.	Es un dato opcional que puede o no ser ingresado.
Texture	Textura de la capa del suelo	Es un dato opcional.
Sol_z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm)	Tomado de (SNI, 2013)

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 mediante el triángulo de texturas y la herramienta "Soil Characteristics Tool"
Sol_awc	Es el agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible.	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"
Sol_k	La conductividad hidráulica saturada (mm/hr), relaciona la proporción del flujo de agua (densidad del fluido) y el gradiente hidráulico.	Los valores de la conductividad hidráulica saturada para cada una de las capas presentes en la cuenca, se calcularon utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool"
Sol_cbn	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo.	Se utilizó la siguiente fórmula: $C.org = \frac{\text{Materia orgánica \%}}{1.724}$
Clay	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)	Se calculó mediante el triángulo de texturas y la herramienta "Soil Characteristics Tool"
Silt	Contenido de limo (% del peso del suelo)	Se calculó mediante el triángulo de texturas y la herramienta "Soil Characteristics Tool"
Sand	Contenido de arena (% del peso del suelo)	Se calculó mediante el triángulo de texturas y la herramienta "Soil Characteristics Tool"
Rock	Es el contenido de fragmento de roca (% del peso total)	Este valor fue tomado de mapa de suelos (SNI, 2013)
Sol_alb	Es la relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre éste, expresado como una fracción.	Se calculó mediante la siguiente ecuación: $A = \frac{0.6}{\exp(0.4 \cdot OM)}$ Donde: A= es el albedo del suelo OM= es la materia orgánica del suelo (%).

Usle_k	Es el factor K de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo.	Se utilizó la siguiente fórmula: $K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$ Donde: K _{USLE} : es el factor de erodabilidad del suelo. M: es el parámetro del tamaño de las partículas. OM: es el porcentaje de materia orgánica. C _{soilstr} : es el código de la estructura del suelo en la clasificación del suelo. C _{perm} : es el perfil de las clases de permeabilidad.
Sol_ec	La conductividad eléctrica (ds/m)	No se encuentra actualmente activa.

Fuente: USDA, 2005

Elaboración: La autora

A continuación, se ingresaron los grupos hidrológicos y demás variables edafológicas requeridas según cada textura del suelo mediante la aplicación del software Soil Water Characteristics y Num Curv como se muestra en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. *Parámetros edafológicos ingresados a SWAT.*

Tipo de suelo	Hydrandept	Dystrandept	Tropofluent
Textura	Franco	Franco limoso	Franco arenoso
Hydgrp	B	B	A
Sol_zmx	1000	1000	100
Anion excl.	0,50	0,50	0,50
Sol_z	500	500	500
Sol_bd	1,44	1,37	1,46
Sol_awc	0,14	0,18	0,10
Sol_k	18,60	12,19	50,34
Sol_cbn	1,74	1,74	1,74
Clay	18	20	10
Silt	40	60	25
Sand	42	20	65
Rock	10	10	10
Sol_alb	0,30	0,30	0,30
Usle_k	0,46	0,44	0,52

Elaboración: La autora.

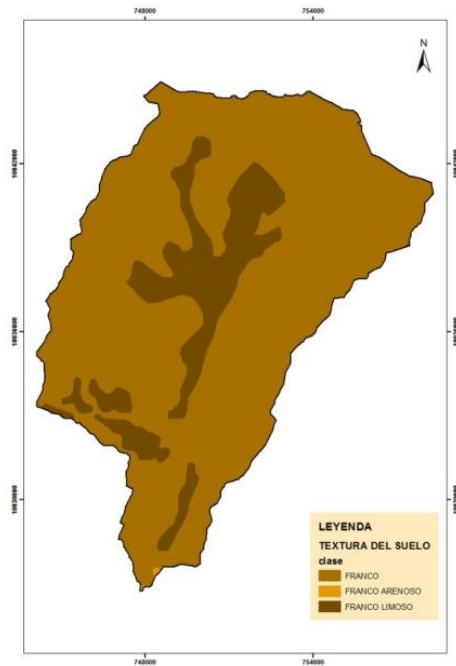


Figura 3.3. Texturas del suelo ingresado a SWAT para los 2 escenarios.

- **Cobertura vegetal y rangos de pendiente**

A partir de las categorías de cobertura vegetal identificadas en el análisis multitemporal se realizó una reclasificación con la base de datos de cobertura de SWAT como se detalla en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Coberturas vegetales ingresadas a SWAT.

Categorías de cobertura vegetal	
Sistema Nacional de Información (SNI)	SWAT
Bosque nativo	Forest evergreen (FRSE)
Cultivo	Agricultural land row crops (AGRR)
Pastizal	Pasture (PAST)

Elaboración: La autora

El mapa de cobertura vegetal y los rangos de pendientes fueron ingresados posteriormente para generar las unidades de respuesta hidrológica (HRU) producto del cruce de las variables ingresadas.

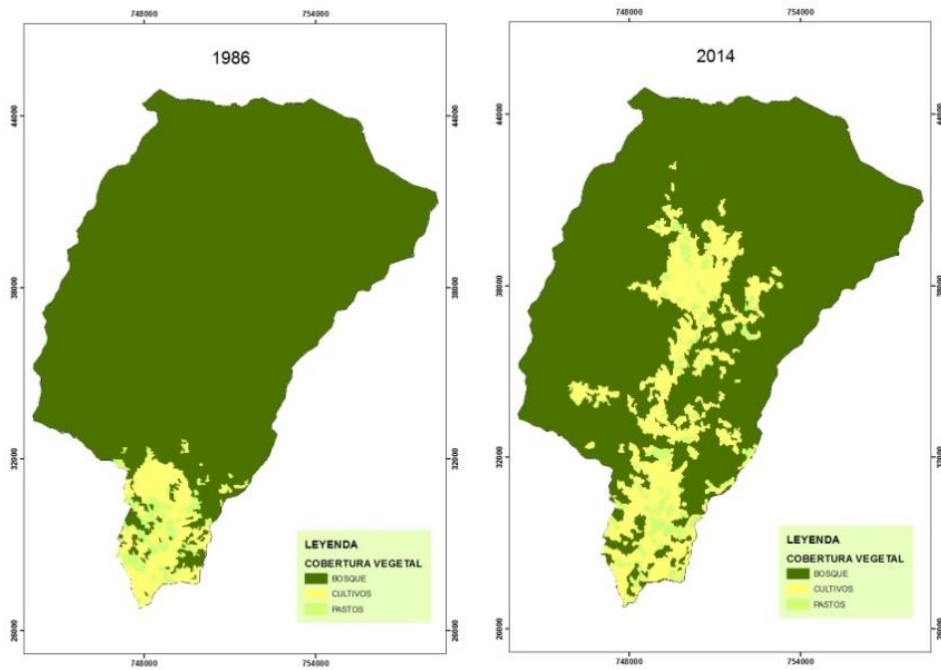


Figura 3.4. Cobertura vegetal ingresada de los años 1986 y 2014

Tabla 3.16. Rango de pendientes ingresados a SWAT.

Número	Rango de pendientes (%)
1	0-12
2	12-25
3	25-50
4	50-75
5	75-100

Elaboración: La autora

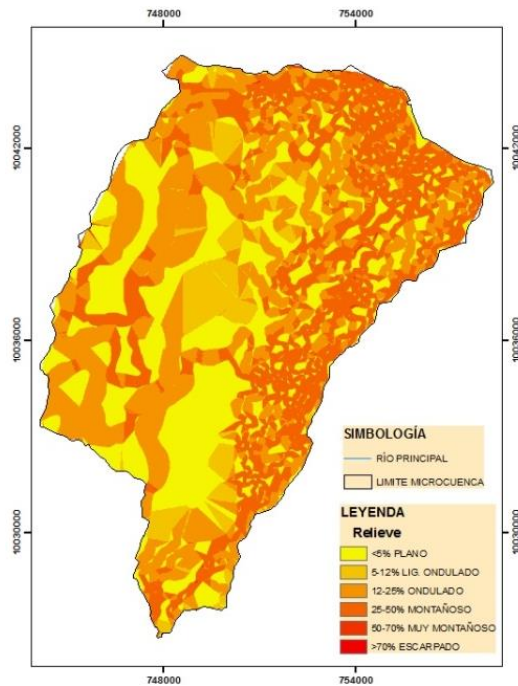


Figura 3.5. Rango de pendientes del área de estudio

- **Variables climáticas**

Las variables climáticas utilizadas para la aplicación del modelo SWAT fueron: temperatura máxima y mínima, heliofanía, humedad relativa, velocidad del viento, punto de rocío y precipitación. Para obtener los datos de cada variable se realizó un análisis de los registros históricos de las estaciones climatológicas y pluviométricas más cercanas al área de estudio; es decir, se clasificaron las estaciones según la disponibilidad de información, para posteriormente realizar un relleno de datos si fuera necesario. Los datos de cada estación fueron obtenidos de la base de datos meteorológicos e hidrológicos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para los escenarios simulados.

A partir de la ubicación de la red de estaciones nacionales en la cartografía digital, se determinó que dentro del cantón Cotacachi existen únicamente estaciones pluviométricas, siendo las más cercanas a la microcuenca del río Magdalena, las estaciones de Chontal Bajo DJ Alambí, García Moreno, Selva Alegre y Apuela-Intag como se muestra en la Figura 3.6.

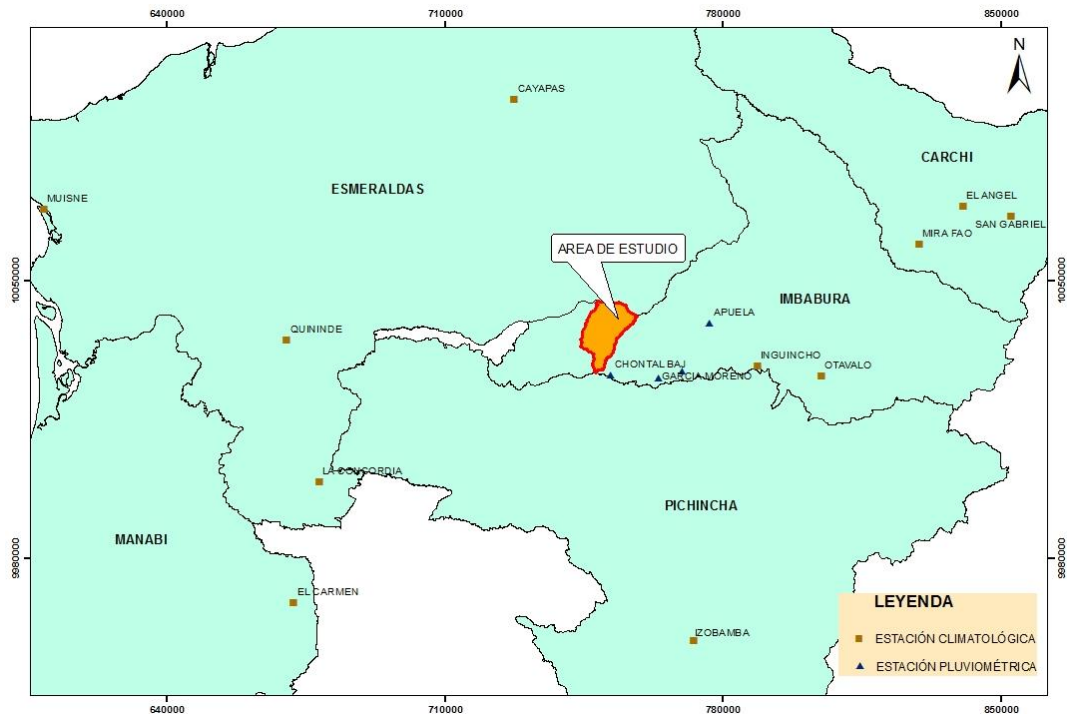


Figura 3.6. Estaciones climáticas y pluviométricas cercanas al área de estudio

Debido a que los datos de las estaciones más cercanas no reflejan las condiciones climáticas del área de estudio, se aplicó un método de interpolación para generar datos más reales de la zona.

3.3.2.2. Método de interpolación

El método de interpolación fue aplicado con el fin de generar datos climáticos mensuales de los años 1986 y 2014 de las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la parroquia de García Moreno, a partir de datos obtenidos de las estaciones climatológicas más cercanas. La metodología aplicada corresponde a la sugerida por Arias (2015) y Fries, et al. (2012) como se detalla a continuación:

- a) **Determinación de valores mensuales.-** Mediante la información climática proporcionada por el INAMHI de las estaciones más cercanas al área de estudio y de los datos obtenidos de los anuarios meteorológicos, se realizó una homogenización para obtener cada valor mensual de las diferentes variables.
- b) **Selección de estaciones para la interpolación.-** Según Fries, et al. (2012), deben existir al menos tres estaciones con disponibilidad de datos para realizar la interpolación; de esta manera, se seleccionaron las estaciones con la mayor disponibilidad de datos y se descartaron aquellas con más de tres meses de

información faltante. (Tabla 3.17). A partir de las variables climáticas y la altitud de cada estación, se realizó un análisis de correlación lineal para determinar la relación existente.

Tabla 3.17. *Estaciones climatológicas seleccionadas para la interpolación.*

Codigo	Nombre	Tipo	Altitud (msnm)	Distancia al área de estudio (km)
M001	INGUINCHO	CP	3140	37,29
M105	OTAVALO	CP	2550	52,37
M003	IZOBAMBA	AP	3058	74,61
M0025	CONCORDIA	CP	360	74,60
M0156	QUININDÉ	CP	115	74,30
M0160	EL CARMEN	CO	260	97,87
M0153	MUISNE	CP	6	138,38
M0103	SAN GABRIEL	CP	2860	102,73
M0102	EL ANGEL	CO	3000	88,30

NOTA: *CP:* Climatológica Principal; *AP:* Agrometeorológica; *CO:* Climatológica Ordinaria

Elaboración: La autora

Fuente: INAMHI, 2015

- c) **Homologación de variables climáticas a una misma altitud.-** Se realizó una homologación de altura entre las estaciones seleccionadas considerando un nivel de referencia del área de estudio de 1000 msnm. Posteriormente, cada variable climática fue interpolada considerando este nivel y la correlación obtenida a partir de la fórmula planteada por los 2 autores antes mencionados. La fórmula es la siguiente:

$$V_{C_{Det}} = V_{C_{mensual}} + (\Gamma * (Z_{Det} - Z_{estación}))$$

Donde:

$V_{C_{Det}}$ = Valores climáticos a nivel de referencia.

V_c = valores mensuales de las variables climáticas.

r = gradiente altitudinal correspondiente al valor de (x) en la ecuación de regresión lineal.

Z_{Det} = nivel de referencia planteado.

$Z_{estación}$ = valor de la altitud a la cual se ubica cada estación.

- d) Interpolación de datos climáticos homologados.-** La interpolación se realizó mediante el método determinístico IDW de ArcGIS, en el cual se consideró la ubicación espacial de las estaciones seleccionadas con una resolución del formato raster de 30m.
- e) Interpolación de variables climáticas a su nivel altitudinal real.-** Mediante la herramienta “raster calculator” de ArcGIS y el modelo digital de elevación (DEM) se obtuvieron los valores mensuales de cada variable para las estaciones requeridas a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{C(x,y)} = V_{C_{Det}} + (r * (z_{x,y}DEM - z_{DET}))$$

Donde:

$V_{C(x,y)}$ = resultado del promedio mensual de las variables climáticas interpoladas.

$V_{C_{Det}}$ = valor de las variables climáticas a un nivel de referencia.

r = gradiente altitudinal.

$Z_{x,y}DEM$ = modelo digital de elevación.

Z_{DET} = nivel de referencia determinando (1000msnm).

y a partir de la información obtenida de las 9 estaciones climatológicas, se generaron datos correspondientes a los dos años de estudio 1986 y 2014 de las variables: temperatura máxima y mínima, heliofanía, punto de rocío y velocidad del viento para las 5 estaciones detalladas en la tabla 3.18.

Tabla 3.18. *Estaciones utilizadas en el ingreso de variables climáticas a SWAT.*

Codigo	Nombre	Tipo	Altitud (msnm)	Distancia al área de estudio (km)
M0318	APUELA- INTAG	PV	1620	21,30
M0325	GARCIA MORENO	PV	1950	13,45
M0327	CHONTAL BAJO (GUAYLLABAMBA DJ ALAMBI)	PV	675	2,95
M0326	SELVA ALEGRE- IMBABURA	PV	1800	18,38
M001	INGUINCHO	CP	3140	37,29

Elaboración: La autora

Fuente: INAMHI, 2015

A partir de los datos obtenidos por interpolación para cada una de las 5 estaciones se ingresaron las variables climáticas detalladas en la tabla 3.19.

Tabla 3.19. *Variables climáticas requeridas por SWAT.*

Variab	Descripción	Requerida /opcional
Wlatitud	Latitud de la estación a emplear en grados	Requerido
Wlongitud	Longitud de la estación en grados	Opcional
Welev	Elevación de la estación climática	Requerida
Rain_yrs	Número de días máximo para la media hora de lluvia mensual usada para los valores de RAIN_HHMX(1)-RAIN_HHMX(12)	Requerida
Tmpmx	Promedio mensual de la temperatura máxima (°C)	Requerida
Tmpmn	Promedio mensual de la temperatura mínima (°C)	Requerida
Tmpstdmx	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C)	Requerida
Tmpstdmn	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C)	Requerida
Pcpmm	Promedio mensual de la precipitación diaria (mmH2O)	Requerida
Pcpstd	Desviación estándar de la precipitación diaria (°C)	Requerida
Pcpskw	Coefficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria	Requerida
Pr_w1	Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día seco (días)	Requerida
Pr_w2	Probabilidad mensual de ocurrencia un día húmedo luego de un día húmedo (días)	Requerida
Pcpd	Promedio mensual del número de días de lluvia	Requerida
Rainhhmx	Máxima lluvia de media hora por mes (mmH2O).para este parámetro se tomó en cuenta los valores históricos de lluvia máxima para 24 horas	Requerida
Solarv	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m2/día). Los valores del promedio de solar diaria fueron calculados mediante la fórmula e Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación. $R_s = (a_s + b_s(n/N)) R_a$ Donde: Rs: radiación solar o de onda corta [MJ*m-2*día-1] n: duración real de la insolación[horas] N: duración máxima posible de la insolación [horas] n/N: duración relativa de la insolación[-] Ra: radiación extraterrestre [MJ*M-2*DÍA-1] as: constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n=0), as+bs fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados(n=N) (Ib) en caso en que no se dispongan de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de as=0,25 y de bs=0,50	Requerida
Dewpt	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	Requerida
Wndav	Promedio mensual de la velocidad del viento (m/s)	Requerido

Elaboración: La autora

Fuente: Arnold, Williams y Maidment, 1995

3.3.2.3. Cálculo de variación del caudal entre los 2 años simulados

Para determinar el porcentaje de cambio de caudal entre los 2 años, se utilizó la fórmula planteada por (Arias, 2015), que se explica a continuación:

$$\text{Variación} = \frac{Q_{\text{modificado}} - Q_{\text{base}}}{Q_{\text{base}}} * 100$$

Donde:

Variación = porcentaje variación de caudal en el período simulado.

Qmodificado= caudal mensual total obtenido del año 2014.

Qbase= caudal mensual total obtenido del año 1986.

3.3.2.4. Validación de resultados simulados por SWAT

Los resultados de caudales obtenidos a partir del modelo hidrológico fueron validados mediante la comparación entre los caudales simulados por SWAT y los caudales medidos en campo.

• Medición de caudales en campo

La medición fue realizada con el fin de obtener datos reales del caudal del río Magdalena durante la época seca y lluviosa y poder compararlos con los valores simulados por el modelo SWAT. Las mediciones se llevaron a cabo mediante la identificación de un punto de aforo, considerando una zona del río con mayor flujo de agua y sin presencia de meandros. Posteriormente, el punto de aforo fue georeferenciado y se ingresaron las coordenadas UTM al software arcGIS.

Tabla 3.20. *Coordenadas del punto de aforo.*

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud (msnm)
PARTE BAJA	748011	10026939	638

Elaboración:La autora

Mediante el uso de un flexómetro y una cuerda, se determinó el ancho superficial del río desde la orilla izquierda hasta la derecha, en sentido de la corriente. La sección transversal del cauce se dividió en subsecciones considerando una separación de 1

metro, en cada una de las cuales mediante el molinete electrónico, se midieron la profundidad y la velocidad del agua como se observa en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Medición de caudales en la parte baja del río Magdalena.

Los aforos fueron realizados durante 4 meses considerados dentro de la época seca o de menor presencia de lluvias (julio, agosto, septiembre y octubre), y otros 4 dentro de la época lluviosa (noviembre, diciembre, enero y febrero), estos a su vez, fueron comparados con los simulados por el modelo hidrológico para los mismos meses. El nivel de ajuste entre los caudales simulados y observados fue evaluado mediante 2 técnicas estadísticas: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el coeficiente de correlación (R^2).

a) Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de correlación al cuadrado, es una medida de la regresión lineal entre valores observados y simulados. La expresión matemática es la siguiente:

$$R^2 = \frac{Cov(Q_o, Q_m)^2}{\sigma_o^2 \sigma_m^2}$$

Donde:

Q_o = caudal observado

Q_m = caudal simulado

$Cov(Q_o, Q_m)$ = covarianza entre los caudales observados y los simulados

σ_o^2 = varianza de los caudales observados

σ_m^2 = varianza de los caudales simulados

Al igual que el Coeficiente de Nash-Sutcliffe, el R_2 puede tener valores comprendidos entre 0 y 1, a mayor valor, mejor ajuste (Cabrera, 2012).

b) Coeficiente de eficiencia de Nash- Sutcliffe (EF)

Este coeficiente es la diferencia entre la varianza de los valores observados y el error cuadrado promedio, dividida para la varianza de los valores simulados. Es utilizado generalmente en la evaluación de modelos hidrológicos debido a su flexibilidad en la aplicación. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

Q_{simi} = Caudal simulado.

Q_i = Caudal observado.

\bar{Q} = Caudal medio observado

Según Ritter, Muñoz y Regalado (2011), no existen criterios globalmente aceptados sobre los rangos utilizados en la interpretación de los valores del coeficiente, por tanto, en este estudio se utilizaron los criterios de Singh, Knapp y Demissie (2004) como se detalla en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

Ceff	Eficiencia del ajuste
<0.75	No aceptable
0.75-0.84	Aceptable
0.84-0.91	Bueno
>0.91	Muy bueno

Fuente: Singh, et al (2004)

Elaboración: La Autora.

3.3.2.5. Determinación de la relación entre el cambio de uso del suelo, las áreas productoras y las variables de caudal y percolación del río Magdalena

A partir de la delimitación automática de los drenajes menores de la microcuenca en el modelo SWAT, se realizaron simulaciones hidrológicas en 12 de los 15 drenajes, descartándose los 3 de menor extensión, como se muestra en la Figura 3.8.

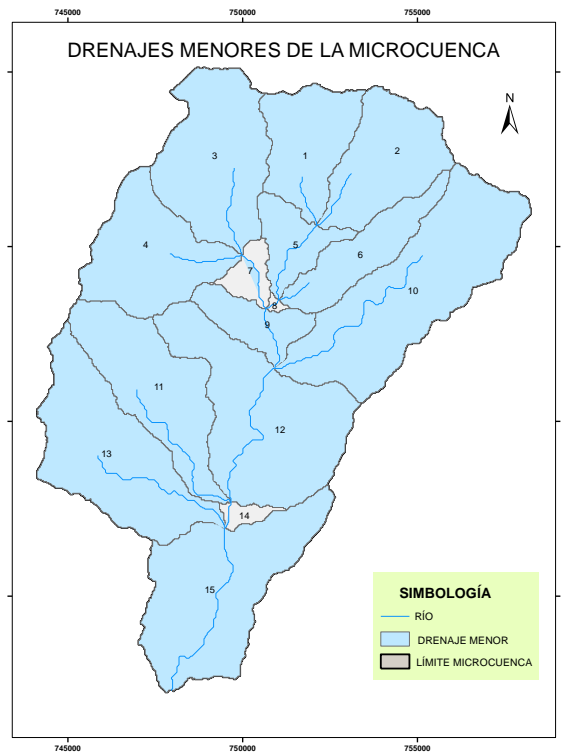


Figura 3.8. Drenajes menores de la cuenca del río Magdalena

Posteriormente, se realizaron comparaciones entre las variables, mediante un análisis de correlación lineal, como se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3.22. Comparación de variables simuladas para cada drenaje de la cuenca.

Año	Variables utilizadas para el coeficiente de Pearson
1986 y 2014	bosque vs caudal
	bosque vs áreas productoras
	áreas productoras vs caudal
	bosque vs percolación

3.3.3. Estrategias de conservación de las áreas productoras de agua

Las estrategias de conservación o manejo comprenden acciones de planificación, análisis de objetivos y visiones compartidas entre los diferentes actores, estableciendo redes de cooperación y reflexión para alcanzar una visión común, que favorezca el desarrollo integral de la microcuenca con base a la gestión de los recursos naturales y la conservación del ambiente para lograr el bienestar de la población (Amend, et al., 2002).

Para determinar las estrategias de conservación se utilizaron los resultados obtenidos a partir del análisis de cambio de uso del suelo y áreas productoras, los resultados arrojados por el modelo SWAT, además de la aplicación de un análisis F.O.D.A. (Fortalezas, Amenazas, Debilidades, Oportunidades) para identificar las potencialidades del sector y los factores internos y externos que inciden en la población y en la microcuenca, facilitando la obtención de datos a considerar dentro de las estrategias de conservación.

Para obtener información real del estado de la cuenca hidrográfica, se realizó un levantamiento de información en campo basado en observación directa y aplicación de encuestas de forma aleatoria sobre la población de las comunidades: Magdalena Alto y Magdalena Bajo. Ver formato de la encuesta en el Anexo 12.

Los datos considerados para desarrollar las estrategias de conservación se detallan a continuación:

- a) Identificación de impactos externos e internos sobre las áreas productoras de la cuenca mediante la aplicación de un análisis FODA.
- b) Aplicación de la normativa legal vigente del Ecuador.
- c) Análisis de involucrados estratégicos.
- d) Planteamiento de objetivos generales y metas de cada estrategia.
- e) Elaboración de proyectos y actividades a ser desarrollados dentro de cada estrategia, su duración y posibles fuentes de financiamiento.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se da a conocer los resultados obtenidos y las discusiones desarrolladas en la investigación.

4.1. Análisis del cambio de uso del suelo y áreas productoras de agua de los años 1986, 2000 y 2014

4.1.1. Uso del suelo

A partir de la clasificación supervisada de las imágenes satelitales Landsat de 1986, 2000 y 2014 se generaron 3 mapas, representando 3 categorías de coberturas de suelo (bosques, pastos y cultivos). En la figura 4.1. se presentan las clasificaciones obtenidas, con base a las cuales, se observa la mayor proporción de cambio en la parte baja y media de la cuenca, donde se aprecia un cambio considerable de bosques a pastizales y zona agrícola.

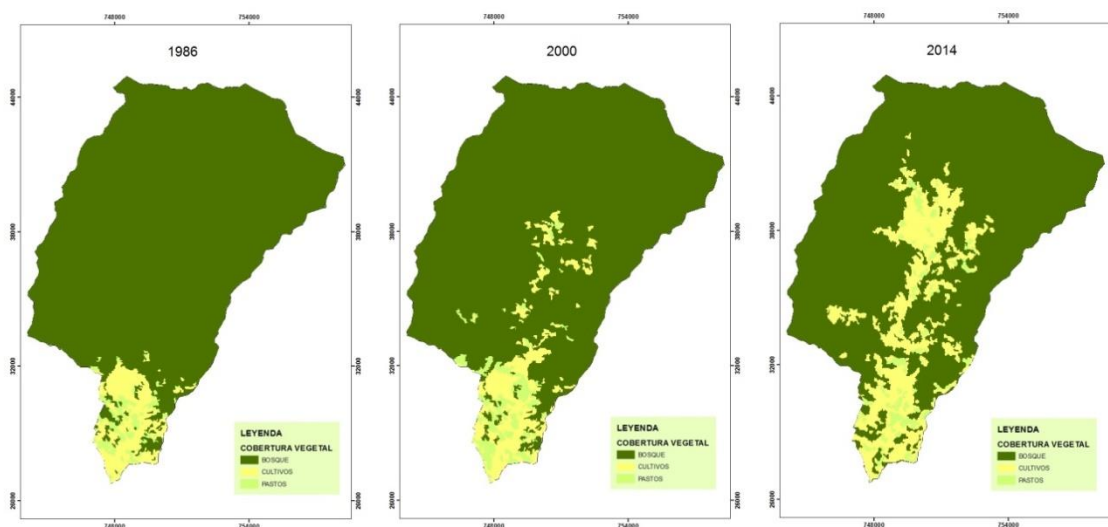


Figura 4.1. Uso del suelo de la cuenca en los años 1986, 2000 y 2014.

La superficie de bosque natural en el año 1986 fue de 11967,75 has; para el año 2000 fue de 11411,24 has, mientras que para el año 2014 hubo una disminución de 444,36 has, quedando un total de 10966,88 has. De igual manera, la superficie de pastos cultivados incrementó de 179,02 has en el año 1986 a 259,3 has en el año 2000 y posteriormente a 383,34 has para el año 2014. El porcentaje de cultivos pasó de 10% en el año 1986 a 14% en el año 2010 y posteriormente a 16% en el año 2014; de igual forma

el porcentaje de pastos incrementó de 1% en 1986, a 2% en 2000 y a 3% en 2014 como se muestra en la Tabla 4.1

Tabla .4.1. *Tasa de variación de uso del suelo.*

Tipo de cobertura	Año 1986		Año 2000		Año 2014		Tasa de variación (%)	
	has	%	has	%	has	%	1986-2000	2000-2014
Bosque	11967,75	89	11411,24	85	10966,88	81	-0,34	-0,28
Pastos	179,02	1	259,3	2	383,34	3	2,68	2,83
Cultivos	1345,87	10	1822,1	14	2142,42	16	2,19	3,38

Elaboración: La autora

En 1986 la superficie de bosque fue de 11967,75 has, sin embargo en 2000 esta cobertura disminuyó 556,51 has, dando una tasa de deforestación media anual de -0,34%, la cual es menor a lo reportado por el Ministerio del Ambiente (MAE) (-0,68%) en el periodo 1990-2000 en Ecuador (MAE, 2010). De igual forma para 2014, la superficie de bosque de la cuenca disminuyó a un total de 10966,88 has, generando una tasa de deforestación media anual de -0,28% el cual difiere con lo presentado por el MAE para el periodo 2000-2008 (-0,63%)

Los resultados obtenidos a partir del análisis multitemporal, corroboran estimaciones de coberturas vegetales y sus cambios, obtenidos en varias investigaciones dentro de la zona, como el estudio de Latorre, et al (2015), quienes estiman una tasa de deforestación mayor al 1% en el cantón Cotacachi, atribuyendo esta cifra a la ausencia de control forestal y la expansión de la frontera agrícola. De igual manera, en el Plan de Ordenamiento Territorial de la parroquia García Moreno, se estiman una tasa de deforestación de alrededor de 1,9% anual, debido a la tala ilegal del bosque, incluso dentro de las áreas de conservación comunitaria.

La baja tasa de deforestación de la cuenca del río Magdalena en relación a los valores estimados con los estudios de MAE, (2008); PDOT de García Moreno, (2011) y Latorre, et al (2015) puede atribuirse a la presencia de 2 bosques protectores (El Chontal y Los Cedros), los cuales abarcan un total de 6,166 has correspondiente al 45,71% de la cuenca regulando la expansión acelerada de la frontera agrícola. Figura 4.2.

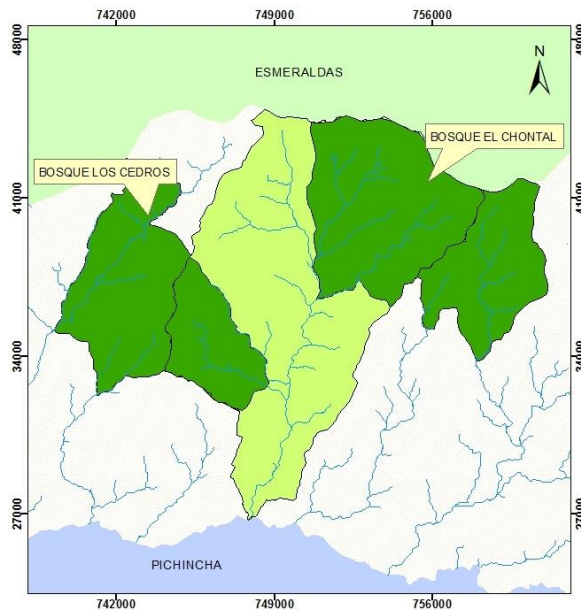


Figura 4.2. Bosques Protectores Los Cedros y El Chontal dentro de la cuenca del río Magdalena.

4.1.2. Áreas productoras de agua

A partir de la sobreposición de mapas de las 4 variables en el software arcGIS 10.4, y según los criterios desarrollados por Matus (2007), se identificaron las áreas de producción de agua de la microcuenca para cada uno de los años estudiados como se muestra en la Figura 4.3.

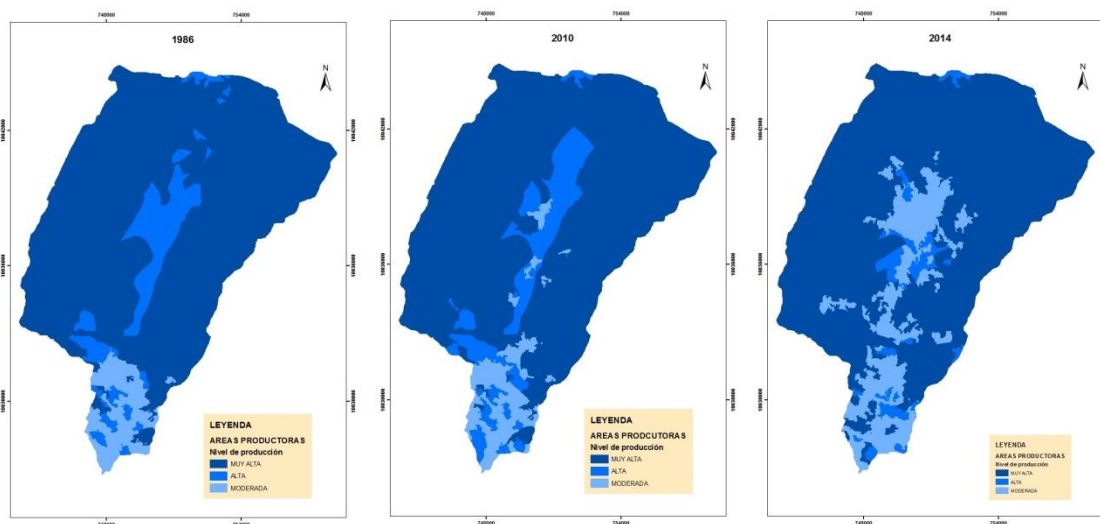


Figura 4.3. Áreas productoras de agua según el uso y cobertura vegetal en los años 1986, 2000 y 2014.

Dentro de la cuenca del río Magdalena se identificaron tres de las cinco categorías de producción de agua: zonas de muy alta, alta y moderada producción. Las zonas consideradas de muy alta y alta producción se encuentran distribuidas principalmente en la parte media y alta de la cuenca, en su mayoría dentro del área de los bosques protectores. Estas zonas se caracterizan por tener un rango de pendiente que varía entre 5 y 12%, considerado favorable para la infiltración de agua; las texturas de suelo en esta zona, varían de limoso a franco limoso con una alta retención del agua y un uso de suelo correspondiente al bosque nativo. Las zonas consideradas de moderada producción de agua se hallan ubicadas principalmente sobre los márgenes del río Magdalena en la parte media y baja de la microcuenca. Estas áreas, a diferencia de las de mayor producción, se caracterizan por presentar pendientes muy pronunciadas que superan el 50% disminuyendo la capacidad de retención e infiltración de agua, y presentan un uso de suelo correspondiente a pastizales y cultivos. Las texturas de suelo en esta zona varían de franco a franco limoso y arcilloso con una menor retención de agua asociada a la otras variables expuestas.

En la cuenca del río Magdalena, las áreas productoras han variado en función al uso del suelo, es así que las zonas consideradas de muy alta y alta producción de agua han disminuido a medida que aumenta el área de pastos y cultivos en la zona, como se muestra en la tabla 4.2

Tabla 4.2. *Tasa de variación de las áreas productoras de agua.*

Nivel de producción	Año 1986		Año 2000		Año 2014		Tasa de variación (%)	
	has	%	has	%	has	%	1986-2000	2000-2014
Muy alta	10114,5	74,9	9954,2	73,8	9478,13	70,2	-0,11	-0,35
Alta	3324,1	21,05	2912,5	21,6	2143,11	15,9	-0,84	-2,16
Moderada	547,04	4,05	625,94	4,6	1871,4	13,9	0,97	8,14

Elaboración: La autora

Esta tendencia de cambio se asemeja a lo demostrado en varios estudios como el de Urrutia (2016), en el que a través del análisis de 3 escenarios de cambio de cubierta vegetal en una cuenca, concluye que la respuesta hidrológica está directamente relacionada al tipo y distribución de la cobertura vegetal en la misma, es así que, al tener al suelo más cubierto se mejora la disponibilidad de agua en la misma. De igual forma, en el estudio de Chamorro (2016), se determinó que a pesar de que las actividades

agrícolas son fundamentales para el desarrollo productivo de una región, estos usos dificultan la recarga o producción de agua dentro de la zona debido a que los suelos son sobreexplotados, erosionados y con escasa vegetación arbustiva. Por tanto, al alterar la cobertura vegetal de una cuenca hidrográfica, se está alterando la capacidad de recarga de los acuíferos, y por ende la producción de agua de la misma (Uribe, 2010).

4.2. Simulación hidrológica de SWAT.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo hidrológico, corresponden a datos mensuales de las variables 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 cada escenario simulado.

4.2.1. Análisis de variación de caudal y percolación de los años simulados

Percolación.- Los valores obtenidos en cuanto a esta variable demostraron una disminución en la cuenca, pasando de 49,69 m³/s en el año 1986 a 32.86 m³/s para el año 2014 (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. *Percolación de la cuenca en los 2 años.*

Mes	Año 1986 (m ³ /s)	Año 2014 (m ³ /s)
Enero	6,33	4,74
Febrero	8,28	5,87
Marzo	5,05	1,70
Abril	8,83	8,72
Mayo	3,52	3,42
Junio	0,99	0,96
Julio	0,85	0,10
Agosto	0,41	0,16
Septiembre	0,55	0,50
Octubre	1,39	1,32
Noviembre	5,31	4,12
Diciembre	7,44	4,15
Total	48,95	35,76

6.68

Caudal.- El valor anual de la cuenca pasó de 45,85 m³/s en el año 1986 a 52,53m³/s para el año 2014, mostrando un porcentaje de cambio de 12,72% según la fórmula de Arias (2015) como se detalla en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. *Variación de caudales en los 2 años.*

Mes	Año 1986 (m ³ /s)	Año 2014 (m ³ /s)	Porcentaje de cambio (%)
Enero	3,5	3,73	6,17
Febrero	3,77	5,76	34,55
Marzo	4,96	5,79	14,34
Abril	6,1	8,29	26,42
Mayo	5,88	8,05	26,96
Junio	5,6	5,33	-5,07
Julio	2,54	2,40	-5,83
Agosto	2,3	1,41	-63,12
Septiembre	2,02	1,03	-96,12
Octubre	2,6	1,71	-52,05
Noviembre	3,14	5,46	42,49
Diciembre	3,44	3,57	3,64
Total	45,85	52,53	12,72

6.68

Los resultados de la simulación demuestran que el modelo evaluó satisfactoriamente la hidrología de la cuenca, mostrando un incremento de caudal durante la época lluviosa, y una disminución del mismo durante la época seca como se muestra en la Figura 4.4

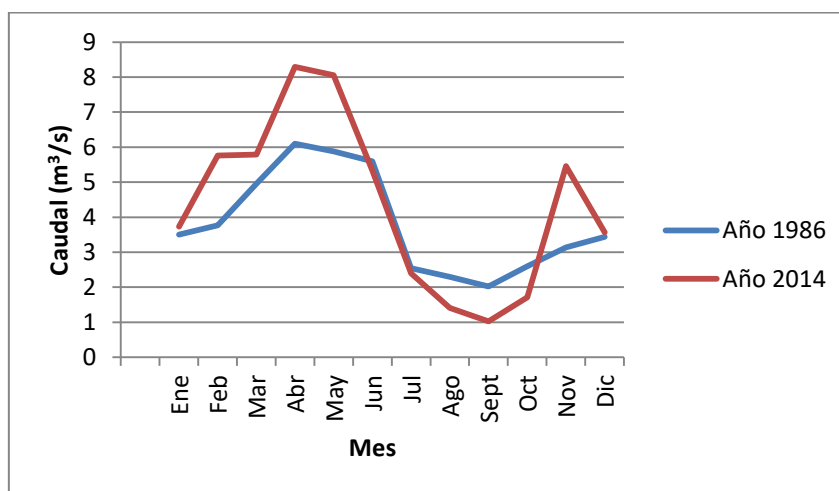


Figura 4.4. Caudales (1986) vs caudales (2014)

Elaboración: La autora

4.2.2. Validación de caudales simulados

Los datos de caudales obtenidos en campo durante los 8 meses de medición fueron comparados con los valores obtenidos a partir de la simulación para los mismos meses del año 2014 como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. *Caudales simulados vs caudales medidos*

Mes	Caudal simulado (m ³ /s)	Caudal medido (m ³ /s)
Enero	3,73	4,02
Febrero	5,76	4,28
Marzo	5,79	-
Abril	8,29	-
Mayo	8,05	-
Junio	5,33	-
Julio	2,40	2,71
Agosto	1,41	2,39
Septiembre	1,03	2,98
Octubre	1,71	2,65
Noviembre	5,46	3,9
Diciembre	3,57	3,62

La figura 4.5. muestra la dinámica de la escorrentía mensual de la microcuenca entre los datos medidos en el río Magdalena y los simulados por SWAT. Como se aprecia en la imagen, los valores mensuales simulados matienen la misma tendencia de los aforados, a excepción del mes de septiembre, en el que el modelo simula una disminución de caudal en relación a los meses de agosto y octubre.

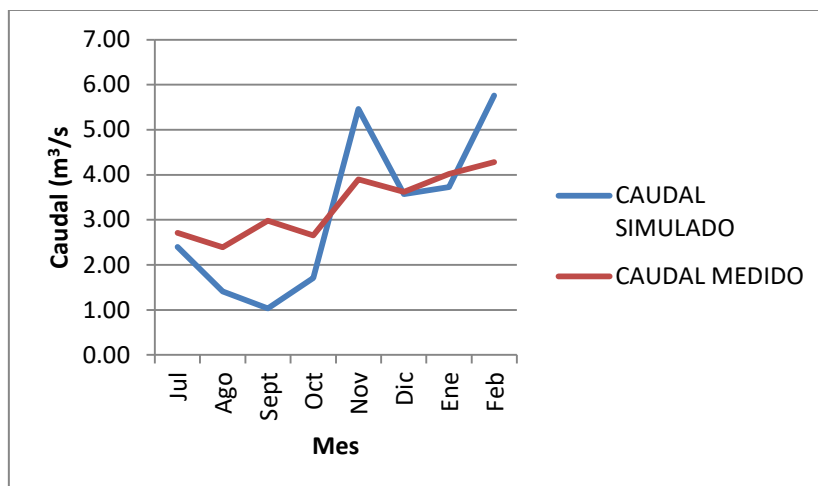


Figura 4.5. Tendencia de caudales simulados y medidos.

a) Validación de caudales con el coeficiente de determinación (R^2)

Mediante la aplicación de este coeficiente se obtuvo un valor R^2 de 0,797, el cual, según los criterios de Cabrera (2012), es un valor muy aceptable, lo que indica que el modelo representó de manera adecuada las condiciones reales del sistema. Figura 4.6.

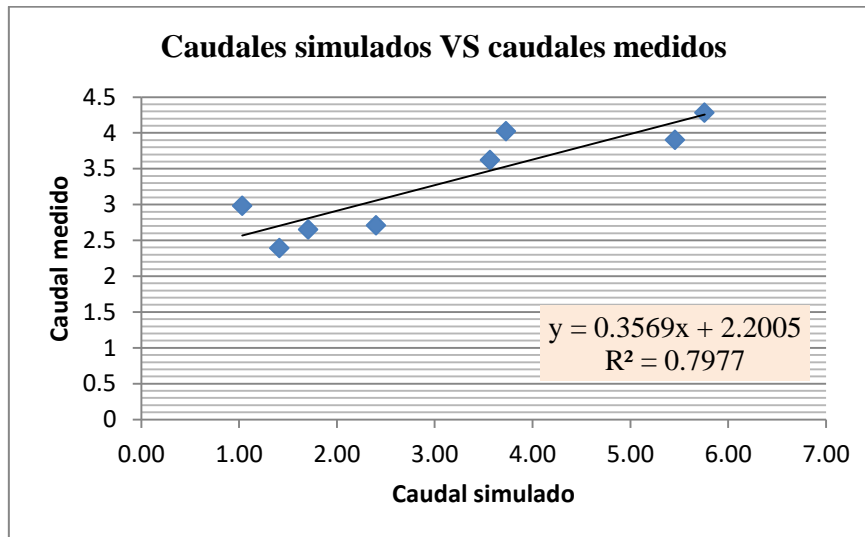


Figura 4.6. Análisis de correlación entre caudales simulados y caudales medidos.

b) Validación de caudales con el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF)

Al aplicar este coeficiente se obtuvo un valor de $EF = 0,94$, el cual, al igual que en el coeficiente de correlación, y según el criterio de Singh, et al (2004) significa que el resultado es muy aceptable.

Según Valdivieso y Naranjo (2003), la eficiencia del modelo depende de la preparación de los datos de entrada que se utilizan para la simulación, ya que con información completa de datos climáticos el modelo puede generar información con mejor ajuste a la realidad hidrológica de la microcuenca. Aunque los registros de datos climáticos de las estaciones del INAMHI contienen datos faltantes y períodos no registrados, los parámetros hidrológicos obtenidos presentan relación con las condiciones climáticas del lugar, además de un bajo grado de error según los coeficientes utilizados, demostrando la eficiencia del método de interpolación IDW en la generación de datos climáticos a partir de estaciones meteorológicas cercanas.

4.2.3. Relación entre el cambio de uso del suelo en las áreas productoras y las variables de caudal y percolación

Los porcentajes anuales de caudal y percolación de cada drenaje fueron comparados con el porcentaje de bosque y áreas productoras a partir de un análisis de regresión lineal R^2 como se muestra en la (figura 4.7). A partir de este análisis, se determinó una relación inversamente proporcional entre las variables de uso del suelo, áreas productoras y caudal, demostrando que al disminuir el porcentaje de bosque y áreas de muy alta producción de agua en la cuenca, el caudal disminuye; sin embargo, al comparar la variable del uso del suelo (cobertura boscosa) con las áreas productoras y la percolación, se obtuvo una relación directamente proporcional, es decir que mientras mayor es el porcentaje de bosque, la percolación y las áreas de mayor producción en cada drenaje aumentan.

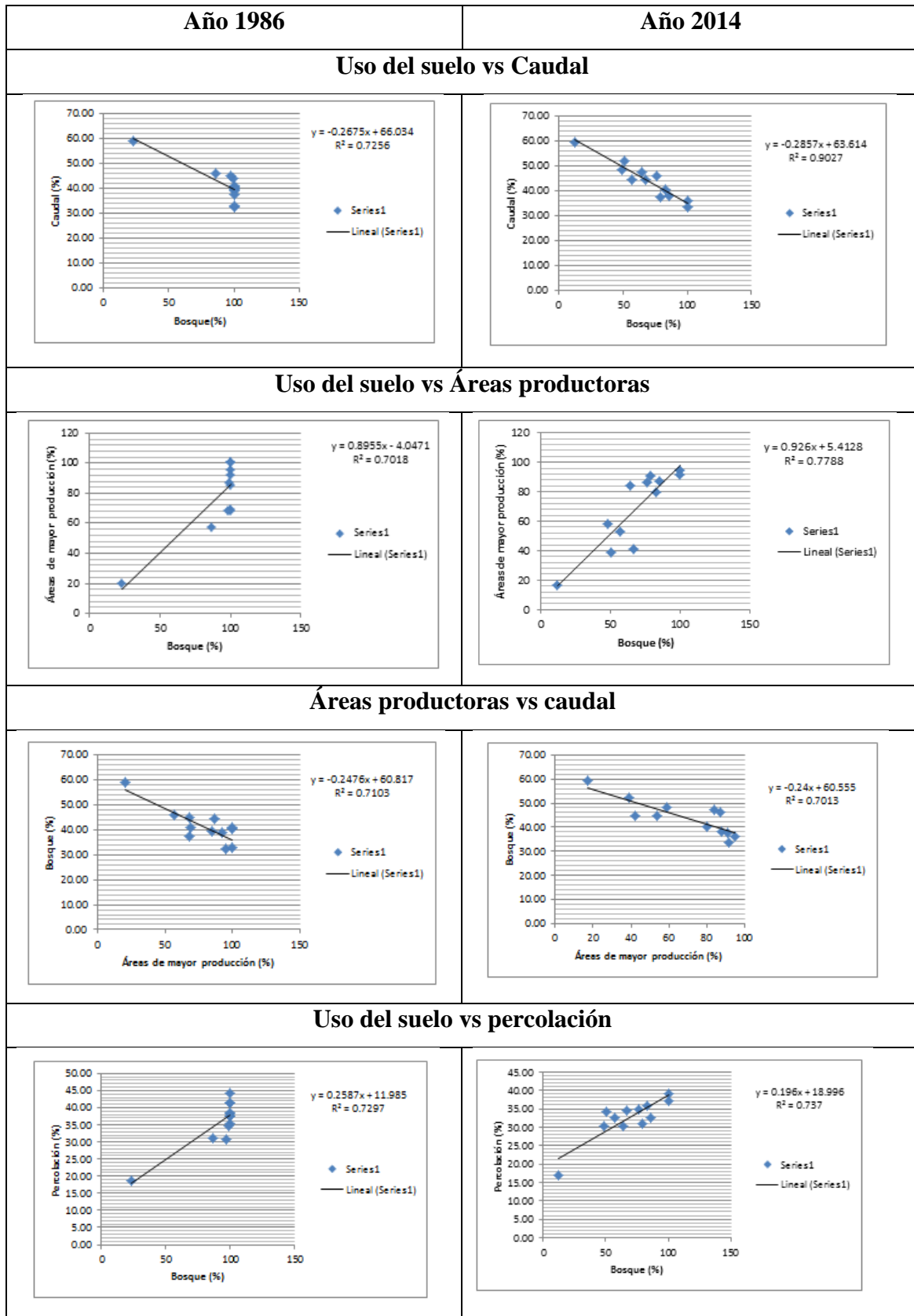


Figura 4.7. Comparación entre variables simuladas para cada drenaje en los años 1986 y 2014.

La tendencia de disminución de la percolación y la variación del caudal al comparar 2 escenarios de cobertura vegetal y uso de suelo, se ajusta a lo reportado con otros autores como Sahín y Hall (1996) y Little et al., (2009). Sahín y Hall (1996), a través del análisis y aplicación de SWAT en varias microcuencas con diferentes tipos de cubierta forestal, concluyen que las cuencas con deforestación total o parcial registran un aumento de caudales. Por su parte, Little et al. (2009) observan la misma tendencia en cuencas de mayor tamaño donde el reemplazo de bosques nativos por plantaciones de rápido crecimiento tiene un mayor efecto durante la época seca, provocando disminuciones en el caudal en un 42,7 % y 31,9% en dos cuencas de gran tamaño.

La disminución de los caudales a causa de los cambios de uso del suelo es notoriamente mayor durante la época de estiaje (Aguayo, Stehr y Link (2016). Las simulaciones hechas por Sánchez (2015) sobre una cuenca confirman que la baja disponibilidad de agua durante los meses de menor precipitación, se debe a que al agua precipitada que ingresa al sistema no se almacena adecuadamente cuando se reemplaza la cobertura vegetal original. Por tanto, si la capacidad de percolación del suelo es baja, la producción de agua será menor.

Varios autores coinciden que el principal efecto que tienen el bosque sobre el balance hídrico es la cantidad de precipitación que puede retener en el dosel y de esta manera, aumentar la infiltración del agua en el suelo reduciendo la escorrentía superficial dentro de la cuenca (Calder, 1993, Sánchez, 2015, Iroumé y Palacios, 2013). En efecto, cuanto se reemplaza la cobertura vegetal original se modifica significativamente la disponibilidad de agua dentro del sistema. Estos valores a su vez, varían dependiendo del régimen de precipitaciones y la capacidad de retención de humedad del suelo (Huber, Iroumé y Bathurst, 2008). Aguayo, et al (2016) concluyen que las variaciones de caudales constituyen una mínima aproximación a los verdaderos efectos del cambio de uso del suelo, ya que además existen otros factores como la variación en el régimen de las lluvias y los cambios de temperatura que agudizan los actuales problemas de disponibilidad de agua.

4.3. Estrategias de conservación de las áreas productoras de agua

El planteamiento de estrategias de conservación de las áreas productoras de agua pretende beneficiar principalmente a los habitantes de las comunidades ubicadas dentro de la microcuenca y a las autoridades del GAD parroquial de García Moreno ya que se

dispondrá de información base que ayude en la gestión de las áreas productoras de agua (los bosques) y su relación con el uso del suelo.

4.3.1. Identificación y descripción del problema

A partir de la aplicación de entrevistas a los dirigentes de las comunidades y 32 encuestas a los comuneros de Magdalena Alto y San Jose de Magdalena, se identificaron los siguientes problemas relacionados al cambio de uso del suelo en la cuenca.

Tabla 4.6. *Problemas asociados al cambio de uso del suelo sobre el recurso hídrico.*

Problema	Causa	Efecto positivo	Efecto negativo
Deforestación ilegal.	Falta de empleo de la población.	Mayores ingresos económicos.	Disminución de la cobertura vegetal nativa.
Presencia de monocultivos.	Rentabilidad económica con un producto.	_____	Degradación paulatina del suelo.
Aumento de carreteras.	Incremento poblacional.	Mejor acceso a las comunidades.	Compactación del suelo de la microcuenca.
Desconocimiento de la población sobre problemáticas ambientales.	Pobreza y limitada instrucción académica.	_____	Aumento de problemas ambientales en la microcuenca.

Elaboración: La autora.

4.3.2. Aplicación de una Matriz FODA

Mediante la aplicación de un análisis FODA se visualizaron los lineamientos estratégicos para el desarrollo y elaboración de las estrategias.

Tabla 4.7. *Análisis FODA de la microcuenca del río Magdalena.*

Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de la Junta de Agua con estructura organizada, manejada por representantes de la población y sus beneficiarios directos. • Presencia de dos bosques protectores dentro de la microcuenca destinados a la conservación de especies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Convenios interinstitucionales entre el GAD de Cotacachi y la Univerdidad Técnica del Norte. (Proyecto V5E) para evaluar el estado de los recursos naturales en la zona. • Aumento del número de asociaciones con enfoque de turismo ecológico en la zona. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la extensión agrícola en la parte media y baja de la cuenca. • Variaciones del caudal de agua del río. • Falta de control a la extracción maderera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de obras de infraestructura que modifican el cauce natural del río. • Aumento de actividades agrícolas en pendientes altas. • Aumento de deslizamientos en las vías generando un mayor aporte de sedimentos a los drenajes menores.

Elaboración: La autora.

Luego de haber definido las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas se realizó un análisis de cada una de ellas para puntualizar las diferentes estrategias en las que se debe trabajar.

Fortalezas: La microcuenca del río Magdalena posee grandes extensiones de bosque y vegetación arbustiva, el río aún provee suficiente cantidad de agua para abastecer a la población.

Oportunidades: Considerando los aspectos positivos dentro de la cuenca como la cantidad de agua disponible, la presencia de áreas aptas para regeneración natural y áreas protectoras de bosque; las entidades como GADs municipales y parroquiales e incluso el Ministerio del Ambiente, pueden involucrarse para brindar capacitaciones y elaborar proyectos.

Debilidades: Dentro de la población existe una falta de conciencia ambiental y un desconocimiento general de leyes ambientales, lo que ha provocado un mal manejo de los recursos naturales.

Amenazas: El avance de la frontera agrícola y la deforestación en sectores de altas pendientes y en áreas cercanas a los bosques protectores afecta ambientalmente a la microcuenca.

A partir del análisis de la matriz FODA se determinaron dos estrategias de manejo que permiten neutralizar los aspectos negativos (Debilidades y Amenazas) y conservar los positivos (Fortalezas y Oportunidades). Las estrategias son las siguientes:

Estrategia 1: Conservación del bosque como principal área productora de agua de la cuenca.

Estrategia 2: Educación ambiental.

4.3.3. Identificación y análisis de involucrados

Para el análisis e identificación de involucrados se tomó en cuenta el interés y el poder priorizado de cada organización como indica la tabla 4.8.

Tabla 4.8. *Análisis de involucrados.*

Organización	Interés		Poder	
	Descripción	Puntuación/5	Descripción	Puntuación/5
MAE	Uso sustentable de los recursos naturales.	4	Gestión a nivel nacional Gestión ambiental.	5
SENAGUA	Protección y manejo de fuentes hídricas	3	Gestión de los recursos hídricos. Gestión a nivel nacional	4
GAD Municipal Cotacachi	Implementación del plan de manejo	3	Gestión en el cantón Cotacachi Creación ordenanzas.	4
GAD Parroquial García Moreno	Conservación y protección del ambiente mediante actividades comunitarias.	3	Coordinación con los demás GAD Autonomía financiera Gestión en toda la parroquia de García Moreno.	3
Junta administradora de Agua	Mejoramiento organizativo y estructural	5	Autonomía de gestión Grupo organizado	2
Comunidades	Ejecución del Plan de manejo y conservación de las áreas de producción de agua.	5	Grupo interesado	1

A partir del análisis de involucrados se establecieron que los representantes de mayor prioridad en el proyecto se encuentran en el cuadrante III.

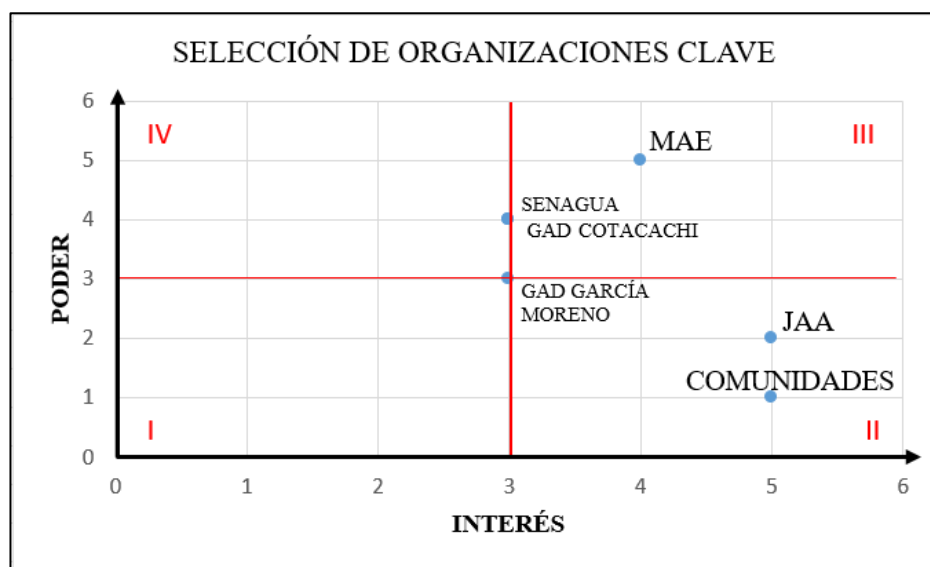


Figura 4.8. Involucrados estratégicos: “Poder Vs. Interés”

Como se muestra en la figura 4.8, los actores estratégicos para la ejecución de las estrategias de manejo son SENAGUA, MAE y el GAD Municipal de Cotacachi.

4.3.4. Estrategias de ejecución

Estrategia 1: Conservación del bosque como principal área productora de la cuenca

Esta estrategia está encaminada a mantener en buen estado las áreas con mayor potencial de producción de agua de la cuenca, los bosques, generadores de los servicios ecosistémicos de los cuales la población se abastece.

Meta: Reducir los efectos del cambio de uso del suelo en la cuenca.

Proyecto: Protección participativa del bosque dentro y fuera de los límites de los Bosques Protectores.

Este proyecto tiene como finalidad el dar a conocer a la población la importancia de los dos bosques protectores presentes en la microcuenca, y plantar especies nativas de la microcuenca en zonas de importancia hídrica y proteger aquellos espacios que ya se encuentran en proceso de regeneración con apoyo y participación de las autoridades locales y la población de la zona.

Actividades: Las actividades ha desarrollarse dentro de este proyecto, se detallan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. *Actividades valoradas para el proyecto de protección participativa del bosque.*

Actividades	Presupuesto referencial (Dólares)	Tiempo de ejecución	Posibles fuentes de financiamiento	Entidades encargadas	Medios de verificación
Socialización de la importancia del Bosque Protector Los Cedros y El Chontal a los pobladores de las comunidades inmersas en el área de influencia de los bosques.	200	4 meses	<ul style="list-style-type: none"> • Ministerio del Ambiente (MAE). • ONGs 	<ul style="list-style-type: none"> • GAD Municipal de Cotacachi. • Junta de Agua. • Autoridades administrativas de los bosques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lista de asistencia de los pobladores de cada comunidad. • Informe y registro fotográfico.
Reforestación con especies nativas, en zonas intervenidas y con altas pendientes, además de zonas cercanas a los límites de los bosques protectores	2500	8 meses	<ul style="list-style-type: none"> • Ministerio del Ambiente. • ONGs. 	<ul style="list-style-type: none"> • GAD Municipal de Cotacachi. • Junta de Agua. • Comuneros 	<ul style="list-style-type: none"> • Informe y registro fotográfico de las actividades de reforestación y seguimiento de especies plantadas.

Elaboración: La autora

Estrategia 2: Educación ambiental

Tomando en cuenta la situación actual de la microcuenca y la falta de conciencia ambiental por parte de la población, se pretende capacitar de forma continua a los dirigentes e integrantes de la comunidad sobre temáticas ambientales enfocadas en la relación de la

producción de agua y el uso del suelo, para lo cual se dará a conocer las leyes vigentes en el ámbito de conservación del recurso hídrico.

Meta: Educar a la población sobre la importancia de mantener y cuidar los bosques para garantizar la protección y conservación del recurso hídrico de la microcuenca.

Proyecto: Buenas prácticas ambientales para el manejo adecuado del recurso hídrico

Este proyecto pretende impulsar el desarrollo sostenible en la microcuenca y disminuir las malas prácticas ambientales asociadas al cambio de uso de suelo.

Actividades: Las actividades que se desarrollarán dentro de este proyecto se detallan en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. *Actividades valoradas para el proyecto de buenas prácticas ambientales.*

Actividades	Presupuesto referencial (Dólares)	Tiempo de ejecución	Posibles fuentes de financiamiento	Entidades encargadas	Medios de verificación
Aplicación de talleres de capacitación dirigidos a líderes comunales y la población inmersa dentro de la cuenca.	300	3 meses	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno Provincial de Imbabura. • GAD Municipal de Cotacachi. • ONGs 	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno Provincial de Imbabura. • GAD Municipal de Cotacachi. • Autoridades administrativas de los bosques protectores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lista de asistencia de los pobladores de cada comunidad . • Informe y registro fotográfico .

Elaboración: La autora

La estructura de los talleres que se realizarán dentro de este proyecto, se detallan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. *Talleres de capacitación.*

Taller	Temática	Entidad encargada
Uso y aprovechamiento del agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Conservación del recurso hídrico • Deberes y atribuciones de las juntas administradoras de agua potable. • Conservación del bosque como área productora de agua. 	SENAGUA Gobierno provincial.
Desarrollo sustentable	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de reciclaje. • Uso de las tres “r”: reducir, reciclar y reutilizar. • Creación de compost a partir de desechos orgánicos. 	Ministerio del ambiente (MAE)
Agroecología y presencia de monocultivos.	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas agroecológicas. • Contaminación de agua y suelo por el uso de agroquímicos. • Rotación de cultivos. 	Ministerio del ambiente (MAE) Gobierno provincial.

Elaboración: La autora

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Dentro de la microcuenca se identificaron tres categorías de uso del suelo correspondientes a bosque, pastizales y cultivos; y tres categorías de producción de agua correspondiente a muy alta, alta y moderada, de las cuales, la categoría de bosque y zonas de muy alta producción de agua son las que predominan en la cuenca en los 3 años de estudio.
- El análisis de cambio de uso del suelo de la cuenca generó una tasa de disminución del bosque de -0,28% entre los años 1986 y 2000 y -0,32% entre 2000 y 2014; mientras que, la tasa de cambio de las áreas de muy alta producción pasó de -0,11% entre 1986 y 2000 a -0,35% entre 2000 y 2014.
- Los resultados de la simulación hidrológica de los años 1986 y 2014 mostraron una variación en aumento del caudal total de la cuenca del 12,72%. Los valores obtenidos del año 2014 fueron validados con los caudales medidos en el río mediante el índice de Nash-Sutcliffe, obteniéndose un coeficiente de 0,94, y el coeficiente de determinación R^2 , con un valor de 0.79, que indican que el modelo representó de manera confiable los procesos hidrológicos de la microcuenca.
- Al comparar los valores simulados para cada drenaje de la microcuenca, se obtuvo una relación directamente proporcional entre el uso del suelo, las áreas productoras y la percolación, e inversamente proporcional entre el uso del suelo y el caudal, obteniéndose valores de R^2 superiores a 0.7, demostrando que, mientras mayor es la superficie de bosque, la percolación de cada drenaje aumenta, mientras la escorrentía superficial disminuye, afectando el flujo de retorno en la época de bajas precipitaciones.
- Las estrategias de manejo sustentable propuestas, permitirán un manejo del recurso hídrico de manera organizada con participación comunitaria, para garantizar la sostenibilidad hídrica de la cuenca.

5.2. Recomendaciones

- Replicar la metodología del presente estudio en microcuencas cercanas con el fin de evaluar los impactos del cambio de uso del suelo en la producción de agua a mayor escala en la Zona de Íntag.
- Considerar las estrategias de manejo sustentable propuestas en este estudio, para fortalecer el Plan de Ordenamiento Territorial de García Moreno, de forma que sea integrado en un modelo estratégico aplicable enfocado en conservar y mantener las zonas productoras de agua identificadas para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en el lugar.
- Debido a que el Proyecto Hidroeléctrico Manduriacus se abastece de varios ríos, entre estos el Magdalena, se recomienda realizar una modelación hidrológica anual de cada microcuenca abastecedora, con el fin de determinar la variación de caudales y sedimentos generados.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, M., Stehr, A. y Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de Geografía Norte Grande*, 65, 197-214.
- Amend, S., Giraldo, A., Oltremari, J., Sánchez, R., Valarezo, V. y Yerena, E. (2002). Planes de manejo: conceptos y propuestas. *Parques nacionales y conservación ambiental*, (10).
- Arias, P. (2015). *Vulnerabilidad al cambio climático e inseguridad hídrica: El caso de la cuenca del río Pichaví, (Cotacachi-Ecuador)*. (Tesis de Maestría). Universitat Heidelberg. Santiago de Chile, Chile.
- Arnold, J., Williams, J. y Maidment, D. (1995) Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2): 171-183.
- Cabrera, J. (2012). *Modelos hidrológicos*. Universidad Nacional De Ingeniería, Lima, Perú.
- Cacoango, J. (2014). *Modelamiento de la microcuenca del río Illangama con la utilización del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool "Swat"*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Cadena, H. (2012). *Hablemos de riego. Creadores gráficos*. Quito - Ecuador. 43.
- Calder, I. (1993). *Effects of Land-Use Change: Handbook of Hydrology*. New York, USA: Maidment, D.R.
- CARE (2014). *Plan estratégico Red de Íntag*. Recuperado de <http://www.care.org.ec/wp-content/uploads/2014/04/Plan-Estrategico-de-turismo-de-INTAG.pdf>
- Carrillo, J., Cardona, A., Huízar, R., & Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 303-319.
- CEPAL (2013). *Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial*. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) Primera Edición, Junio 2013.

http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36817/S2014205_es.pdf?sequence=1

- Chamorro, M. (2016). Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas sig de los acuíferos la carbonería, guaraczapas, yuyucocha y santa clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra. Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. España: Ariel.
- Constitución de la República del Ecuador. (2009). Ecuador.
- Crespo, P., Coello C., Iñiguez, V., Cisneros F., Cisneros P., Ramírez M. y Feyen J. (Octubre, 2008). Evaluación de SWAT 2000 como herramienta para el análisis de escenarios de cambio de uso del suelo en microcuencas de montaña del sur del Ecuador. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, SECSuelo, Quito.
- Dwarakish, G. y Ganasri B. (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1). 1-2.
- FAO (2000). Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales. Actas del taller electrónico organizado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO 18 de septiembre-27 de octubre de 2000. Roma. <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lw9s.pdf>
- FAO (2006). Global forest resources assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. Rome.
- FAO (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo y los desastres naturales en Guatemala*. Recuperado de <http://coin.fao.org/coin-static/cms/media/5/12820628912320/fao20manejo20de20cuencas.pdf>
- Faustino, G. (2006). Manejo de cuencas y conservación de suelos. Universidad Católica de Chile.
- Figuroa, M., Ibáñez, L., Arteaga, R., Arellano, J. y Vázquez, M. (2010). Cambio de uso de suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *SciELO, Agrociencia*.45 (5).

- Fries, A., Rollenbeck, R., Naub, T. y Bendix, 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.
- García, J. y Cebrián, F. (2015) *La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de albacete*. http://age-tig.es/docs/XII_1/012%20-%20Garcia%20y%20Cebrian.pdf
- Gualotuña, A. (2012). *Desarrollo y economía socio-comunitaria productiva en Íntag*. Universidad Andina Simón Bolívar, Quito.
- Guerrero, J. (2015). Interpolación IDW (ponderada por el inverso de la distancia) en PyQGIS. <https://joseguerreroa.wordpress.com/2015/10/03/interpolacion-idw-ponderada-por-el-inverso-de-la-distancia-en-pyqgis/>
- Hibbert, A. (1967). Forest treatment effects on water yield, en: International Symposium on Forest Hydrology, Sopper, W.E., Lull H. W. (Eds). Pergamon, Oxford, p. 813.
- Huber, A., Iroumé, A. y Bathurst, J. (2008). Effect of Pinus radiata plantation on water balance in Chile. *Hydrological Process*. 22, 142-148.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). 2010. Boletines mensuales. Consultado el 18 de mayo del 2016. Disponible en: <http://www.inamhi.gov.ec/html/inicio.htm>
- Iroumé, A. y Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 505, 113-125.
- Khan, S., & Rushton, K. R. (1996). Reappraisal of flow to tile drains II. Time-variant response. *Journal of Hydrology*, 183(3-4), 367-382. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02948-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02948-6) Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169495029486>
- Knee, K. y Encalada, A. (2012). *La calidad del agua en la zona de Íntag (Imbabura) y su relación con el uso del suelo*. Quito, Ecuador: Karen Knee-DECOIN.
- Kocian, M., Batker, D., Harrison-Cox, J. (2011). Estudio ecológico de la región de Intag, Ecuador: Impactos ambientales y recompensas potenciales de la minería. *Earth Economics*, Tacoma, WA, Estados Unidos.

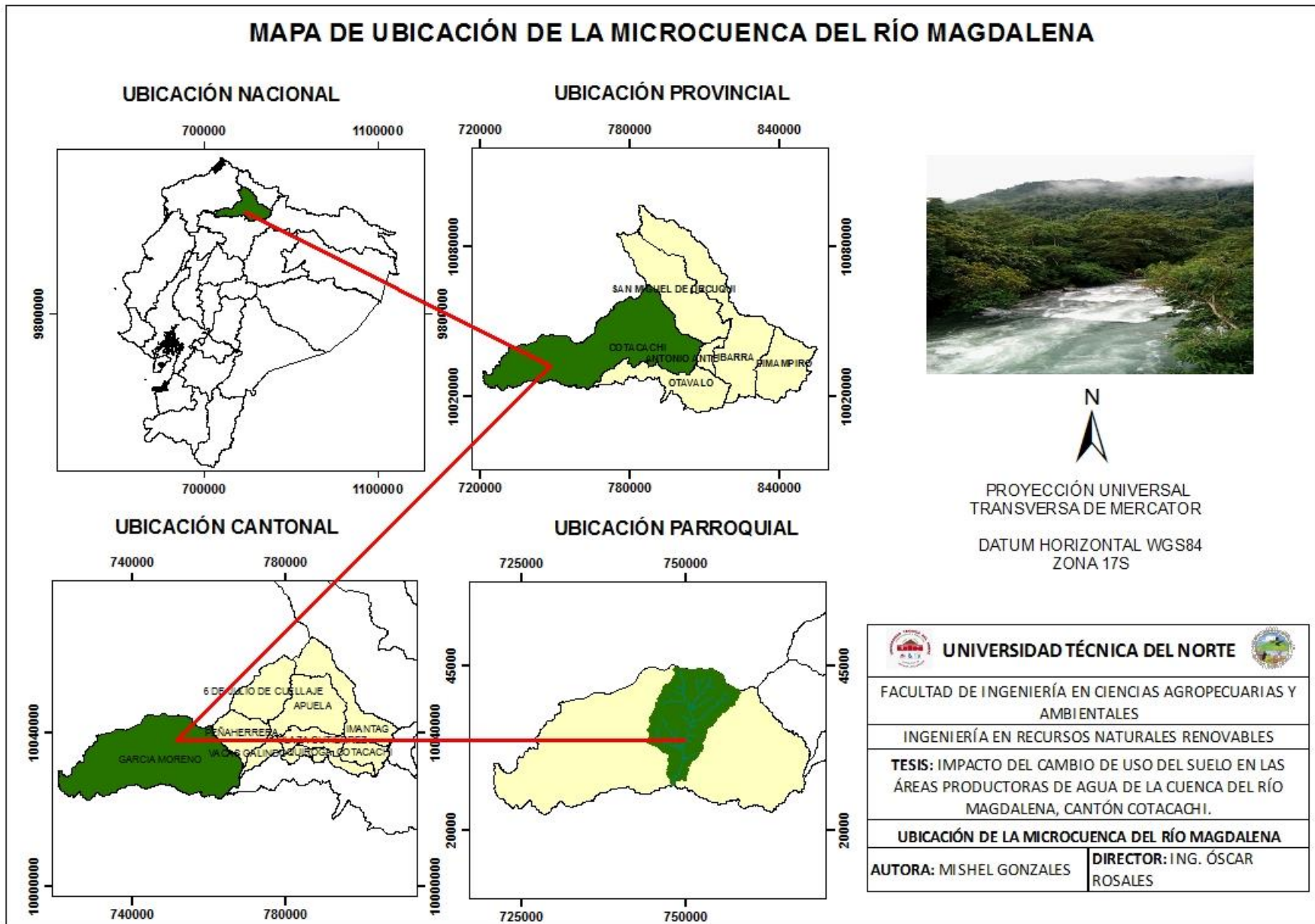
- Lambin, E. (1997). *Modelling deforestation processes: a review tropical ecosystem environmet observations by satellites*. Luxemburgo: TREE Series B.
- Latorre S., Walter M. y Larrea C. *Íntag, un territorio en disputa: evaluación de escenarios territoriales y no extractivistas*. Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- 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.
- Losilla, M. 1986. Protección de las zonas de recarga de los acuíferos. In Bases hidrológicas para el manejo de cuencas. Turrialba, CR, CATIE. 8 p.
- Maderey, R. (2005). Principios de hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico. Mexico.
- Martínez, R., Montoya, A., Calderón, M. y Camacho N. (2006). La cobertura vegetal en la cuenca del canal de Panamá. <http://www.micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2012/06/cobertura-vegetal.pdf>
- Matus, S. (2007). Elaboración participativa de una metodología para identificar zonas potenciales de recarga hídrica aplicada a la subcuenca del río juquapa. Turrialba: Catie. 247.
- McColl, C., & Aggett, G. (2007). Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, 84, 494–512.
- McCuen, R., Knight, Z. y Cutter A. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *Journal Hydrology Eng.* 11, 597-602.
- Ministerio del Ambiente Ecuador (MAE). (2006). El recurso agua en Ecuador. En línea. Disponible en: www.ambiente.gob.ec
- Ministerio del Ambiente Ecuador (MAE). (2010). Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador Continental. En línea. Disponible en: www.ambiente.gob.ec
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J., Pardo, A. y Rendón J. (2012). *Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos*. Universidad de San Buenaventura. Medellín, Colombia.
- Neitsch, S., Arnold, J., & Kiniry, J. (2005). Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua Documentación Teórica, 415. Retrieved from <http://swatmodel.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>

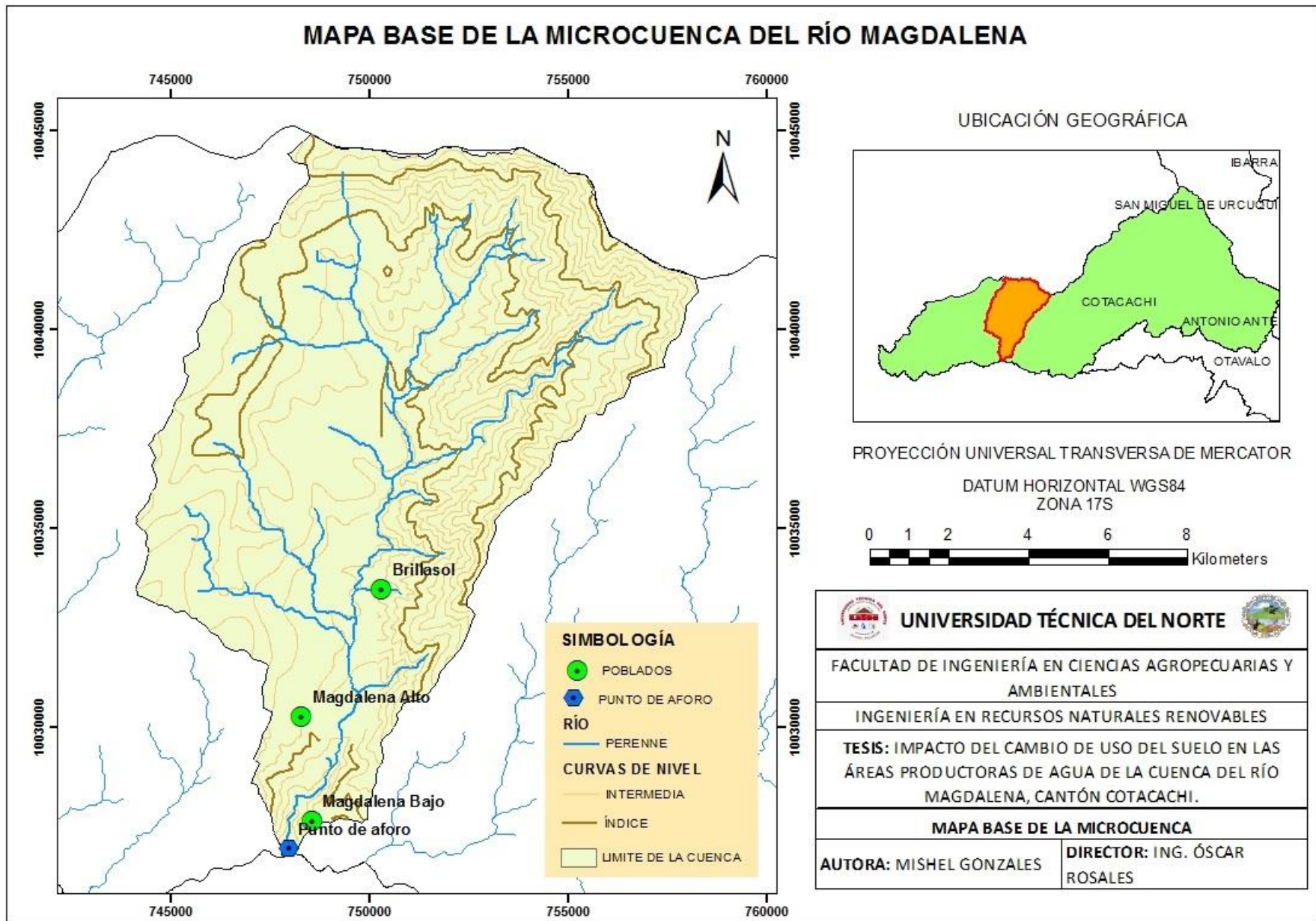
- Oropeza, M. (1999). Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacán Sinaloa.
- Peñuela, L. (2007). *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pafo por servicio ambiental hidrológico, Sierra Nevada y Las Cruces*. México: UNAM.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., y Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográficas y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. Analysis of land use changes in the State of M. *Boletín Del Instituto de Geografía UNAM*, 69, 33-52.
- Pourrut, P., Róvere, O., Romo, I. y Villacreses, H. (1990). El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, esorrentía. *Estudios de Geografía*, 7, 13.
- RAMSAR, (2010). Manejo de cuencas hidrográficas: Integración de la conservación y del uso racional de los humedales en el manejo de las cuencas hidrográficas. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición, vol. 9. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Ritter, A., Muñoz-Carpena 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*, 10.
- Royo, L. (2012). Modelos de superficie. Interpolaciones. <http://inisig.com/modelos-de-superficie-interpolaciones-2/>
- Sahín, V., y Hall, M. (1996), The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, Vol. 178, N° 1-4, p. 293-309.
- Salgado, J. y Güitrón de los Reyes, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos.
- Sarkar, A., & Kumar, R. (2012). Artificial neural networks for event based rainfall–runoff modeling. *Journal of Water Resource and Protection*, 04, 891–897.
- SENAGUA. (2014). *Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. Recuperado de: <http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/LEYD-E-RECURSOS-HIDRICOS-II-SUPLEMENTO-RO-305-6-08-204.pdf>

- Singh, J., Knapp, H. y Demissie, M. (2004) Hydrologic modeling of Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. *ISWS CR 2004, 08. Champaign, III: Illinois State Water Survey.*
- Siriwardena, L., Finlayson, B.L. and McMahon. T.A. (2006) The Impact of Land Use Change on Catchment Hydrology in Large Catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326, 199-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.030>
- Tang, L., Yang, D., Hu, H., & Gao, B. (2011). Detecting the effect of land-use change on streamflow, sediment and nutrient losses by distributed hydrological simulation. *Journal of Hydrology*, 409, 172–182.
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT 2005. SWAT Soil and Water Assessment Tool, 1–47. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- 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. Bogotá D.C., Colombia.
- Valdivieso, F., y Naranjo, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. *Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas* (pp. 8-13).
- Watson, D. F. y G. M. Philip. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation". *Geoprocessing* 2:315–327. 1985.

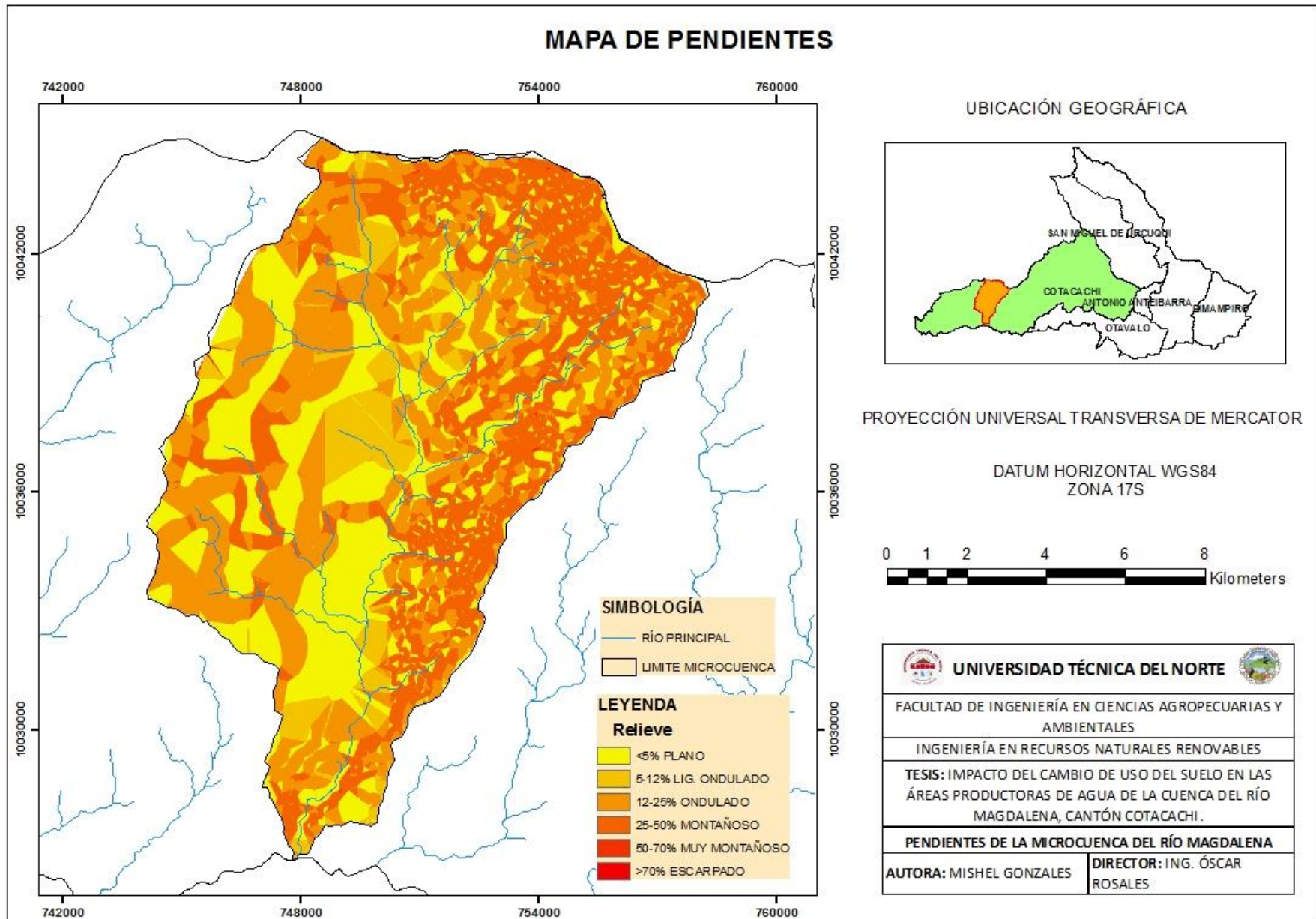
ANEXOS

Anexo 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

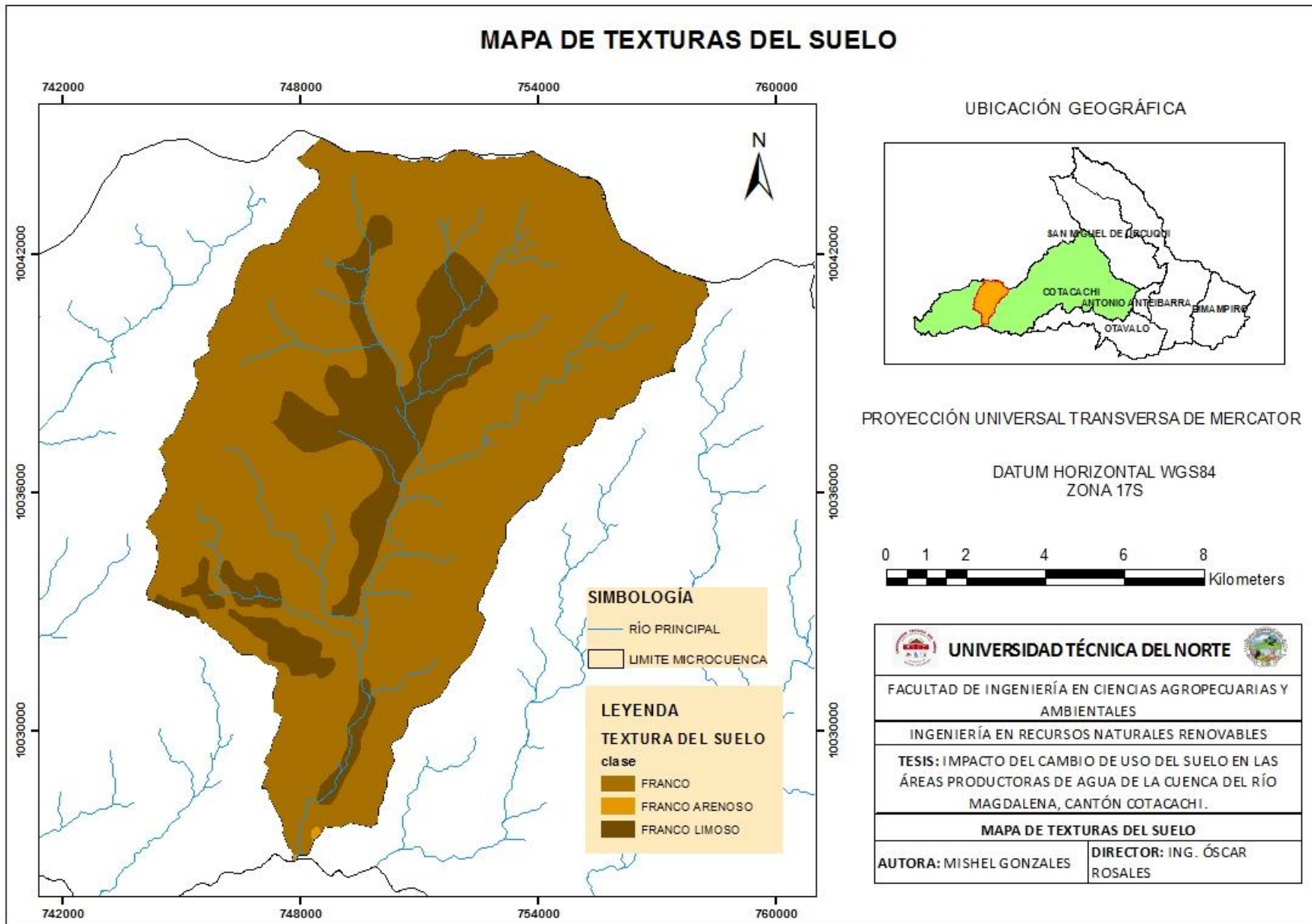




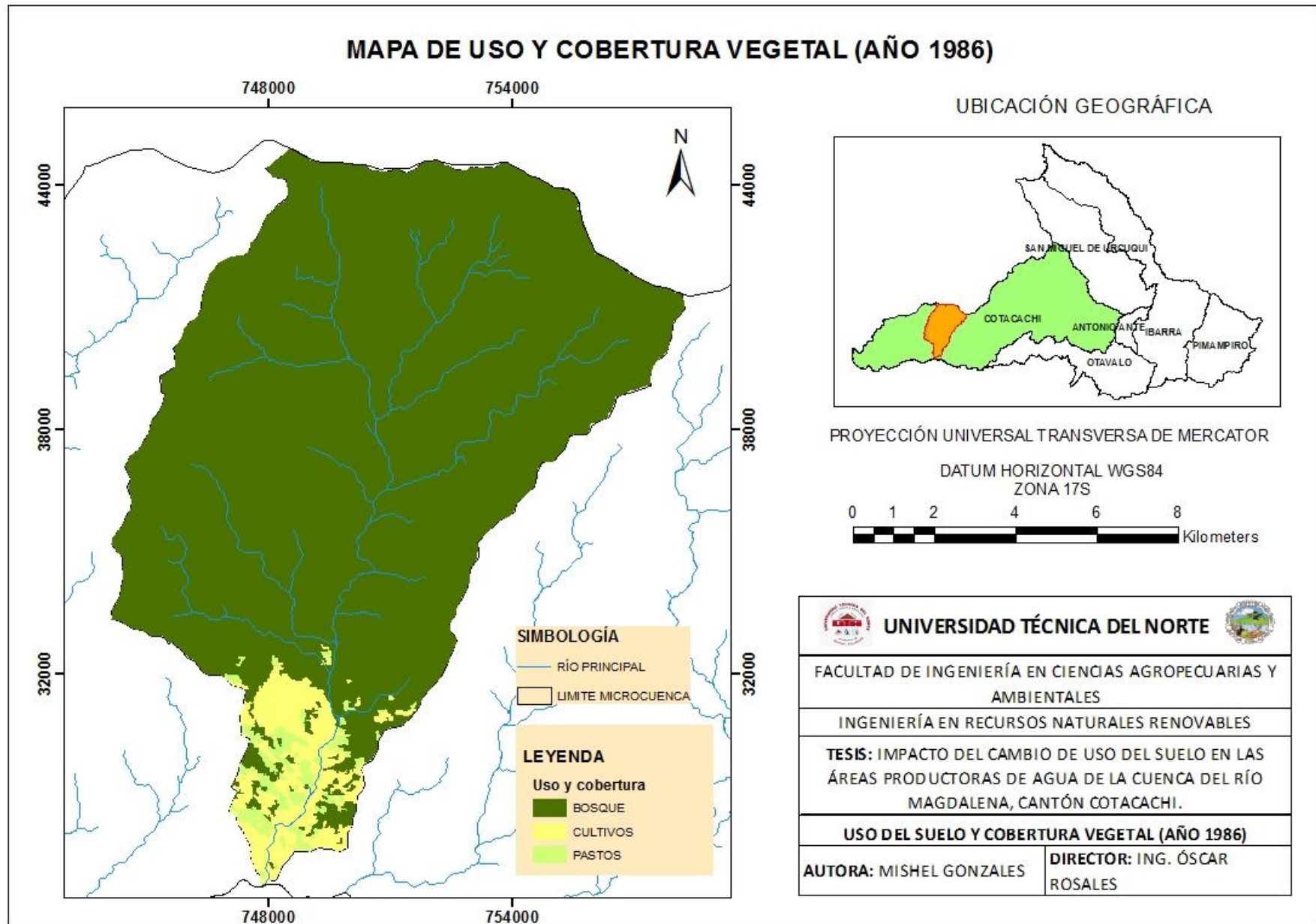
Anexo 3. Mapa de pendientes.

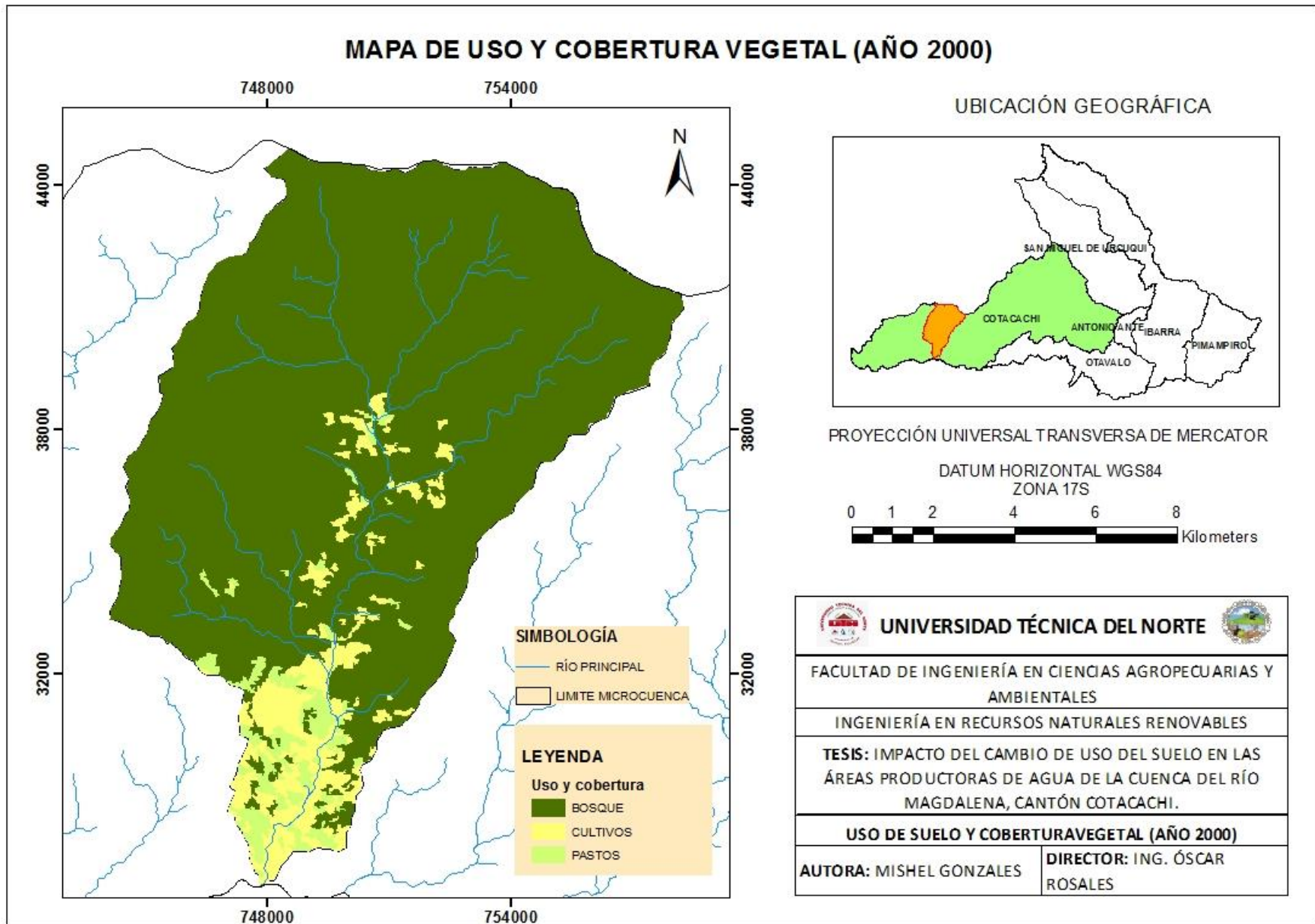


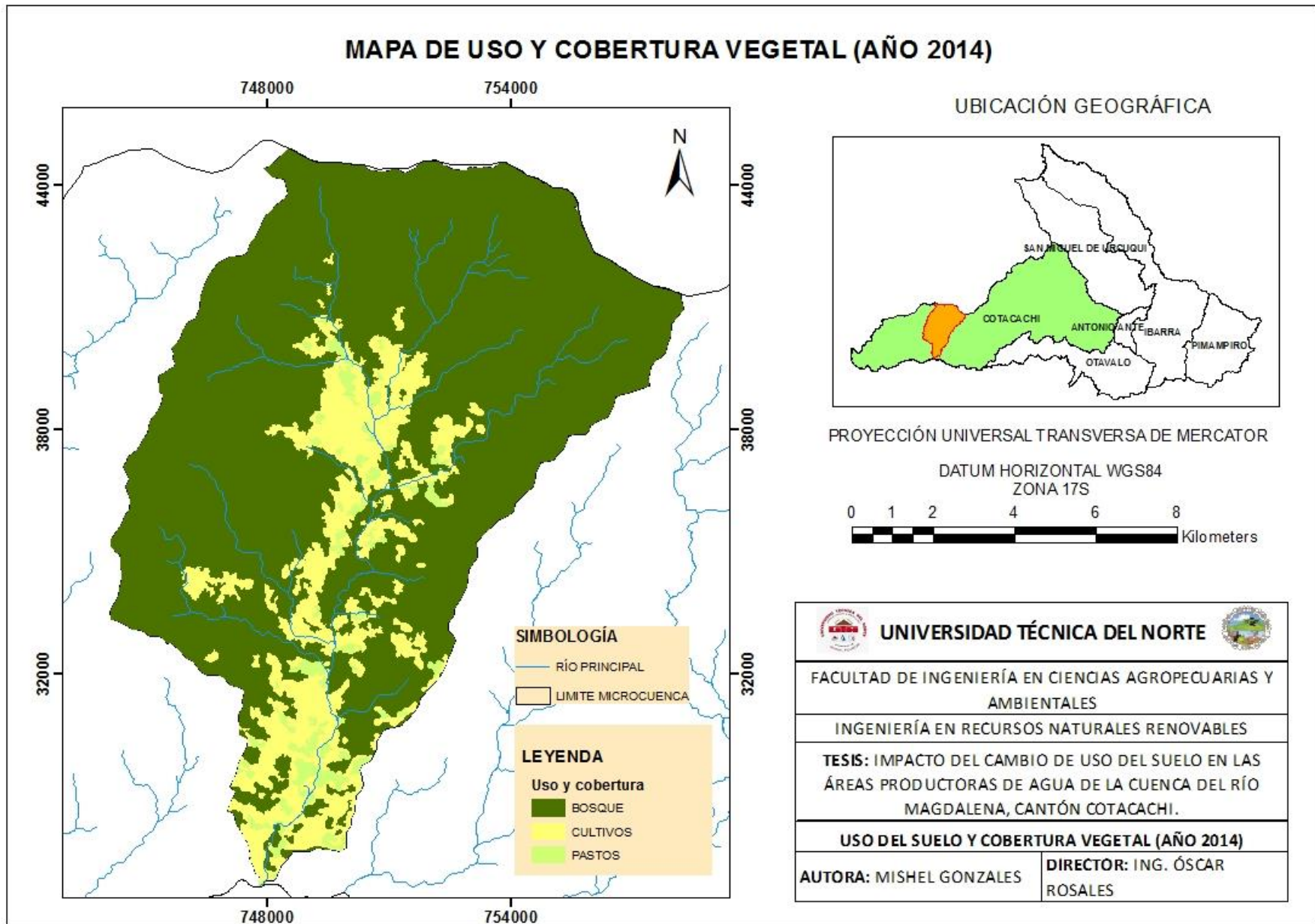
Anexo 4. Mapa de texturas del suelo



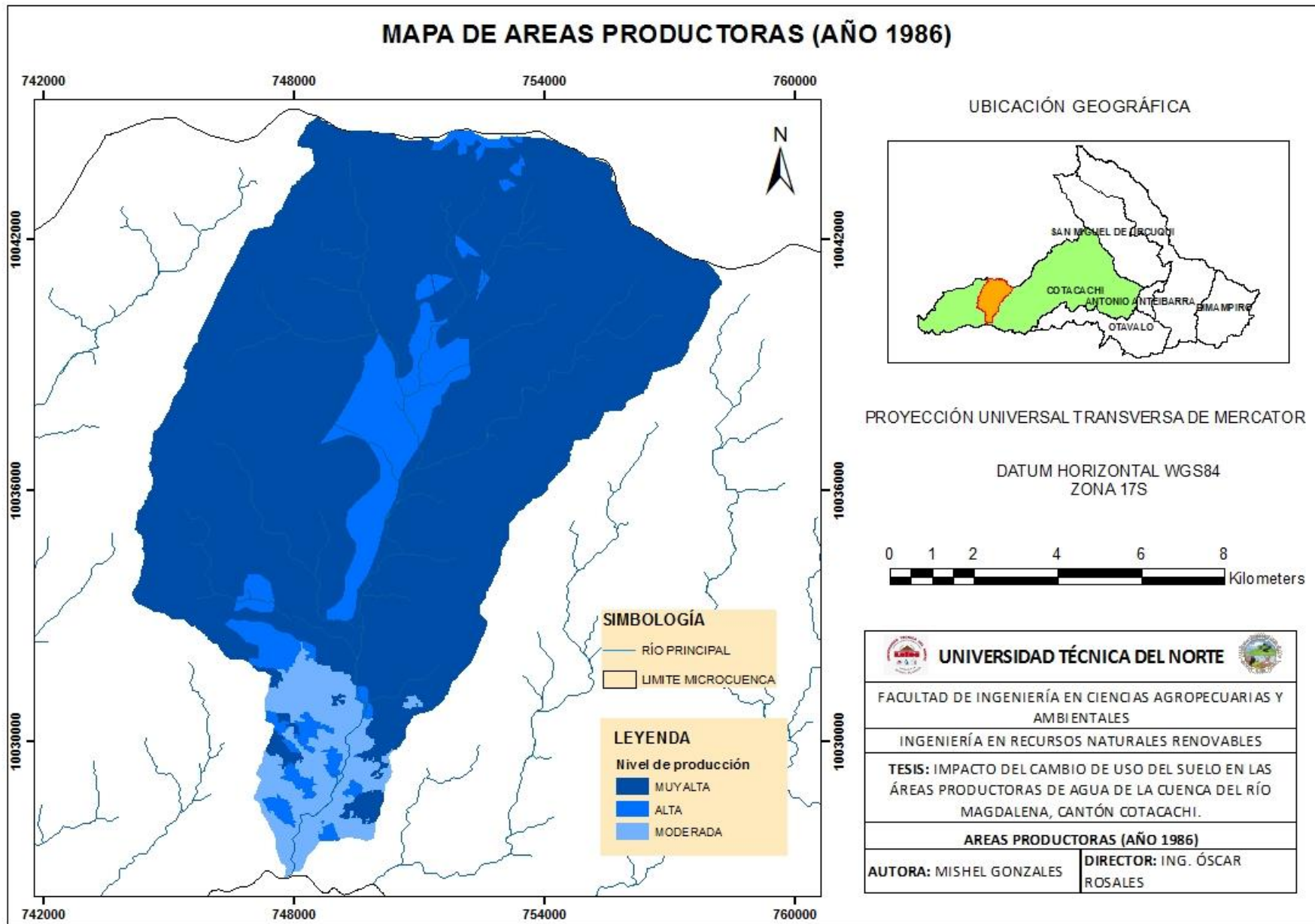
Anexo 5. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal (1986)



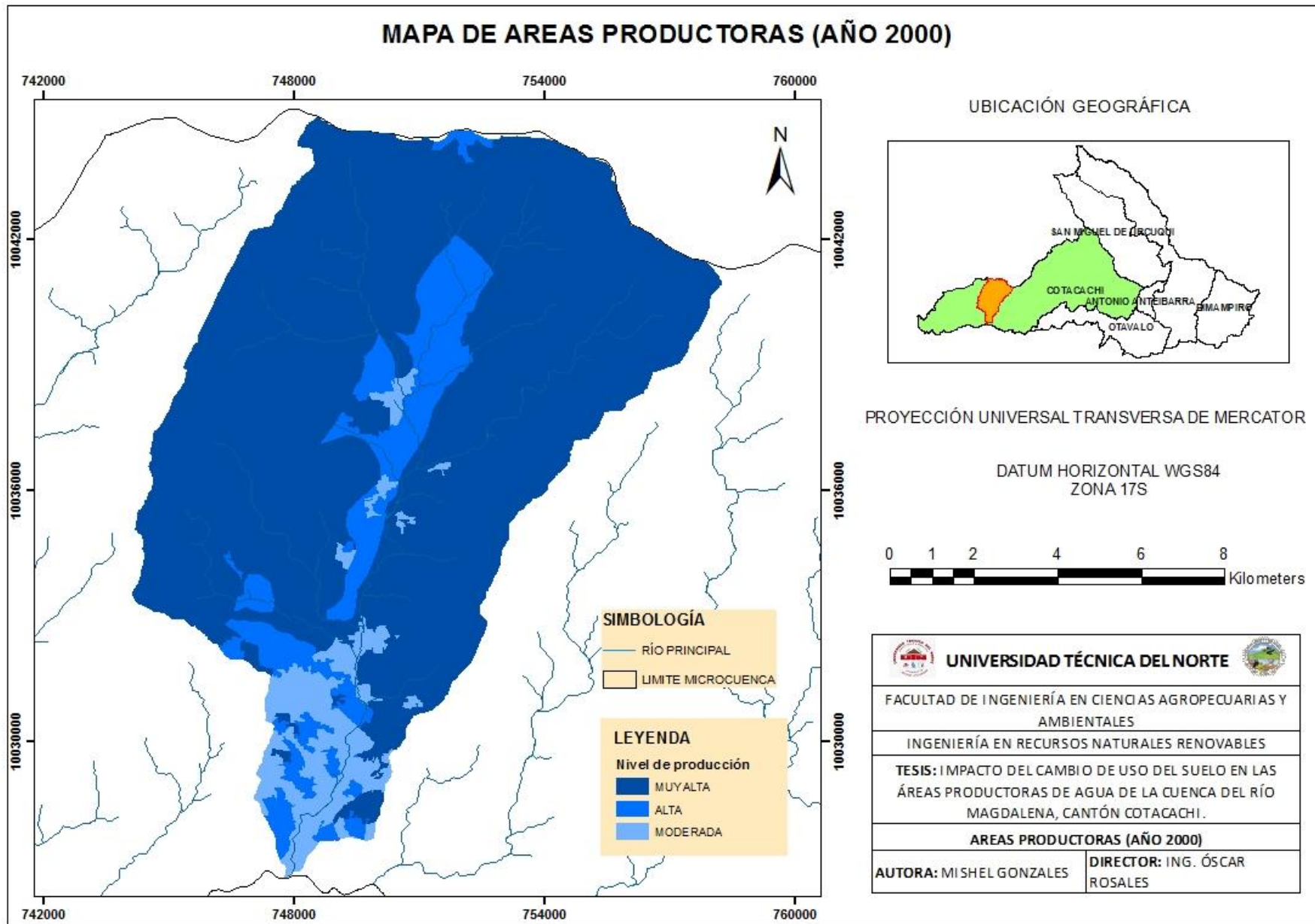




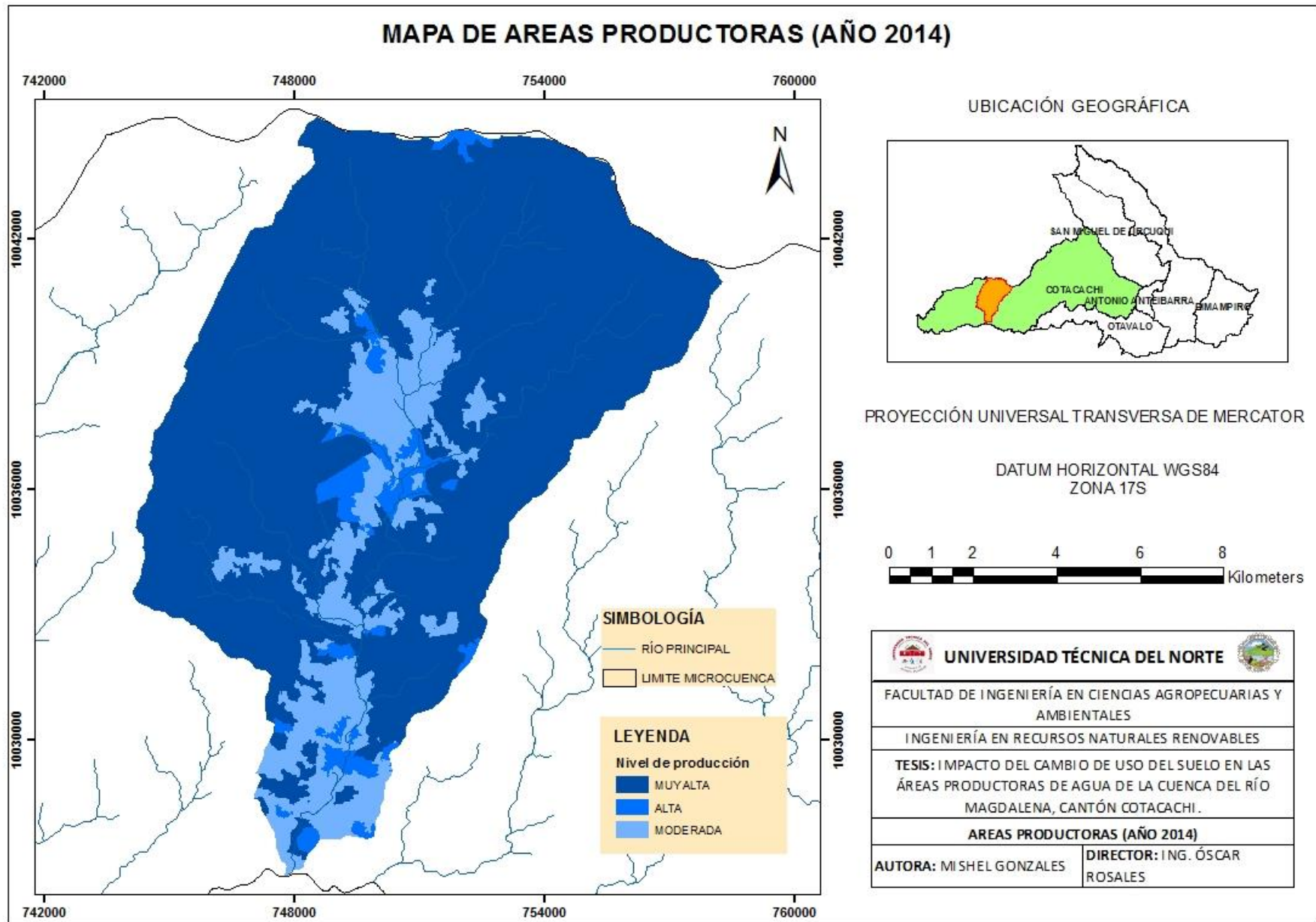
Anexo 8. Mapa de áreas productoras (1986)



Anexo 9. Mapa de áreas productoras (2000)



Anexo 10. Mapa de áreas productoras (2014)



Anexo 11. Interpolación de datos climaticos de las estaciones pluviométricas (M0318, M0325, M0326 y M0327)

ESTACIÓN		CÓDIGO	ALTURA	LONGITUD						LATITUD		
APUELA-INTAG		M0318	1620	78° 30'40" W						0° 21'18" N		
AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1982	24.1	24.1	25.8	24.6	24.4	24.3	22.7	22.7	25	24.5	24.9	24.9
1983	27.8	27.1	27	26.8	27.5	26.9	26	25.6	24.9	24.5	25	24.7
1984	25.3	23.5	24.2	24.1	24.4	23.9	23.6	24.4	23.1	23	23.3	24.2
1985	23.9	24.9	26.2	26.2	25.3	24.6	25.1	23.3	25.8	26.3	25.3	25
1986	25.8	25.2	25.9	25.6	24.8	24.4	25.9	25.4	26.1	27.3	26	25.9
2010	25.9	25.4	25.9	25	25.7	24.6	24.5	26.3	25	25	24.3	23.3
2011	25.9	26.3	26.2	26.1	26.7	25.6	25.8	25.4	26.6	25.9	26.9	26.1
2012	23.3	23.6	24.3	24.3	24	24.1	23.5	23.9	24.8	25.2	24	24.6
2013	24.8	25.8	25.3	26.2	24.7	24.3	23.9	24.4	12	25.2	25.9	25.8
2014	24.9	25.1	25.4	26.1	25	24.5	26.1	24.9	25.6	25.2	25.8	25.8
TEMPERATURA MÍNIMA												
1982	12.5	13.3	13	13.3	12.7	11.9	9.4	11.4	12.1	11.3	9.8	11.4
1983	12.7	13.6	13.4	13.5	13.4	12.7	10.7	11.6	12.8	12.4	11.6	12.5
1984	12.9	13.9	13.8	13.6	14	13.4	12	11.8	13.5	13.4	13.3	13.6
1985	12.7	13.7	14	13.1	13.7	12.8	12.3	12.1	13.4	14	13.6	12.7
1986	13.2	14.2	13.5	14.1	14.3	14.1	11.7	11.5	13.5	12.7	13	14.5
2010	13.4	14.8	15.7	13.2	13.4	16.2	14.9	13.7	14.3	13.3	13.5	13.6
2011	14.2	14	13.4	14.3	13.5	13.3	8.8	12.1	16.6	12	13.2	17.3
2012	14.2	13	14.1	13.9	14.3	14.1	12.7	11.8	12.9	12.8	13.5	12.5
2013	14.7	15	15.3	14.6	15	13.5	12.8	12	12.8	13.7	12.7	11.7
2014	15.2	14.6	15.7	15.1	13.5	7	13.7	14.1	13.6	13.5	13.4	13.6

HELIOFANÍA												
1982	102.1	111	109.4	101.2	92.1	123.9	123.7	153.2	113.4	86.7	114.7	99
1983	129.8	108.3	105.1	103.6	92.2	143	158.5	139.1	109.7	93.4	108.4	95.6
1984	95.8	105.7	100.8	106	92.2	125.5	135.6	115.9	106.1	109.3	116.4	90.4
1985	61.9	113.7	91.9	106.5	81.2	107.9	112.7	92.8	81.3	125.3	124.3	85.2
1986	94.7	97.7	109.7	105.5	103.2	97.3	135.9	130.1	130.9	88	119.2	116.4
2010	129.4	91.4	95.9	96.7	102.8	72.1	89.6	122.7	76.1	83.2	54.6	50.8
2011	93.3	82.2	105.9	110.5	103.5	74.5	96.1	112.3	111.2	83.9	101.1	77.2
2012	87.1	80.8	107	114.5	80.8	82.6	99.4	113.4	102.8	93.2	98.2	88.5
2013	89.5	80.4	107.9	116.6	59.3	99.6	103.7	119.5	108.3	107.4	96.3	106.4
2014	81	75.3	99.7	107.7	90.2	117.6	121.2	102.1	108.8	87.4	93.5	99.6
PUNTO DE ROCÍO												
1982	17.1	17.5	17.8	17.6	17.1	16.3	15.8	15.9	16.2	15.5	15.3	15.9
1983	16.1	16.6	17.1	16.5	17.4	17	17.2	16.5	17	16.9	16.4	16.7
1984	17.9	24	17.7	18	17.3	17	16.6	16.1	16.2	19.5	15.5	15.9
1985	15.6	15.8	16.1	16	15.9	15.2	14.6	14.6	15	15.1	15.3	16.2
1986	15.5	16.3	16.4	16.2	16.6	16.2	15.3	15.5	15.3	15.7	15.4	16.4
2010	17.5	16.3	17.3	16	16.4	15.9	16.4	15.7	14.7	15.5	13.1	15.1
2011	16	15.7	15.4	15.8	15.2	16.4	15.3	16	14.7	13.8	10.5	15.8
2012	17	15.7	16.4	16.4	16	16.1	15.6	15.6	14.8	13.2	12.6	14.6
2013	15.9	17	17.2	16	16	15.8	13.3	15.7	15	15.2	12.7	15
2014	16.7	16.3	17.3	16.7	16.4	16.1	15.5	15	14.6	15.3	12.9	16.1

ESTACIÓN		CÓDIGO	ALTURA	LONGITUD						LATITUD			
GARCÍA MORENO		M0325	1950	78° 37'36.5''W						0° 14'4.6''N			
AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	
1982	25.2	25.2	25.5	25.7	25.4	25.1	23.9	24.1	25.5	25.3	26.7	25.7	
1983	28.1	27	26.7	26.6	27.6	26.9	25.7	25.3	24.9	24.6	25.5	24.8	
1984	26.2	24.7	25.2	25.2	25.5	25	24.5	25.1	24.2	23.9	24.3	25.4	
1985	24.3	24.9	26	25.7	25.3	24.8	25.1	23.9	25.7	26.1	25.2	25.7	
1986	25.8	25.2	25.7	25.7	25	24.6	25.7	25.4	25.9	27.4	25.9	26	
2010	27.1	26.6	27.1	26.4	26.9	25.7	25.5	27.4	26.1	26.1	25.1	24.2	
2011	26.8	27.4	27.3	27.2	27.7	26.6	26.8	26.1	27.5	26.8	27.7	27.2	
2012	24.6	25	25.7	25.7	25.4	25.4	24.8	25.2	26.3	26.7	25.4	26	
2013	25.9	26.8	26.5	27.3	25.6	25.4	25.1	25.6	13	27.3	27	27	
2014	25.7	26.2	26.5	27.3	26.1	25.6	27.4	26	26.6	26.2	26.8	26.9	
TEMPERATURA MÍNIMA													
1982	13.4	14.3	13.9	14.2	13.4	12.8	10.6	12.5	13.1	12.2	10.7	12.4	
1983	13.5	14.5	14.3	14.3	14	13.5	11.6	12.4	13.6	13	12.3	13.3	
1984	13.7	14.7	14.6	14.4	14.7	14.1	12.7	12.4	14	13.9	13.8	14.2	
1985	13.3	14.5	14.9	13.9	14.2	13.2	12.8	12.5	13.9	14.4	14	13.2	
1986	14	14.8	14.3	15	15.1	14.9	12.5	12.3	14.1	13.4	13.6	15.3	
2010	14	15.2	16.4	14.1	14.5	16.8	15.5	14.3	15	14	14.1	14.4	
2011	15	14.9	14.2	15.2	14.8	14.5	9.7	13.3	16.5	13.2	14.3	16.6	
2012	15.2	14.1	15.2	15	15.2	15	13.6	12.7	13.8	13.7	14.4	13.6	
2013	15.5	15.8	16.2	15.6	15.9	14.6	13.7	13	13.7	14.7	13.6	12.6	
2014	15.3	14.7	16	15.4	13.2	7.2	13.7	13.8	13.7	13.4	13.3	13.5	

HELIOFANÍA												
1982	99.2	107.2	105.6	98.2	88.1	113.7	116	144.7	109.4	83.2	111.9	97.4
1983	128.5	107.5	96	99.5	81.4	140.7	156.2	134.8	91.4	90	100.8	90.4
1984	93.9	107.7	91.1	100.2	78.1	120.6	130.4	109.1	82.3	102.5	107.6	84.9
1985	59.2	107.9	86.3	100.8	74.7	100.5	104.6	83.5	73.3	114.9	114.4	79.5
1986	89.2	95.4	107.5	101.7	95.9	92	126.5	123.5	121.6	82.3	110	109.6
2010	119.3	88	94.5	96.4	98.4	67.8	84.1	114.8	72	77.9	51	48.9
2011	97.2	81.3	94.8	100.3	103	80.6	92.6	116.8	110.8	84.6	107.4	79
2012	91	78	99.5	106.2	80.1	86.5	98.8	116.8	106	93.3	100.8	89.6
2013	84.9	74.6	104.2	112.2	57.2	92.4	105	116.7	101.2	102	94.2	100.1
2014	77.8	73.2	86.8	100.4	89.7	108.6	116.7	96.3	102.5	84.8	88.2	93.9
PUNTO DE ROCÍO												
1982	17.6	18.1	18.4	18.2	17.8	16.9	16.2	16.4	16.7	16.3	16	16.5
1983	16.9	17.3	17.9	17.1	17.9	17.5	17.5	16.8	17.4	17.6	17.1	17.2
1984	18.6	22.9	18.4	18.6	17.8	17.4	17.1	16.6	16.6	21.3	16.1	16.3
1985	16.4	16.6	16.9	16.6	16.5	15.8	15.1	15	15.5	15.7	15.8	16.7
1986	16.1	16.7	17.2	17	17.4	16.9	16	16.1	16	16.5	16.1	17.1
2010	18.09	17.11	17.98	16.69	17.36	16.68	16.97	16.35	15.82	16.22	14.2	15.83
2011	16.76	16.52	16.29	16.77	16.28	17.12	16.06	16.7	15.7	14.78	11.94	16.45
2012	17.59	16.45	17.19	17.26	16.9	16.95	16.4	16.21	15.53	14.29	14	15.55
2013	16.76	17.67	17.99	16.88	16.95	16.53	14.56	16.3	15.72	16.01	13.83	15.86
2014	17.49	17.07	18.02	17.53	17.32	16.98	16.33	15.9	15.54	16.07	14.32	16.83

ESTACIÓN		CÓDIGO	ALTURA	LONGITUD						LATITUD		
CHONTAL BAJO ALAMBÍ		M0327	675	78° 44'57'' W						0° 14'14'' N		
AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1982	27.1	27	27.4	27.6	27.3	26.7	25.8	26.4	27.5	26.9	28.4	27.2
1983	29.6	28.9	28.7	28.6	29.2	28.7	27.8	27.4	26.8	26.5	26.9	26.6
1984	28	26.9	27.2	27.3	27.6	27.1	26.3	27.2	26.1	25.6	26.1	27.4
1985	26.1	26.9	27.8	27.8	27.2	26.7	27.1	25.7	27.6	27.9	27.2	27.6
1986	27.7	27.2	27.8	27.5	26.9	26.5	27.8	27.4	28	29	27.9	27.8
2010	29.1	28.7	29	28.7	28.8	27.6	27.4	29.1	27.9	27.9	26.6	25.7
2011	28.3	29.3	29.2	29.1	29.5	28.2	28.6	27.4	29.2	28.5	29.2	29.1
2012	26.8	27.3	28	28.1	27.7	27.6	26.7	27.2	28.7	29	27.6	28.2
2013	27.6	28.7	28.5	29.4	27.4	27.2	27	27.6	15.1	29.2	29	29.2
2014	27.3	28.2	28.3	29.4	28.1	27.6	28.8	28.1	28.4	28	28.6	28.9
TEMPERATURA MÍNIMA												
1982	15.5	16.4	16	16.1	15.3	14.6	12.5	14.6	15.2	14.3	12.6	14.4
1983	15.4	16.4	16.3	16.2	15.8	15.2	13.4	14.3	15.4	14.9	14	15.1
1984	15.4	16.5	16.5	16.3	16.4	15.7	14.4	13.9	15.7	15.5	15.4	15.9
1985	14.9	16.5	16.8	15.6	15.8	14.6	14.4	13.9	15.5	15.7	15.4	14.6
1986	15.8	16.6	16.2	16.9	17	16.8	14.4	14	15.8	15.2	15.3	17.1
2010	15.5	16.4	18.3	16	16.8	18.5	17.1	16	16.7	15.5	15.8	16
2011	17	16.7	15.9	17.1	17.2	16.8	11.1	15.6	16.3	15.3	16.3	14.7
2012	17.3	16	17.4	17.1	17.1	17	15.4	14.6	15.7	15.6	16.3	15.7
2013	17.4	17.5	18.1	17.7	17.7	16.6	15.9	15.1	15.5	16.6	15.5	14.2
2014	17.2	16.5	17.7	17	15.2	7.7	15.4	15.9	15.3	15.2	15.1	15.3

HELIOFANÍA												
1982	93.4	99.5	98.1	92.4	80	93.1	100.4	127.4	101.4	76.1	106.2	94.3
1983	125.9	97.8	86.5	90.7	70.6	136.1	151.4	126.1	79	83.2	85.2	79.9
1984	89.6	97	80.7	89.9	65.8	110.5	119.7	95.2	67.9	88.4	89.6	73.7
1985	53.2	96.1	74.9	89	61.1	84.9	87.9	64.2	56.7	93.7	94	67.5
1986	78	90.6	102.9	94.1	81.2	80.9	106.9	110.1	103	70.6	91.5	95.8
2010	99.7	79.8	90	89.6	89.2	58.6	71.8	98.8	62.2	66.1	43.1	43.3
2011	83.9	75.5	93.5	97	91.7	69.6	86.1	98.4	97.6	76.8	89.9	71.7
2012	77.4	71.2	97	104.5	71.2	73	89.6	103.4	92.9	83.5	88.4	78.8
2013	70.9	71.2	97	104.5	50.8	76.5	93	108.4	88.2	90.1	87	85.9
2014	67.6	64.9	76.4	87.9	86.9	91	103.1	83.5	89.7	76.2	75.9	81.7
PUNTO DE ROCÍO												
1982	19	19.5	19.9	19.6	19.3	18.3	17.5	17.7	18	17.7	17.5	17.9
1983	18.4	18.9	19.6	18.6	19.3	19	18.9	18	18.8	19	18.5	18.7
1984	20.3	21	20.2	20	19.3	18.9	18.5	17.9	17.9	24.3	17.4	17.7
1985	18	18.4	18.6	18.1	18	17.2	16.5	16.3	16.9	17	17.1	18.1
1986	17.6	17.9	18.8	18.7	19	18.5	17.4	17.5	17.5	18.1	17.5	18.6
2010	19.6	18.8	19.6	18.1	19.4	18.2	18.4	18	17.9	17.8	16.3	17.3
2011	18.5	18.3	18.1	18.6	18.4	18.8	17.8	18.3	17.6	16.7	14.4	18
2012	19	18	18.9	19.1	18.8	18.8	18.1	17.8	17.2	16.2	16.4	17.4
2013	18.5	19.2	19.7	18.9	18.8	18.2	16.7	17.8	17.4	17.7	15.9	17.6
2014	19.1	18.7	19.7	19.3	19.2	18.8	18.2	17.8	17.4	17.7	16.6	18.4

ESTACIÓN		CÓDIGO	ALTURA	LONGITUD						LATITUD		
SELVA ALEGRE-IMB		M0326	1800	78° 34'36.3''W						0° 14'46.4''N		
AÑO	TEMPERATURA MÁXIMA											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1982	24.2	24.3	24.6	24.7	24.5	24.3	22.9	23	24.5	24.5	25.9	24.9
1983	27.3	26	25.6	25.6	26.8	26.1	24.7	24.3	23.9	23.7	24.8	23.9
1984	25.3	23.7	24.2	24.2	24.5	24	23.6	24	23.2	23.1	23.4	24.3
1985	23.4	23.8	25.1	24.6	24.4	23.8	24.1	23	24.8	25.2	24.2	24.7
1986	24.9	24.2	24.6	24.9	24.1	23.6	24.7	24.4	24.8	26.6	25	25
2010	26	25.5	26.1	25.2	25.9	24.7	24.6	26.5	25.2	25.1	24.4	23.4
2011	26	26.4	26.3	26.2	26.8	25.7	25.9	25.4	26.6	26	27	26.3
2012	23.4	23.7	24.5	24.4	24.2	24.2	23.7	24.1	25.1	25.4	24.2	24.8
2013	25	25.8	25.4	26.3	24.8	24.5	24.1	24.5	12	26.4	26	25.9
2014	24.9	25.2	25.5	26.2	25.1	24.7	26.6	25	25.7	25.3	25.9	25.9
TEMPERATURA MÍNIMA												
1982	12.4	13.4	12.9	13.3	12.5	11.9	9.7	11.5	12.1	11.1	9.7	11.4
1983	12.6	13.6	13.3	13.4	13.2	12.6	10.8	11.6	12.7	12.2	11.4	12.5
1984	12.9	13.8	13.7	13.5	13.9	13.3	11.9	11.7	13.3	13.2	13.1	13.5
1985	12.6	13.6	14	13	13.5	12.6	12.1	11.8	13.2	13.7	13.3	12.6
1986	13.1	14	13.4	14.1	14.2	14	11.6	11.5	13.4	12.6	12.9	14.4
2010	13.3	14.7	15.6	13.2	13.4	16	14.8	13.5	14.2	13.2	13.3	13.6
2011	14.1	14	13.3	14.3	13.6	13.3	8.9	12.2	16.6	12.1	13.2	17.4
2012	14.2	13	14	13.9	14.2	14	12.7	11.8	12.8	12.8	13.5	12.5
2013	14.7	14.9	15.2	14.5	15	13.6	12.7	12	12.8	13.7	12.7	11.7
2014	14.5	13.8	15.1	14.6	12.3	7	12.9	12.8	12.9	12.5	12.5	12.6

HELIOFANÍA												
1982	102.1	111	109.4	101.2	92.1	123.9	123.7	153.2	113.4	86.7	114.7	99
1983	129.8	108.3	105.1	103.6	92.2	143	158.5	139.1	109.7	93.4	108.4	95.6
1984	95.8	105.7	100.8	106	92.2	125.5	135.6	115.9	106.1	109.3	116.4	90.4
1985	61.9	113.7	91.9	106.5	81.2	107.9	112.7	92.8	81.3	125.3	124.3	85.2
1986	94.7	97.7	109.7	105.5	103.2	97.3	135.9	130.1	130.9	88	119.2	116.4
2010	129	91.9	96.5	96.9	102.8	72.3	90	122.5	76.7	83.6	54.8	51.5
2011	103	91.9	96.5	96.9	108.7	86.5	95.8	126.4	118.1	88.2	116	82.1
2012	96.9	84	102.2	106.5	84.4	93.2	103.2	123.3	113	97.8	106.5	94.3
2013	90.8	76.2	107.9	116.1	60	100	110.5	120.3	107.8	107.4	97	106.5
2014	81.9	76.2	91.7	107.1	90.8	117.7	122.7	102.6	108.9	88.3	93.7	99.6
PUNTO DE ROCÍO												
1982	17	17.4	17.7	17.5	17.1	16.2	15.7	15.8	16.1	15.5	15.3	15.8
1983	16.1	16.5	17	16.4	17.2	16.8	17	16.2	16.8	16.9	16.4	16.6
1984	17.8	23.9	17.6	17.9	17.2	16.8	16.4	16	16	19.5	15.5	15.7
1985	15.6	15.8	16.1	15.9	15.8	15.1	14.5	14.4	14.8	15.1	15.2	16.1
1986	15.4	16.2	16.4	16.2	16.6	16.1	15.3	15.4	15.3	15.7	15.4	16.4
2010	17.4	16.3	17.2	16	16.4	15.9	16.3	15.6	14.8	15.5	13.2	15.1
2011	15.9	15.7	15.4	15.9	15.2	16.3	15.2	16	14.8	13.9	10.7	15.7
2012	16.9	15.7	16.4	16.4	16	16	15.6	15.5	14.7	13.3	12.8	14.7
2013	15.9	16.9	17.2	15.9	16.1	15.7	13.5	15.6	14.9	15.2	12.8	15
2014	16.7	16.3	17.2	16.7	16.4	16.1	15.4	15	14.6	15.3	13.2	16.1

Anexo 12. Formato de encuesta aplicada dentro de las comunidades de la cuenca

Encuesta

1. Comunidad: _____ Coordenadas _____

2. ¿Hace cuántos años viven usted y su familia en la comunidad? _____

3. Indique:

Su edad: _____ Género: _____ Nivel de estudios: _____

4. ¿A qué actividad se dedica? _____

5. Realiza usted agricultura o ganadería dentro de su finca? (SI) _____ (NO) _____

6. ¿Qué alimentos cultiva? _____

7. ¿Dentro de su finca existe bosque? (SI) _____ (NO) _____

8. ¿Qué especies de árboles que sean nativas de su comunidad conoce? _____

9. ¿Conoce los Bosques Protectores Los Cedros y El Chontal? (SI) _____ (NO) _____

10. Indique cuáles son las principales dificultades que usted tiene en relación al acceso y uso del agua:

11. Indique si está en acuerdo o desacuerdo con cada una de las siguientes afirmaciones:

Afirmaciones	Sí	No	No sabe/no opina
Hasta ahora su familia ha tenido suficiente agua para consumo.			
Antes había más agua en su comunidad.			
La agricultura y ganadería afecta al río Magdalena.			
Existe riesgo de escasez de agua en su comunidad.			
La comunidad cuenta con acciones de prevención frente a sequías, inundaciones y deslizamientos.			

Anexo 13. Georeferenciación de categorías de uso del suelo del año 2014



Fotografía 1. Cultivo en la parte media de la microcuenca.



Fotografía 2. Cultivo en la parte baja de la microcuenca.



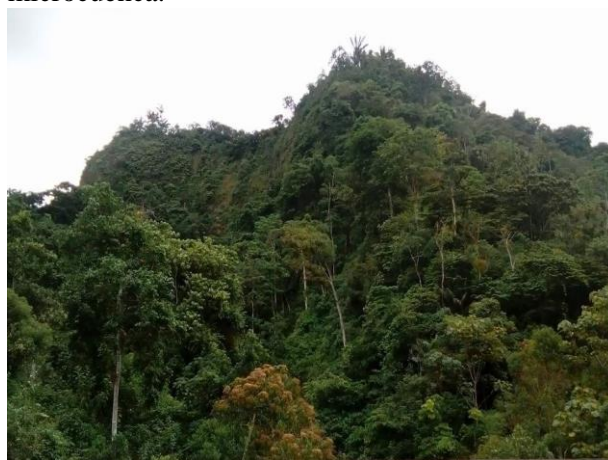
Fotografía 3. Pastizal en la parte media de la microcuenca.



Fotografía 4. Pastizal en la parte baja de la microcuenca.



Fotografía 5. Bosque en la parte media de la microcuenca.



Fotografía 6. Bosque en la parte baja de la microcuenca.

Anexo 14. Medición de caudales y aplicación de encuestas en la microcuenca.



Fotografía 7. Río Magdalena en época seca.



Fotografía 8. Río Magdalena en época lluviosa.



Fotografía 9 y 10. Medición de caudales.



Fotografía 11. Encuesta en la comunidad de Magdalena Alto.



Fotografía 12. Encuesta en la comunidad de San José de Magdalena.