



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERA GEOGRAFA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: MODELO DE INTERVENCIÓN PARA LA CONSERVACIÓN DEL
RECURSO HÍDRICO APLICANDO LÓGICA DIFUSA EN LAS
MICROCUENCAS DE LOS RIOS PITA Y PISQUE**

AUTOR: GUERRERO CASTELLANOS, ARIANA SHAMIRA

DIRECTOR: PhD. PADILLA ALMEIDA, OSWALDO VINICIO

SANGOLQUÍ

2019



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "Modelo de intervención para la conservación del recurso hídrico aplicando lógica difusa en las microcuencas de los ríos Pita y Pisque" fue realizado por la señorita *Guerrero Castellanos, Ariana Shamira* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de abril del 2019

PhD. Oswaldo Vinicio Padilla Almeida

CI 110977665-0



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Guerrero Castellanos, Ariana Shamira*, declaro que el contenido , ideas y criterios del trabajo de titulación: **“MODELO DE INTERVENCIÓN PARA LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO APLICANDO LÓGICA DIFUSA EN LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS PITA Y PISQUE”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 24 de abril del 2019

Una firma manuscrita en tinta azul que dice 'Ariana Shamira Guerrero Castellanos' sobre una línea horizontal.

Ariana Shamira Guerrero Castellanos

C.I: 1722752571



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, Guerrero Castellanos, Ariana Shamira, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "MODELO DE INTERVENCIÓN PARA LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO APLICANDO LÓGICA DIFUSA EN LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS PITA Y PISQUE" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 24 de abril del 2019

Ariana Shamira Guerrero Castellanos

C.I: 1722752571

DEDICATORIA

Este pequeño gran logro quiero dedicarles a mis padres Rocío y Walter, pues por todo su esfuerzo estoy subiendo este escalón.

A mis hermanos, Isaac por la motivación y gran ejemplo de perseverancia, y a ti Nari por ser la luz y alegría de mi vida.

Y no sin menos importancia a Mamita, pues fuiste tú quien cuando era niña y estabas con nosotros pusiste en mi mente que debo ser una Ingeniera, y aquí estoy. Sé que desde allá arriba estás viendo que lo logre e iré por más, pues día a día solo intento vivir como tú hubieras querido que viva.

Ari.

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Oswaldo Padilla, por el apoyo y tiempo dedicado para el desarrollo de este trabajo de titulación.

Al FONAG por recibirme siempre con las puertas abiertas y el apoyo para la elaboración del presente trabajo, y principalmente a ti Su por abrirme las puertas del FONAG, ofrecerme tu amistad y consejos.

A Andrés por la paciencia, amor y apoyo para leer y releer todas las veces necesarias este trabajo.

ÍNDICE

CAPITULO 1	1
INTRODUCCION.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Área de Influencia.....	5
1.4 Justificación e Importancia.....	7
1.5 Objetivos.....	8
1.5.1 Objetivo general	8
1.5.2 Objetivo específico	8
1.5.3 Metas	9
CAPÍTULO 2	9
MARCO TEORICO	10
2.1 Fundamento Teórico	10
2.1.1 El Agua	10
2.1.2 Sistemas de información geográfica (SIG)	19
2.1.3 Evaluación multicriterio	20
2.2 Fundamento Legal	32
2.2.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)	32
2.2.2 Leyes Orgánicas	33
2.2.3 Reglamentos y Acuerdos Ministeriales	35
CAPITULO 3	36
METODOLOGIA	36
3.1 Descripción del área de estudio.....	36
3.1.1 Microcuenca del río Pita	36
3.1.2 Microcuenca del río Pisque	40
3.2 Recolección de datos	44
Curvas de nivel.....	45
Base Nacional de Autorizaciones de agua.....	46
Canales de agua.....	47
Vertientes de EPMAPS.....	48

Cobertura vegetal y uso de suelo.....	49
Cuerpos de agua (lago/laguna).....	49
Centros poblados.	50
Degradación.	51
Geopodológico.	51
Ríos.....	52
Vías.....	53
Áreas Protegidas.....	54
Centros educativos.....	54
Concesiones mineras.	55
Amenazas Naturales.	56
3.3 Análisis de datos	59
3.3.1 Variables para estudio bajo lógica difusa.....	59
3.4 Rasterización	68
3.5 Análisis de variables de acuerdo a Lógica difusa	69
Altura.	69
Autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua.....	69
Canales de agua.	69
Cuerpos de agua.	69
Deforestación.	69
Poblaciones.	70
Ríos.....	70
Vías.....	70
Zonas de recarga hídrica.	70
3.6 Desarrollo del algoritmo de lógica difusa en el SIG.....	70
3.6.1 Generación de modelo	75
3.6.2 Modelos Cartográficos.....	79
3.7 Análisis de modelos generados	82
3.8 Lineamientos para la gestión de las microcuencas	84
3.8.1 Microcuenca del río Pita	84
3.8.2 Microcuenca del río Pisque	92

CAPITULO 4.....	100
RESULTADOS	100
4.1 Microcuenca hidrográficas	100
4.1.1 Microcuenca del Río Pita	100
4.1.2 Microcuenca del Río Pisque.....	101
4.2 Recopilación de información	102
4.3 Recarga hídrica.....	102
4.4 Variables	103
4.5 Modelos generados	103
4.6 Áreas de conservación	104
4.6.1 Tiempo de ejecución.	104
4.7 Lineamientos para intervención	105
4.7.1 Microcuenca del río Pita	105
4.7.2 Microcuenca del río Pisque	108
CAPITULO 5	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
5.1 Conclusiones	111
5.2 Recomendaciones	113
Referencias.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Clasificación de la pendiente de una cuenca hidrográfica</i>	12
Tabla 2. <i>Densidad de drenaje</i>	13
Tabla 3. <i>Permanencia de agua en el reservorio.</i>	14
Tabla 4. <i>Distribución política de la microcuenca del río Pita</i>	37
Tabla 5. <i>Porcentaje de cada cobertura vegetal en la microcuenca del río Pita</i>	38
Tabla 6. <i>Parámetros de forma de la microcuenca del río Pita</i>	40
Tabla 7. <i>Distribución política de la microcuenca del río Pisque</i>	42
Tabla 8. <i>Cobertura y uso del suelo de la microcuenca del río Pisque</i>	43
Tabla 9. <i>Factores de forma de la microcuenca del río Pisque</i>	44
Tabla 10. <i>Variables utilizadas para la conservación del recurso hídrico</i>	60
Tabla 11. <i>Pesos asignados a criterios del CATIE</i>	62
Tabla 12. <i>Ponderación pendiente y microrelieve</i>	62
Tabla 13. <i>Ponderación textura del suelo</i>	63
Tabla 14. <i>Ponderación por textura de roca</i>	64
Tabla 15. <i>Ponderación de cobertura vegetal</i>	65
Tabla 16. <i>Posibilidad de recarga por el uso del suelo</i>	66
Tabla 17. <i>Resumen de microcuenca del río Pita</i>	72
Tabla 18. <i>Resumen de modelamiento para microcuenca del río Pisque</i>	73
Tabla 19. <i>Peso establecido a variables</i>	77
Tabla 20. <i>Ponderación de variables en concordancia a metodología Saaty</i>	77
Tabla 21. <i>Resultados de la Microcuenca del río Pita</i>	83
Tabla 22. <i>Resultados de la microcuenca del río Pisque</i>	83

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Área de Influencia del proyecto	6
<i>Figura 2.</i> Elementos de una cuenca hidrográfica sana	12
<i>Figura 3.</i> Ciclo hídrico	15
<i>Figura 4.</i> Caso 1 de lógica difusa.	24
<i>Figura 5.</i> Puntos de inflexión de caso 1.....	24
<i>Figura 6.</i> Caso 2 de lógica difusa.	28
<i>Figura 7.</i> Puntos de inflexión de caso 2.....	29
<i>Figura 8.</i> Caso 3 de lógica difusa	30
<i>Figura 9.</i> Puntos de inflexión del caso 3.....	31
<i>Figura 10.</i> Ubicación Microcuenca del río Pita	37
<i>Figura 11.</i> Ubicación de la microcuenca del río Pisque	41
<i>Figura 12.</i> Curvas de nivel del área de estudio	45
<i>Figura 13.</i> Base Nacional de Autorizaciones de Agua.....	46
<i>Figura 14.</i> Canales de agua de Pichincha	47
<i>Figura 15.</i> Vertientes de Agua de la EPMAPS	48
<i>Figura 16.</i> Cobertura y uso de suelo.....	49
<i>Figura 17.</i> Cuerpos de agua presentes en el área de estudio	50
<i>Figura 18.</i> Centros Poblados	50
<i>Figura 19.</i> Áreas degradadas.....	51
<i>Figura 20.</i> Información geopedologica	52
<i>Figura 21.</i> Capa de ríos existentes.....	53
<i>Figura 22.</i> Capa de vías presentes	53
<i>Figura 23.</i> Áreas Protegidas presentes.....	54
<i>Figura 24.</i> Centros educativos existentes.....	55
<i>Figura 25.</i> Concesiones Mineras del Ecuador.....	55
<i>Figura 26.</i> Amenaza a deslizamientos 1:25.000	56
<i>Figura 27.</i> Susceptibilidad a inundaciones	57
<i>Figura 28.</i> Susceptibilidad a inundaciones	58
<i>Figura 29.</i> Susceptibilidad a inundaciones	58

Figura 30. Susceptibilidad a inundaciones	59
Figura 31. Pendiente en microcuencas según clasificación del CATIE	63
Figura 32. Textura de suelo en microcuencas	64
Figura 33. Tipo de roca en microcuencas	65
Figura 34. Clasificación de la cobertura vegetal en zonas de estudio	66
Figura 35. Ponderación de uso de suelo en zonas de estudio	67
Figura 36. Zonas de recarga en cada Microcuenca	68
Figura 37. Modelo 1 Microcuenca del río Pita	76
Figura 38. Modelo 1 Microcuenca del río Pisque	76
Figura 39. Modelo Saaty microcuenca del río Pita	78
Figura 40. Modelo Saaty microcuenca del río Pisque	79
Figura 41. Modelo cartográfico del modelamiento por promedio de variables	80
Figura 42. Modelo cartográfico del modelamiento por ponderación con Saaty	81
Figura 43. Modelos del río Pita.....	82
Figura 44. Resultados microcuenca del río Pisque	83
Figura 45. Áreas protegidas en la microcuenca del río Pita	85
Figura 46. Concesiones mineras en la microcuenca del río Pita.....	85
Figura 47. Zona agrícola de la microcuenca del río Pita	86
Figura 48. Zonas con uso ganadero en la microcuenca del río Pita.	87
Figura 49. Centros poblados de la microcuenca del río Pita	87
Figura 50. Áreas degradadas sobre los 3400 m en la microcuenca del río Pita.....	88
Figura 51. Centros educativos de la microcuenca del río Pita	89
Figura 52. Susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca del río Pita.....	89
Figura 53. Peligros volcánicos en la microcuenca del río Pita	90
Figura 54. Susceptibilidad a sequía en la microcuenca del río Pita	90
Figura 55. Movimientos de masa en la microcuenca del río Pita	91
Figura 56. Susceptibilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Pita.....	91
Figura 57. Áreas protegidas de la microcuenca del río Pisque	92
Figura 58. Concesiones mineras de la microcuenca del río Pisque	93
Figura 59. Áreas agrícolas de la microcuenca del río Pisque	93

Figura 60. Zonas pecuarias de la microcuenca del río Pisque	94
Figura 61. Centro poblados de la microcuenca del río Pisque	95
Figura 62. Áreas degradadas sobre los 3400m de la microcuenca del río Pisque	95
Figura 63. Centros educativos de la microcuenca del río Pisque.....	96
Figura 64. Susceptibilidad de inundaciones en la microcuenca del río Pisque	97
Figura 65. Peligros volcánicos en la microcuenca del río Pisque	97
Figura 66. Susceptibilidad a sequía en la microcuenca del río Pisque.....	98
Figura 67. Susceptibilidad a movimientos de masa en la microcuenca del río Pisque	98
Figura 68. Susceptibilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Pisque	99

RESUMEN

Siendo el agua un recurso no renovable e indispensable en las actividades diarias del ser humano, y debido a que sufre constantemente de presiones medio ambientales, provocando que este recurso se encuentre afectado en calidad y cantidad, se ha establecido que existe la necesidad de determinar áreas de prioridad hídrica para ser conservadas y así disminuir dichas presiones sobre este recurso. En el presente estudio gracias al modelamiento con lógica difusa de 8 variables y el cálculo de la recarga hídrica bajo la metodología del CATIE se generaron dos modelos que permitieron encontrar áreas de conservación y de intervención a corto mediano y largo plazo. El modelo 1 está en relación al promedio de las 9 variables utilizadas, mientras que para el modelo 2 se realizó ponderación de variables por Saaty. Se determinó que en las microcuencas de los ríos Pita y Pisque existen áreas con altas probabilidades de ser conservadas en relación del factor agua. Las actividades productivas ejercen presiones directa e indirectamente a las microcuencas determinando así que la microcuenca del río Pisque cuenta con más presiones medio ambientales que la del Pita por lo que las áreas en las que se recomienda conservación son menores. Finalmente se recomienda estudios hidrosociales en las zonas en las cuales se proponen conservar.

PALABRAS CLAVE:

- **LÓGICA DIFUSA**
- **MICROCUEENCA DEL ´RIO PITA**
- **MICROCUEENCA DEL ´RIO PISQUE**
- **SAATY**
- **CONSERVACIÓN HÍDRICA**

ABSTRACT

Being water a nonrenewable source and indispensable in the human being daily basis, and because it constantly suffers from environmental pressures, causing this source to be affected in quality and quantity, is being established the need of determine hydric priority areas to be conserved and therefore decrease pressure over this source. In the following research thanks to the 8 variable diffuse logic modeling and the calculation of the hydric recharge under CATIE methodology, two models were being generated allowing to find conservation and intervention in areas in short and long term. The model 1 is related to the 9 variable average used, while the model 2 has been done with Saaty ponderation variable. It has been determined that in the Pita and Pisque rivers micro-basins exist areas with high probabilities of being conserved in relation with the water factor. The productive activities exert direct and indirect pressure to the micro-basins determining that the Pisque river micro-basin has more environmental pressures than the Pita's therefore the fewer recommended conservation areas. Finally it is recommended hydrosocial researches in the proposed conservation areas.

KEY WORDS:

- **DIFFUSE LOGIC**
- **PITA RIVER MICRO-BASIN**
- **PISQUE RIVER MICRO-BASIN**
- **SAATY**
- **WATER CONSERVATION**

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Planteamiento del Problema

Conforme al Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo (2015), para el año 2030 el déficit de agua a nivel mundial alcanzara un 40%, como consecuencia de la sobrepoblación y demanda de agua para cada una de las actividades antrópicas. Estas cifras son preocupantes debido a que el agua como tal es un recurso indispensable tanto como para humanos y los diferentes procesos ecosistémicos (Enríquez, 2018).

La mayor amenaza para el agua es la reducción de ecosistemas que proporcionan el recurso hídrico, esta reducción está dada por las demanda de más aliento, la devastación de los bosques y paramos de la Sierra ecuatoriana (Enríquez, 2018), además de las quemas, sobrepastoreo, cultivo a gran escala de papas y la minería (Hofstede R. C., 2014).

El Ecuador al poseer grandes extensiones de páramos se ve en la obligación de proteger y cuidar estos ecosistemas tan frágiles e importantes científica y ecológicamente, previendo así la demanda de recurso hídrico y la necesidad del mismo a futuro, según Camacho (2013, tomado de Enríquez, 2018), los páramos son “fábrica de agua, esponjas para su almacenamiento o cuna del sistema hídrico de los neotrópicos”.

La carencia de procesos efectivos para conservar, proteger y distribuir el recurso hídrico, se ha convertido en una amenaza donde la frontera agrícola, ganadera, el cambio de uso de suelo y el accionar humano ejercen presiones en el medio ambiente afectando las fuentes hídricas.

Además los planes de ordenamiento territorial locales no presentan una posibilidad de articulación en una perspectiva micro regional y regional lo que provoca la ocupación desordenada del suelo, “atentando contra su gran potencial y riqueza hídrica, que altera las condiciones biofísicas de zona de recarga y descarga de acuíferos, incrementando su vulnerabilidad como fuente para el desarrollo futuro” (Barrántes y Jiménez, 2004, tomado de Hartley, 2010).

Por lo que el presente estudio busca definir estas estrategias entorno al análisis espacial para la priorización de zonas a ser intervenidas para el adecuado manejo de las microcuencas hidrográficas de los ríos Pita y Pisque ya que son de vital importancia para el abastecimiento del agua a propietarios privados, comunidades que realizan actividades productivas entorno a las riveras de los ríos antes mencionados, juntas de agua existentes, cantones como Cayambe, Mejía, Pedro Moncayo y el Distrito metropolitano de Quito (DMQ) buscando el bien común y generando buenas prácticas ambientales.

1.2 Antecedentes

El agua es un recurso no renovable e indispensable para el ser humano en todas las actividades del diario vivir, radicando ahí su gran importancia y no se debe escatimar esfuerzos para la conservación de las fuentes hídricas y de esta manera contribuir en la mitigación de los efectos del cambio climático. Los impactos del cambio climático en los páramos ya pueden ser observados en las pérdidas de vegetación, materia orgánica y capacidad de regulación generando estrés hídrico (Chiriboga J. L., 2015) y las consecuencias de esto se ven reflejadas en los caudales de los ríos.

Los páramos son ecosistemas que se encuentran sobre la línea de los bosques andinos hasta las zonas nivales. El Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002), los define como ecosistemas variados y complejos, endémicos de los Andes tropicales venezolanos, colombianos, ecuatorianos y peruanos.

Según Llambí & Soto (2012), el Ecuador cuenta con el 51.33% de la extensión total de los Páramos de los Andes del Norte. De acuerdo con Mediana, Mena y Hofstede (2001) en el Ecuador se utiliza usualmente como límite inferior de los páramos la altitud de 3.500 m pero por condiciones climatológicas, geológicas y antrópicas se puede encontrar a partir de los 2.800 m y el 6% de su territorio está cubierto por páramos convirtiéndolo en el país con mayor extensión de este ecosistema en relación a su tamaño (Mena & Hofstede, 2006).

Hofstede, Segarra, & Mena (2003), indican que la regulación hídrica es el mayor valor de los páramos ya que por cada metro cuadrado este ecosistema puede producir hasta un litro de agua por día, siendo esta la importancia de un adecuado manejo e intervención del ser humano en este ecosistema. Además el agua producida en el páramo a más de ser almacenada forma vertientes y estas a su vez microcuencas hidrográficas.

Los datos mencionados demuestran que la conservación de los páramos deben ir de la mano con la protección y manejo adecuado de las fuentes hídricas y a la vez de las microcuencas hidrográficas; motivo por el cual este proyecto de investigación está enfocado en la conservación y protección de las microcuencas hidrográficas de los ríos Pita y Pisque, las mismas que son de gran importancia ya que proveen de agua al DMQ y cuentan con 444 y 1879 autorizaciones de consumo y uso de agua correspondientemente.

La microcuenca hidrográfica del río Pita es de gran importancia ya que en torno a este río se realizan varias actividades productivas, motivo por el cual Lala, H. (2017), realizó el estudio titulado “Análisis de la sostenibilidad de la producción de agua en la microcuenca del río Pita mediante la determinación de la huella hídrica y disponibilidad de agua”, donde tras aplicar el cálculo de huella hídrica bajo la metodología del Dr. Arjen Hoekstra se muestra que la microcuenca a la fecha de la investigación es sostenible para consumo, disponibilidad y capacidad de depuración de agua.

Otro estudio importante en la microcuenca del río Pita es el realizado por Pérez, K (2007), denominado “Estimación de la oferta hídrica en la microcuenca alta del río Pita mediante el uso de herramientas geoinformáticas”, donde se aplicó modelación hidrológica y se llegó a la conclusión que esta oferta hídrica disminuye considerablemente debido a la falta de conservación y protección del páramo. En esta misma microcuenca existe una propuesta de un plan de manejo de la misma, elaborado por Hernández, D & Lara, D (2005).

Referente a la microcuenca del río Pisque se cuenta con un plan participativo de gestión del agua elaborado por Cachipundo, Moya, & Sandoval (2011), donde se determina que existen varias presiones en la microcuenca y el principal uso del agua que produce el río El Pisque es para agricultura, además se observa que el avance de la frontera agrícola es constante recomendando así la concertación e intervención para la recuperación de esta microcuenca. A partir de este estudio en el año 2013 se elabora la tesis denominada “Aportes para la implementación del plan de gestión del agua de la microcuenca del río Pisque”, elaborada por Herrera, L (2013).

Es importante destacar dos modelaciones espaciales realizadas anteriormente en el área de estudio mencionada, el primero es el Modelo Cartográfico para la determinación de áreas

prioritarias de forestación y reforestación del río Pita que fue elaborado por el FONAG (2010), en base a este estudio y con pequeñas modificaciones, en el año 2015 se realizó la Modelación espacial para la identificación de áreas de recuperación de cobertura vegetal natural en el ámbito de trabajo del FONAG, definiendo el ámbito FONAG las subcuencas que aportan agua para el DMQ.

Finalmente como referencia a estudios similares se tiene la aplicación de un análisis de múltiples criterios en gestión hídrica local elaborado por Rocio Hartley (2010), el mismo que ha sido desarrollado en Costa Rica y tiene como objetivo la creación de política pública para la gestión integral de recursos hídricos, otro estudio realizado en Costa Rica con similares objetivos, se titula Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí (2004) en este estudio bajo el análisis multicriterio se determina zonas prioritarias en rangos de Muy baja, baja, mediana y alta prioridad.

1.3 Área de Influencia

El presente proyecto de investigación será realizado en dos microcuencas hidrográficas localizadas en la Provincia de Pichincha las mismas que se muestran en la Figura 1. Una de las zonas de estudio es la microcuenca hidrográfica del río Pisque, que está ubicada al nor-este de la provincia, la segunda zona de estudio es la microcuenca hidrográfica del río Pita, que se encuentra al sur de la provincia. Entre las dos microcuencas hidrográficas se tiene un área aproximada de 1.720 km².

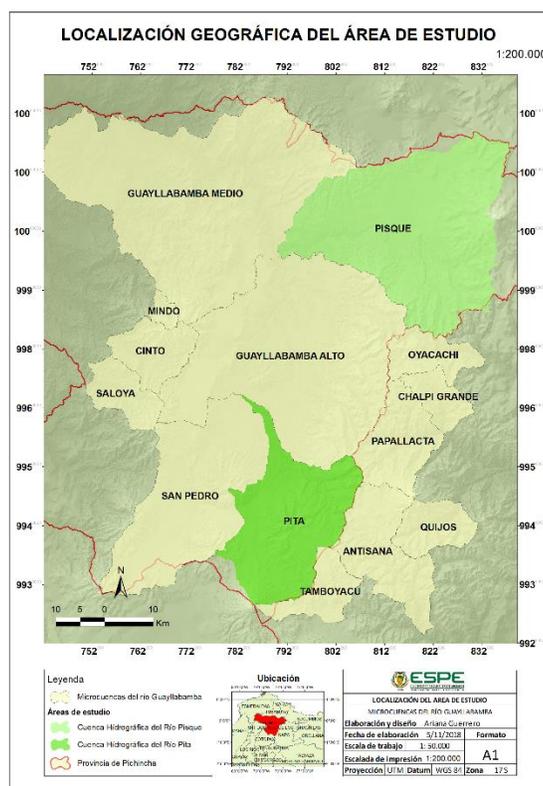


Figura 1. Área de Influencia del proyecto

Al tratarse de dos microcuencas hidrográficas no aledañas se tiene dos zonas de influencia, estas zonas estarán definidas por las parroquias que están inmersas en cada una de las microcuencas. La microcuenca del Río Pita tiene una influencia directa en las parroquias de Machachi, Pintag, Rumipamba, Sangolqui y en menor cantidad a Alangasi y Archidona.

Mientras que la microcuenca del Río Pisque comprende las parroquias de Olmedo (Pesillo), San José de Ayora, Cayambe, Tupigachi, Cangahua, Tabacundo, La Esperanza, Toachi, Oton, Santa Rosa de Cuzubamba, Malchingui, Ascazubi, Guayllabamba y en mínima cantidad a Oyacachi.

Además es importante destacar que estas dos microcuencas pertenecen a la cuenca del río Guayllabamba.

1.4 Justificación e Importancia

El crecimiento acelerado de la población ha promovido la expansión de las fronteras urbanas, industriales o agropecuarias, estos elementos implican necesariamente la sobre explotación del recurso hídrico, consumo de energías no renovables, generando presiones y amenazas al páramo.

El páramo es un actor importante en la generación del recurso hídrico, donde radica la importancia de su cuidado y protección, ya que el 85% del agua potable para consumo, electricidad y para riego en la producción de alimentos sale de los páramos (Hofstede, Segarra, & Mena, 2003). Según Buytaert et al. (2006, tomado de Enríquez, 2018) la importancia hidrológica de los ecosistemas de alta montaña se ve contrastada con su vulnerabilidad, debido a que las actividades antrópicas cada vez invaden más estos espacios naturales, ejerciendo presión y deterioro.

A nivel mundial la gran importancia del recurso hídrico se ve reflejada en la agenda 2030 de la ONU (2015), donde el objetivo 6 de los ODS menciona “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, las metas de esta objetivo están relacionadas a la sostenibilidad de extracción y abastecimiento de agua dulce así como la protección y restablecimientos de ecosistemas relacionadas con el agua.

En un contexto nacional los objetivos nacionales mencionados en el Plan Nacional del Desarrollo – Toda una Vida (SENPLADES, 2017) que están relacionados directamente con el agua y su importancia son:

- Objetivo 1, política 1.10 “Garantizar el acceso, uso y aprovechamiento justo, equitativo y sostenible del agua; la protección de sus fuentes; la universalidad, disponibilidad y

calidad para el consumo humano, saneamiento para todos y el desarrollo de sistemas integrales de riego”.

- Objetivo 6, política 6.6 “Fomentar en zonas rurales el acceso a servicios de salud, educación, agua segura, saneamiento básico, seguridad ciudadana, protección social rural y vivienda con pertinencia territorial y de calidad; así como el impulso a la conectividad y vialidad nacional”.

Es importante mencionar que entre las dos microcuencas son parte de las arterias que confluyen en el Río Guayllabamba que posteriormente desemboca en el río Esmeraldas, abasteciendo de esta manera la costa ecuatoriana. Además dentro de las mismas existen aproximadamente 294 juntas de agua, el agua de estas fuentes hídricas abastece al DMQ y otras parroquias, demostrando así la importancia de la preservación de estas microcuencas así como la necesidad de crear una herramienta que facilite la toma de decisiones referentes a las zonas prioritarias de intervención.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar zonas prioritarias de intervención para la conservación del recurso hídrico en las microcuencas hidrográficas de los ríos Pita y Pisque, mediante el análisis geoespacial aplicando lógica difusa.

1.5.2 Objetivo específico

- Recopilar y validar la información geoespacial 1:50.000 a ser utilizada.
- Modelar las variables indispensables para la conservación del recurso hídrico aplicando la lógica difusa.
- Identificar zonas que necesiten ser conservadas para mantener en buen estado el recurso hídrico.
- Definir niveles de intervención en relación al tiempo de ejecución en cada microcuenca.

1.5.3 Metas

- Una base de datos digital homogenizada y sistematizada con información de cada una de las variables utilizadas en el modelamiento.
- Lista de variables mínimas que influyan en la conservación del recurso hídrico y que sean analizables bajo la lógica difusa.
- Modelo bajo la lógica difusa para la conservación del recurso hídrico aplicado en cada microcuenca.
- Un mapa con las áreas de intervención para la microcuenca del río Pisque a escala 1:50.000, generado a partir del modelo obtenido que cuente con 3 niveles de prioridad en relación al tiempo de ejecución.
- Un mapa con las áreas de intervención para la microcuenca del río Pista a escala 1:50.000, generado a partir del modelo obtenido que cuente con 3 niveles de prioridad en relación al tiempo de ejecución.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

Este capítulo está enfocado en recalcar la importancia de conservación del agua, la descripción de cada uno de los elementos importantes que están inmersos en el ciclo hídrico y la sustentación teórica de la metodología aplicada para la generación del modelo. Adicional se presenta la legislación existente en el país donde se resalta el cuidado y protección del recurso hídrico.

2.1 Fundamento Teórico

A continuación se describirá cada uno de los elementos naturales que están estrechamente relacionados con el recurso hídrico así como el ciclo que este sigue. Esta sección tiene por objetivo el conocer cada uno de los factores importantes para la conservación y preservación del agua. Posteriormente se detallará la base conceptual bajo la cual está regida la metodología aplicada.

2.1.1 El Agua

El recurso hídrico es indispensable para la existencia de la vida en el planeta Tierra, ya que garantiza la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas. El agua ocupa aproximadamente el 75% del planeta, más solo el 3% está disponible para el consumo humano. De esta pequeña porción el “70% está en los polos y sitios de nieves eternas, el 29% está almacenado en las profundidades de la tierra y el 11% restante en los ríos, lagos, pantanos, suelo, embalses, la atmósfera y en organismos vivos” (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009).

2.1.1.1 Cuenca hidrográfica

Se define a la cuenca hidrográfica como un área de la superficie terrestre donde el agua de la lluvia escurre y drena hacia una corriente principal y esta a su vez tiene un punto de salida (Coronel & Jaramillo, 2005).

Es importante recordar que “la disponibilidad de agua y la calidad de vida de las poblaciones situadas en las partes bajas depende de todo lo que suceda dentro de los límites de la cuenca” (Sánchez, García, & Palma, 2003) por lo que resulta indispensable que cada cuenca hidrográfica sea considerada como una unidad de planeación y cuente con el manejo individualizado de la misma, considerando sus características particulares y aplicando políticas estratégicas para procurar un buen estado de conservación

Existen diversos aspectos que deben ser considerados para el buen manejo de una cuenca hidrográfica (Figura 2), a continuación se mencionara algunos:

- Todas las vertientes de las cuencas deben manejarse manteniendo una cobertura vegetal suficiente que permita amortiguar las precipitaciones, controlar la erosión y las inundaciones (Sánchez, García, & Palma, 2003).
- Es fundamental el ordenamiento ecológico del territorio. Es decir, establecer actividades y proyectos rentables desde el punto de vista económico, sustentables ambientalmente y socialmente justos (Sánchez, García, & Palma, 2003).
- Alcantarillado sanitario para recolectar y tratar aguas residuales y alcantarillado pluvial para manejo de la escorrentía (Hartley, 2010).
- Protección del bosque, ríos, fuentes y acuíferos, entre otros (Hartley, 2010).



Figura 2. Elementos de una cuenca hidrográfrica sana

Fuente. (Sánchez, García, & Palma, 2003)

Parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfrica

Son parámetros que permiten conocer las características físicas de la microcuenca (Delgadillo & Páez, 2008), entre los principales está el perímetro, el área, la forma de la cuenca, la pendiente, densidad de drenaje, el orden de los ríos, entre otros. Esto permitirá comprender si la cuenca es propensa a erosión, el tipo de escorrentía que tiene la misma y la infiltración.

La pendiente está determinada por la fórmula de Alvord y en la Tabla 1 se encuentra la clasificación propuesta por Pérez (1979), de acuerdo al porcentaje de pendiente.

Tabla 1.

Clasificación de la pendiente de una cuenca hidrográfrica

Pendiente (%)	Tipo de terreno
0-2	Llano

2 - 5	Suave
5 - 10	Accidentado medio
10 - 15	Accidentado medio
15 - 25	Fuertemente accidentado
25 - 50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente. (Pérez, 1979)

La densidad de drenaje permite conocer si una microcuenca posee capacidad de evitar catástrofes en el caso de tormentas, ya que una cuenca bien drenada permite que exista infiltración de agua y evitara posibles deslaves o inundaciones (Delgadillo & Moreno, 2013). En la Tabla 2 se presenta la clasificación.

Tabla 2.

Densidad de drenaje

Densidad de drenaje	Categoría
< 1	Baja
1 – 2	Moderada
2 – 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente. (Delgadillo & Páez, 2008)

2.1.1.2 Ciclo hídrico

Según Ordoñez (2011), el ciclo hidrológico es el movimiento constante de masas de agua (en cualquier estado) por la ayuda de la luz solar y la gravedad. De acuerdo a Llambí, L et. al (2012), el ciclo hidrológico “describe el movimiento tanto vertical como horizontal del agua, en estado gaseoso, líquido o sólido, entre la superficie, el subsuelo, la atmósfera y los océanos terrestres”.

El agua puede estar almacenada en la atmosfera, océanos, glaciares, lagos, ríos, suelos y aguas subterráneas y se mueve constantemente entre estos reservorios a través de sus procesos físicos y químicos como son la evaporación, condensación, precipitación, sedimentación,

escorrentía infiltración, sublimación, transpiración, fusión y flujos de agua subterránea (Ordoñez, 2011). El agua en movimiento bajo los procesos mencionados genera el ciclo hidrológico, en la Tabla 3 se presenta el tiempo promedio que permanece el agua en un reservorio,

Tabla 3.

Permanencia de agua en el reservorio.

Reservorio	Tiempo Promedio
Glaciares	20 a 100 años
Cubierta de nieve	2 a 6 meses
Humedad del Suelo	1 a 2 meses
Agua subterránea superficial	100 a 200 años
Agua subterránea profunda	10,000 años
Lagos	50 a 100 años
Ríos	2 a 6 meses

Fuente. Ordoñez (2011)

El agua se precipita desde la atmosfera hacia la superficie terrestre, posteriormente pasa por un proceso de filtración en el suelo para incrementar el caudal del agua subterránea o a su vez baja por las laderas hacia las fuentes hídricas. Finalmente el agua recolectada en dichas fuentes hídricas tiene un proceso de evaporación y regresa a la atmosfera formando nubes, cumpliendo así su ciclo (Ordoñez, 2011). Es importante destacar que el agua precipitada también puede alimentar directamente a las fuentes hídricas. En la Figura 3 se presenta un gráfico del ciclo hídrico.

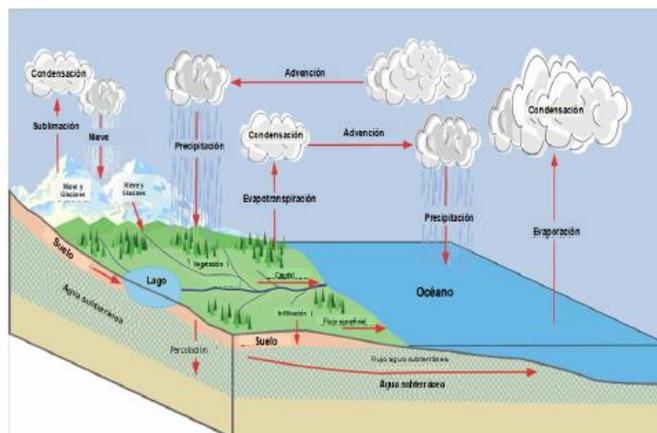


Figura 3. Ciclo hídrico

Fuente: (Ordoñez, 2011)

Según Ordoñez (2011), los principales procesos dentro del ciclo hidrológico son:

Precipitación: Todo tipo de agua que cae a la superficie terrestre ya sea en estado líquido o sólido (granizo o nieve), la precipitación es provocada por cambios en la presión o temperatura.

Evaporación. Proceso por el cual el agua líquida pasa a estado gaseoso, para que este fenómeno suceda es importante que la humedad de la atmósfera sea menos a la humedad de la superficie de evaporación. Este proceso “requiere grandes cantidades de energía pues para evaporar un gramo de agua a 100° Celsius se requiere 540 calorías de energía de calor” (Ordoñez, 2011).

Condensación. Es el proceso de enfriamiento en el que cambia el vapor de agua a estado líquido.

Transpiración. Proceso por el cual las plantas expulsan partículas de agua a través de sus hojas.

Intercepción. Es la porción de agua precipitada que es interceptada por objetos presentes en la superficie como techos de infraestructura o la cobertura vegetal.

Escorrentía superficial. Es el agua precipitada que no fue infiltrada, evaporada o interceptada y mana las laderas a manera de ríos o riachuelos.

2.1.1.3 Recarga hídrica

Se define recarga hídrica como el proceso en el que el agua se concentra y es captada en un determinado lugar para posteriormente ser liberada (regulación hídrica). El deterioro de una zona de recarga es consecuencia de la erosión, deforestación y compactación del suelo causadas por actividades antrópicas (Mamani, Alfaro, & Gonzales, 2016). De acuerdo a INAB (2003, tomado de Matus, Faustino, & Jimenez, 2009), los factores que afectan a la recarga hídrica son:

- **Clima.** Aquí se centra el balance hídrico ya que es la cantidad de precipitación y evapotranspiración.
- **Suelo.** Del tipo de suelo depende la infiltración del agua, por lo que los suelo permeables son los mejores en una zona de recarga.
- **Topografía.** Este factor ayuda a determinar el tiempo de contacto que existirá entre el agua y la superficie.
- **Estratos geológicos.**
- **Cobertura vegetal.** La vegetación permite que exista menor escorrentía superficial por ende permite la infiltración del agua.
- **Escurrimiento.** Que es el flujo superficial del agua, que también interviene en el ciclo hidrológico.

2.1.1.4 Regulación hídrica en el ciclo hidrológico

La regulación hídrica es una de funciones ecosistémicas más importantes que poseen los ecosistemas altoandinos. “La regulación del ciclo hidrológico se produce cuando un ecosistema almacena agua durante períodos húmedos, para liberarla durante los períodos secos” (Llambí, L et. al , 2012).

2.1.1.5 Los Páramos

Al igual que todos los ecosistemas el páramo cumple con determinados servicios ambientales siendo el principal la regulación hídrica, sabiendo que dicha regulación es el proceso mediante el cual el suelo absorbe el agua como una esponja para luego liberarla gradualmente según la disponibilidad de la misma. “El flujo de agua desde los páramos a través de quebradas y ríos, depende de un delicado balance entre todos los procesos” (Hofstede, Segarra, & Mena, 2003).

Suelo. Los tipos de suelo más comunes son andisoles, histosoles, entisoles e inceptisoles. Los suelos de los páramos altos son rocosas y poco profundos, con poca materia orgánica pro lo que su retención de agua es baja, los páramos de mediana altitud poseen suelos relativamente húmedos con alta capacidad de retención de agua (Llambí, L et. al , 2012), finalmente los páramos más bajos son muy oscuros, con altos niveles de nitrógeno y bajos de calcio y gran retención de agua.

Vegetación en paramos. Las formaciones vegetales más comunes en los páramos son: bosque paramero, pajonales, rosetales matorrales o arbustales, bosque andino, subparamo y humedales altoandinos (Llambí & Soto, 2012).

Degradación y amenazas de los páramos. Existen diferentes actividades antrópicas que amenazan los páramos sobre todo si se las practica sin criterios de sostenibilidad y sustentabilidad (Hofstede, R et. al, 2014).

Agricultura. La amenaza más fuerte es la siembra de papa, la agricultura en los páramos provoca que estos pierdan la materia orgánica, acidificación y modificación de la estructura del suelo, influyendo así en el servicio ecosistémico más importante que estos tiene que es la regulación hídrica (Hofstede , Mena , & Mediana, 2001).

Ganadería. La afectación de esta en los páramos se ve en la compactación del suelo por ende el aumento de erosión del mismo, y la disminución de la abundancia de especies vegetales preferidas por el ganado.

Quema de vegetación. Se da por parte de comuneros que habitan en estas zonas para estimular el crecimiento de nuevas plantas que sirvan de alimento para el ganado o a su vez para “limpiar” el terreno para una nueva siembra. Esto tiene efectos negativos como la disminución de la cobertura vegetal, pérdida de hábitad y de especies (Mena & Hofstede, 2006).

Forestación. Es un problema ya que se han introducido especies exóticas como son el pino y el eucalipto, provocando alteración en los paisajes, disminuyendo abundancia vegetal, acidificación de los suelos.

Minería. Impacta significativamente a los páramos por los cambios en los cauces de agua, contaminación de agua y suelo y la creación de carreteras para realizar la actividad.

Es importante destacar que cada una de estas actividades antrópicas tienen efectos similares que se resumen en la compactación y erosión del suelo provocando así la reducción de la capacidad de retención del agua que tienen los páramos en general.

2.1.2 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un SIG es un conjunto de software y hardware que están elaborados con el objetivo de generar y manejar datos referenciados a un sistema de coordenadas geográficas. En la actualidad al menos el 70% de información que se maneja esta georeferenciada (Olaya, 2014).

Los sistemas de información geográfica permiten la lectura, almacenamiento, edición y la gestión de datos distribuidos en el espacio, generando mapas y gráficos que permitan visualizar de mejor manera la información espacial.

2.1.2.1 Base de datos geográficos

Según Olaya (2014) es un conjunto de datos geográficos estructurados y almacenados de forma sistemática, de manera en la que su futura utilización sea cómoda. Es importante recordar que los datos almacenados pueden ser numéricos y alfanuméricos, sin olvidar que deben pertenecer a un espacio geográfico determinado.

2.1.2.2 Análisis espacial

El análisis es una función indispensable que tienen los SIG's y se puede definir como el conjunto de varias técnicas matemáticas y estadísticas que se aplica a datos que están distribuidos geográficamente en el espacio (Buzai, 2015), existen varias ventajas de los análisis espaciales entre las principales están la automatización de las tareas, la creación de nuevos procesos para la solución

de problemas (Olaya, 2014) y la facilidad que tienen sus resultados para ser comprendidos por el público en general.

2.1.2.3 Algebra de mapas

Es un conjunto de procedimientos y herramientas que permite obtener información derivada de la operación de varias capas de datos (Olaya, 2014), esta información será presentada en una nueva capa.

2.1.2.4 Modelo cartográfico

Un modelo cartográfico es similar a un diagrama de flujo, ya que este modelo indica sistemáticamente el conjunto de operaciones necesarias, así como el análisis necesario para el modelamiento o la obtención de determinados resultados.

2.1.3 Evaluación multicriterio

La evaluación multicriterio (EMC) es una técnica alternativa a aquellas de evaluación monetaria para la inclusión de los recursos ambientales y los servicios ecológicos en el proceso de toma de decisiones al momento de planificar proyectos de desarrollo (Matteucci, y otros, 2007). Además permite trabajar con todos los criterios o variables relacionados a un tema, identificando la importancia de cada una de estas variables en referencia al tema de estudio (Grajales, Serrano, & Hahn, 2013).

La EMC con ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG) permiten modelar espacialmente las diferentes factores biogeofísicos, económicos y humanos (Henríquez & Qüense, 2009) que responden a los distintos cambios generados en un espacio geográfico como por ejemplo el cambio de uso de suelo.

Las variables a ser utilizadas en los EMC pueden ser de carácter continuo como la temperatura y la humedad, o de carácter discreto (puntos calientes, fallas geológicas, entre otros.). También es importante mencionar que estas metodologías pueden ser empleadas para resolver problemas de gestión de riego, selección de usos de suelo, manejo de humedales, reducción de la contaminación difusa en ríos, entre otros (Grau, y otros, 2011).

La aplicación de metodologías multicriterio implica la definición de objetivos, alternativas, criterios y pesos (Romero 1993, tomado de Grau, y otros, 2011).

2.1.3.1 Proceso analítico de jerarquización (AHP)

Es una de las técnicas empleadas para la toma de decisiones bajo la evaluación multicriterio, esta técnica tiene como fundamento la jerarquización de variables, la comparación pareada y la asignación de pesos de importancia a cada variable (Yajure, 2015).

El proceso analítico de jerarquización fue planteado en 1980 por Thomas Saaty, y tiene por propósito el convertir criterios subjetivos en un conjunto de pesos totales. Además es una metodología que sirve para sintetizar, medir y estructurar las variables.

“En el AHP las comparaciones de las n alternativas forman una matriz A , cuadrada y de orden n , donde a_{ij} representa la preferencia de la alternativa i con respecto a la alternativa j y, debido a que la matriz que se forma es una matriz recíproca, la preferencia de j sobre i es definida como $a_{ji} = 1/a_{ij}$. El objetivo es obtener, a partir de la matriz de comparaciones A , un vector de pesos o preferencias relativas, $w = (w_1, \dots, w_n)T$, también llamado vector de prioridades” (Builes & Lotero, 2012).

Finalmente el AHP cuenta con un método para medir la coherencia entre las ponderaciones obtenidas, llamado consistencia, “en términos generales, si $a_{ij} = a_{ik}a_{kj}$ para todo $i, j, k = 1, \dots, n$ entonces se dice que la matriz de preferencias del decisor, A , es consistente” (Builes & Lotero, 2012). Además si la consistencia como tal esta es menor a 0.10 es aceptable y si es mayor es inconsistente (Toskano, 2005).

2.1.3.2 Lógica Difusa (FUZZY)

La teoría difusa es una teoría matemática que se utiliza posterior a la jerarquización de variables e intenta representar la imprecisión del pensamiento humano (Yajure, 2015), además permite manejar y procesar ciertos tipos de información en los cuales se manejen términos inexactos, imprecisos o subjetivos (Carranza, 2008).

Según Hartley (2010) esta teoría puede describir las relaciones difusas del sistema socio-hídrico, esto se debe a que la lógica difusa permite la representación matemáticas de conceptos imprecisos (Andocilla, 2012). La clasificación difusa de las variables tiene como fundamento el evaluar la posibilidad de que cada elemento pertenezca a un determinado fenómeno o sistema (Guo et. Al., 2004, tomado de Andocilla, 2012).

“La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido” (Carranza, 2008).

Para modelar o representar las variables se hará uso de las funciones sinusoidales y cosinusoidales ya que estas se ajustan a las representaciones que tiene la lógica difusa, en donde el

ángulo a ser analizado (α) será la variable a ser representada (Ruiz Puente, et. al, 2007 tomado de Padilla, 2007), por lo que la probabilidad de que suceda un evento se puede definir como:

$$P = f(\text{sen } \alpha) \quad (1) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Donde:

P = probabilidad de ocurrencia de un evento o fenómeno

α = variable en función del evento

La probabilidad mínima de que suceda será 0 o 0% y la probabilidad máxima será 1 o 100%, para obtener una curva donde el rango de los valores sea [0,1.0], se utilizara la función del seno cuadrado (Padilla, 2007).

Padilla (2007) en el artículo titulado “Fundamento teórico para modelización de variables ambientales mediante operadores difusos”, determina que existen 3 casos de análisis bajo la lógica difusa.

Caso 1. Consiste en la curva completa de la función seno cuadrado, la misma que está en un rango de 0 a π radianes. Este caso describe a los eventos que tienen p probabilidad de ocurrencia va creciendo desde un punto 0 hasta un punto máximo y posteriormente esta probabilidad vuelve a decrecer.

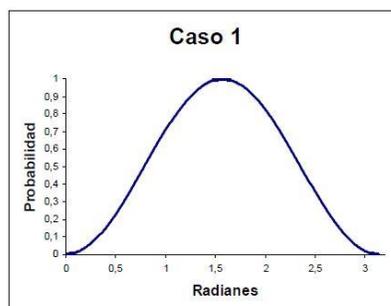


Figura 4. Caso 1 de lógica difusa.
Fuente. (Padilla, 2007)

En la Figura 4 se observa la curva completa de la función seno cuadrado entre 0 a π radianes, donde se puede determinar que existen 5 puntos importantes donde 3 son los puntos de inflexión de la curva y los otros dos son el inicio y el final de la misma. El punto máximo es donde existe mayor probabilidad de ocurrencia del evento por lo que esta será igual a 1 o 100%, mientras que el punto inicial y final tendrán una probabilidad nula de ocurrencia.

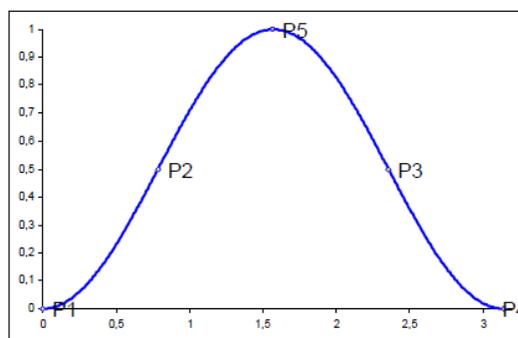


Figura 5. Puntos de inflexión de caso 1.
Fuente. (Padilla, 2007)

Los puntos de interés del caso 1 se presenta en a Figura 5, junto a estos puntos se trazan rectas que permiten el análisis del área bajo la curva. Los puntos de inflexión de la curva se calculan con la segunda derivada de la función.

$$P = \text{sen}^2 \alpha \quad (2) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

$$P' = 2 \text{sen} \alpha \cos \alpha$$

$$P'' = 2 \operatorname{sen} \alpha - \operatorname{sen} \alpha + 2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha$$

$$P' = 2(\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha)$$

$$\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha = 0$$

$$1 - \operatorname{sen}^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha = 0$$

$$1 - 2\operatorname{sen}^2 \alpha = 0$$

$$\operatorname{sen}^2 \alpha = \frac{1}{2}$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{4}; \alpha_2 = \frac{3\pi}{4}$$

A raíz de esto se determinan los puntos necesarios a ser analizados, los cuales son:

P₁ (A; 0); este es el valor mínimo que obtendrá la variable a ser modelada

P₂ (B; $\frac{\pi}{4}$); punto de inflexión donde empieza el área en la que se encuentra ubicado el mayor número de datos.

P₃ (C; $\frac{3\pi}{4}$); punto de inflexión donde termina el área en la que se encuentra ubicado el mayor número de datos.

P₄ (D; π); punto en el que la variable a modelar tendrá el valor mínimo

P₅ (E; $\frac{\pi}{2}$); punto en el que la variable toma su valor máximo, donde $E = \frac{B+C}{2}$

A continuación se analizará las secciones entre los puntos que ayudarán a determinar el área bajo la curva.

Sección P1P2. Es la sección al inicio de la función en la que existe menor cantidad de datos.

Se utilizara la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_1 (A; 0) \text{ y } P_2 (B; \frac{\pi}{4});$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (3) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - 0 = \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} * \frac{V - A}{B - A} \quad (4) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Sección P2P5. Es la sección al inicio de la función en la que existe mayor cantidad de datos.

Se utilizara la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_2 (B; \frac{\pi}{4}) \text{ y } P_5 (\frac{B+C}{2}; \frac{\pi}{2})$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{\pi}{4} = \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{\frac{B+C}{2} - B} (V - B)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{2}(V-B)}{C-B} \quad (5) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Sección P₅P₃. Es la sección al final de la función en la que existe mayor cantidad de datos.

Se utilizara la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_5 \left(\frac{B+C}{2}; \frac{\pi}{2} \right) \text{ y } P_3 \left(C; \frac{3\pi}{4} \right)$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{\pi}{2} = \frac{\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{C - \frac{B+C}{2}} \left(V - \frac{B+C}{2} \right)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi}{4}(2V-B-C)}{C-B} \quad (6) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Sección P₃P₄. Es la sección al final de la función en la que existe menor cantidad de datos.

Se utilizara la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_3 \left(C; \frac{3\pi}{4} \right) \text{ y } P_4 \left(D; \pi \right)$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{3\pi}{4} = \frac{\pi - \frac{3\pi}{4}}{D - C} (V - C)$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V-C)}{D-C} \quad (7) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Caso 2. Es la curva de la función seno cuadrado que comprende el rango de 0 a $\frac{\pi}{2}$ (Figura 6), las variables que se ajusten a este caso son las que a medida que se alejen de determinada condición habrá mayor probabilidad de ocurrencia.

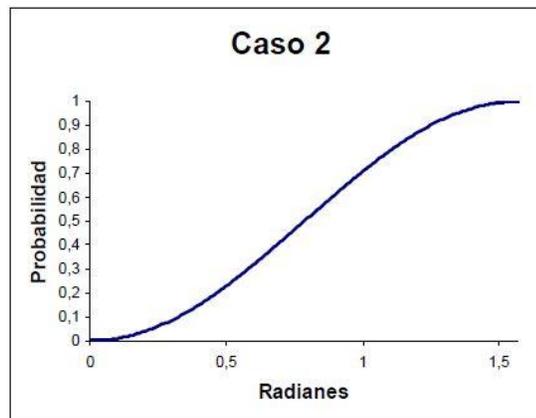


Figura 6. Caso 2 de lógica difusa.
Fuente. (Padilla, 2007)

En este caso existen 3 puntos de inflexión de la curva los mismos que serán tomados del caso 1 y se presentan en la Figura 7, los mismo que tienen por coordenadas: $P_1 (A; 0)$; $P_2 (B; \frac{\pi}{4})$; $P_3 (C; \frac{\pi}{2})$, y sus segmentos serán analizados a continuación.

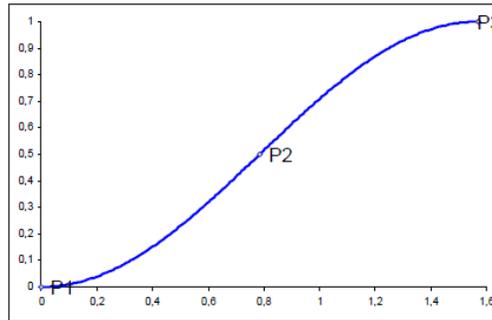


Figura 7. Puntos de inflexión de caso 2.
Fuente. (Padilla, 2007)

Sección P1P2. Es la sección en la que existe menor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V , y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_1 (A; 0) \text{ y } P_2 (B; \frac{\pi}{4});$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - 0 = \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} * \frac{V - A}{B - A} \quad (8) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Sección P2P3. Es la sección en la que existe mayor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V , y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_2 (B; \frac{\pi}{4}) \text{ y } P_3 (C; \frac{\pi}{2})$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{\pi}{4} = \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{C - B} (V - B)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V-B)}{C-B} \quad (9) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Caso 3. Es la curva de la función seno cuadrado que comprende el rango de $\frac{\pi}{2}$ a π , en la Figura 8 se puede ver su gráfica donde se entiende que las variables que se apegan a este caso son aquellas que a medida que se alejan de una condición específica su probabilidad de ocurrencia disminuye.

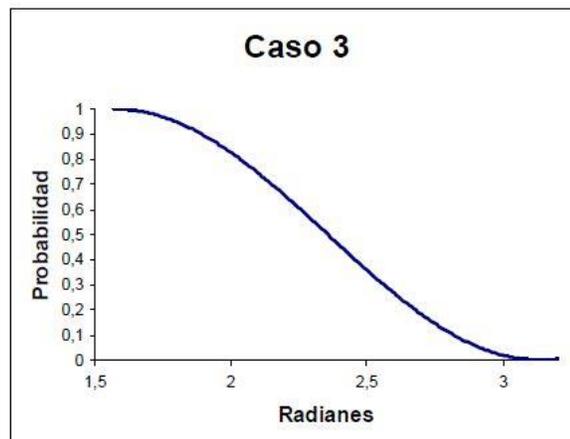


Figura 8. Caso 3 de lógica difusa
Fuente. (Padilla, 2007)

Al igual que en el caso 2 existen 3 puntos de inflexión de la curva los mismos que serán tomados del caso 1 y se presentan en la Figura 9, estos puntos tienen por coordenadas: $P_1 (A; \frac{\pi}{2})$; $P_2 (B; \frac{3\pi}{4})$; $P_3 (C; \pi)$, y sus segmentos serán analizados a continuación.

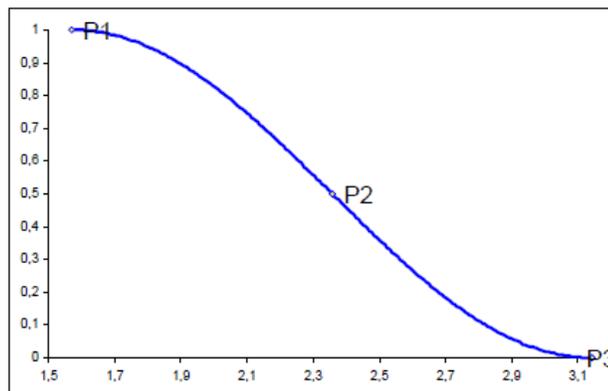


Figura 9. Puntos de inflexión del caso 3.
Fuente. (Padilla, 2007)

Sección P₁P₂. Es la sección en la que existe mayor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$$P_1 \left(A; \frac{\pi}{2} \right) \text{ y } P_2 \left(B; \frac{3\pi}{4} \right);$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{\pi}{2} = \frac{\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{B - A} (V - A)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi}{4}(V - A)}{B - A} \quad (10) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

Sección P₂P₃. Es la sección en la que existe menor cantidad de datos. Se utilizará la ecuación de la curva donde x representa los valores de la variable en estudio que será llamada V, y son los valores de la función seno cuadrado para la sección α .

$P_2 (B; \frac{3\pi}{4})$ y $P_3 (C;\pi)$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Reemplazando puntos se tiene

$$\alpha - \frac{3\pi}{4} = \frac{\pi - \frac{3\pi}{4}}{C - B} (V - B)$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V-B)}{C-B} \quad (11) \text{ Fuente. Padilla (2007)}$$

2.2 Fundamento Legal

En este bloque se mencionará secciones y artículos existentes en las diferentes leyes, reglamentos y acuerdos ministeriales, donde se alude la importancia del agua, así como de la conservación y cuidado de este recurso.

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)

Título II: Derechos – Capítulo II: Derechos del buen vivir – Sección Primera: Ambiente Sano.

Título II: Derechos – Capítulo VII: Derechos de la naturaleza

Título VII: Régimen del Buen Vivir – Capítulo II: Biodiversidad y recursos naturales – Sección Primera: Naturaleza y ambiente

Título VII: Régimen del Buen Vivir – Capítulo II: Biodiversidad y recursos naturales – Sección Tercer: Patrimonio cultural y ecosistemas

Título VII: Régimen del Buen Vivir – Capítulo II: Biodiversidad y recursos naturales –
Sección Cuarta: Recursos naturales

Título VII: Régimen del Buen Vivir – Capítulo II: Biodiversidad y recursos naturales –
Sección Sexta: Agua

2.2.2 Leyes Orgánicas

2.2.2.1 Ley Orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua (2014):

En esta Ley se menciona y otorga el derecho a la conservación del agua, protección de sus fuentes, la regulación del caudal, se establece las zonas de captación, de igual manera existen artículos específicos que detallan normativas, usos y aprovechamientos del líquido vital es así que tenemos los siguientes artículos.

Artículo 1, En este artículo se establece que los recursos hídricos son parte del patrimonio del Estado, el cual tendrá exclusividad en sus competencias, de igual manera se menciona que el recurso agua es de uso público y es patrimonio nacional estratégico, siendo de dominio inalienable, inembargable, imprescriptible y es un elemento vital de la naturaleza.

En el Artículo 12 de la ley de recursos hídricos se estipula que son corresponsables en la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua y del manejo de los páramos, el Estado Ecuatoriano, Junta de aguas, comunidades, los consumidores y usuarios.

Artículo 13 se menciona las formas de conservación y protección de las fuentes de agua, donde se detallan las siguientes.

- Servidumbres de uso público

- Zonas de protección Hídrica
- Zonas de restricción

2.2.2.2 Ley forestal y de conservación de áreas naturales y vida silvestre (2004)

Artículo 6.- Se consideran bosques y vegetación protectores aquellas formaciones vegetales, naturales o cultivadas, que cumplan con uno o más de los siguientes requisitos:

- a) Tener como función principal la conservación del suelo y la vida silvestre;
- b) Estar situados en áreas que permitan controlar fenómenos pluviales torrenciales o la preservación de cuencas hidrográficas, especialmente en las zonas de escasa precipitación pluvial;
- c) Ocupar cejas de montaña o áreas contiguas a las fuentes, corrientes o depósitos de agua;
- d) Constituir cortinas rompe vientos o de protección del equilibrio del medio ambiente;
- e) Hallarse en áreas de investigación hidrológico-forestal;
- f) Estar localizados en zonas estratégicas para la defensa nacional; y,
- g) Constituir factor de defensa de los recursos naturales y de obras de infraestructura de interés público.

Artículo 8, se menciona que los bosques y vegetación protectores serán manejados, y para garantizar su conservación se sustentaran en las limitaciones y términos que estén estipulados en los reglamentos.

2.2.3 Reglamentos y Acuerdos Ministeriales

Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental.

Reglamento a la Ley Orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua.

Ordenanza Metropolitana N°199. Gestión integrada de los recursos hídricos del Distrito Metropolitano de Quito.

CAPITULO 3

METODOLOGIA

En el presente capítulo se realizará la descripción de las microcuencas hidrográficas en las que se realiza el estudio, se describe la información geográfica a ser utilizada, se determina las variables a ser empleadas en el estudio, la determinación de los pesos a cada variable y los modelos generados.

3.1 Descripción del área de estudio

A continuación se hará una breve descripción de las microcuencas a ser estudiadas.

3.1.1 Microcuenca del río Pita

La microcuenca nace en los páramos del Sincholagua y del Cotopaxi, y luego de 44 km de recorrido desemboca en el río San Pedro (Hofstede, R et. al, 2014). La mayor altura de la microcuenca es de 5897 msnm y la menos es de 2440 msnm, además cuenta con una temperatura media de 6°C (Chiriboga J. , 2015). En la Figura 10 se presenta el mapa de ubicación.

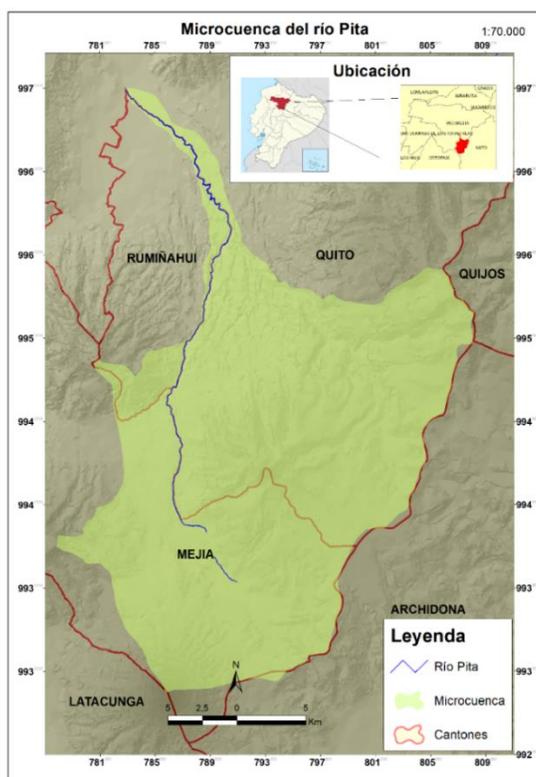


Figura 10. Ubicación Microcuenca del río Pita

Según Chiriboga (2015) la importancia de la microcuenca del río Pita radica en que aporta con agua para el consumo humano a la ciudad de Quito (aproximadamente 30% de la población) además otorga agua para riego a las zonas agropecuarias de las parroquias de Machachi, Pintag y Rumipamba. En la Tabla 4 se presenta la distribución política de la microcuenca.

Tabla 4.

Distribución política de la microcuenca del río Pita

Cantón	Parroquia	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Habitantes(2010)
Quito	Alangasi	6350715	1,074442186	24251
	Pintag	323225800	54,68477723	27930
Mejía	Machachi	233729200	39,54334473	27623
Rumiñahui	Rumipamba	18798770	3,180459448	775
	Sangolqui	8966406	1,516976413	81140

Fuente. Censo 2010 (INEC, 2010)

Debido a las características antes mencionadas es importante destacar que la microcuenca representa una fuente y reserva de agua tanto para las poblaciones, como a las actividades agropecuarias y a los ecosistemas que se encuentran dentro de la misma, en la Tabla 5 se presenta las coberturas y usos de suelo encontrados en esta microcuenca, de acuerdo a la información levantada por el FONAG (2016).

Tabla 5.
Porcentaje de cada cobertura vegetal en la microcuenca del río Pita

Cobertura y Uso 2016	Área (km)	Porcentaje de la cuenca
Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes	0,833468	0,14
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	16,166863	2,73
Áreas erosionadas	22,13313	3,73
Áreas quemadas	0,067121	0,011
Arenales	0,102801	0,017
Bosque plantado para conservación	0,335775	0,057
Bosque plantado para producción	10,422987	1,760
Bosque siempreverde del Páramo	0,119483	0,020
Bosque y Arbustal semideciduo del norte de los Valles	1,143886	0,193
Cultivos	116,954149	19,749
Cultivos de ciclo corto	0,085997	0,0145
Flujos de lava	8,582468	1,449
Herbazal de Páramo	294,224331	49,68
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	5,852044	0,988
Herbazal inundable del Páramo	0,82563	0,139
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	3,7552	0,6341
Lahar	31,502436	5,319
Nieve-hielo	3,176098	0,5363
Pasto	68,452281	11,559
Zona poblada	7,43976	1,2563

Según Quiñónez (2015), “la vegetación de la microcuenca está compuesta por pastos naturales o cultivados, bosques remanentes y secundarios con árboles nativos y exóticos, páramo

de pajonal, matorrales, donde se encuentran achupallas, chilcas, huaicundo, pumamaquis, alisos, pinos, eucaliptos, ciprés, orquídeas, bromelias, etc”.

Al tratarse de una cuenca con actividades productivas existe la presencia de varias presiones ambientales, algunas de estas son: el avance de la frontera agrícola, pastoreo, uso intensivo del suelo, quema de páramos, caza, pesca y deforestación. Presiones que, ocasionan la degradación del suelo y por ende el cambio en la disponibilidad y calidad del agua (Chiriboga J. , 2015).

Parámetros geomorfológicos

La microcuenca del río Pita cuenta con 140,48 km aproximadamente de perímetro y un área de 592,39 km², estos parámetros fueron obtenidos del ArcMap. La pendiente de una cuenca es un “índice de la velocidad media de escorrentía” (Pérez, 1979) por lo que indica el poder erosivo de la misma, la pendiente se calculó con la fórmula de Alvord:

$$S = \frac{D \sum L}{A} * 100 = \frac{369,4905 * 0,4}{592,389} * 100 = 24,95\% \quad (12)$$

Donde: $\sum L$ es la sumatoria de las distancias de las curvas de nivel (369,4905)

D es la distancia entre curvas de nivel (0,4km)

A es el área (592,389 km²)

La importancia de la forma de una cuenca radica en que ayuda a comprender el comportamiento hidrológico de la misma, en la Tabla 6 se presentan los resultados de la forma de esta microcuenca.

Tabla 6.*Parámetros de forma de la microcuenca del río Pita*

Parámetro de forma	Fórmula	Valor
Razón de circularidad de Miller	$Cc = 4\pi \frac{A}{P^2}$	0,23713821
Índice de compacidad	$k_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,61608094
Factor de forma de Horton	$K_f = \frac{A}{L^2}$	0,30140666

Nota. A es el valor de área, P es el valor del perímetro y L es la longitud axial de la cuenca

A continuación se utilizó la fórmula de Horton para determinar la densidad de drenaje.

$$D = \frac{\sum Li}{A} = \frac{1097,853715 \text{ km}}{592,389 \text{ km}^2} = 1,85 \frac{\text{km}}{\text{km}^2} \quad (13)$$

Donde: D es la densidad de drenaje

$\sum Li$ es la sumatoria de las longitudes de los drenajes

A es el área

3.1.2 Microcuenca del río Pisque

Se encuentra ubicada aproximadamente a 75 km de Quito, y tiene como límites: al norte los cantones Otavalo, Ibarra y Pimampiro, al sur y oeste el cantón Quito y al este los cantones Gonzalo Pizarro y El Chaco (Herrera, 2013). La microcuenca del río Pisque se encuentra en la cuenca alta del río Guayllabamba y se encuentra entre los 1700 msnm y los 4400 msnm, en las partes baja de la microcuenca se presentan temperaturas entre 16,1°C y 16,8°C, y en las partes altas (sobre los 3600msnm) existen temperaturas entre los 6,4°C y 6,9°C (Salazar, 2015), en la Figura 11 se presenta el mapa de ubicación.

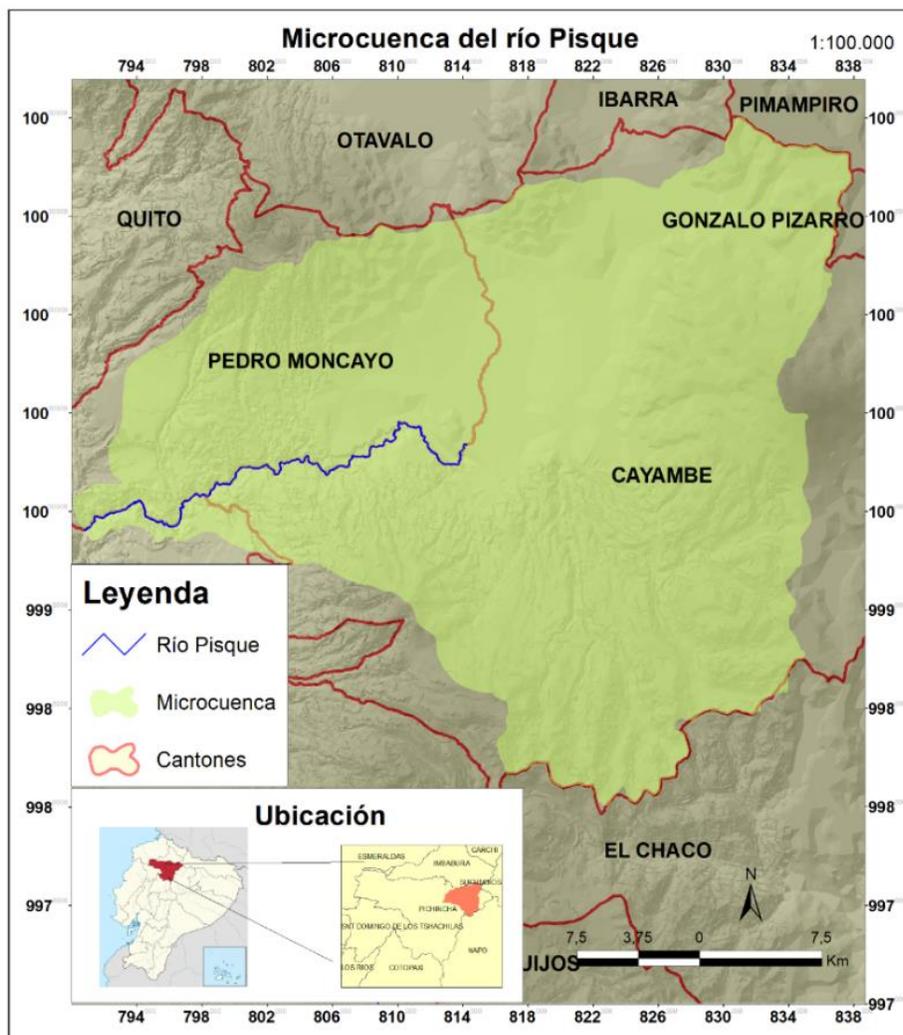


Figura 11. Ubicación de la microcuenca del río Pisque

El río Pisque se forma de la unión de los ríos Granobles y Guachalá. El río Granobles es la unión de los ríos Blanco y Chimba y este último se forma de los deshielos del volcán Cayambe (Pila, 2011). La distribución política de la microcuenca se encuentra por porcentajes en la Tabla 7.

Tabla 7.
Distribución política de la microcuenca del río Pisque

Cantón	Parroquia	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Habitantes(2010)
Cayambe	Ascazubi	2,323148	0,216809212	5050
	Cayambe	214,5275	20,02091056	50829
	Cangahua	286,8472	26,77019093	16231
	Olmedo	161,6637	15,08736399	6772
	Oton	24,51858	2,288211521	2766
	Santa Rosa de Cuzubamba	21,44645	2,001503104	4147
	San José de Ayora	126,7958	11,83329583	
Pedro Moncayo	Tabacundo	7,015251	0,654702604	16403
	La Esperanza	38,04976	3,551017197	3986
	Malchingui	49,46687	4,616525992	4624
	Tocachi	80,1215	7,477388144	1985
	Tupigachi	41,77605	3,898775497	6174
Quito	Guayllabamba	16,96539	1,58330543	16213

Fuente. Censo 2010 (INEC, 2010)

Campo (2018) la define como una microcuenca constituida por terrenos de alta montaña con zonas cultivas, zonas de pasto, áreas forestales, con actividades económicas intensivas y pobladas por comunidades con agricultura para subsistencia, además cuenta con alta demanda de agua para consumo humano, ganadería, uso industrial, generación de electricidad por el DMQ (Moya, 2010).

La presión sobre la microcuenca ha incrementado en las últimas décadas debido a que las poblaciones no pueden crecer hacia debajo y deben expandirse hacia arriba (Campo, 2018) fragmentando así ecosistemas importantes. De acuerdo a la investigación de Campo se conoce que existen dos ejes principales de desarrollo en esta microcuenca los cuales son la agricultura con las florícolas y la ganadería para la producción de lácteos.

Se conoce que aproximadamente existen 140 empresas florícolas asentadas en la cuenca del río Pisque (Campo, 2018), por lo que se cree que el crecimiento poblacional de Cayambe se

debe a esta industria. Por otra parte se ha determinado que esta actividad está desplazando a las actividades ganaderas provocando así que estas se disminuyan y en otros casos se reubiquen en las partes altas impacto ecosistemas frágiles como el páramo. En la Tabla 8 se presenta la distribución de las coberturas y usos del suelo (FONAG, 2016).

Tabla 8.
Cobertura y uso del suelo de la microcuenca del río Pisque

Cobertura y uso 2016	Área (km)	Porcentaje de la cuenca (%)
Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes	27,221365	2,398290138
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	102,87468	9,063591427
Áreas erosionadas	30,628737	2,698490611
Arenales	5,981606	0,5269988
Bosque plantado naturalizado	30,733532	2,707723389
Bosque plantado para producción	0,156895	0,013822956
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	62,974032	5,548215524
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Oriental de los Andes	1,884559	0,166035732
Bosque siempreverde montano del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes	3,261227	0,287324627
Bosque y Arbustal semideciduo del norte de los Valle	29,470561	2,596451567
Cultivos	182,76401	16,10209931
Cultivos de ciclo corto	90,043846	7,933153529
Herbazal de Páramo	281,30887	24,78421927
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	5,374342	0,473496881
Nieve-hielo	5,32441	0,46909771
Pasto	245,70355	21,64727625
Zona poblada	29,325966	2,58371228

Parámetros geomorfológicos

Esta microcuenca consta de un perímetro y área aproximados de 168,8307 km y 1135,78004km² respectivamente. La pendiente fue determinada bajo la fórmula de Alvord.

$$S = \frac{D \cdot \sum L}{A} * 100 = \frac{973,9164 * 0,4}{1135,78} * 100 = 34,3\% \quad (14)$$

Donde: $\sum L$ es la sumatoria de las distancias de las curvas de nivel (973,9164)

D es la distancia entre curvas de nivel (0.4km)

A es el área (1135,78 km²)

Para comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca que calcularon parámetros de forma, los mismo que están en la Tabla 9.

Tabla 9.

Factores de forma de la microcuenca del río Pisque

Parámetro de forma	Fórmula	Valor
Razón de circularidad de Miller	$Cc = 4\pi \frac{A}{P^2}$	0,14864736
Índice de compacidad	$k_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,40269205
Factor de forma de Horton	$K_f = \frac{A}{L^2}$	0,41520028

Nota. A es el valor de área, P es el valor del perímetro y L es la longitud axial de la cuenca

A continuación se presenta el cálculo de la densidad de drenaje de la microcuenca.

$$D = \frac{\sum Li}{A} = \frac{1772,3 \text{ km}}{1135,78 \text{ km}^2} = 1,56 \frac{\text{km}}{\text{km}^2} \quad (15)$$

Donde: D es la densidad de drenaje

$\sum Li$ es la sumatoria de las longitudes de los drenajes

A es el área

3.2 Recolección de datos

A continuación se describirá cada una de las coberturas utilizadas en el estudio.

Curvas de nivel. Esta cobertura contiene las curvas de nivel en un intervalo de 20 metros de altura. Fue obtenida a través de la base de datos del Fondo para la Protección del Agua (FONAG). Esta cobertura se encuentra a escala 1:25.000, y tiene como campos la altura en metros y la longitud del elemento. En la Figura 12 se encuentra una representación de esta capa.

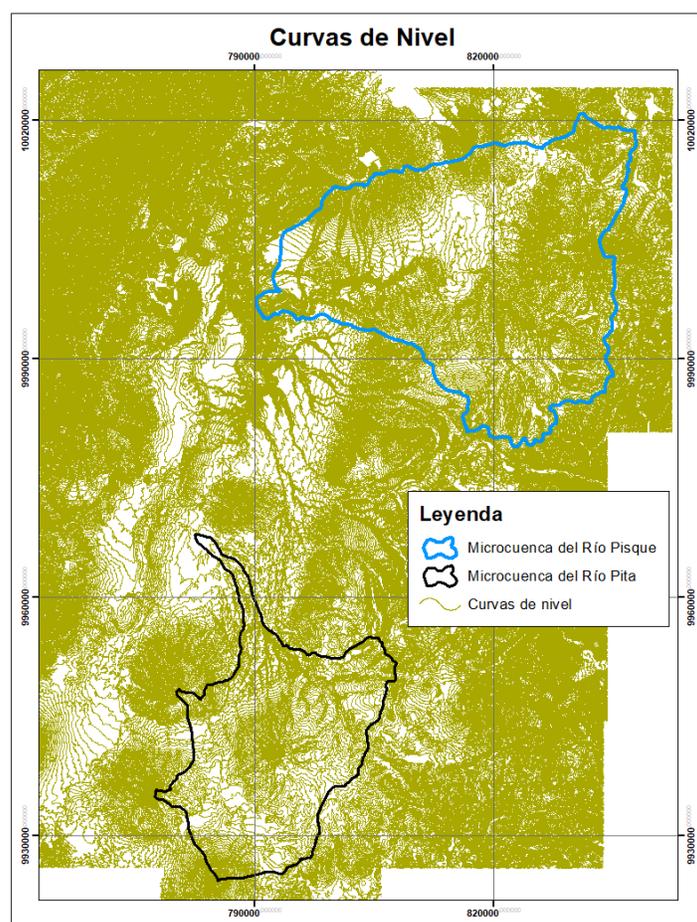


Figura 12. Curvas de nivel del área de estudio

Base Nacional de Autorizaciones de agua. Esta base contiene los puntos donde se ha autorizado el uso y aprovechamiento de agua por lo que el autor de la capa es la SENAGUA, mas fue entrega por el FONAG, está en escala 1:50.000 y se la presenta en la Figura 13. Entre los campos que contiene están las coordenadas, la información de cada uno de los beneficiarios como nombre, número de cédula, fecha de autorización, así como el uso que tendrá el agua así como el caudal autorizado.

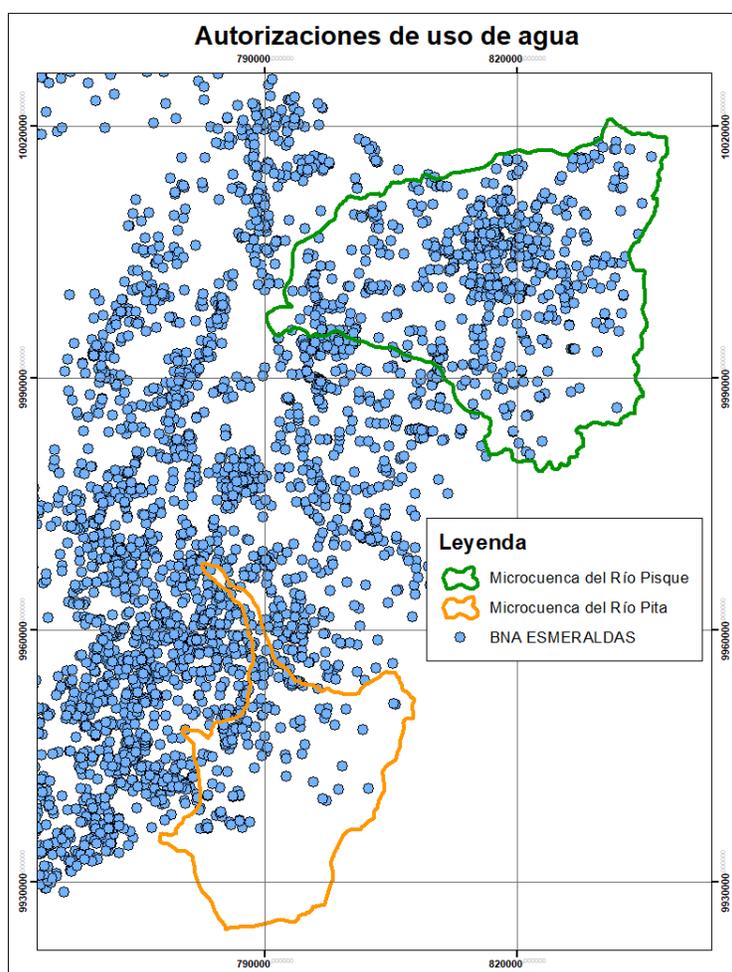


Figura 13. Base Nacional de Autorizaciones de Agua

Canales de agua. Son infraestructuras elaboradas para captaciones de consumo humano, la información fue entregada por el Consejo Provincial de Pichincha y contienen como información la ubicación del canal, material y diámetro de la tubería, el tipo de agua que conduce (tratada o cruda) y el sistema al que pertenece. En la Figura 14 se presenta una captura de esta capa, la información se encuentra en escala 1: 50.000.

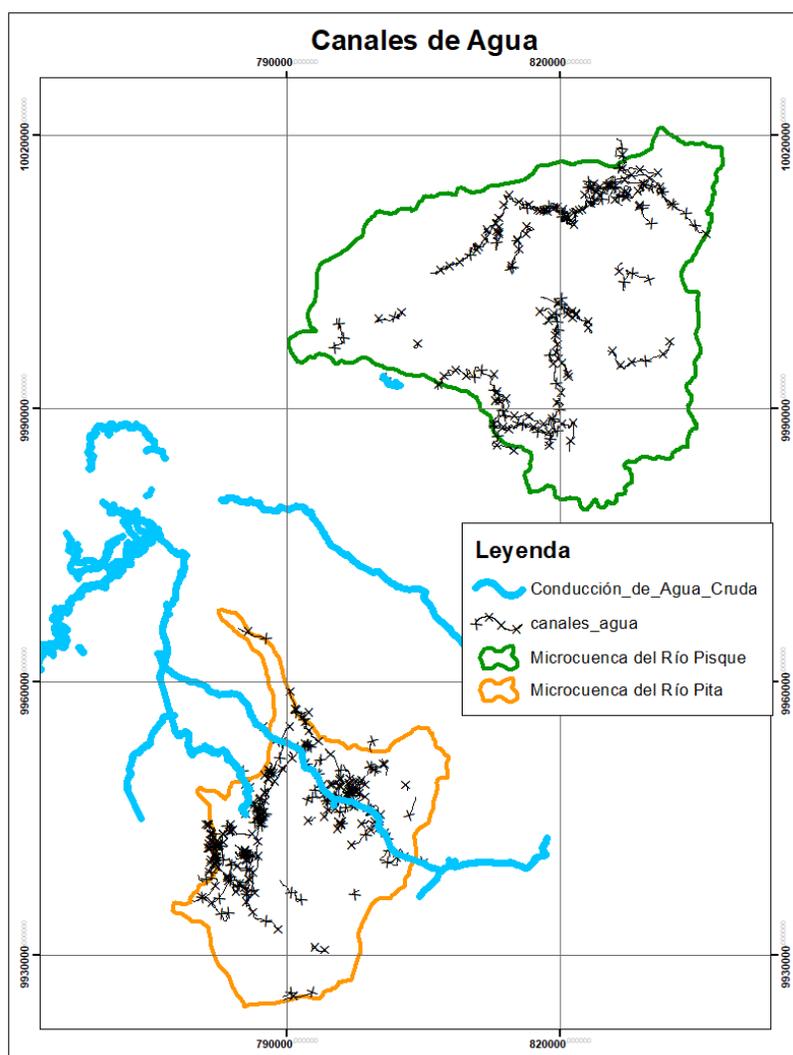


Figura 14. Canales de agua de Pichincha

Vertientes de EPMAPS. Son los puntos donde la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito tiene infraestructura para la captación de agua que será abastecida a todo el Distrito Metropolitano de Quito. Esta información se la puede apreciar en la Figura 15 y está a escala 1: 50.000. La información es reproducida por la EPMAPS y fue obtenida a través del FONAG.

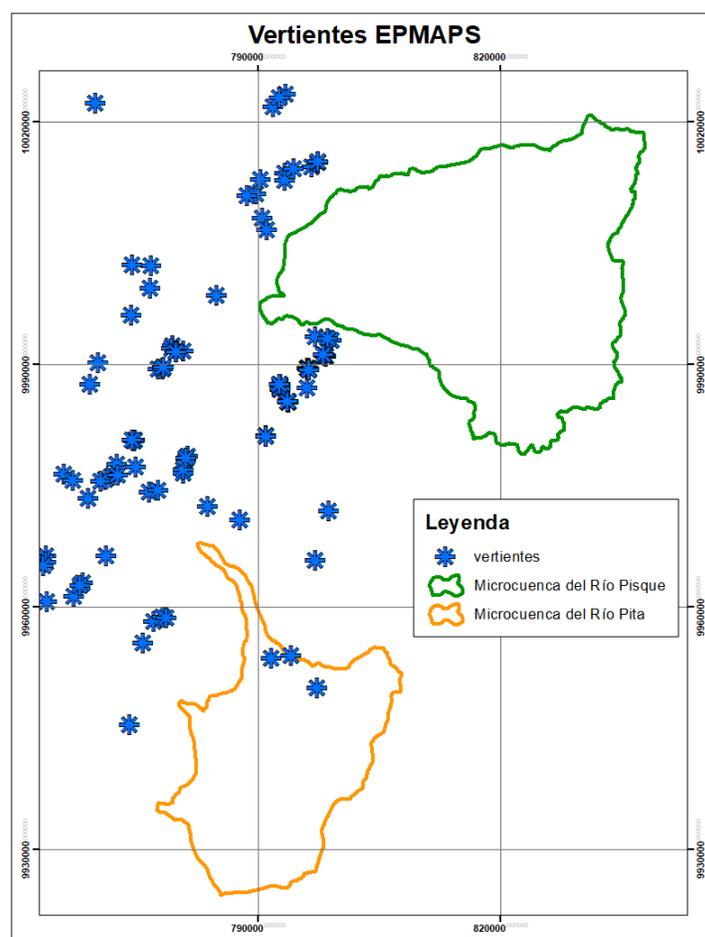


Figura 15. Vertientes de Agua de la EPMAPS

Entre la información existente en esta capa se tiene las coordenadas, la Parroquia en la que se encuentra ubicada, la demarcación hidrográfica en la que se encuentra y el nombre de la vertiente.

Cobertura vegetal y uso de suelo. Capa entregada por el FONAG a escala 1:25.000, fue elaborada en el 2016 y se encuentra en la Figura 16. En esta capa se encuentran información sobre la macrocobertura y la cobertura en el 2016.

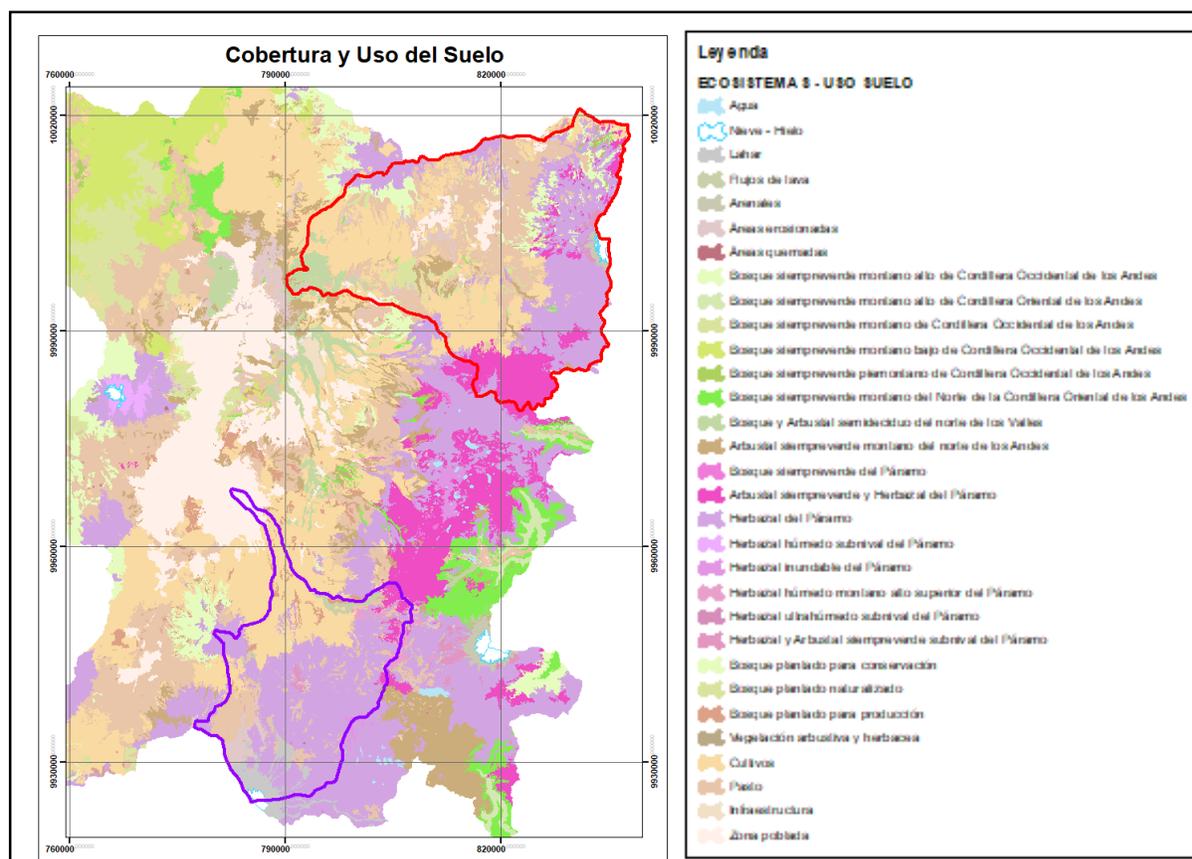


Figura 16. Cobertura y uso de suelo

Cuerpos de agua (lago/laguna). Capa que contiene los lagos y lagunas a escala 1:50.000, fue obtenida de la página del IGM y se encuentra en la Figura 17, en los campos del shape se encuentra la descripción, el nombre y la temporalidad.

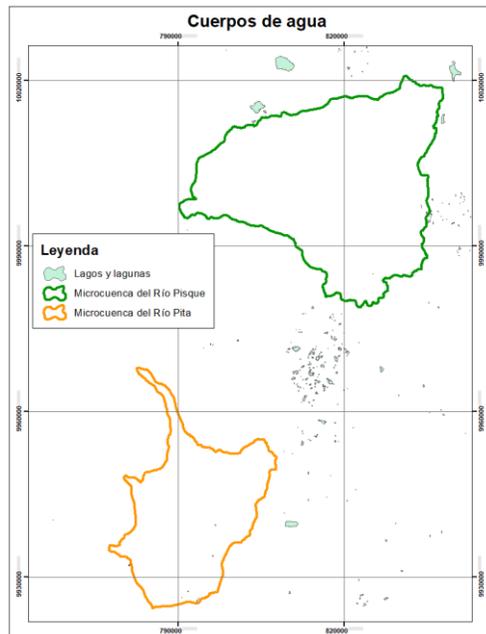


Figura 17. Cuerpos de agua presentes en el área de estudio

Centros poblados. Información obtenida de la base de datos abierta del IGM a escala 1:50.000, la misma que se encuentra reflejada en la Figura 18.

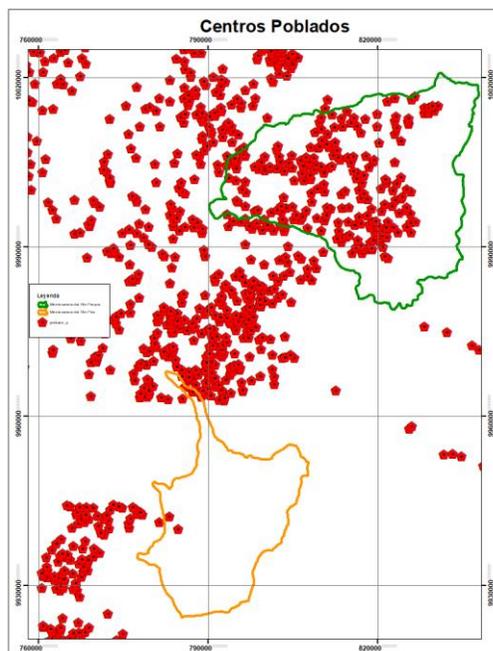


Figura 18. Centros Poblados

Degradación. Capa entregada por el FONAG donde se encuentran las áreas degradadas sobre los 3400m de altura. Se encuentra a escala 1:10.00 y se presenta en la Figura 19.

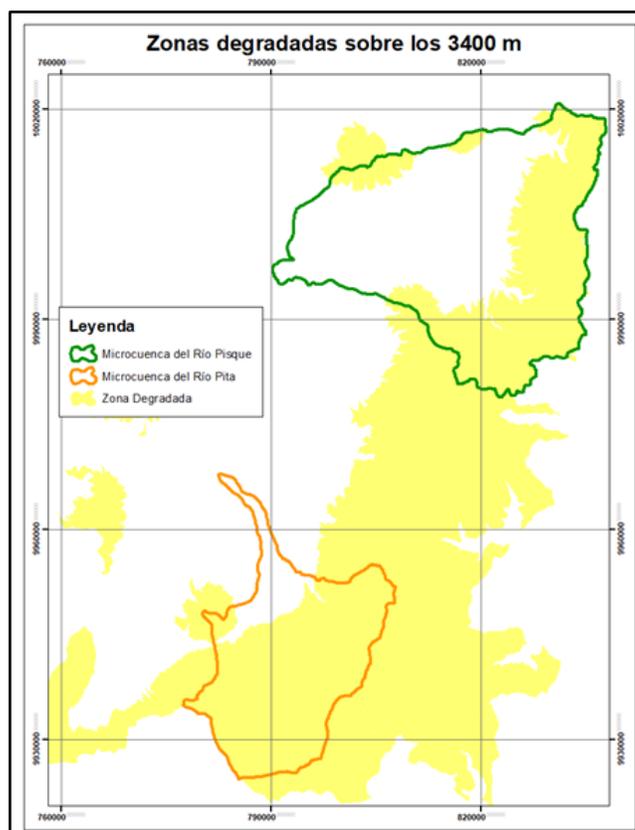


Figura 19. Áreas degradadas

Geopodológico. Estudio elaborado por el SIGTierras y el IEE sobre el análisis geopodológico del Ecuador. Se encuentra a escala 1:25.000, tiene por información la litología, geología del suelo, capacidad de infiltración, textura de suelo y roca e información química del suelo. En la Figura 20 se presenta la información geopodológica.

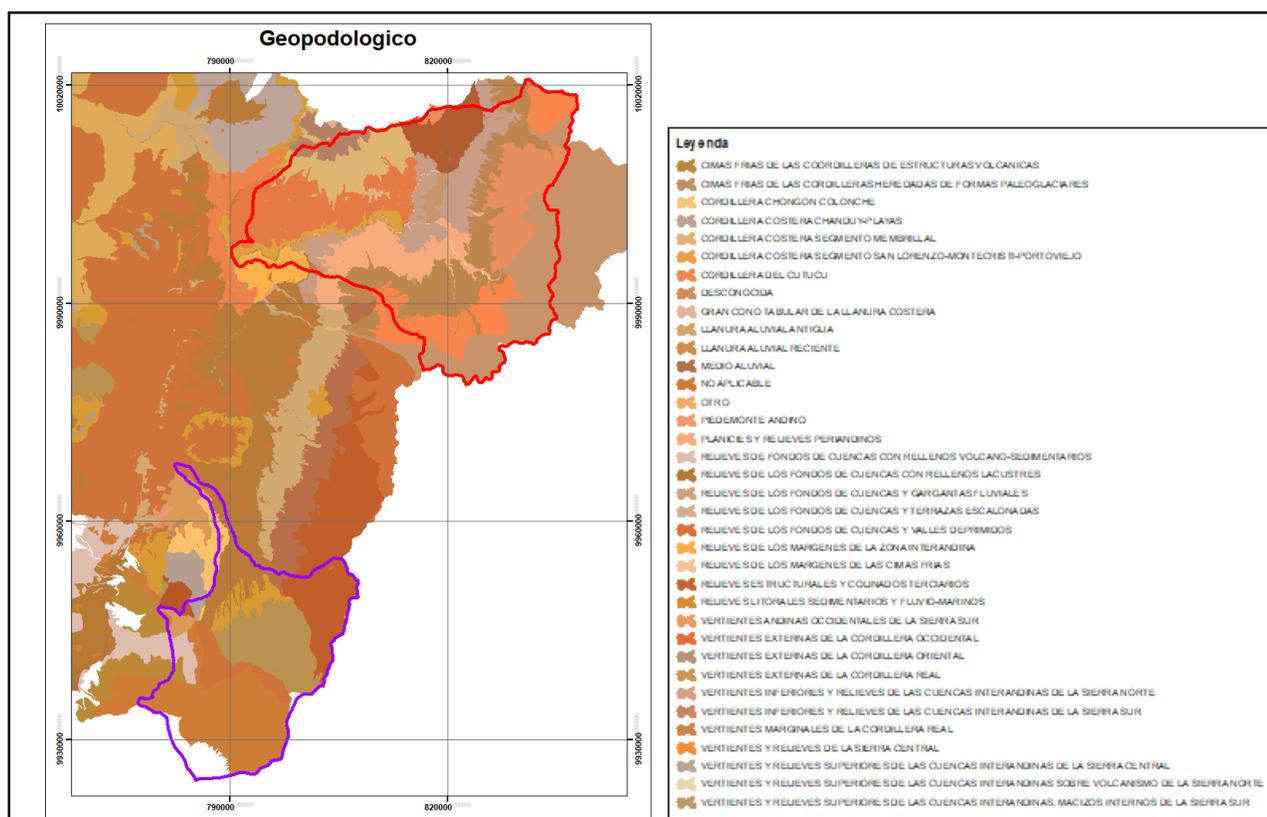


Figura 20. Información geopodologica

Ríos. Información obtenida en el Consejo Provincial de Pichincha, a escala 1:25.000 que contiene los ríos existentes en la provincia de Pichincha con los respectivos y longitudes. En la Figura 21 se presenta una captura de esta información.

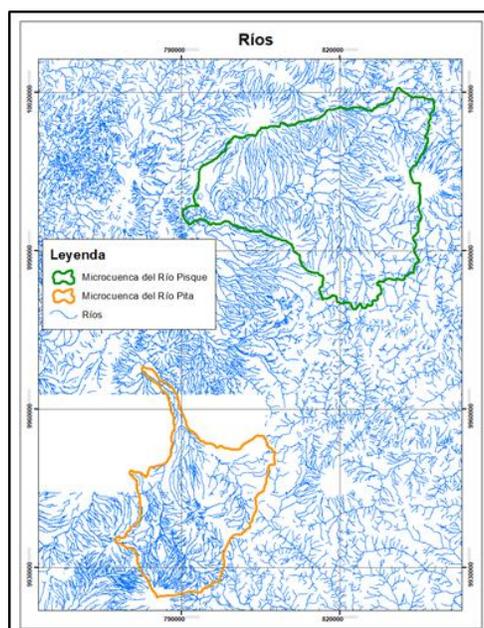


Figura 21. Capa de ríos existentes

Vías. En la Figura 22 se puede apreciar esta capa que fue elaborada en escala 1: 50.000 y fue obtenida en la página del IGM en la sección de libre acceso, contiene el nombre de las vías, temporalidad y orden.

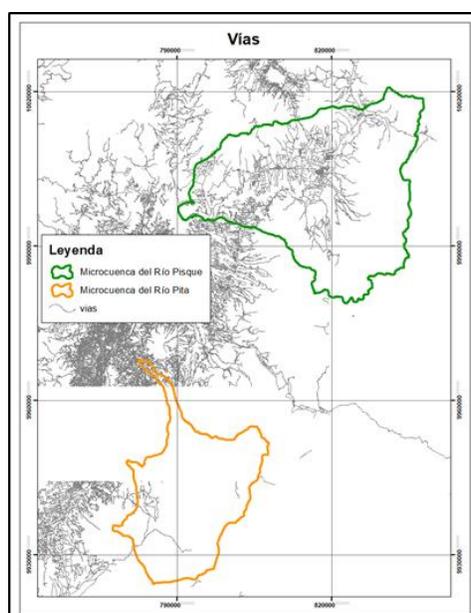


Figura 22. Capa de vías presentes

Áreas Protegidas. “En Ecuador, las áreas protegidas representan aproximadamente el 20% del territorio nacional conservado” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2018), al ser áreas de protección nacional de acuerdo a lo propuesto por (Matteucci, y otros, 2007) tiene una zona de influencia que es de 2km a su alrededor.

La información fue obtenida en el geoportal del MAE (Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador), en la Figura 23 se presenta esta información, la escala de trabajo es 1:60.000. Cabe mencionar que las áreas protegidas comprenden Parques Nacionales, Bosques Protectores, áreas de conservación privadas y áreas de Conservación de gobiernos autónomos descentralizados.

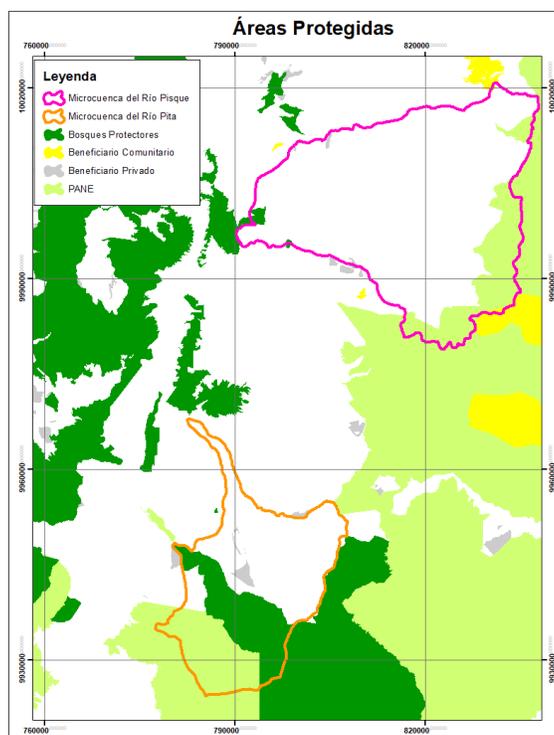


Figura 23. Áreas Protegidas presentes

Centros educativos. Información obtenida en la página de la Secretaria Nacional de Información (SNI), la misma que se presenta en la Figura 24 y está a escala 1:100.000

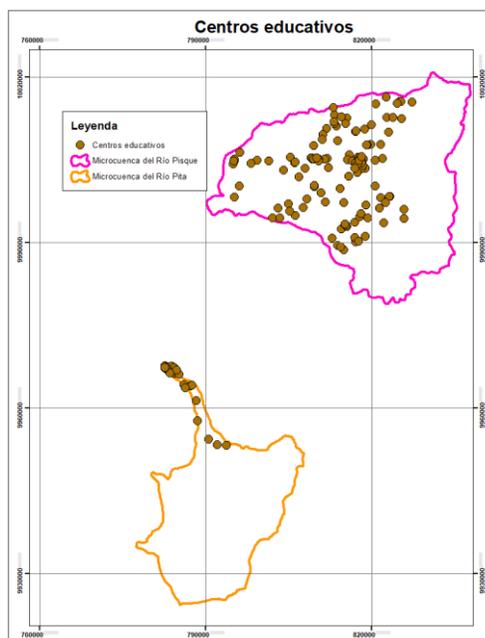


Figura 24. Centros educativos existentes

Concesiones mineras. Información entregada por el FONAG y emitida por Agencia de control y regulación minera, se encuentra en escala 1:50.000 y se presenta en la Figura 25.

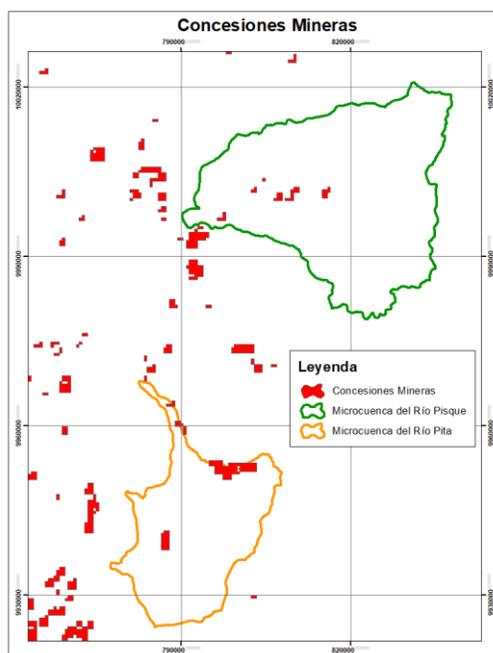


Figura 25. Concesiones Mineras del Ecuador

humanas, pérdidas de sembríos o ganado y destrucción de infraestructura. Las posibles áreas afectadas por las inundaciones se encuentran en la Figura 27.

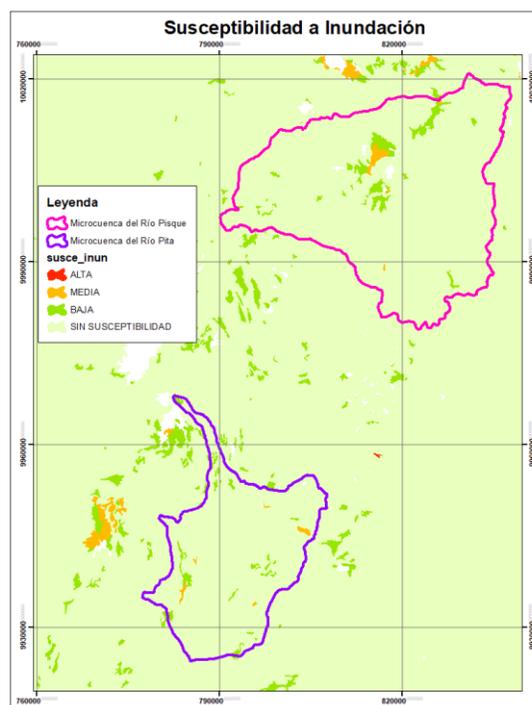


Figura 27. Susceptibilidad a inundaciones

Amenaza a incendios forestales. Los incendios forestales son un gran mal que acecha persistentemente a bosques y páramos, en el Ecuador desde enero del 2018 a octubre del mismo año, según El Comercio (2018) “se han registrado 886 incendios forestales en 20 provincias y la mayoría de incendios son causados por descuidos de los ciudadanos”, los incendios tienen como efecto la reducción de regulación hídrica debido a la pérdida del suelo. En la Figura 28 se presenta esta capa.

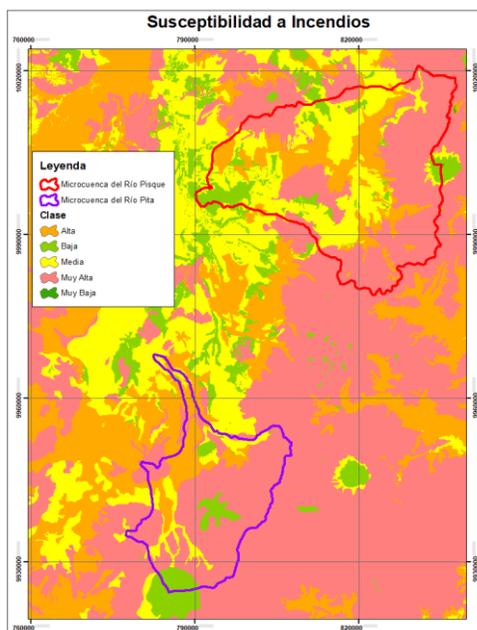


Figura 28. Susceptibilidad a inundaciones

Peligros volcánicos. En la Figura 29 se presenta esta capa, es importante esta información ya que el Ecuador es un país con varios volcanes activos, representando así una gran amenaza.

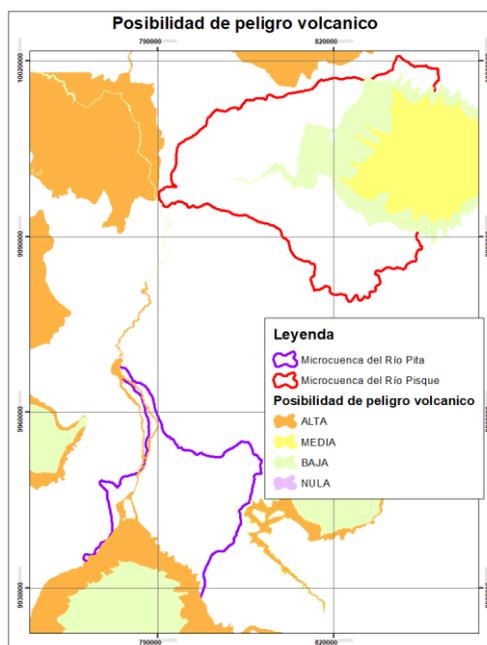


Figura 29. Susceptibilidad a inundaciones

Susceptibilidad a sequía. Esta amenaza está estrechamente relacionada con el agua, siendo uno de los efectos que causa el cambio climático. En la Figura 30 se presenta esta capa.

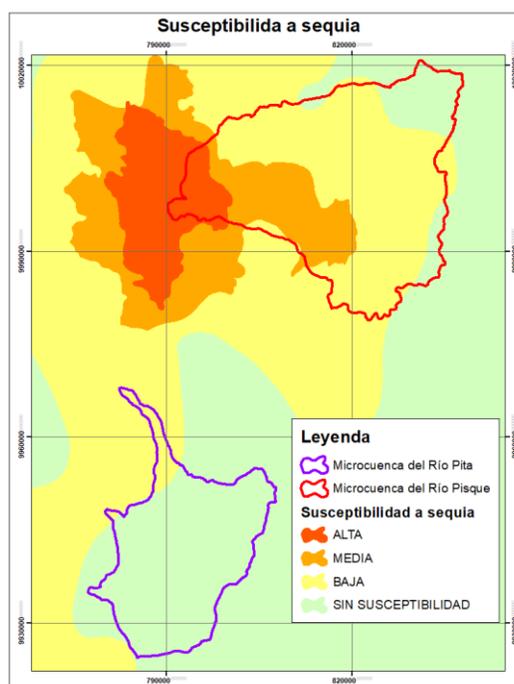


Figura 30. Susceptibilidad a inundaciones

3.3 Análisis de datos

Para el estudio se consideró toda la información disponible a la escala propuesta, y posteriormente se analizó que esta información sea relevante para la identificación de áreas de conservación hídrica, además se consideraron capas que servirían para establecer estrategias de gestión en base a los resultados obtenidos.

3.3.1 Variables para estudio bajo lógica difusa

Se consideraron 9 variables para el análisis bajo la lógica difusa, las mismas que se encuentran en la Tabla 10 y que bajo determinados parámetros son importantes para el recurso hídrico.

Tabla 10.
Variables utilizadas para la conservación del recurso hídrico

Variable	Importancia
Altura	<p>La altura es un factor importante que determina la existencia de cada uno de los ecosistemas, como se ha indicado anteriormente los páramos es uno de los ecosistemas más importantes para la regulación hídrica. De acuerdo con Mediana, Mena y Hofstede (2001) en el Ecuador se utiliza usualmente como límite inferior de los páramos la altitud de 3.500 m pero por condiciones climatológicas, geológicas y antrópicas se puede encontrar a partir de los 2.800 m.</p> <p>Además el artículo 50 de la Ley Orgánica de Tierras rurales y territorios ancestrales (2016) expresa que “No se permitirá el avance de la frontera agrícola en los páramos que se encuentren sobre los 3300 metros de altitud sobre el nivel del mar, al norte del paralelo tres latitud sur, y sobre los 2700 metros de altitud, al sur de dicho paralelo”... Tras la verificación de la ubicación geográfica de las microcuencas estudiadas se determina que estas se apegaran a los 3300 metros.</p>
Autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua.	<p>La Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua (2014) (LORHUyA) en el artículo 86 indica el orden de priorización de los destinos del agua, siendo así el primordial es el consumo humano, seguido de uso para riego que garantice la soberanía alimentaria (comprende abrevadero de animales, acuicultura y actividades de producción agropecuaria domestica), como tercer nivel de importancia está el caudal ecológico y en última instancia las actividades productivas no consideradas en soberanía alimentaria. Para el estudio se tomaron en cuenta las autorizaciones para consumo humano, soberanía alimentaria y se incrementaron las captaciones de la EPMAPS debido a la importancia que tienen estas cuencas para el DMQ.</p>
Canales de agua	<p>En esta capa se consideró los canales de agua para la conducción de agua cruda. Son infraestructuras elaboradas para captaciones de consumo humano. La protección y cuidado de estos es muy importante por lo que se realizara un mapa de distancias referente a los mismos (Matteucci, y otros, 2007).</p>
Cuerpos de agua(lago/laguna)	<p>Los espejos de agua son importantes para la biodiversidad principalmente en las épocas de sequía ya que es aquí donde la fauna se dota de agua. Como se conoce el equilibrio ecosistémico es fundamental para la conservación e cada uno de los recursos por lo que conservar la fauna en determinado ecosistema es indispensable</p>
Degradación	<p>Capa de deforestación sobre los 3400 metros de altura, la deforestación causa pérdida de suelo y está a su vez es una alteración en el ciclo hídrico por lo que es indispensable analizar este factor para el análisis de área a ser reforestadas y mantener una cuenca hidrográfica saludable.</p>
Poblados	<p>Las actividades antrópicas así como la presencia humana afecta significativamente a la naturaleza. Matteucci, y otros (2007) determinaron que el área de influencia de una localidad pequeña (de 100 a 1000 habitantes) es de 3 km, el de una población mediana (1000 a 15 000 habitantes) es de 10 km. Por lo que para el estudio se consideraron todas las poblaciones presentes a un radio de 10 km de la microcuenca.</p>
Ríos	<p>Cobertura que contiene todos los drenajes pertenecientes a las microcuencas el Reglamento a la LORHUyA (2014) en el artículo 64 “la zona de protección hídrica tendrá una extensión de 100 metros de anchura medidos horizontalmente desde el cauce”.</p>
Vías	<p>La densidad de caminos se asocia con la pérdida de biodiversidad, ya sea por el ruido que aleja a las especies, por los atropellamientos a fauna silvestre o por la caza. Además en varias áreas se da la contaminación de agua debido a derrames de combustibles fósiles por accidentes en las vías.</p>

Zonas de recarga hídrica	La recarga hídrica es el proceso en el que el agua se concentra a un acuífero (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009), y los suelos de estos permiten a captación del agua para luego liberarla lentamente a manantiales, ríos o lagunas; motivo por el que LORHUyA (2014) indica que es una de las zonas de mayor importancia por lo que su protección es indispensable.
--------------------------	--

Determinación de zonas de recarga hídrica. Para determinar las zonas de recarga hídrica se utilizó la metodología propuesta por el CATIE en su “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica” (2009). Donde a cada variable biofísica se la evalúa con una ponderación del 1 al 5, siendo 1 el valor menos favorable para zonas de recarga.

Debido a que el estudio trabaja con valores porcentuales y para evitar la subjetividad se establecerá pesos a cada criterio a través de la siguiente fórmula

$$w_i = \frac{N - O_i + 1}{\sum(N - O_i + 1)} \quad (16)$$

Donde. w_i es el peso del criterio

N es el número de criterios

O_i es la importancia asignada al criterio

Para cumplir con esta metodología se aplica valores de importancia a cada criterio, es así que los valores de 5 propuestos por el CATIE tendrán una importancia de 1 y los de 1 tendrán la menor importancia que será 5. En la Tabla 11 se encuentran los pesos asignados a cada criterio lo mismo que se utilizaran en la metodología a ser aplicada.

Tabla 11.*Pesos asignados a criterios del CATIE*

Posibilidad de recarga	O _i	N	N-O _i +1	w _i
Muy baja	5	5	1	0,07
Baja	4	5	2	0,13
Moderada	3	5	3	0,20
Alta	2	5	4	0,27
Muy alta	1	5	5	0,33

$$\Sigma 15$$

Pendiente y microrelieve. La pendiente está relacionada con la esorrentía superficial por lo que los lugares con altas pendientes tienen menor probabilidad de recargar agua, mientras que en las pendientes más bajas el agua tiene por mayor tiempo contacto con la superficie por lo que la infiltración será mayor.

El microrelieve indica si la superficie es plana, cóncava o convexa y esto también dará a entender el comportamiento del agua según el relieve de la superficie, a partir de la capa de curvas de nivel se creó un mapa de pendientes en ArcGis y se reclasificó los valores de acuerdo a la Tabla 12, que son rangos establecidos por el CATIE bajo la metodología aplicada. Los mapas resultantes de las microcuencas de los ríos Pita y Pisque, se encuentran en la Figura 31.

Tabla 12.*Ponderación pendiente y microrelieve*

Microrelieve	Pendiente (%)	Ponderación
Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0 - 6	0.33
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 - 15	0.27
Ondulado/cóncavo	15 - 45	0.20
Escarpado	45 - 65	0.13
Fuertemente escarpado	> 65	0.07

Fuente. Modificado de (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009)

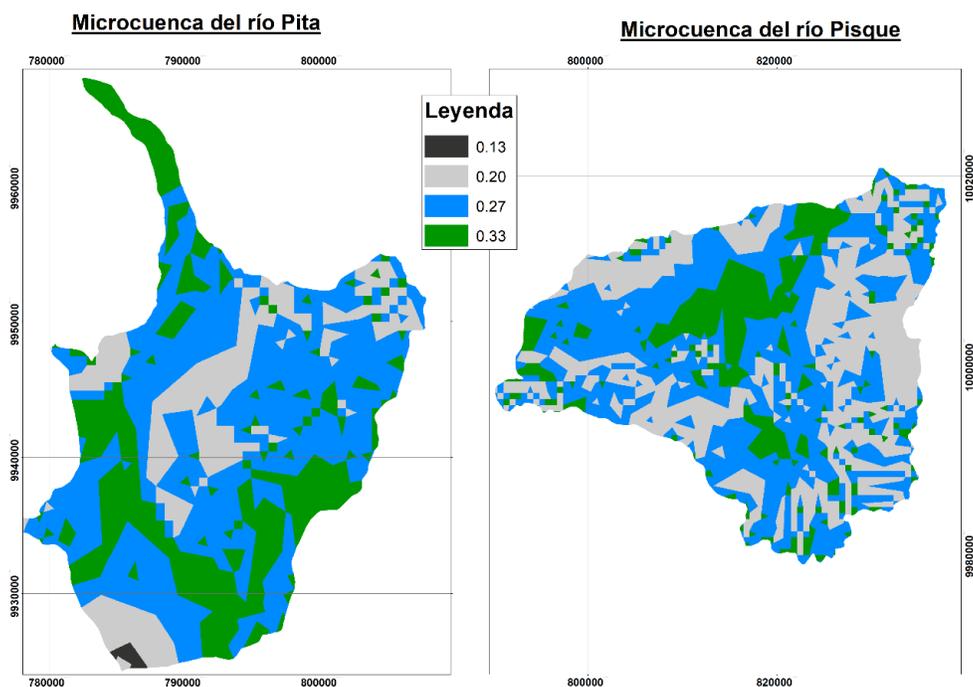


Figura 31. Pendiente en microcuencas según clasificación del CATIE

Tipo de suelo. En la Tabla 13 se presenta la relación que tiene el tipo de suelo con respecto a la posibilidad de recarga, recordando que las zonas de recarga hídrica deben ser permeables y esto depende de la porosidad, textura y estructura del suelo, se tomó el mapa geopedológico elaborado por el proyecto Sig Tierras y el IEE y se reclasificó de acuerdo a la metodología planteada, en la Figura 32 se muestra el tipo de suelo de cada microcuena.

Tabla 13.

Ponderación textura del suelo

Textura	Ponderación
Suelos franco arenosos a arenosos	0.33
Suelos francos	0.27
Suelos franco limosos	0.20
Suelos franco arcillosos	0.13
Suelos arcillosos,	0.07

Fuente. Modificado de (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009)

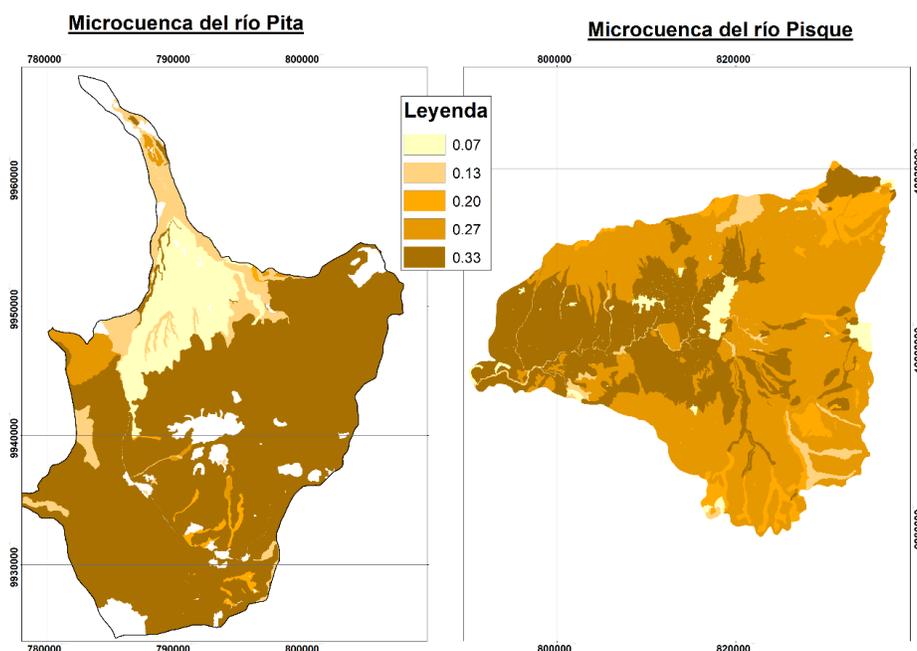


Figura 32. Textura de suelo en microcuencas

Tipo de roca. De esta variable depende la recarga subsuperficial, las características de las rocas que determinan la capacidad de recarga son la porosidad y permeabilidad. En la Tabla 14 se muestra la ponderación propuesta por el CATIE, por lo que se tomó la cobertura geológica y se reclasifico según lo propuesto, esta clasificación se encuentra en la Figura 33.

Tabla 14.

Ponderación por textura de roca

Rocas	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	0.33
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación.	0.27
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	0.20
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas.	0.13
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	0.07

Fuente. Modificado de (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009)

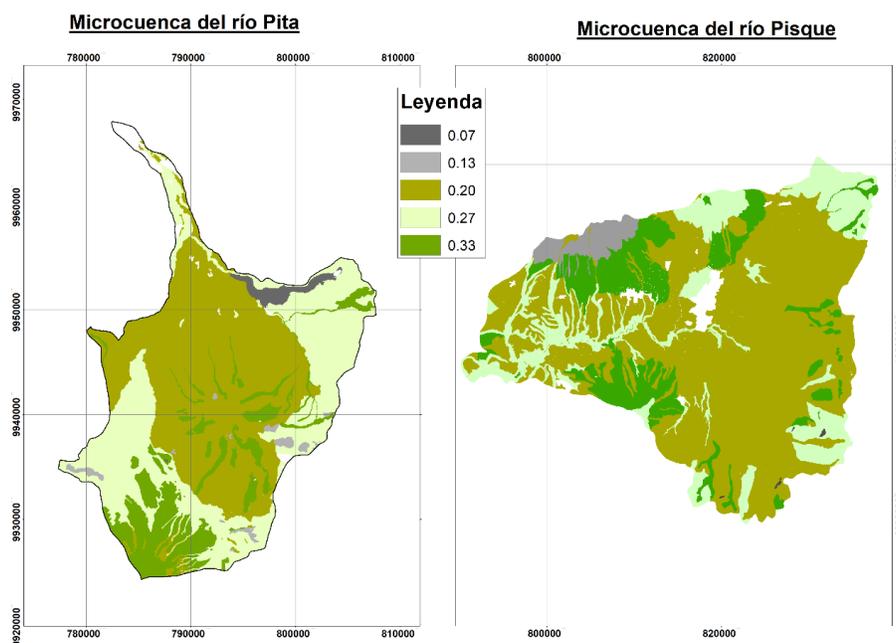


Figura 33. Tipo de roca en microcuencas

Cobertura vegetal. Se analiza la cobertura vegetal permanente ya que esta disminuye “la velocidad de la escorrentía, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la resequedad causada por los rayos del sol” (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009).

En la Tabla 15 se presenta la reclasificación de la cobertura vegetal en base a la propuesta por el CATIE, y en la Figura 34 se presenta los mapas resultantes de esta reclasificación en las dos zonas de estudio.

Tabla 15.

Ponderación de cobertura vegetal

Cobertura vegetal	Ponderación
Ecosistemas frágiles	0.33
Pastizales de páramo	0.27
Bosques plantados para la conservación	0.20
Pastizales y cultivos perennes	0.13
Cultivos de ciclo corto y zonas con infraestructura	0.07

Fuente. Modificado de (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009)

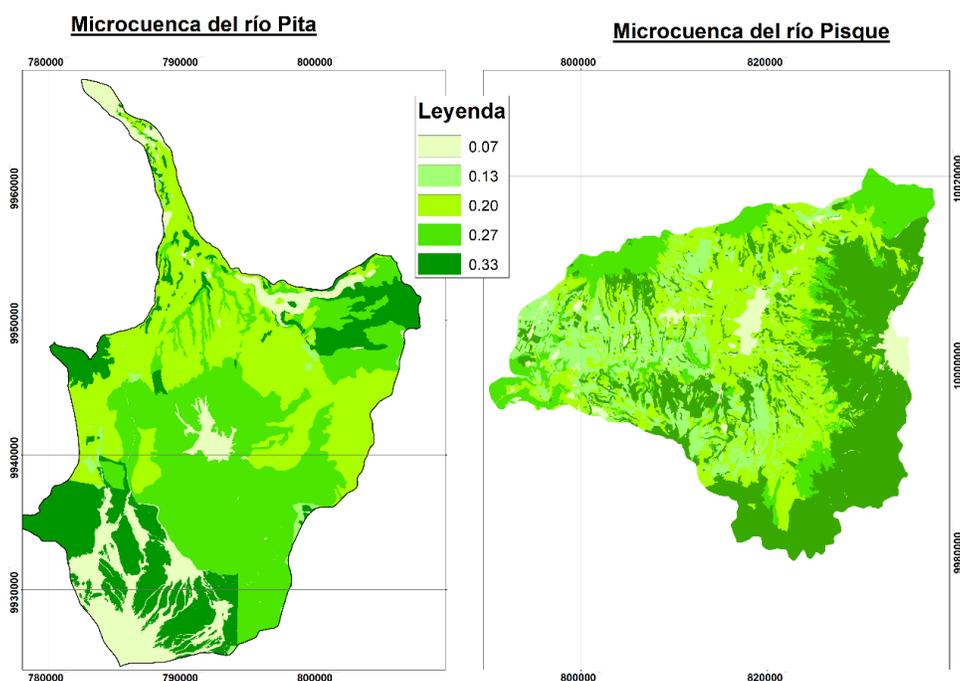


Figura 34. Clasificación de la cobertura vegetal en zonas de estudio

Usos de suelo. El uso inadecuado del suelo puede provocar la reducción de la recarga hídrica hasta un 50%, y un suelo desgasto aumenta los riesgos naturales (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009). De acuerdo al uso que se da el suelo existe mayor posibilidad de recarga hídrica, en la Tabla 16 se presentan los valores establecidos de acuerdo a las características de las coberturas y en relación a los valores propuestos por el CATIE. En la Figura 35 se presenta la aplicación de esta ponderación en las microcuencas en estudio.

Tabla 16.
Posibilidad de recarga por el uso del suelo

Uso de suelo	Ponderación
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	0.33
Bosque siempreverde del Páramo	
Herbazal de Páramo	
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	
Herbazal inundable del Páramo	
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	

CONTINÚA 

Nieve-hielo	
Arenales	
<hr/>	
Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes	
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	0.27
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Oriental de los Andes	
Bosque siempreverde montano del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes	
Áreas erosionadas	
Áreas quemadas	
<hr/>	
Bosque plantado naturalizado	0.20
Bosque plantado para conservación	
Bosque y Arbustal semidecídulo del norte de los Valles	
<hr/>	
Flujos de lava	0.13
Lahar	
<hr/>	
Pasto	
Cultivos de ciclo corto	
Cultivos	0.07
Bosque plantado para producción	
Zona poblada	
<hr/>	

Fuente. Modificado de (Matus, Faustino, & Jimenez, 2009)

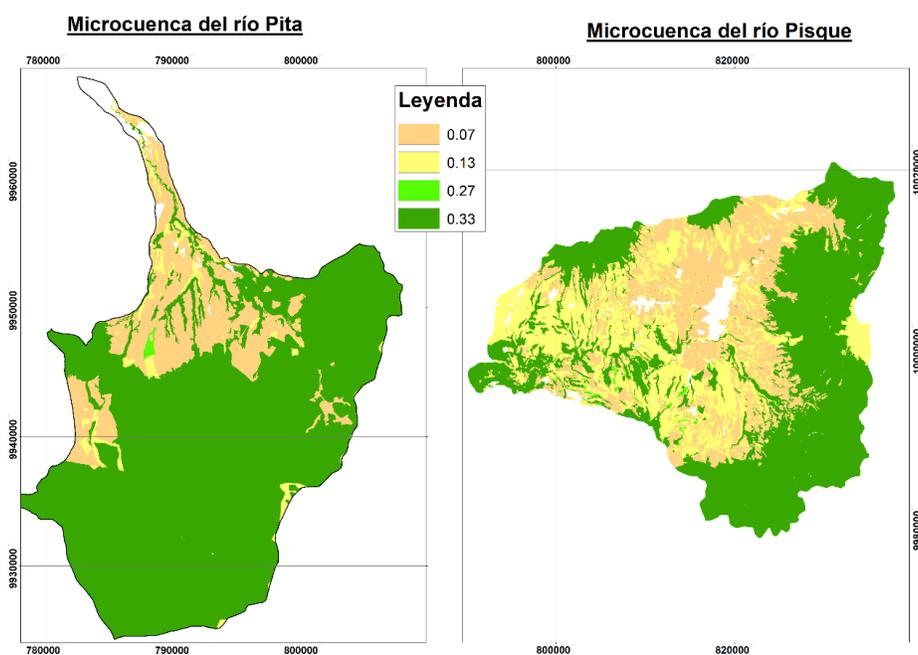


Figura 35. Ponderación de uso de suelo en zonas de estudio

Finalmente la ecuación propuesta para el CATIE para determinar el potencial de recarga es la siguiente:

$$ZR = [0.27(\text{Pendiente}) + 0.23(\text{Tipo de suelo}) + 0.12(\text{Tipo de roca}) + 0.25(\text{Cobertura vegetal}) + 0.13 (\text{Uso de suelo})]$$

(17) Matus, Faustino, & Jimenez (2009)

El resultado obtenido de la recarga hídrica en cada una de las microcuencas se presenta en la Figura 36.

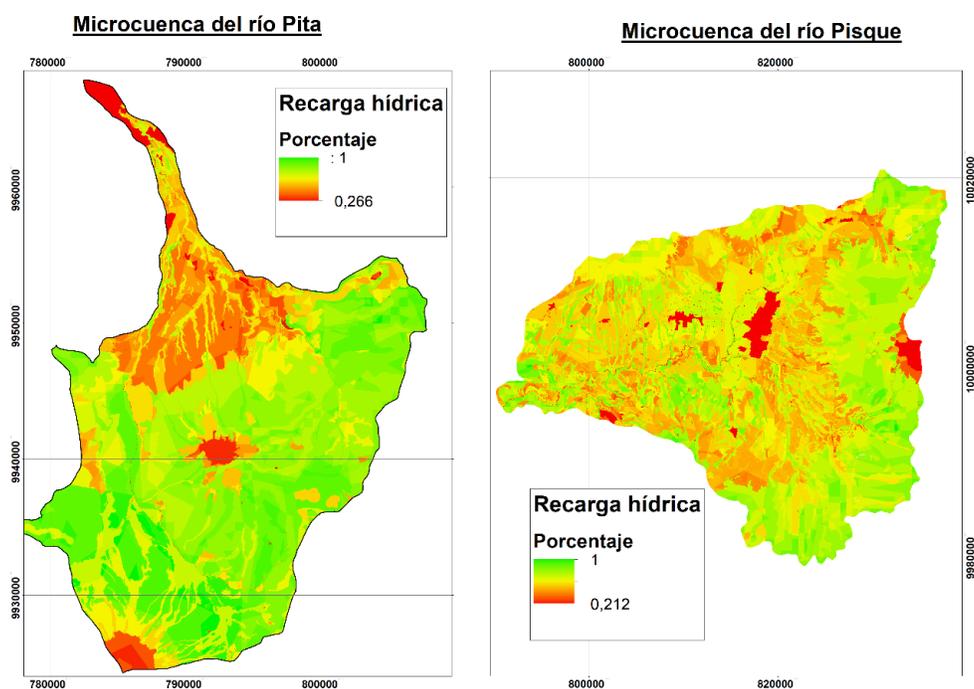


Figura 36. Zonas de recarga en cada Microcuenca

3.4 Rasterización

Todas las variables a ser utilizadas fueron rasterizadas por medio de mapas de distancias, para este proceso se utilizó la herramienta Polygon to Raster del ArcToolbox del ArcGis. En consideración a la escala del modelamiento se estableció un tamaño de celda de 16 metros, el cual está dentro de los parámetros establecidos para capas a 1:50.000.

3.5 Análisis de variables de acuerdo a Lógica difusa

A continuación se establecerá a que caso de la lógica difusa propuesto en este estudio corresponde cada variable analizada.

Altura. De acuerdo al artículo 50 de la Ley Orgánica de Tierras rurales y territorios ancestrales (2016) frontera agrícola no puede pasar los 3300 metros de altura, por lo que mientras más cerca este una zona a la altura establecida tendrá mayor probabilidad de ser conservada. Concordando así con el caso 3 de la lógica difusa.

Autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua. Las fuentes de agua son de vital importancia para el hombre ya que realiza todas sus actividades entorno a la misma por lo que la protección de estos puntos es de alta importancia definiendo así que a esta variable se apega el caso 3 de la lógica difusa.

Canales de agua. Al ser importante estas infraestructuras ya que aquí está el agua que se capta para el consumo humano, se tiene la misma consideración de protección que los ríos, por lo que se aplicara el caso 3 de la lógica difusa.

Cuerpos de agua. Cuenta con la misma importancia de ríos y canales de agua por lo que se aplicó el caso 3 de la lógica difusa, ya que a mayor lejanía de esta variable existe menos interés de conservación del recurso hídrico.

Deforestación. Zonas degradadas sobre los 3400 metros de altura, debido a su altura deben ser restauradas de manera inmediata por lo que mientras más cerca este una zona a esta variable mayor importancia tiene de ser conservada e intervenida, perteneciendo así al caso 3 de la lógica difusa.

Poblaciones. Para analizar esta variable bajo la lógica difusa se generó un mapa de distancias donde se aplicó el caso 2 de la metodología propuesta donde indica que mientras más lejos este un área de esta variable mayor probabilidad tendrá de mantenerse conservada.

Ríos. La ley ecuatoriana protege las riberas de todos los ríos, mínimo a 100 m de distancia por lo que mientras más cerca de los ríos esté una zona tendrá mayor probabilidad de ser conservada, es así que se aplica el caso 3 de la lógica difusa.

Vías. Esta variable se apega al caso 2 de la lógica difusa ya que la aptitud para la conservación incrementa con la distancia de los caminos (Matteucci, y otros, 2007). Se elabora un mapa de distancias y posterior se aplicó la función correspondiente a este caso.

Zonas de recarga hídrica. Debido a las características de estas zonas es importante determinar que toda área cercana este en conservación asegurando así el ciclo hídrico, debido que se encuentran valores continuos desde el 1 al 5 se realizó la normalización de esta variable obteniendo así valores finales entre el 0 al 1 y apegándose al formato de las otras variables facilitando así las operaciones posteriores.

3.6 Desarrollo del algoritmo de lógica difusa en el SIG

Para continuar con el análisis bajo la lógica difusa, se necesita que las variables rasterizadas tengan un rango de [0,1], motivo por el cual se normaliza a las variables aplicando la siguiente fórmula en la herramienta Raster Calculator del Spatial Analyst.

$$N = \frac{V_o - V_m}{v_m - V_m} \quad (18)$$

Donde: N es normalización

V_o es la variable original

V_m es el valor mínimo

VM es el valor máximo

Posterior a la normalización se pasan los datos a radianes, considerando en los casos 2 y 3 de la lógica difusa el rango de las funciones es de 0 a $\frac{\pi}{2}$, por lo que la fórmula es

$$R = N \times 1.5707963268 \quad (19)$$

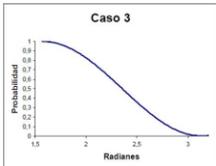
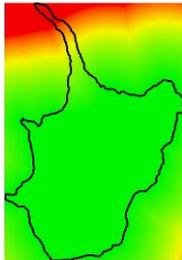
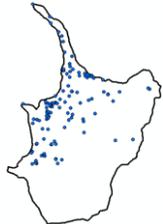
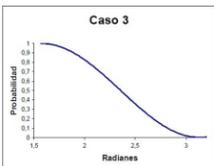
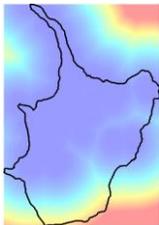
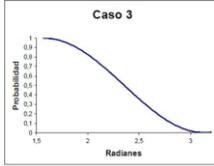
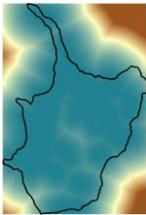
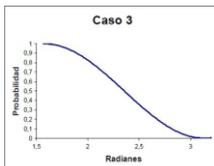
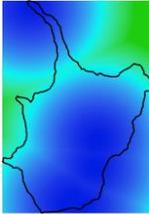
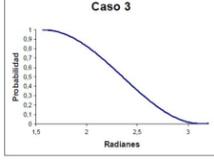
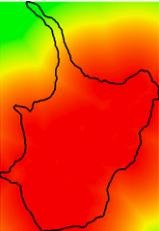
Donde R representa los radianes y N el raster normalizado. Finalmente se procede a la extracción de las probabilidades de cada caso con la aplicación de la fórmula 21 si corresponde a al caso 2 y la ecuación 22 si corresponde al caso 3.

$$P = \text{sen}(R) \quad (20)$$

$$P = \text{cos}(R) \quad (21)$$

En la Tabla 17 se presenta un resumen del procedimiento seguido para la generación del modelo en la microcuenca del río Pita y en la Tabla 18 en la microcuenca del río Pisque

Tabla 17.
Resumen de microcuenca del río Pita

Variable	Capa de variable	Caso de lógica Difusa	Raster bajo lógica difusa
Altura		 <p>Función coseno</p>	
Base nacional de autorizaciones de agua		 <p>Función coseno</p>	
Canales de agua		 <p>Función coseno</p>	
Cuerpos de agua (lago/laguna)		 <p>Función coseno</p>	
Degradación		 <p>Función coseno</p>	

CONTINÚA 

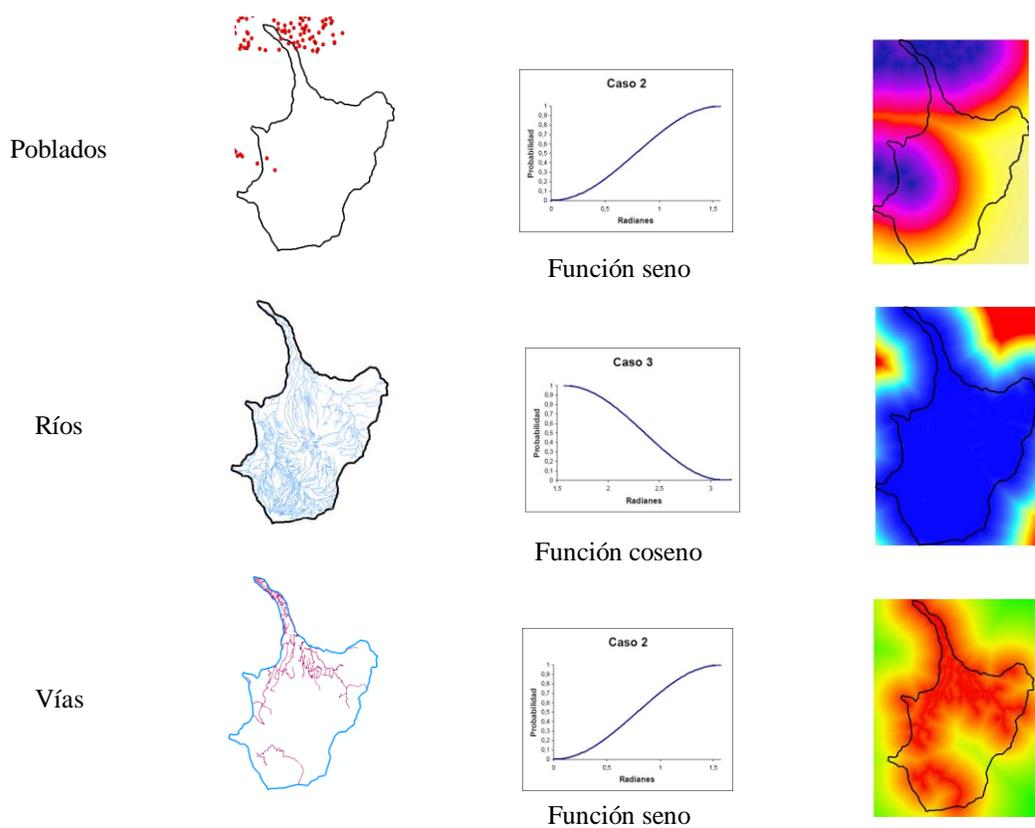
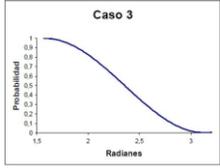
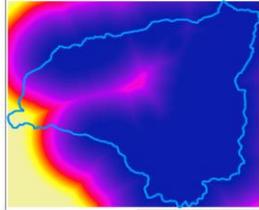
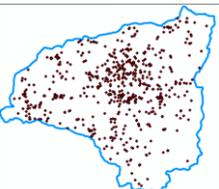
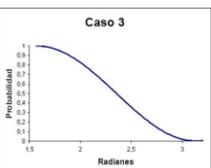
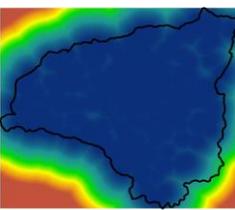
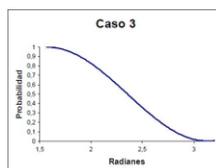


Tabla 18.
Resumen de modelamiento para microcuenca del río Pisque

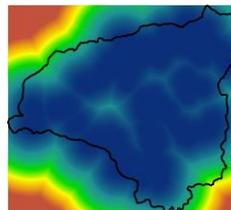
Variable	Capa de variable	Caso de lógica Difusa	Raster bajo lógica difusa
Altura			
		Función coseno	
Base nacional de autorizaciones de agua (bna)			
		Función coseno	

CONTINÚA →

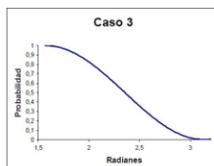
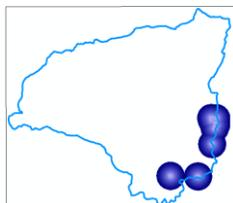
Canales de agua



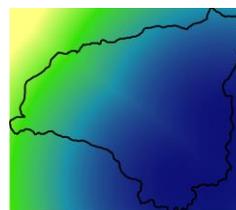
Función coseno



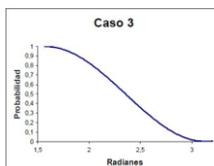
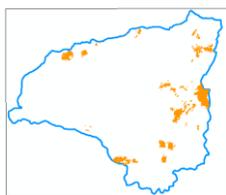
Cuerpos de agua(lago/laguna)



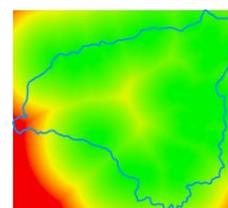
Función coseno



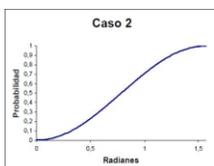
Degradación



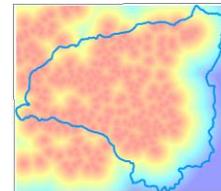
Función coseno



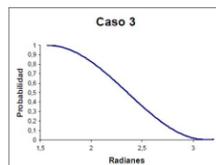
Poblados



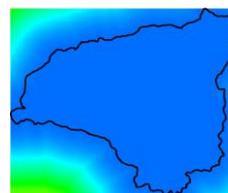
Función seno



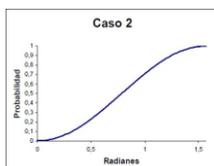
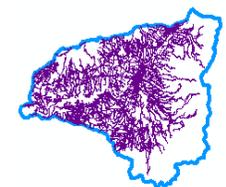
Ríos



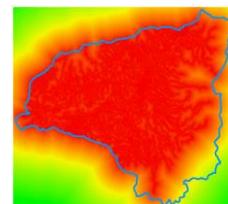
Función coseno



Vías



Función seno



3.6.1 Generación de modelo

Se generaran dos modelos basado en lógica difusa, el primero corresponde al promedio de todas las variables y el segundo corresponde a la ponderación de cada variable bajo el método Saaty.

3.6.1.1 Modelo 1

Al obtener el promedio de todas las variables, indirectamente se está entregando a cada variable la misma ponderación, al tratarse de 9 variables cada variable tendrá aproximadamente el 11.11% de importancia.

Para generar el modelo promedio se suma todas las variables y se divide para el total, teniendo así la probabilidad total, la ecuación 23 es la expresión final.

$$M = ("rios" + "cuerpos_agua" + "degradacion" + "canales" + "bna" + "vias" + "recarga_hidrica" + "poblacion" + "altura")/9 \quad (22)$$

Donde M es el modelo del promedio de probabilidades, este modelo aplicado a las dos microcuencas se presenta en las Figuras 37 y Figura 38.

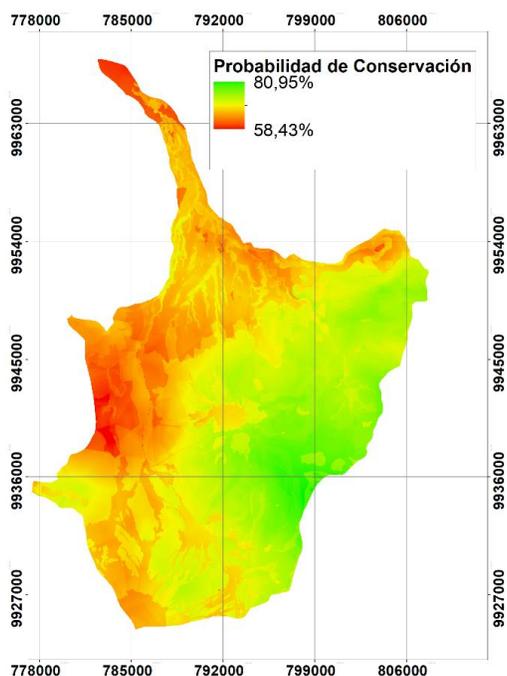


Figura 37. Modelo 1 Microcuenca del río Pita

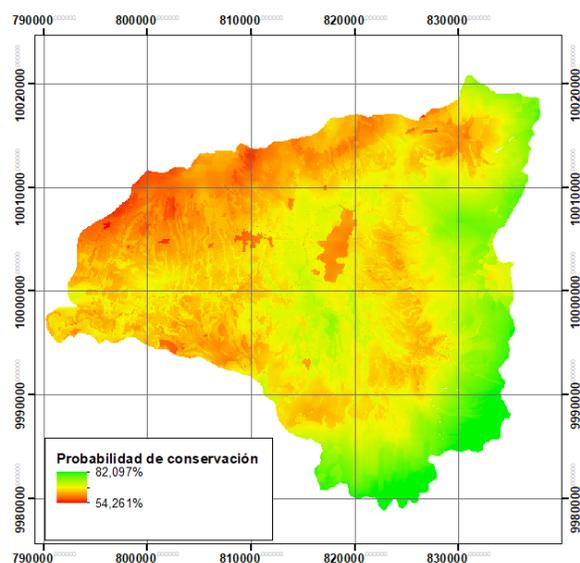


Figura 38. Modelo 1 Microcuenca del río Pisque

3.6.1.2 Modelo 2

Para generar este modelo se utilizó la matriz de Saaty, donde inicialmente se dio un valor entre el 1 al 10 a cada variable, los mismo que se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19.
Peso establecido a variables

Variable	Valor
Altura	6
Base Nacional de Autorizaciones de agua	8
Canales de agua	7
Cuerpos de agua(lago/laguna)	10
Degradación	5
Poblados	4
Ríos	10
Vías	4
Zonas de recarga hídrica	9

Posteriormente se aplicó la metodología Saaty obteniendo una consistencia de 0, corroborando así que existe coherencia entre las ponderaciones obtenidas, las mismas que se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20.
Ponderación de variables en concordancia a metodología Saaty

Variable	Ponderación
Altura	0,10
Base Nacional de Autorizaciones de agua	0,13
Canales de agua	0,11
Cuerpos de agua(lago/laguna)	0,16
Degradación	0,08
Poblados	0,06
Ríos	0,16
Vías	0,06
Zonas de recarga hídrica	0,14

Tras definir los valores se obtiene la expresión 22 que fue ingresada a la herramienta “Raster calculator” del ArcToolbox del ArcGis. En las Figuras 39 y 40 se presentan los modelos obtenidos bajo la siguiente ecuación.

$$M = 0,10 * "altura" + 0,13 * "bna" + 0,11 * "canales" + 0,16 * "cueropos_agua" + 0,14 * "recarga_hidrica" + 0,16 * "rios" + 0,08 * "degradación" + 0,06 * "poblacion" + 0,06 * "vias" \quad (23)$$

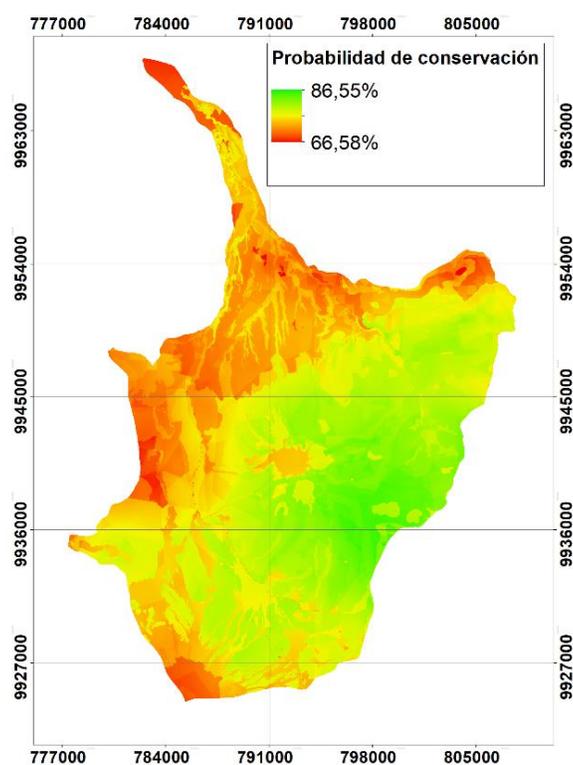


Figura 39. Modelo Saaty microcuenca del río Pita

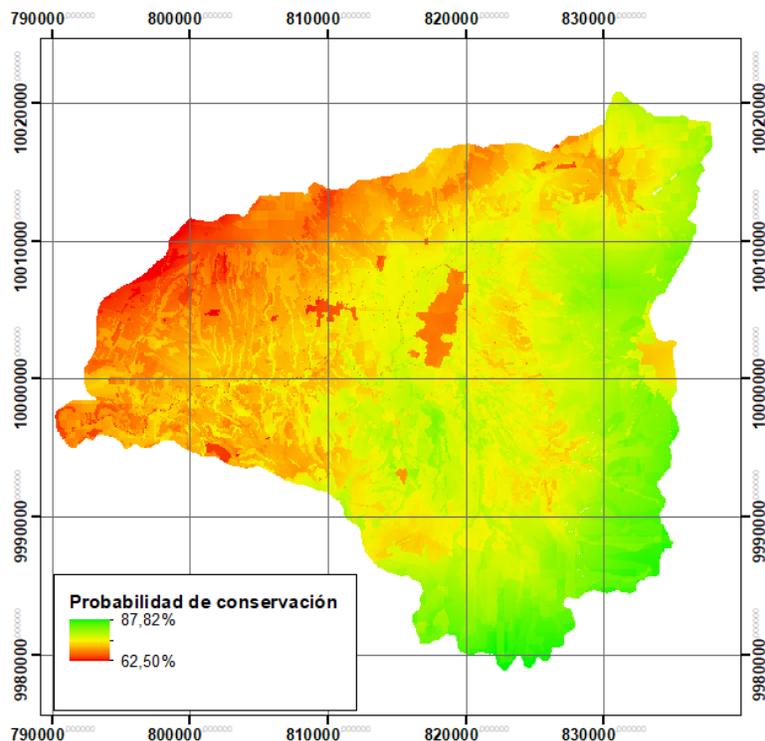


Figura 40. Modelo Saaty microcuenca del río Pisque

3.6.2 Modelos Cartográficos

En los modelos cartográficos se encuentra de manera sistematizada el proceso para el modelamiento de variables bajo lógica difusa, con este modelamiento se generaran mapas de probabilidades de conservación e importancia para el recurso hídrico. Además en dichos modelos cartográficos se puede visibilizar el desarrollo para la elaboración del mapa de pendientes, como las clasificaciones necesarias para la obtención de la recarga hídrica en cada una de las microcuencas.

Todo el proceso realizado en el SIG se puede plasmar en los modelos cartográficos que se presentan en las Figuras 41 y 42.

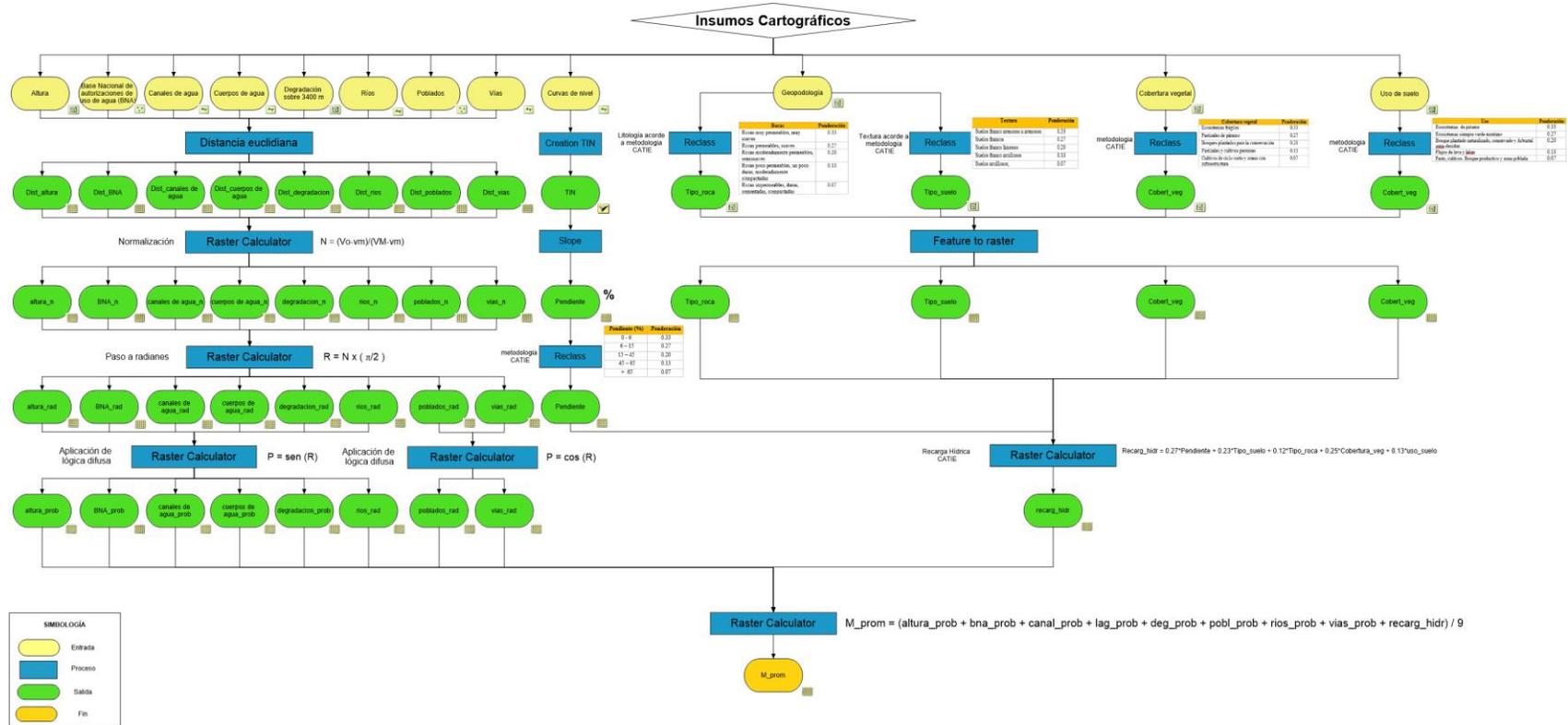


Figura 41. Modelo cartográfico del modelamiento por promedio de variables

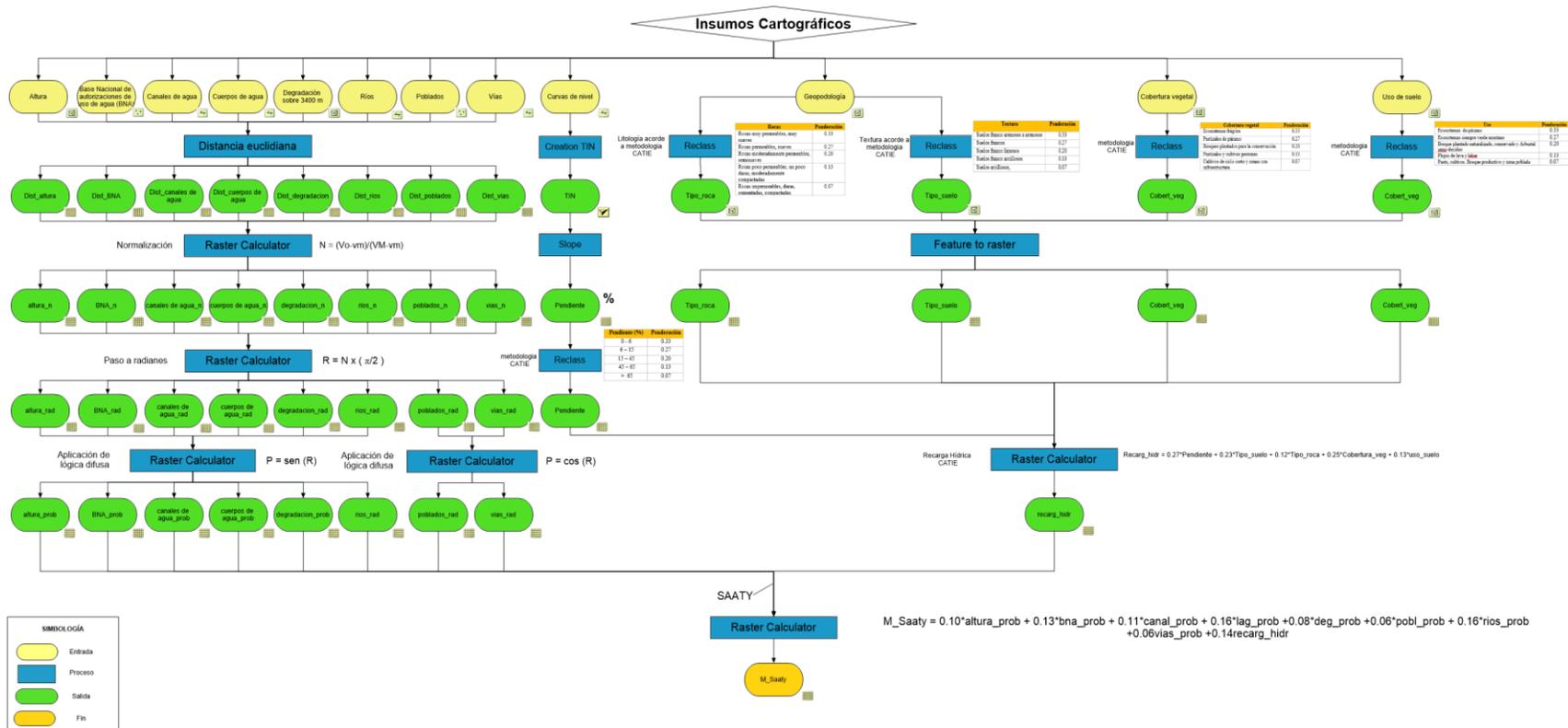


Figura 42. Modelo cartográfico del modelamiento por ponderación con Saaty

3.7 Análisis de modelos generados

Para el análisis de los modelos generados y el cumplimiento de los objetivos propuestos en este estudio se prosiguió con la delimitación de áreas de intervención en relación al tiempo de ejecución, para lo cual se clasificó el rango obtenido en intervalos, donde el primero cuenta con el 40% de las probabilidades y los otros con el 20% cada uno

En la Figura 43 se puede observar los modelos obtenidos para la microcuenca del río Pita, y en la Tabla 21 se presenta la información obtenida tras la clasificación de los modelos.

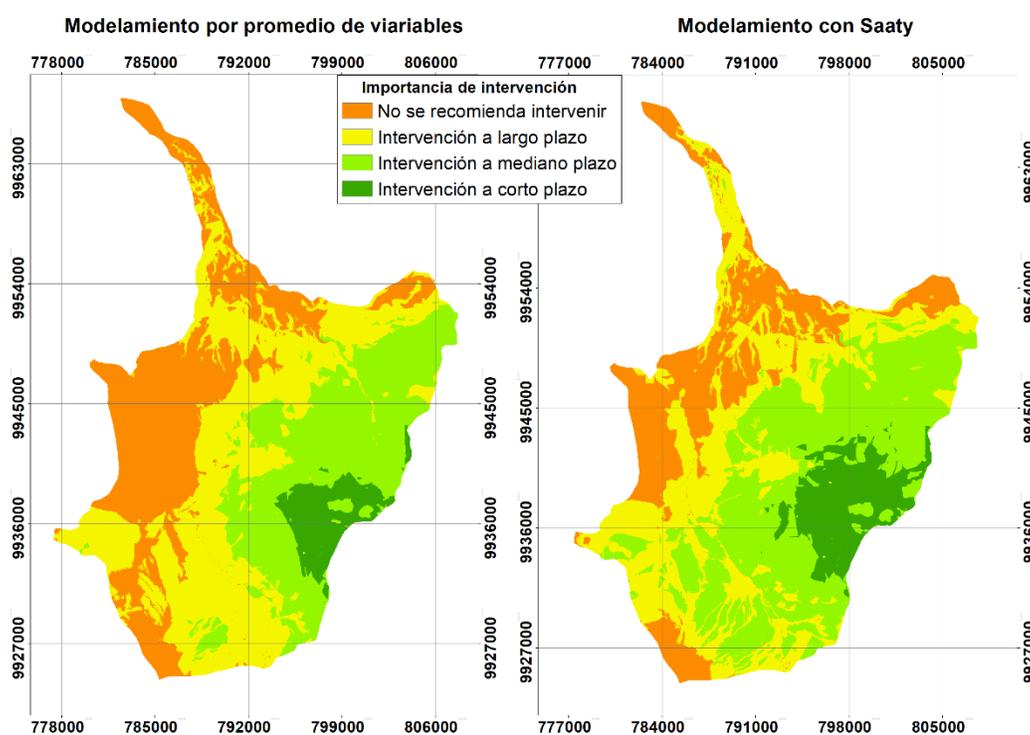


Figura 43. Modelos del río Pita

Tabla 21.*Resultados de la Microcuenca del río Pita*

Tiempo de intervención	Simbología	Modelo 1. Promedio de variables		Modelo 2. Ponderación por Saaty	
		Intervalos (probabilidades)	Extensión (km ²)	Intervalos (probabilidades)	Extensión (km ²)
No se recomienda intervención		0,584276 - 0,674379	170,41	0,66585 - 0,745720	122,98
Largo plazo		0,674379 - 0,719430	224,64	0,745720 - 0,785654	189,81
Mediano plazo		0,719430 - 0,764481	164,33	0,785654 - 0,825589	223,12
Corto plazo		0,764481 - 0,809533	32,99	0,825589 - 0,865523	56,46

Las áreas de intervención generadas para la microcuenca del río Pisque se representan en la Figura 44 y en la Tabla 22.

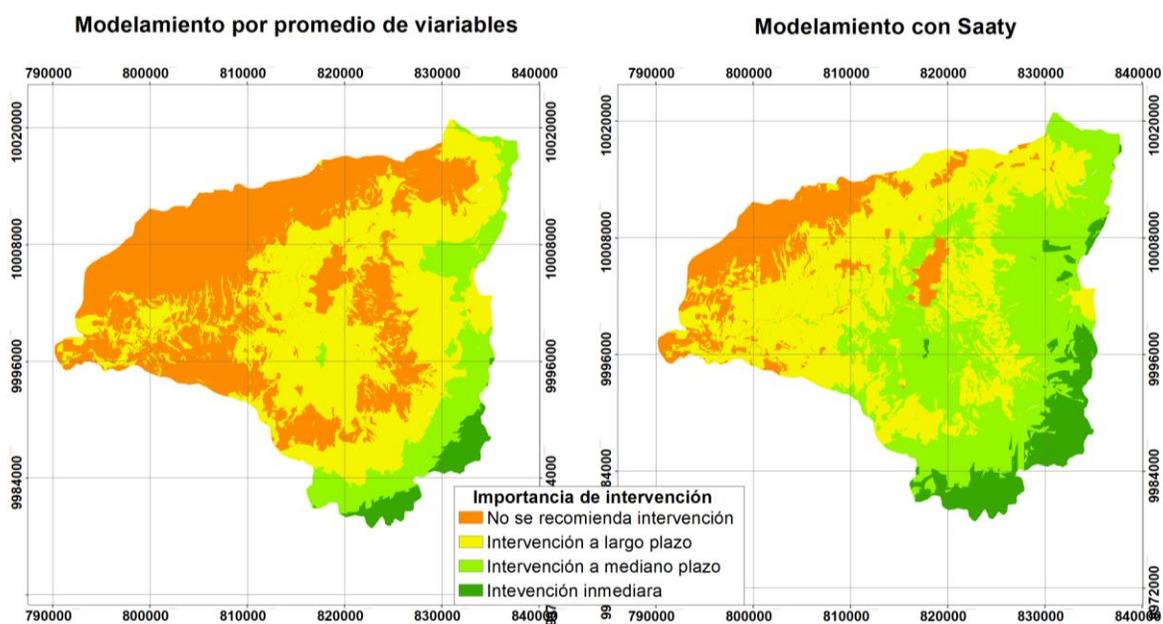
**Figura 44.** Resultados microcuenca del río Pisque

Tabla 22.
Resultados de la microcuenca del río Pisque

Tiempo de intervención	Simbología	Modelo 1. Promedio de variables		Modelo 2. Ponderación por Saaty	
		Intervalos	Extensión (km ²)	Intervalos	Extensión (km ²)
No se recomienda intervención		0,542610 - 0,653953	487,29	0,624954 - 0,726263	152,86
Largo plazo		0,653953 - 0,709624	483,40	0,726263 - 0,776917	464,22
Mediano plazo		0,709624 - 0,765296	129,94	0,776917 - 0,827572	419,72
Corto plazo		0,765296 - 0,820967	34,80	0,827572 - 0,878226	98,62

3.8 Lineamientos para la gestión de las microcuencas

A continuación se realizará el cruce de los modelos con diferentes capas, que ayudaran a la gestión y manejo adecuado de las microcuencas. El color que este dentro del polígono de cada variable independiente cruzada, determinará el tiempo sugerido para la intervención (Ver Tablas 21 y 22).

3.8.1 Microcuenca del río Pita

3.8.1.1 Áreas protegidas

Con la finalidad de comprender como se encuentra el estado de conservación del medio ambiente en esta microcuenca, se decidió cruzar los modelos con el shape de áreas protegidas existentes, en la Figura 45 se presenta el resultado.

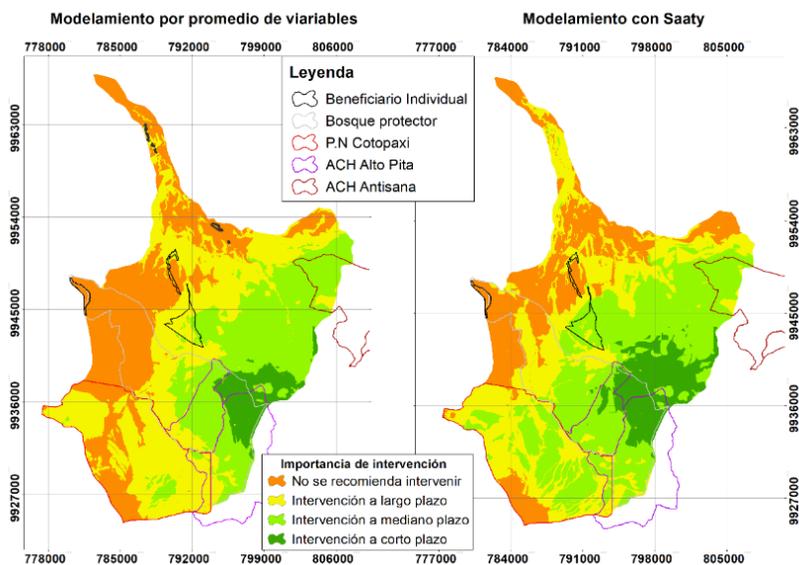


Figura 45. Áreas protegidas en la microcuenca del río Pita

3.8.1.2 Concesiones mineras

De acuerdo a lo establecido en el marco teórico, la minería es una de las presiones más fuertes que tiene el páramo y por ende el recurso hídrico. En la Figura 46, se muestra las concesiones mineras y canteras existentes en la microcuenca del Río Pita.

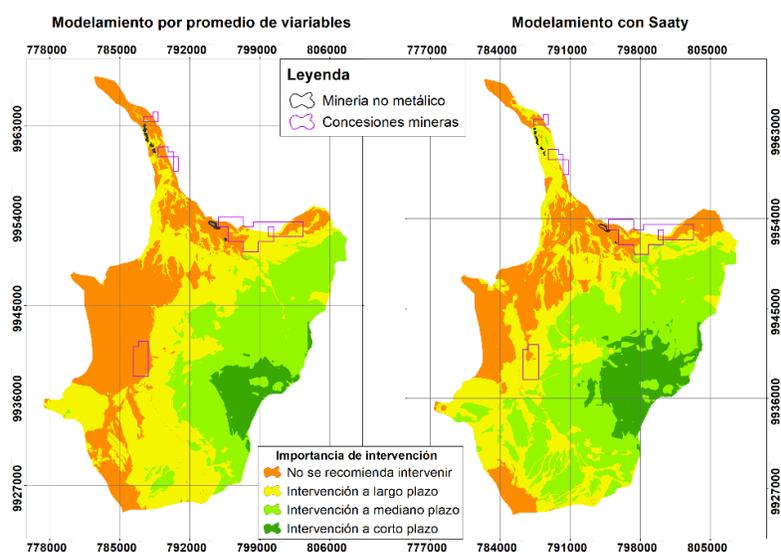


Figura 46. Concesiones mineras en la microcuenca del río Pita

3.8.1.3 Cultivos y bosques plantados para la producción

La producción agrícola es otra de las grandes presiones que se encuentra en esta microcuenca, es importante visualizar las áreas destinadas a esta actividad con los modelos generados. En la Figura 47 se presenta la afectación de la agricultura en las áreas de importancia de conservación para el recurso hídrico.

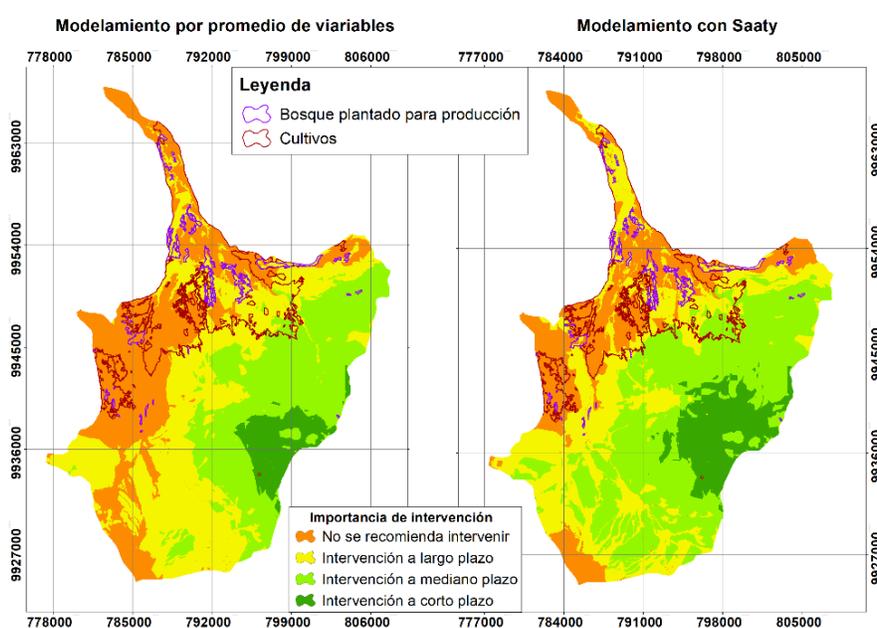


Figura 47. Zona agrícola de la microcuenca del río Pita

3.8.1.4 Suelos con uso pecuario bovino

La ganadería es la segunda actividad productiva en esta microcuenca, esta a su vez trae grandes afectaciones al páramo, en la Figura 48 se presenta el cruce de los modelos generados con los suelos destinados a esta actividad productiva.

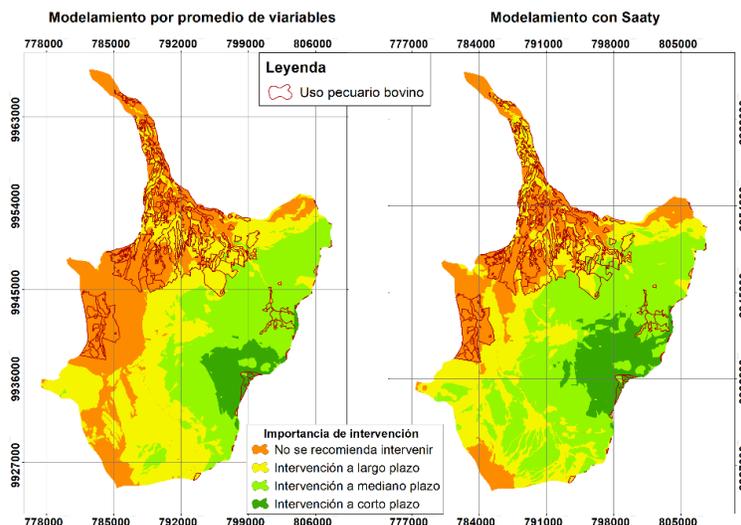


Figura 48. Zonas con uso ganadero en la microcuenca del río Pita.

3.8.1.5 Centros poblados

Los centros poblados abarcan áreas de influencia muy amplias, por lo que es indispensable conocer si se encuentran en zonas de interés hídrico y de esta manera poder encaminar las acciones necesarias para la protección del agua. En la Figura 49 se presentan los centros poblados existentes en la microcuenca del río Pita.

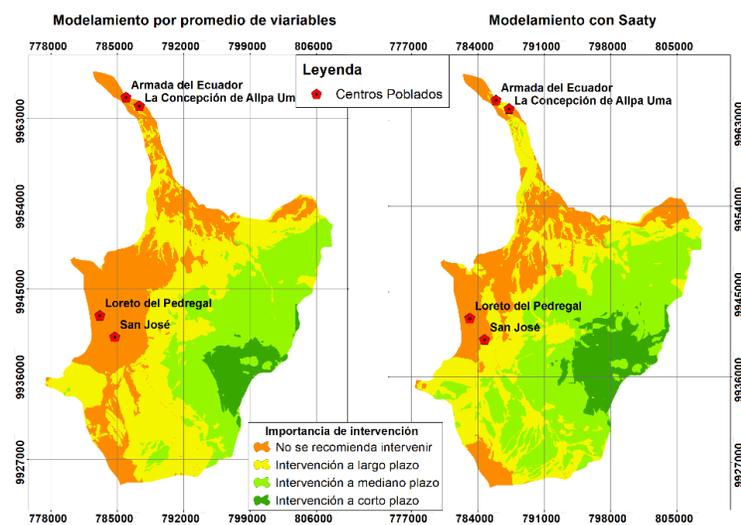


Figura 49. Centros poblados de la microcuenca del río Pita

3.8.1.6 Áreas degradadas sobre los 3400m

Como se mencionó anteriormente, estas áreas son de suma importancia debido a que están localizada sobre la franja de ecosistemas frágiles. Es fundamental conocer y definir la ubicación de estas áreas (Figura 50) para poder ejecutar actividades de restauración.

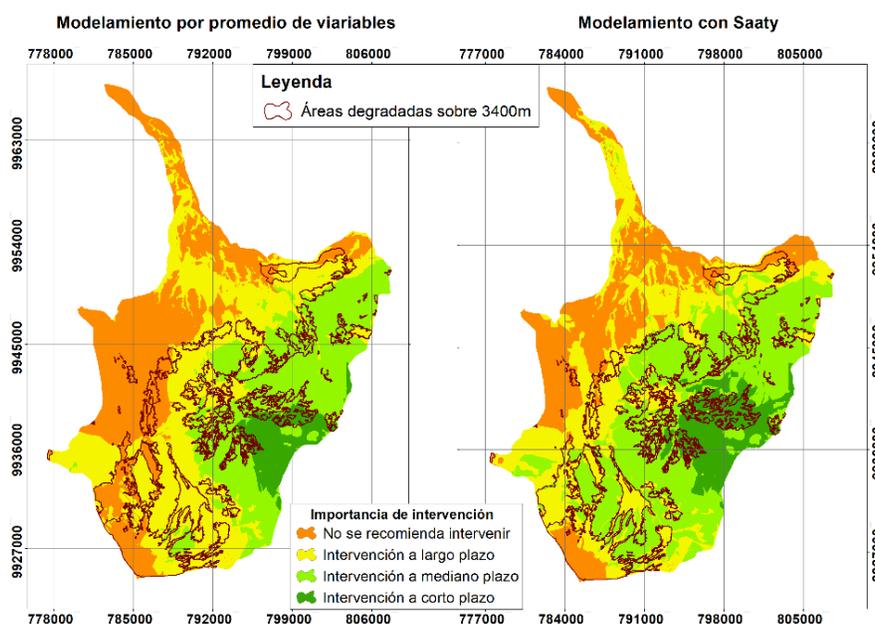


Figura 50. Áreas degradadas sobre los 3400 m en la microcuenca del río Pita

3.8.1.7 Centros educativos

Este cruce se realizó con la información del ministerio de Educación, que permitió identificar las escuelas, colegios o instituciones educativas que se encuentran en la zona, las mismas que se pueden ver en la Figura 51.

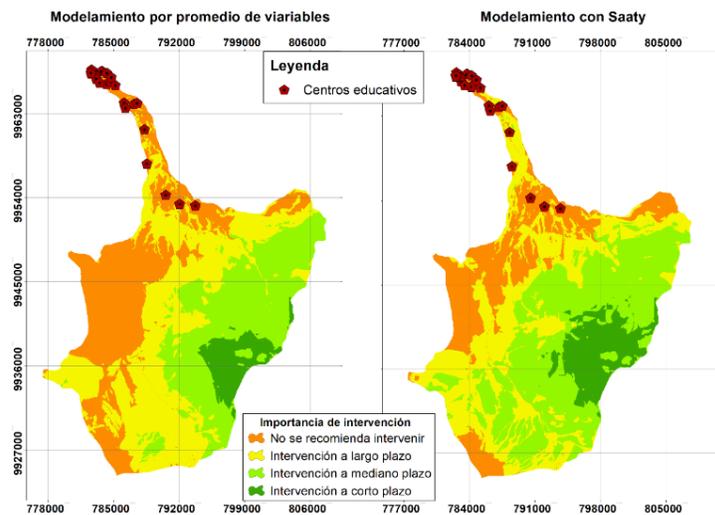


Figura 51. Centros educativos de la microcuenca del río Pita

3.8.1.8 Riesgos Naturales

A continuación se presentaran los mapas de amenazas naturales generados por la Secretaria de Gestión de Riesgos en el 2015.

Las áreas con susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca del rio Pita se identifican en la Figura 52.

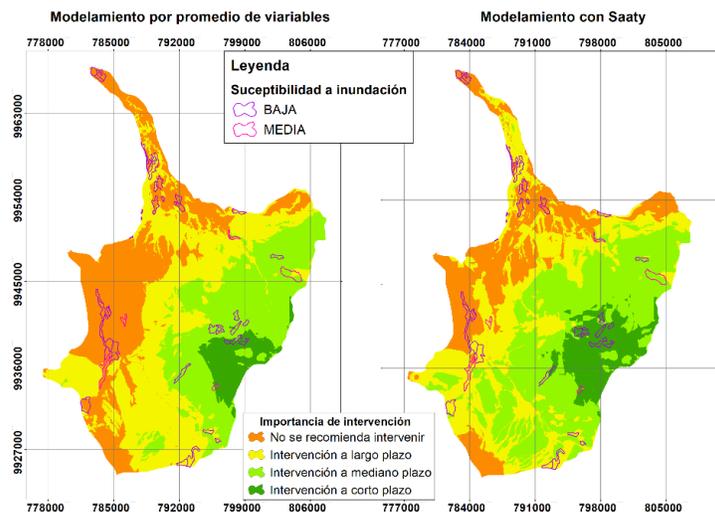


Figura 52. Susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca del río Pita

En la Figura 53 se encuentra los peligros volcánicos existentes en la microcuenca del río Pita.

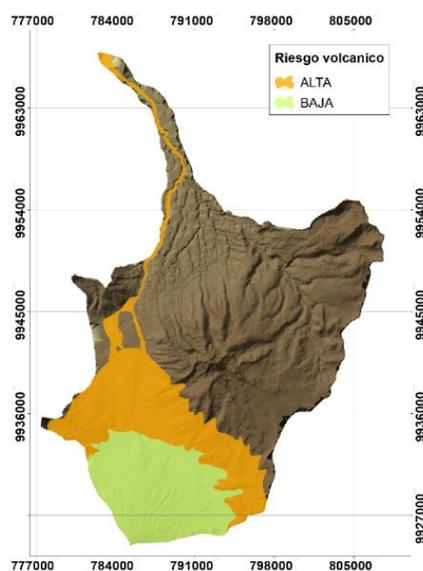


Figura 53. Peligros volcánicos en la microcuenca del río Pita

Es importante conocer las áreas de susceptibles a sequía (Figura 54) para una adecuada gestión en relación a este riesgo.

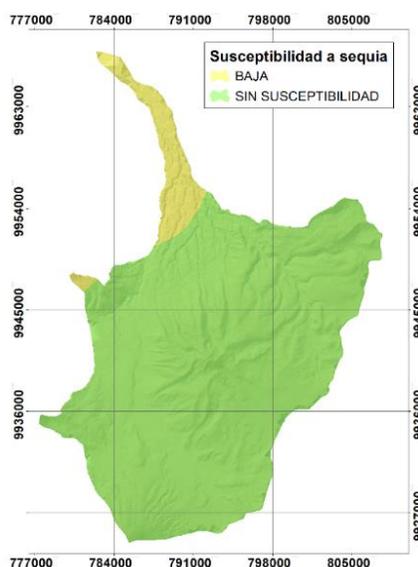


Figura 54. Susceptibilidad a sequía en la microcuenca del río Pita
Fuente. Secretaría de gestión de riesgo

En la Figura 55 se puede observar la susceptibilidad a movimientos de masa que podrían afectar a la microcuenca.

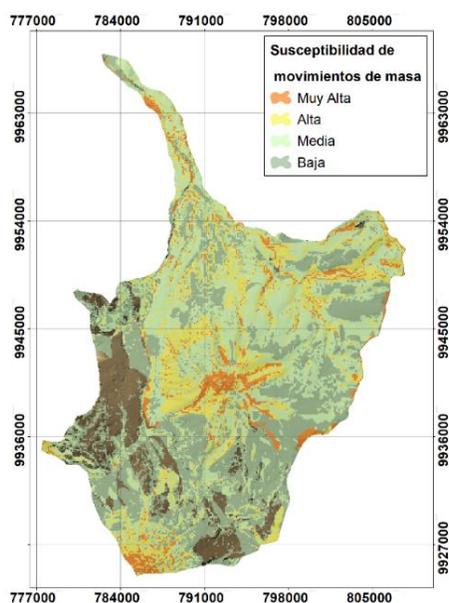


Figura 55. Movimientos de masa en la microcuenca del río Pita

Las áreas afectadas por incendios forestales se encuentran en la Figura 56.

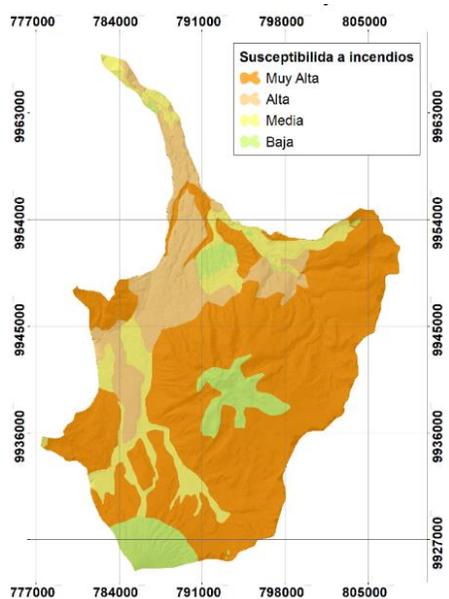


Figura 56. Susceptibilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Pita
Fuente. Secretaria de gestión de riesgo

3.8.2 Microcuenca del río Pisque

3.8.2.1 Áreas protegidas

En la Figura 57 se presenta el cruce de los modelos generados con las áreas protegidas existentes, esto se hizo con el fin de conocer el estado de conservación de la microcuenca.

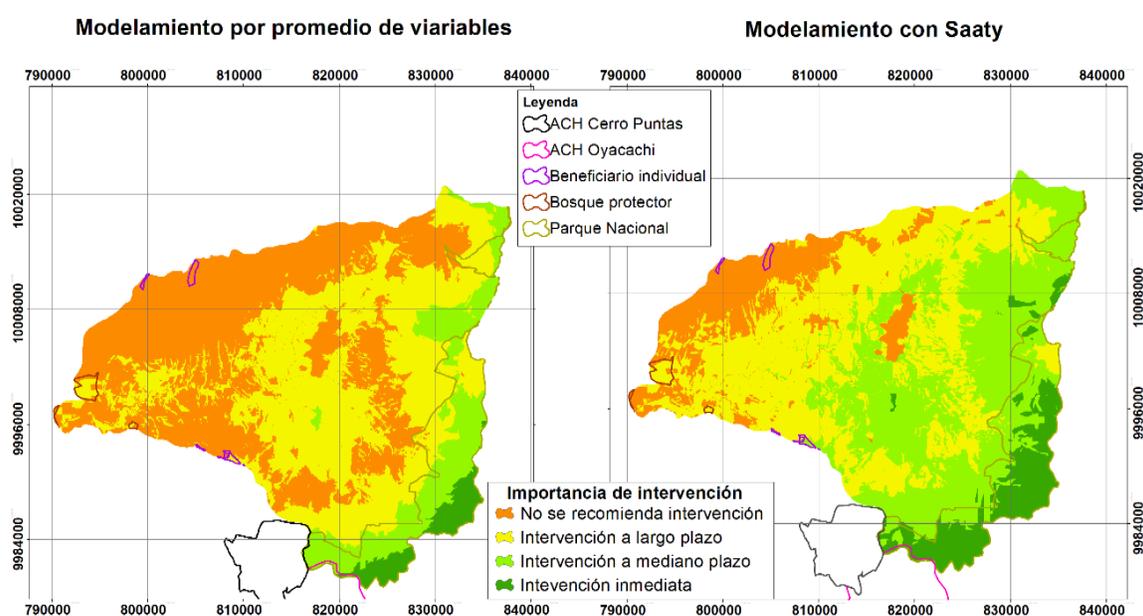


Figura 57. Áreas protegidas de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.2 Concesiones mineras

Conociendo que la minería genera grandes impactos medioambientales se realizó el cruce de los modelos generados con la capa de concesiones mineras, la misma que se presenta en la Figura 58.

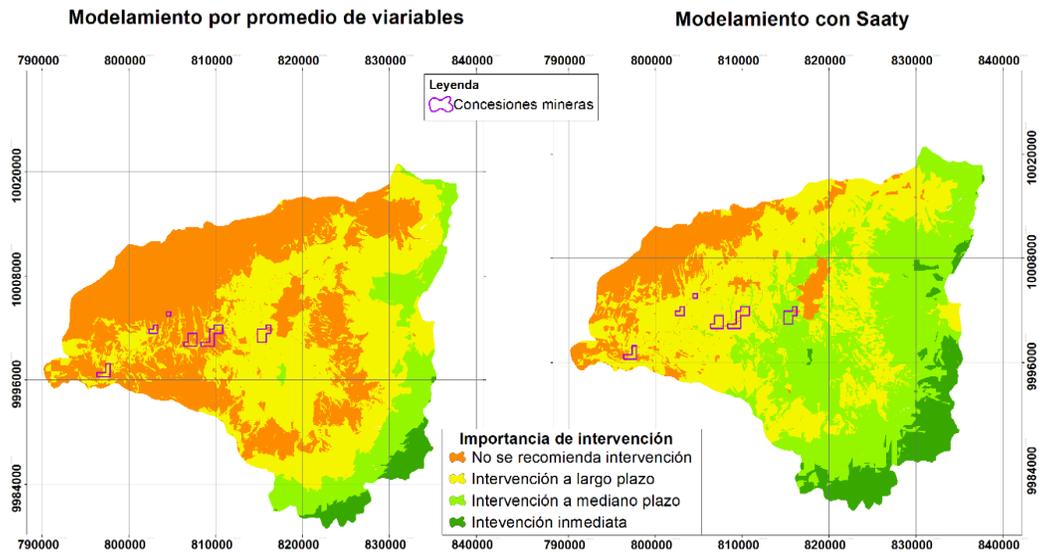


Figura 58. Concesiones mineras de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.3 Cultivos y bosques plantados para la producción

Debido a que la agricultura es la segunda actividad productiva que ejerce presión en esta microcuenca, se realizó el cruce de los modelos generados. En la (Figura 59) se puede observar las áreas dedicadas a esta actividad.

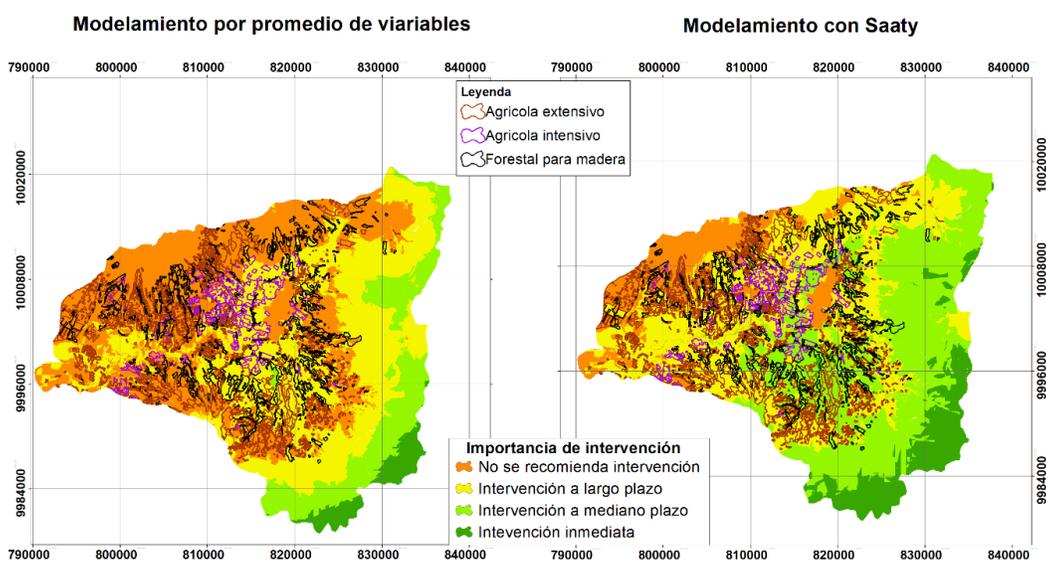


Figura 59. Áreas agrícolas de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.4 Suelos con uso pecuario bovino

La ganadería es la primera actividad productiva en esta microcuenca, en la Figura 60, se presenta el cruce de los modelos generados con los suelos destinados a esta actividad productiva.

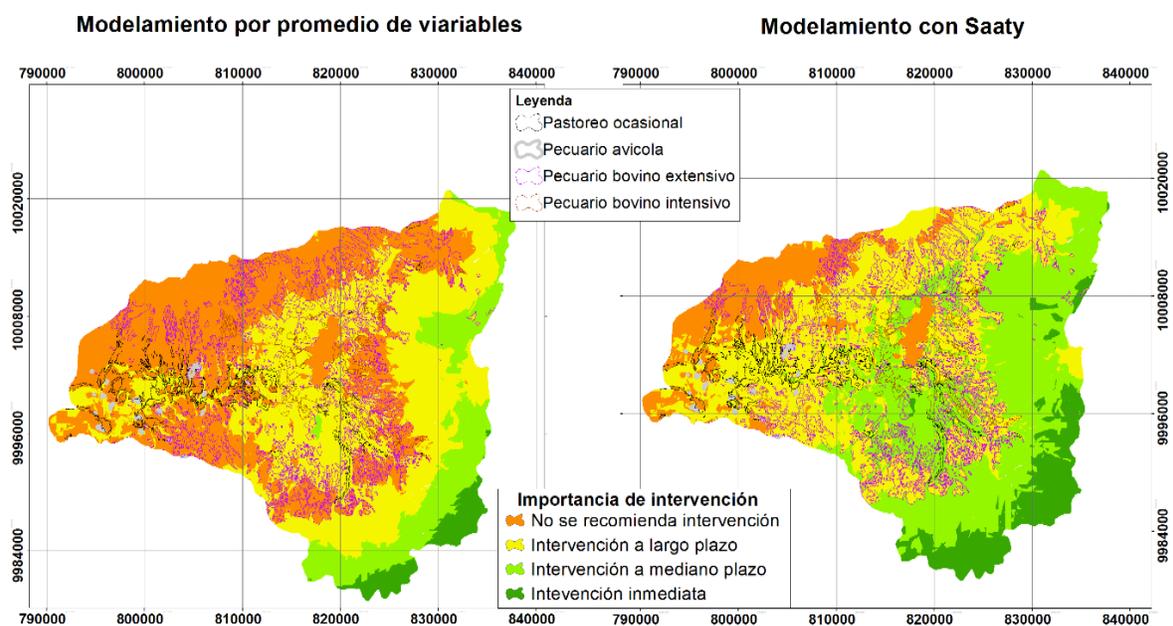


Figura 60. Zonas pecuarias de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.5 Centros poblados

. En la Figura 61 se presenta el cruce de información donde se establecen los centros poblados existentes en la microcuenca del río Pisque.

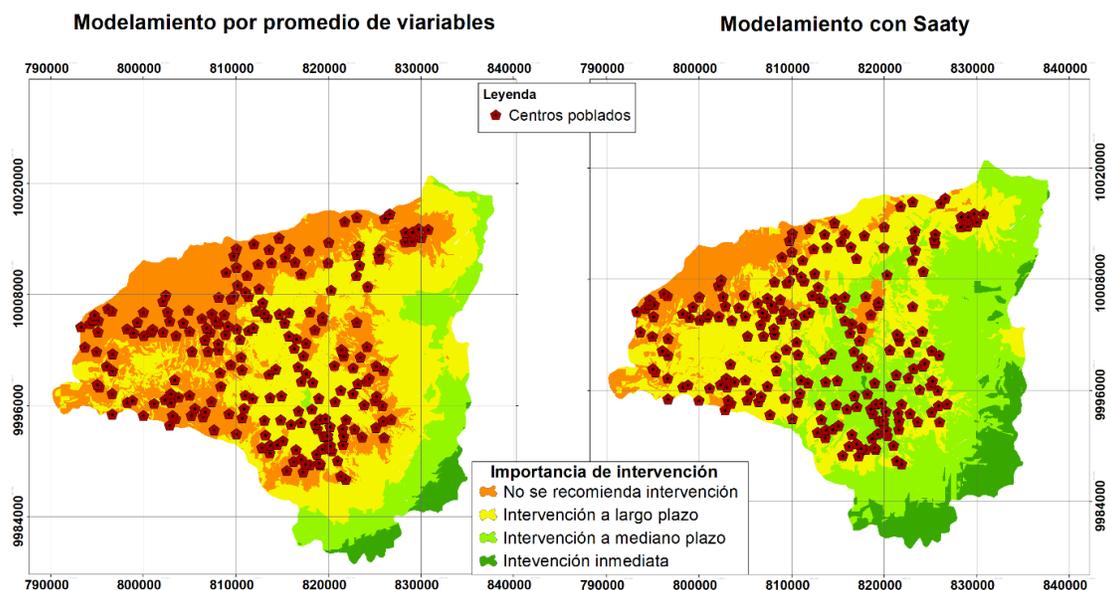


Figura 61. Centro poblados de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.6 Áreas degradadas sobre los 3400m

Con el cruce de información se puede observar según se muestra en la Figura 62 las áreas en las cuales se deben realizar actividades de restauración.

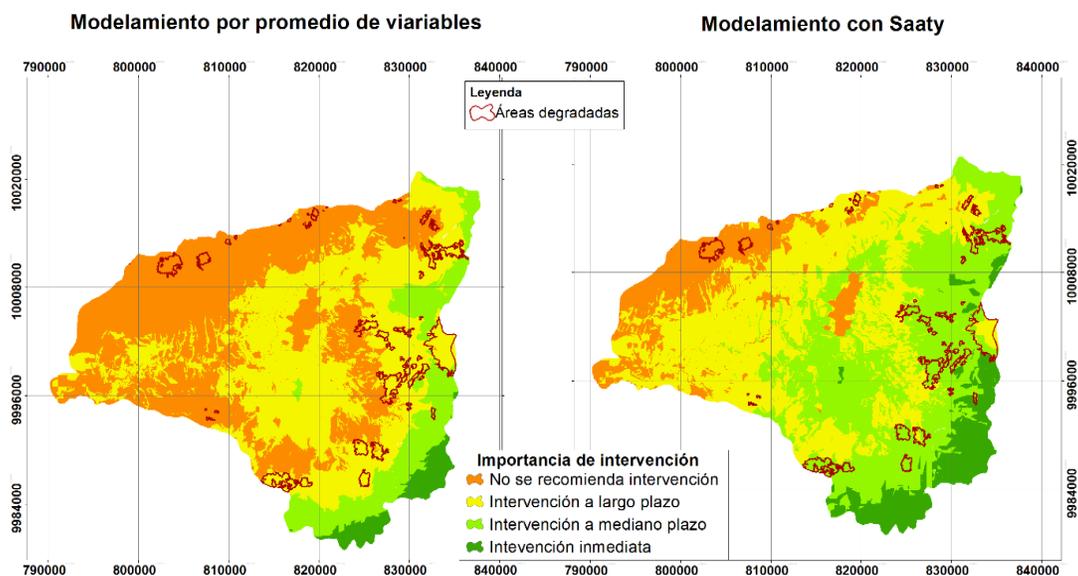


Figura 62. Áreas degradadas sobre los 3400m de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.7 Centros educativos

Este cruce se realizó con la información del ministerio de Educación, en la Figura 63 se identifican las escuelas, colegios o instituciones educativas que se encuentran en la microcuenca del río Pisque.

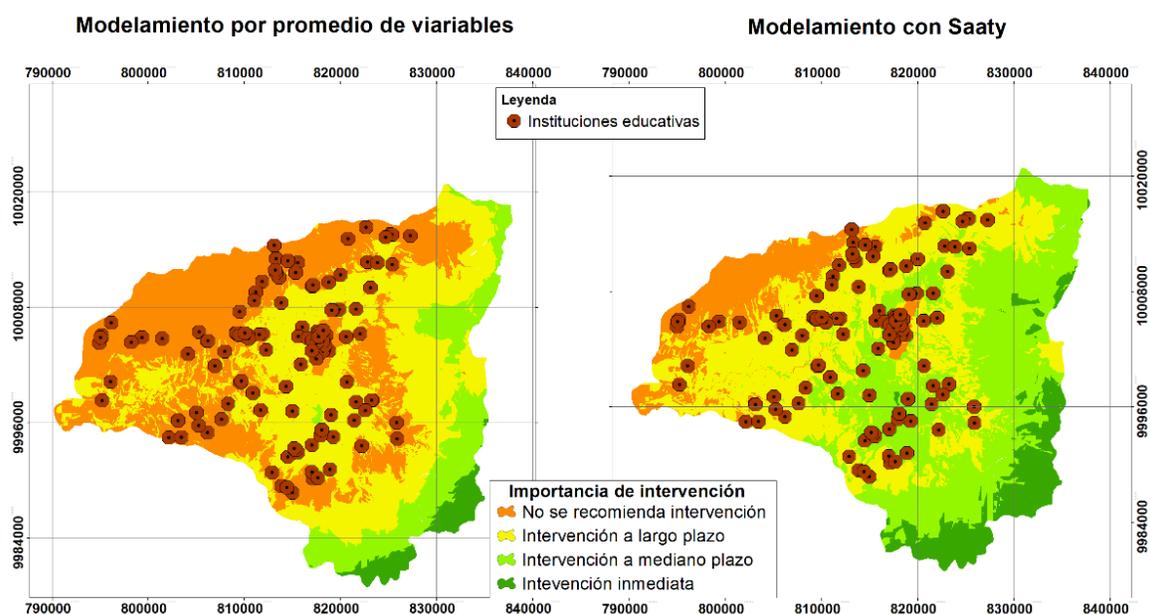


Figura 63. Centros educativos de la microcuenca del río Pisque

3.8.2.8 Riesgos Naturales

Con la finalidad de gestionar un manejo adecuado de la microcuenca en estudio, a continuación se presentaran los mapas de amenazas naturales generados por la Secretaria de Gestión de Riesgos en el 2015.

En la Figura 64 se presentan las áreas con susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca del río Pisque.

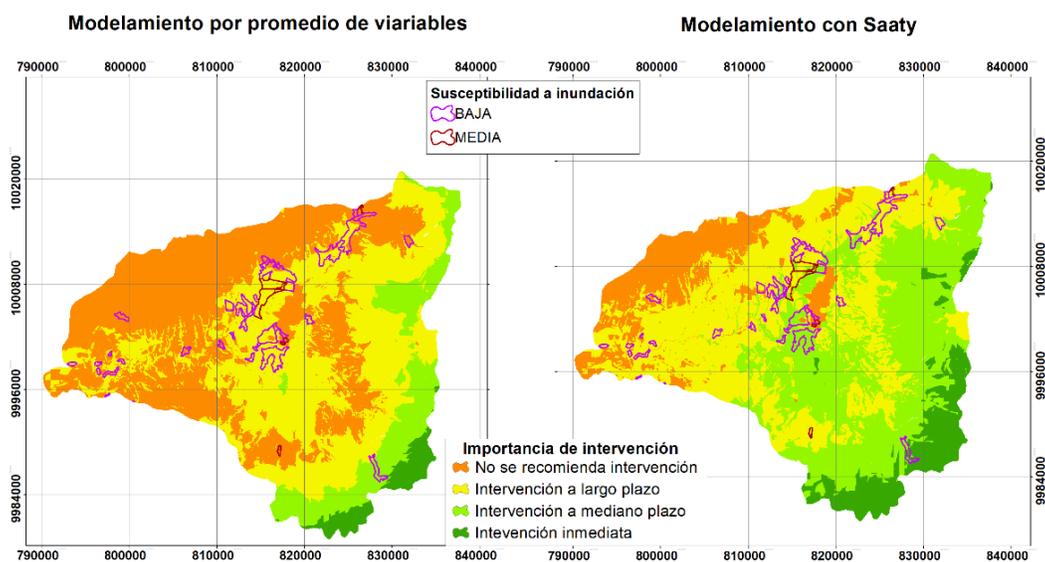


Figura 64. Susceptibilidad de inundaciones en la microcuenca del río Pisque

Los peligros volcánicos existentes en la microcuenca del río Pita se presentan en la Figura

65.

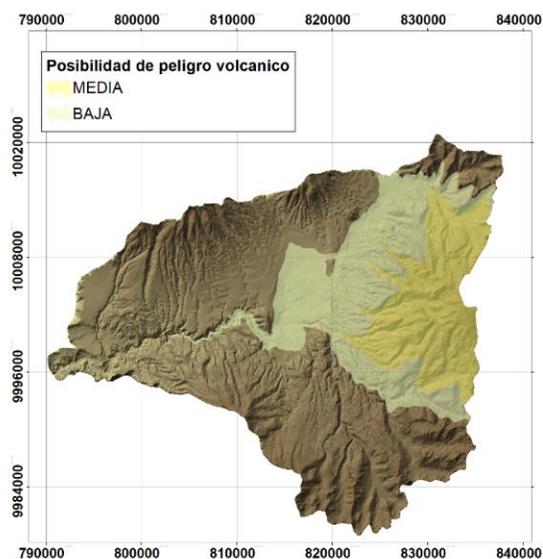


Figura 65. Peligros volcánicos en la microcuenca del río Pisque

Es importante conocer las áreas de susceptibles a sequia (Figura 66) para una adecuada gestión en relación a este riesgo.

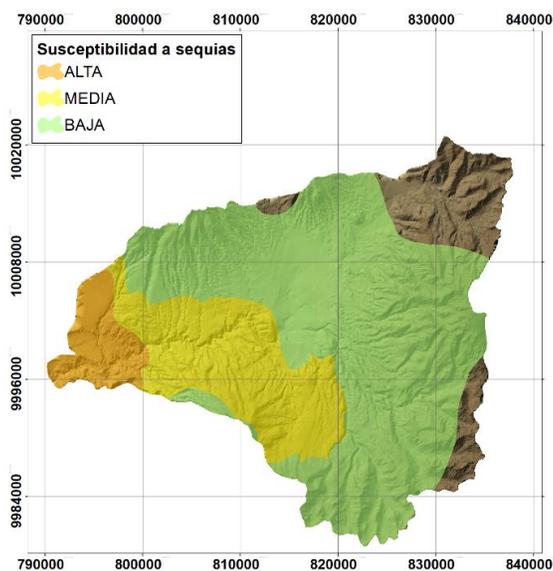


Figura 66. Susceptibilidad a sequía en la microcuenca del río Pisque

En la Figura 67 se puede observar la susceptibilidad a movimientos de masa que podrían afectar a la microcuenca.

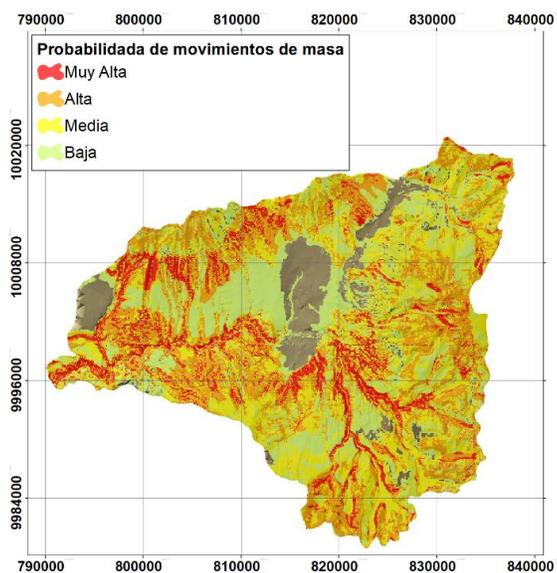


Figura 67. Susceptibilidad a movimientos de masa en la microcuenca del río Pisque

Las áreas afectadas por incendios forestales se encuentran en la Figura 68.

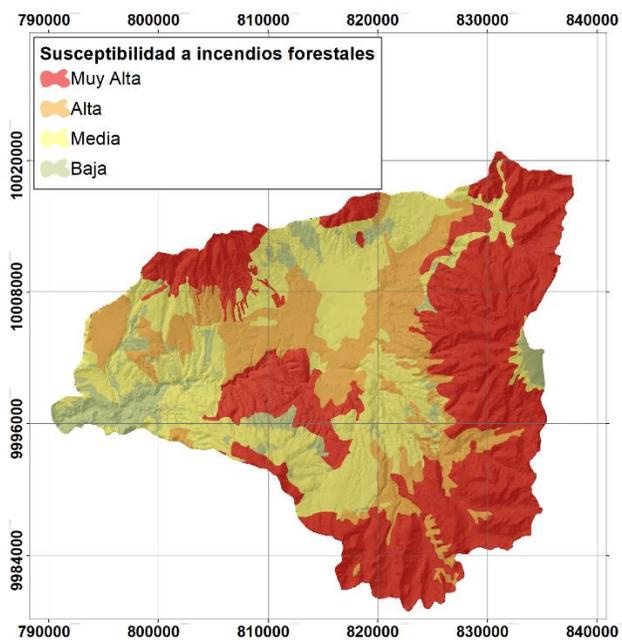


Figura 68. Susceptibilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Pisque

CAPITULO 4

RESULTADOS

El presente capítulo expone los resultados obtenidos en el trabajo “Modelo de intervención para la conservación del recurso hídrico aplicando lógica difusa en las microcuencas de los ríos Pita y Pisque”, los cuales reflejan el cumplimiento de los objetivos propuestos.

4.1 Microcuenca hidrográficas

4.1.1 Microcuenca del Río Pita

La parroquia con mayor ocupación política en esta microcuenca es Pintag con el 54,69%, seguida de la parroquia de Machachi con el 39,54% (Ver Tabla 4 expuesta en el apartado 3.1.1).

Se establece que la mayor cantidad de cobertura vegetal en la microcuenca corresponde al Herbazal de páramo con el 49,69%. Adicionalmente se puede observar que la segunda cobertura más extensa son los cultivos con el 19,75% y la tercera es el pasto con 11,56% de extensión (ver Tabla 5 expuesta en el apartado 3.1.2, determinando de esta manera las principales actividades productivas que se realizan en la microcuenca, así como sus mayores amenazas.

Dentro de los parámetros geomorfológicos se tiene que la microcuenca del río Pita tiene una pendiente de 24,95% (Ecuación 12 detallada en el apartado 3.1.1) que según la clasificación establecida por Pérez (1979) esta microcuenca tiene un terreno fuertemente accidentado que puede originar movimientos de masa con deslizamientos ocasionales y procesos erosivos en el suelo.

El factor de forma de Horton indica que tiene una forma alargada, según el índice de Gravelius y la razón de circularidad de Miller la microcuenca tiene una forma ligeramente alargada (Ver Tabla 6 presente en la sección 3.1.1).

La densidad de drenaje de la microcuenca fue medido bajo la fórmula determinada por Horton (Ecuación 13, apartado 3.1.1), dando como resultado que la densidad de drenaje de la microcuenca es de 1,85 km/km² que según la clasificación del Delgadillo y Páez (2008), corresponde a un drenaje moderado.

4.1.2 Microcuenca del Río Pisque

Se puede observar que la mayor parte de la microcuenca del río Pisque se encuentra en el cantón Cayambe, las parroquias con mayor extensión son Cangahua con el 26,77% de la microcuenca, Cayambe con el 20% y Olmedo con el 15% (Ver Tabla 7 apartado 3.1.2).

En referencia al cobertura vegetal y uso de suelo de la microcuenca (Tabla 8, apartado 3.1.2), se determina que la mayor extensión de suelo se encuentra cubierta por herbazal de páramo con el 24,78%, seguido de cobertura de pasto con el 21,65% y cuenta con el 16,1% de su extensión utilizada en cultivos, siendo estos dos últimos sus actividades productivas y presiones medioambientales.

La pendiente de esta microcuenca es de 34,3% (Ecuación 14, apartado 3.1.2), está pendiente conforme a la clasificación de (Pérez, 1979) es una cuenca con terrenos escarpados. De acuerdo a la clasificación propuesta por Pérez (1979), la microcuenca del río Pisque tiene una forma ni alargada ni ensanchada (Ver tabla 2 y 9).

La microcuenca del río Pisque cuenta con una densidad de drenaje de $1,56 \text{ km/km}^2$ (Ecuación 15) que según la clasificación del Delgadillo & Páez (2008) es moderada, como resultado existe mayor tiempo de infiltración.

4.2 Recopilación de información

En el apartado 3.2 Recolección de datos, la información geográfica recolectada corresponde a datos vectoriales de escala 1:50000 y 1:25000 en formato shapefile de ESRI con un sistema de referencia WGS84, coordenadas UTM 17 S. Debido a la escala de la información recolectada y para asegurar la uniformidad, extensión y resolución del trabajo, el modelo se realizó en escala 1:50.000.

4.3 Recarga hídrica

La recarga hídrica en la microcuenca del río Pita tiene valores desde 0,266 a 1 y en la microcuenca del río Pisque la recarga hídrica varía desde 0,212 a 1 (Ver Figura 34 del apartado 3.3.1), determinando que a lo largo de las dos microcuenca existe gran capacidad de recarga hídrica así como muy baja capacidad de la misma.

La microcuenca del río Pita cuenta con $8,95 \text{ km}^2$ de áreas con muy baja posibilidad de recarga hídrica, $56,32 \text{ km}^2$ con baja posibilidad, $113,17 \text{ km}^2$ con posibilidad moderada, $136,30 \text{ km}^2$ de alta posibilidad y $277,63 \text{ km}^2$ de muy alta posibilidad.

En la microcuenca del río Pisque existen $27,92 \text{ km}^2$ con muy baja posibilidad de recarga hídrica, $7,064 \text{ km}^2$ con baja posibilidad, $383,98 \text{ km}^2$ de posibilidad moderada, $469,21 \text{ km}^2$ de posibilidad alta y $247,23 \text{ km}^2$ de muy alta posibilidad.

4.4 Variables

Para modelar las variables bajo lógica difusa fue indispensable determinar a cuál de los tres casos existentes bajo esta teoría se apega cada variable. En las Tablas 17 y 18 (apartado 3.6) se presenta un resumen del modelamiento de las variables donde se puede determinar que dos variables (vías y centros poblados) corresponden al segundo caso de la lógica difusa, la misma que menciona que mientras más alejada este un área de estas presiones mayor probabilidad tiene de ser conservada.

Además seis variables se ajustaron al caso 3 de la lógica difusa, es importante que dichas variables estén presentes en las áreas de conservación o lo más ceca posible a ellas pues son importantes para el cumplimiento de los servicios ecosistémicos.

4.5 Modelos generados

De acuerdo al modelo 1 de la microcuenca del río Pita la probabilidad de conservación en esta área varían de 58,43 % al 80,95 % (ver Figura 37 del apartado 3.6.1.1), mientras que en relación al modelo 2 los valores de conservación varían entre el 66,6 % al 86,55 % (ver Figura 39 del apartado 3.6.1.2).

En relación al modelo 1 de la microcuenca del río Pisque, los valores obtenidos oscilan entre el 54,26 % al 82,1 % (Figura 38 del apartado 3.6.1.1), mientras que en relación al modelo 2 (ver Figura 40 del apartado 3.6.1.2) estos valores cambian al 62,5 % que el más bajo y el mayor al 87,82 %.

4.6 Áreas de conservación

De acuerdo a la metodología mencionada en el apartado 3.7, se decidió delimitar como zonas de conservación a las áreas de 60% al 100% del rango de probabilidad, mientras que las zonas con 40% al 60% se las definió como áreas de amortiguamiento.

Para la microcuenca del río Pita en concordancia con el modelo 1 (promedio de variables, Figura 43 del apartado 3.7) se establece que 198,32 km² deben ser conservados para apoyar a la conservación del agua, mientras que en referencia al modelo 2 (ponderación con Saaty) deben ser conservados aproximadamente 279,58 km² (Figura 4 del apartado 3.6.1.3) .

En referencia a la microcuenca del río Pisque se establece que de acuerdo al modelo 1 (Figura 40 del apartado 3.6.1.3), se debe intervenir 164,74 km² y de acuerdo al modelo establecido con ponderación Saaty (Figura 42 del apartado 3.6.1.3) se debe enfocar los esfuerzos en 518,34 km².

4.6.1 Tiempo de ejecución.

Se determina que para la microcuenca del río Pita acorde al modelo 1 (promedio de variables, ver Figura 43 del apartado 3.6.1.4) existe aproximadamente 88 km² de intervención inmediata o a corto plazo, 205 km² para intervención a mediano plazo y 171 km² para intervención a largo plazo. De acuerdo al modelo 2 (Saaty, ver Figura 45 del apartado 3.6.1.4) se establece que existen aproximadamente 118 km² para intervención inmediata, 277 km² para intervención a mediano plazo y 63 km² para intervención a largo plazo (ver Tabala 20 apartado 3.7).

En la microcuenca del río Pisque de acuerdo al modelo 1 (Figura 44 del apartado 3.6.1.4) existen aproximadamente 180 km² para intervención inmediata, 176 km² para intervención a

mediano plazo y 403 km² para intervención a largo plazo. En referencia al modelo dos (Figura 46 del apartado 3.6.1.4) existen 278 km² para intervención inmediata, 263 km² para intervención a mediano plazo y 301 km² para intervención a largo plazo (ver Tabla 21 apartado 3.7).

4.7 Lineamientos para intervención

Los cruces de los modelos con cada una de las variables independientes permitieron generar las siguientes estrategias de intervención

4.7.1 Microcuenca del río Pita

4.7.1.1 Áreas protegidas existentes

Se determinó que en esta zona se encuentra el Parque Nacional Cotopaxi, un bosque protector denominado “Subcuencas altas de los ríos Antisana, Tambo, Tamboyacu y Pita”, tres áreas protegidas privadas y dos Áreas de conservación hídrica (ACH) propuestas por el FONAG (Ver Figura 45, apartado 3.8.1.1).

4.7.1.2 Canteras y concesiones mineras

Se determinó que existen 5 concesiones mineras y 8 canteras en la microcuenca, de las cuales una concesión se encuentra dentro del bosque protector, ejerciendo presión directamente, las demás concesiones están fuera de áreas protegidas pero ejercen una presión indirecta en la microcuenca del río Pita.

Como resultado final se determinó que las áreas de interés hídrico no se ven afectadas directamente por las concesiones (Ver Figura 46, apartado 3.8.1.2).

4.7.1.3 Cultivos y bosques plantados para la producción

En relación a la agricultura se estableció que en la microcuenca existen 117 km² afectados por cultivos y 10,4 km² por bosques plantados para la producción. Estas áreas se encuentran en su mayoría en las zonas con media a nula importancia de conservación, a excepción de una parcela de 0.029 km² de cultivos que se ubica dentro del área con intervención inmediata (ver Figura 47, apartado 3.8.1.3).

4.7.1.4 Suelo con uso pecuario bovino

La microcuenca del río Pita cuenta con 102,8 km² destinados a actividades ganaderas, de las cuales 3,23 km² están afectando directamente al recurso hídrico, ya que se encuentran en las partes más altas de la microcuenca (Ver Figura 48, apartado 3.8.1.4).

4.7.1.5 Centros poblados

Se determinó que los menores porcentajes para conservación se ubican en los centros poblados, en relación al modelo Saaty se encuentran en áreas de bajo interés de conservación (Ver Figura 49, apartado 3.8.1.5).

4.7.1.6 Áreas degradadas sobre los 3400m

Se ha obtenido como resultado que las áreas degradadas sobre los 3400m abarcan zonas de mediana y alta importancia para la conservación (Ver Figura 50, apartado 3.8.1.6), sumando una totalidad de 128km².

4.7.1.7 Centros educativos

De acuerdo a la información del Ministerio de Educación al 2013, se determinó que existen 24 centros educativos en la microcuenca del río Pita (Ver Figura 51, apartado 3.8.1.7); de los cuales 10 son de educación básica, uno de educación básica y artesanal P.P, uno de educación básica y Bachillerato, 10 de educación inicial, básica y bachillerato y 2 de educación inicial y Básica.

4.7.1.8 Riesgos Naturales

De acuerdo a los resultados obtenidos (Figura 52, apartado 3.8.1.8), la microcuenca del río Pita posee 21,6 km² con susceptibilidad baja y media de inundación.

Los peligros volcánicos de la microcuenca del río Pita provienen del volcán Cotopaxí, el mismo que aporta a la microcuenca con 223,8 km² de alta probabilidad de riesgo y 123,3 km² de baja probabilidad (Ver Figura 53, apartado 3.8.1.8).

Se estableció que existen 40 km² con baja susceptibilidad a sequías (Ver Figura 54, apartado 3.8.1.8), estas áreas se encuentran en las partes más fragmentadas, por agricultura, ganadería y asentamientos humanos, comprobando así la importancia de la conservación de las partes altas de la microcuenca y perpetuando el abastecimiento de agua a los asentamientos humanos de la parte baja.

Se determina que existen 3,7 km² con muy alta probabilidad de deslizamientos, 104,5 km² con alta probabilidad, 201,5 km² de probabilidad media y 188 km² de baja probabilidad (Ver Figura 55, apartado 3.8.1.8).

En la microcuenca se encuentran 376,8 km² catalogados con muy alta susceptibilidad a incendios forestales, 92,6 km² de susceptibilidad alta, 69 km² de susceptibilidad media y 53 km²

de baja susceptibilidad (Figura 56, apartado 3.8.1.8). Es importante destacar que los terrenos con muy alta susceptibilidad de incendios son aquellos que a la vez están definidos como los más aptos para la conservación.

4.7.2 Microcuenca del río Pisque

4.7.2.1 Áreas protegidas existentes

En la microcuenca del río Pisque existen tres bosques protectores, tres propiedades privadas en conservación y una pequeña parte del Parque Nacional Cayambe Coca (Ver Figura 57, apartado 3.8.2.1), mas solo el Parque Nacional está en zonas de importancia para la conservación hídrica.

4.7.2.2 Concesiones mineras

Las concesiones mineras localizadas en la microcuenca tienen una extensión total de 1,4 km². De acuerdo con el modelamiento de Saaty (Ver Figura 58, apartado 3.8.2.2) estas concesiones afectan a las zonas de interés hídrico por lo que se determinó que 2km² de estas concesiones están en áreas de conservación a mediano plazo y 6,5km² a largo plazo.

4.7.2.3 Cultivos y bosques plantados para la producción

La actividad ganadera cubren un total de 273 km² estos de acuerdo al modelo propuesto por metodología Saaty (Ver Figura 59, apartado 3.8.2.3) cubren áreas que se encuentran con mediano interés para la protección hídrica, mientras que de acuerdo a la metodología de promedio de variables todos se encuentran en zonas de bajo o nulo interés.

4.7.2.4 Suelo con uso pecuario bovino

La actividad pecuaria en la microcuenca del río Psique abarca 291,5 km². En relación al modelo con Saaty, se observa que el suelo con uso pecuario en general cubre zonas de mediana importancia hídrica, ocasionando conflictos de interés, más en relación al modelo con promedio el uso pecuario se encuentran en zonas con bajo a nulo interés para la conservación (Ver Figura 60, apartado 3.8.2.4).

4.7.2.5 Centros poblados

Se ha determinado que existen 218 centros poblados distribuido a lo largo de toda la microcuenca, de acuerdo al modelo 2 (Saaty) estos centros poblados cubren áreas con mediano a bajo interés de conservación, mientras que de acuerdo al promedio de variables (modelo 1), las zonas donde están estos centros poblados son de bajo a nulo interés (ver Figura 61, apartado 3.8.2.5).

4.7.2.6 Áreas degradadas sobre los 3400m

Estas áreas cubren 45,4 km² de la microcuenca, se determinó que se encuentran en zonas de bajo interés de acuerdo al modelo 1 y de mediano a alto interés de conservación en concordancia al modelo 2 (Ver Figura 62, apartado 3.8.2.6).

4.7.2.7 Centros educativos

Se determinó que en la microcuenca existen 156 centros educativos de acuerdo a la información del Ministerio de Educación al 2013 (Ver Figura 63, apartado 3.8.2.7), de los cuales 65 son de Educación Básica, 1 de Educación Básica y Artesanal, 14 son de Educación Básica y Bachillerato, 1 de Educación Básica, Bachillerato y Artesanal, 11 de Educación Inicial, 14 de Inicial, Básica y Bachillerato, 52 de Inicial y Básica y 2 no escolarizados.

4.7.2.8 Riesgos Naturales

Se puede observar que la mayor parte de áreas susceptibles a inundación se encuentran en áreas de mediana a baja importancia de conservación hídrica (Ver Figura 64, apartado 3.8.2.8), abarcando 43,87 km² de extensión a ser intervenida.

Los peligros volcánicos de la microcuenca del río Pisque pueden abarcar un área de 628 km², los mismos que tendría su origen en el volcán Cayambe (Ver Figura 65, apartado 3.8.2.8).

En relación a la susceptibilidad a sequia se determinó que 6,27% de la microcuenca es altamente susceptible, 20,5 % cuenta con susceptibilidad media y 60,43 % tiene baja susceptibilidad (Ver Figura 66, apartado 3.8.2.8).

Se estableció que 1037,8 km² de la microcuenca tiene vulnerabilidad a deslizamientos de masa (Ver Figura 67, apartado 3.8.2.8), lo que representa aproximadamente el 91,4% de la microcuenca.

Se determinó que la microcuenca es propensa a incendios forestales siendo así que el 44,27% de la microcuenca tiene muy alta probabilidad, el 19,87 % alta probabilidad, 28,53 % media probabilidad y el 7,32 % baja probabilidad de ocurrencia (ver Figura 68, apartado 3.8.2.8).

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La importancia de conservación y adecuado manejo de las microcuencas se debe a la gran extensión de cobertura vegetal de herbazal de páramo (49.69% en el Pita y 24,78% en el Pisque).
- Las principales amenazas y presiones medioambientales son las actividades productivas que se realizan en las microcuencas.
- En relación a los parámetros geomorfológicos se concluyó que la microcuenca del río Pita tiene menor probabilidad de crecidas en presencia de lluvias concentradas y un drenaje moderado permitiendo que cuente con acuíferos de alto rendimiento.
- Los parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Pisque indican que esta tiene una velocidad de escorrentía media- alta por lo que probablemente cuente con áreas erosionadas. Además el tiempo de concentración de sus aguas es medio, así como la probabilidad de crecida de los ríos.
- Se validó la información utilizadas cumpliendo los parámetros establecidos, permitiendo generar un adecuado modelamiento a escala 1:50.000.
- Los resultados de los modelos dependen de la caracterización o definición que se les hayan dado a las variables dentro de la lógica difusa.

- El método de promedio de variables para la obtención del modelo final reduce las áreas de interés en comparación con el modelo obtenido por ponderación de variables por Saaty, esta diferencia se debe a la ponderación de cada variable dentro del modelo. El modelo obtenido por Saaty varía en relación al valor de importancia inicial entregado por la autora, a cada variable en la escala del 1 al 10 (antes de iniciar el proceso Saaty).
- Las zonas más aptas para ser conservadas son aquellas que cuentan con la mayor probabilidad dentro del modelamiento y estas a su vez son aquellas que están ubicadas en las zonas altas de las microcuencas.
- Los niveles de intervención serán de corto, mediano y largo plazo, ajustándose así al tiempo de intervención de cada zona, en relación a la planificación que personas naturales o jurídicas puedan ejercer para la conservación de las microcuencas.
- A pesar que los dos modelos generados son diferentes se puede observar que las áreas protegidas cruzan en su mayoría con zonas de importancia para la conservación.
- Las leyes ecuatorianas cuentan con un sinnúmero de artículos en pro de la protección de los recursos naturales así como de la naturaleza misma, mas cada uno de estos artículos y reglamentos pierden su importancia si no son acatados ni respetados
- Tras analizar los resultados se puede concluir que la microcuenca del río Pisque cuenta con más presiones ambientales que microcuenca del río Pita, esto puede deberse a que existen menos áreas de conservación, mayor cantidad de establecimientos educativos, centros poblados, concesiones mineras y actividades agropecuarias.

- Sin duda el cambio de uso de suelo es la causa más importante para la fragmentación de ecosistemas, repercutiendo directamente en la disminución de los servicios ecosistémicos, es por ello que se concluye que realmente la unidad de mínima de gestión dentro del ámbito geográfico debería ser tomada en relación al agua, dividiéndola por microcuencas o subcuencas ya que toda actividad humana está desarrollada en torno a este recurso indispensable.

5.2 Recomendaciones

- Que las administraciones políticas con mayor jurisdicción (Pintag y Machachi en la microcuenca del río Pita, Olmedo Cayambe y Cangahua en la microcuenca del río Pisque), generen estrategias para mantener la extensión de cobertura vegetal de ecosistemas frágiles y posteriormente ampliarla
- MAGAP y el MAE deberían promover y ejecutar actividades productivas sostenibles y alternativas para disminuir la presión por actividades agropecuarias en estas zonas.
- Los pobladores deben prevenir el cambio de la morfología de la microcuenca del río Pita y así evitar posibles incidentes naturales.
- Es indispensable que la información geográfica a ser utilizada se encuentre bajo el mismo sistema y marco de referencia ya que esto garantiza que el modelamiento sea exitoso, además la escala del modelamiento debe absorber el error de todas las variables a ser utilizadas.
- Para el modelamiento de variables con lógica difusa es indispensable la participación de expertos en el tema a ser modelado para un mejor manejo de información.

- Se recomienda generar varios modelos con diferentes métodos y seleccionar el que se apegue mejor a la realidad de cada microcuenca.
- Dentro de la planificación para el manejo de las cuencas se debe mantener el tiempo de intervención recomendado de cada zona.
- Se recomienda complementar este estudio con análisis de balance hídrico y de determinación del área de desmonte admisible que soportaría cada microcuenca para conocer las fronteras para el posible cambio de uso de suelo sin afectar la hidrología de cada microcuenca.
- Es indispensable que cada microcuenca cuente con planes de manejo que sea respetados, llevados a cabo y actualizados permanentemente bajo la coparticipación de todos los actores de la microcuenca como los GAD's provinciales y cantonales, comunidades, propietarios privados y ejecutores de proyectos, permitiendo el manejo eficiente de estas áreas.
- Sería óptimo que el FONAG o el MAE creen un área de protección en la zona de intervención inmediata, debido a que parte de estas zonas carecen de protección.
- Es importante dar seguimiento a los planes de manejo de las actividades extractivas, en el caso de que no existan estos estudios, se debería promover e invertir en estudios de impacto ambiental para poder conocer la magnitud de los impactos y de esa manera minimizarlos.

- Debido a que las zonas destinadas para cultivos han sobrepasado la línea establecida por la ley, de una altura máxima de 3300m, el MAGAP debería trabajar en estrategias para evitar que la frontera agrícola siga ascendiendo.
- Se establece que existen áreas productivas en zonas de gran interés hídrico por lo tanto es recomendable que el FONAG realice acuerdos de conservación con los dueños de estas áreas.
- Las entidades de administración política deben reforestar en el caso de ser necesario las riberas de los ríos, áreas con fuerte pendiente, áreas con probabilidades de inundación y de deslizamientos de masas, áreas erosionadas, los filos de carreteras y caminos con el fin de preveer desastres naturales.
- Realizar reforestación con semillas de la zona, por lo que sería ideal que cada microcuenca cuente con su propio vivero de altura.
- Las entidades de administración política deben crear brechas cortafuego principalmente alrededor de las zonas con alta probabilidad de incendios forestales, así como en los linderos de cada propiedad.
- La educación ambiental es un escalón indispensable para el manejo integrado de una cuenca hidrográfica así como para la protección de cada uno de sus recursos, por lo que es necesario que el Ministerio de Educación se enlace con el MAE y trabajen con los centros educativos presentes en la microcuenca, empezando por los que estén más cercanos a zonas de conservación o a su vez en las partes más altas de la cuenca.

- A pesar que las áreas degradadas están en diferentes niveles de importancia es indispensable el accionar en las mismas de manera urgente ya que de una u otra manera afecta al recurso hídrico y representa una amenaza para el balance hídrico del agua, además en la ocurrencia de fenómenos naturales puede contribuir a que estos sean de mayor magnitud.
- Los pobladores deben evitar construir o realizar actividades humanas en áreas con medias y altas probabilidades de riesgos naturales.
- En relación a la ganadería se determina que varias de estas zonas se encuentran en áreas con gran importancia de conservación por lo que se recomienda que el MAGAP elimine esta presión, con actividades productivas alternativas, ya que las actividades ganaderas no solo afecta a las fuentes hídricas en cantidad al destruir los ecosistemas frágiles, sino que además afecta en calidad del agua, y es importante destacar que mucha de esta agua es usada para agua potable por habitantes de la microcuenca así como por el DMQ.
- En las áreas de conservación generadas con el modelamiento bajo lógica difusa, se recomienda realizar estudios hidrosociales, ya que estos nos permiten determinar las estrategias más adecuadas para la intervención y que vayan acorde a la realidad de cada microcuenca.
- Es indispensable que los habitantes principalmente de las partes altas estén comprometidos con el cuidado de las fuentes hídricas así como de la naturaleza en general por los diferentes servicios ecosistémicos que nos brindan.

Referencias

- Andocilla, L. (2012). *Implementación del algoritmo de lógica fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área de Monjas-Ferrovial- La Magdalena- Itcgimbia del Distrito Metropolitano de Quito*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejercito.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Montecristi: Registro Oficial N°449.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. Quito: Registro Oficial N° 305.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2016). *Ley Orgánica de Tierras rurales y territorios ancestrales*. Quito: Registro Oficial N° 711.
- Builes, A., & Lotero, L. (2012). Análisis y variabilidad de la consistencia en un proceso jerárquico de toma de decisiones ambientales. *Congreso Latino Iberoamericano de Investigación Operativa, XVI*. Rio de Janeiro.
- Buzai, G. (2015). Conceptos fundamentales del análisis espacial que sustentan la investigación científica basada en geotecnologías. En M. Fuenzalida, G. Buzai, A. Moreno, & A. García, *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones* (Primera ed., págs. 56-72). Chile: Triangulo.
- Cachipuendo, C., Moya, C., & Sandoval, C. (2011). *Plan participativo de gestión del agua en la microcuenca del río "El Pisque"*. Universidad Politecnica Salesiana. Obtenido de <http://infoagua->

guayllabamba.ec/repositorio/web/files/Plan_de_Gestion_del_agua_en_cuenca_rio_Pisque.pdf

Campo, A. (2018). *Estudio integrado de la cuenca del río Pisque, cantón Cayambe, Ecuador*. Cayambe: CEPEIGE.

Carranza, D. (2008). *Aplicación de la lógica difusa para la ubicación de especies faunísticas y florísticas, y su comparación con otros métodos geoestadísticos*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.

Chiriboga, J. (2015). *Cambio climático, agua y conflicto: disputas sociales, crisis hídrica y oportunidades de adaptación en la Sierra Centro-Norte de Ecuador*. Área de Estudios Sociales y Globales. Quito: Universidad Andina Simón Bolívar.

Chiriboga, J. L. (2015). *Cambio climático, agua y conflicto: disputas sociales, crisis hídrica y oportunidades de adaptación en la Sierra Centro-Norte de Ecuador*. Quito: Universidad Simón Bolívar.

Congreso Nacional del Ecuador. (2004). *Ley forestal y de conservación de áreas naturales y vida silvestre*. Quito: Registro Oficial N°418.

Coronel, R., & Jaramillo, Á. (2005). *Valoración económica del servicio ambiental hídrico de la microcuenca hidrográfica "El Limón"*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja.

Obtenido de

<http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/4992/1/Coronel%20Castro%20Ren%C3%A9%20Jaramillo%20Ord%C3%B3ñez%20Ingel.pdf>

- Delgadillo, A., & Moreno, A. (2013). *Morfometría de Cuencas*. Venezuela: Universidad de los Andes.
- Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, esenarios de riesgo por crecidas. En C. Ferrer, & M. Dugarte, *Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo*. Merida: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Ecuador, C. N. (10 de Septiembre de 2004). Ley forestal y de conservación de áreas naturales y de vida silvestre. Ecuador: Registro Oficial Suplemento # 418.
- El Comercio. (03 de Octubre de 2018). *Hasta octubre del 2018 se han registrado 886 incendios forestales en 20 provincias*. Quito, Ecuador. Recuperado el 30 de Noviembre de 2018, de <https://www.elcomercio.com/video/incendios-forestales-ecuador-datos-provincias.html>
- Enríquez, M. (2018). *Valoración de la disponibilidad hídrica para la conservación de la reserva Sabia Esperanza, en la microcuenca del Río Mataquí*. Ibarra, Ecuador: Universidad Tecnica del Norte.
- FONAG. (2003). *Diagnóstico de la situación actual de las subcuencas de los ríos San Pedro y Pita*. Quito: Fundación Natura.
- FONAG. (2010). *Modelo cartográfico para la determinación de áreas prioritarias de forestación y reforestación del río Pita*. Quito.
- FONAG. (2016). *Mapa de coberturas y usos de suelo*.

- Grajales, A., Serrano, E., & Hahn, C. (2013). *Los métodos y proceso multicriterio para la evaluación*. Luna Azul, 285-306.
- Grau, J., De Prada, D., Antón, J., Cisneros, J., Degioanni, A., Cantero, A., & Gil, H. (2011). *Evaluación multicriterio de alternativas de ordenamiento territorial utilizando modelos hidrológicos y de erosión para una cuenca representativa del sur de Córdoba*. En *Servicios Ecosistemicos* (págs. 553-579).
- Hartley, R. (2010). Aplicación de un análisis de múltiples criterios en gestión hídrica local. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 14(2), 13-32. Obtenido de http://www.redibec.org/IVO/rev14_02.pdf
- Henríquez, C., & Quiñe, J. (2009). *Evaluación multicriterio/objetivo aplicada a los usos de coberturas de suelo en la cuenca de Chillán*. IV Encuentro de la Red Iberoamericana de la Evaluación y Decisión Multicriterio, (pág. 15). Mexico: Universidad de Guadalajara.
- Hernández Caicedo, D., & Lara Buenaño, D. (2005). *Propuesta de un plan de manejo de las cuencas de los ríos Pita y San Pedro*. Sangolqui: Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/968>
- Herrera, L. (2013). *Aportes para la implementación del plan de gestión del agua de la microcuenca del río Pisque*. Universidad Politecnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5072/6/UPS-YT00261.pdf>
- Hofstede, R., Mena, P., & Mediana. (2001). *Los Páramos del Ecuador: particularidades, problemas y perspectivas*. (P. Mena, G. Medina, & R. Hofstede, Edits.) Quito, Ecuador: Abya Yala.

- Hofstede, R et. al. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito: UICN.
- Hofstede, R. C. (2014). *Los Paramos Andinos ,Que sabemos? Estado de conocimiento sobre el*. Quito, Ecuador: UICN.
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). *Los páramos del mundo* (Primera ed.). Quito: Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia.
- INEC. (2010). *Población por sexo, según provincia, parroquia y cantón de empadronamiento*. Quito: Ecuador en cifras.
- Lala Ayo, H. D. (2017). *Análisis de la sostenibilidad de la producción de agua en la microcuenca del río Pita mediante la determinación de la huella hídrica y disponibilidad de agua*. Sangolqui: Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13246>
- Leal Cuba, Z., Díaz Suárez, J., Schiettecatte, W., Ruiz, M. E., & Almoza Hernández, Y. (2007). *Efecto de la cobertura vegetal de cultivos agrícolas principales sobre el proceso de erosión en suelos de la cuenca del río Cuyaguaje*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 76-83.
- Llambí, L et. al . (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Poyecto Páramo Andino.
- Llambí, L., & Soto, A. (2012). Ecología del páramo. En L. Llambí, A. Soto, R. Celleri, B. De Bievre, B. Ochoa, & P. Borja, *Ecología, hidrología y suelos de páramos* (Primera ed., págs. 1-81). Monsalve Moreno.

- Mamani, J., Alfaro, R., & Gonzales, S. (2016). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la microcuenca del río Huayllani, Lampa. XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016*, (págs. 31-41). Florianópolis, Brasil.
- Matteucci, S., Herrera, P., Miñaro, F., Adámoli, J., Torrela, S., & Ginzburg, R. (2007). *Herramientas de toma de decisiones en la zonificación para el uso sustentable de humedales del sudeste de la región Chaqueña. Memorias XII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG)-Universidad Nacional de Luján*, 1-25.
- Matus, O., Faustino, J., & Jimenez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE,.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). *Los páramos ecuatorianos. Botánica Económica de los Andes Centrales*, 91-109.
- Ministerio del Ambiente Colombia. (2002). *Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña colombiana*. Bogotá.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). *Mapa interactivo Ambiental*. Obtenido de <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/>
- Moya, C. (2010). *Plataforma de la microcuenca del río Pisque*. Cayambre: Futuro Latinoamericano.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. GitHub.

- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico* (Primera ed.). (Z. Novoa, Ed.) Lima, Perú: Sociedad geográfica de Lima.
- Padilla, O. (2007). *Fundamento teorico para modelización de variables ambientales mediante operadores difusos*. *Revista Geoespacial*(4), 56-62.
- Pérez Viera, K. V. (2007). *Estimación de la oferta hídrica en la cuenca alta del río Pita mediante el uso de herramientas geoinformáticas*. Sangolqui: Facultad de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2324>
- Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Caracas, venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Pila, G. (2011). *Análisis de los parámetros de la demanda hídrica: casos de estudio cuencas del Pita y San Pedro*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Quiñónez, P. (2015). *Evaluación del estado de salud ecológica de la microcuenca del río Pita (sector Molinuco, canteras y antiguo botadero Cashapamba) utilizando macroinvertebrados como bioindicadores de calidad de agua*. Quito: Universidad Internacional del Ecuador.
- Salazar, J. (2015). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la Microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, en la Provincia de Imbabura*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.

- Sánchez , K., Jiménez, F., Velásquez, S., Piedra, M., & Romero, E. (2004). *Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente*, 88-95.
- Sánchez, A., García, R., & Palma, A. (2003). *La cuenca hidrográfica: unidad basada d eplaneación y manejo de recursos naturales* (Primera ed.). Mexico, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SENPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida*. Quito, Ecuador.
- Toskano, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramientas de toma de decisiones en la selección de proveedores*. Lima: Universidad Naional Mayor de San Marcos.
- UNESCO. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo*. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos HídricoS.
- Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J., Alarcón, L., & Galván, U. (2011). *La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. Política y Cultura*(36), 45-69.
- Yajure, C. (2015). *Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral. Scientia et Technica*, 20(3), 255-260.