

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACION

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y
ECOTURISMO**

**“EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA
YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HÍDRICA”**

**TESIS PARA OPTAR
TÍTULO PROFESIONAL INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR
GALLO RAMOS VICTOR HUGO**

**ASESOR
DR. JHON WALTER GÓMEZ LORA**

**JURADO
DR. ZAMORA TALAVERANO NOÉ SABINO
DR. GALARZA ZAPATA EDWIN JAIME
MAG. GUILLÉN LEÓN ROGELIA
MAG. GÓMEZ ESCRIBA BENIGNO PAULO**

LIMA - PERU

2018

Dedicatoria

*A Dios, porque para Él y en Él son hechas todas las cosas,
por guiarme en el camino correcto para la culminación de
la tesis.*

*A mis padres Hugo y Emilia, por ser el mejor ejemplo de
empuje, disciplina y persistencia en el camino de la vida.*

Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. Jhon Walter Gómez Lora, gracias siempre por enseñarnos a confiar en nosotros mismos y a vencer nuestros miedos y limitaciones.

A mi familia, por todo su amor y comprensión.

A la Srta. Katherine C. Z. por demostrarme su apoyo y amor incondicional en todo momento.

Al Centro de Investigación y Gestión del Agua (CEIGA) y a mi Universidad Nacional Federico Villarreal.

Al SENAMHI, A la Autoridad Local del Agua (ALA) – Alto mayo por su apoyo con la información.

A la División de Medio Ambiente de la Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca por su apoyo en el levantamiento de información de campo.

RESUMEN

Esta investigación evaluó la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu y la influencia en su regulación Hídrica. Para esto se utilizó 6 imágenes satelitales Landsat del sensor Thematic Mapper (TM) de los años 1989, 1995, 2001, 2006, 2008, 2010, sobre las cuales se realizaron los respectivos procesamientos utilizando el Software CLASlite generando mapas de cobertura boscosa para los distintos años. El análisis de la regulación hídrica se determinó mediante el estudio del rendimiento hídrico, para lo cual se generaron modelos regiones de precipitación, temperatura, evapotranspiración, escorrentía, y así, mediante la determinación del balance hídrico se cuantificó el rendimiento hídrico. La pérdida de cobertura boscosa desde 1989 - 2010 fue de 32 km² (3200 Ha) (14% de la Subcuenca), la tasa variación fue -1,523 km²/año (152,3 Ha/año). La tasa de deforestación promedio calculada fue de -0,012% anual en todo el periodo de análisis. Así mismo, en la validación de los mapas se obtuvo una Exactitud Global del 85% y un índice de Kappa de 0,65 indicando la bondad y precisión de la clasificación. Del análisis de cobertura boscosa – rendimiento hídrico, existe una relación inversa, demostrándose que el rendimiento hídrico puede aumentar, con la disminución progresiva de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu, lo que puede desencadenar problemas en la estación húmeda, tales como inundaciones y erosión; afectando de forma negativa en la regulación hídrica de caudales, el mayor aumento de rendimiento hídrico se presenta para el año 2008, para el cual se calculó una cobertura de bosque igual a 116,9 km² (18% menor en comparación con la cobertura del año 1989), siendo el rendimiento hídrico 22l/s/km² lo que representa 73,5% más del rendimiento hídrico promedio.

Palabras Clave: Cobertura Boscosa, Rendimiento Hídrico, Teledetección, Claslite, Sistemas de Información Geográfica

ABSTRACT

The Paper evaluated the forest cover in the Yuracyacu Sub-basin and the influence on it's water regulation.

For this, 6 Landsat satellite images of the Thematic Mapper (TM) sensor were used for the years 1989, 1995, 2001, 2006, 2008, 2010, on which the respective processing was carried out using the CLASlite Software, generating maps of forest cover for the different years. The analysis of water regulation was determined through the study of water yield, for which models were generated of precipitation, temperature, evapotranspiration, runoff, and thus, by determining the water balance was quantified the water yield. The loss of forest cover from 1989 - 2010 was 32 km² (3200 Ha) (14% of the Sub-basin), the variation rate was -1,523 km² / year (-152.3 Ha / year). The deforestation rate calculated was -0,012% per year throughout the period of analysis. Thus, in the validation of the maps, a Global Accuracy overall of 85% and a Kappa Index of 0,65 were obtained indicating the goodness and precision of the classification. From the analysis of forest cover - water yield, there is an inverse relation, showing that water yield can increase, with the progressive reduction of forest cover in the Yuracyacu Sub-basin, which can trigger problems in the wet season, such as floods and erosion ; negatively affecting the water regulation of flows, the greatest increase in water yield is presented for the year 2008, for which a forest cover equal to 116,9 km² was calculated (18% lower compared to the coverage of the year 1989), the water yield being 22l/s/ km², which represents 73,5% more than the average water yield.

Keywords: Forest Cover, Water yield, Remote Sensing, Claslite, Geographic Information Systems.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO I.....	17
ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.1. Antecedentes.....	17
1.1.1. Nacionales.....	17
1.1.2. Internacionales.....	18
1.2. Planteamiento del Problema.....	21
1.2.1. Descripción del Problema.....	21
1.2.2. Formulación del Problema.....	22
1.2.2.1. Problema Principal.....	22
1.2.2.2. Problemas Secundarios.....	22
1.3. Objetivos.....	23
1.3.1. Objetivo General.....	23
1.3.2. Objetivos Específicos.....	23
1.4. Hipótesis.....	23
1.5. Población y Muestra.....	23
1.5.1. Población.....	23
1.5.2. Muestra.....	23
1.6. Variables.....	23
1.7. Justificación.....	24
1.8. Importancia.....	24
CAPITULO II.....	25
MARCO TEORICO.....	25
2.1. Crisis de la Cobertura Boscosa.....	25
2.2. Bosques.....	26
2.2.1. Tipos de Bosques.....	27
2.2.1.1. Funciones Ambientales de los Bosques.....	28
2.2.2. Influencia de la Cobertura Boscosa en Cuencas Hidrográficas.....	30
2.2.2.1. Balance Hídrico.....	30
2.2.2.2. Rendimiento Hídrico.....	35
2.2.2.3. Caudales Máximos.....	37
2.2.3. Deforestación.....	37
2.2.3.1. Impacto en el ambiente.....	38
2.2.3.2. Impacto en la biodiversidad.....	38
2.2.3.3. Impacto en el medio hidrológico.....	39
2.2.3.4. Impacto en el medio ecoturístico.....	39
2.2.3.5. Impacto en el medio económico.....	39
2.2.4. Cuantificación de áreas boscosas y deforestadas.....	39
2.3. Teledetección.....	40
2.3.1. Bases de la Teledetección.....	40
2.3.1.1. Elementos de un sistema de Teledetección:.....	41

2.3.1.2.	Formas de un sistema de Teledetección	41
2.3.1.3.	Principios Físicos de la Teledetección.....	42
2.3.2.	Interacción de la Radiación con la superficie	44
2.3.3.	Interacción de la Radiación con la Atmósfera	45
2.3.4.	Resolución de las Imágenes Satelitales	47
2.3.5.	Composición a color de las imágenes satelitales	49
2.3.6.	Pre-Procesamiento de Imágenes Satelitales	52
2.3.6.1.	Corrección Geométrica.....	53
2.3.6.2.	Corrección Radiométrica.....	54
2.3.6.3.	Corrección Atmosférica	55
2.3.7.	Procesamiento de Imágenes satelitales.....	56
2.3.8.	Clasificación de Imágenes satelitales	57
2.3.8.1.	Clasificación Supervisada.....	57
2.3.8.2.	Clasificación No Supervisada	58
2.3.9.	Evaluación de la Precisión de la Clasificación	58
2.3.10.	Teledetección de la cobertura boscosa.....	60
2.3.10.1.	Avances en la detección de cambios de la cobertura boscosa.....	60
2.3.10.2.	Procedimiento de Análisis usando CLASlite	61
CAPITULO III.....		66
MATERIALES Y MÉTODOS.....		66
3.1.	Materiales.....	66
3.2.	Métodos	68
3.2.1.	Determinación de los cambios de la Cobertura Boscosa	68
3.2.2.	Regulación hídrica de la subcuenca.....	75
3.3.	Etapas de la investigación.....	76
CAPITULO IV		77
CARACTERISTICAS DE LA SUBCUENCA		77
4.1.	Ubicación Geográfica.....	77
4.1.1.	Localización	77
4.1.2.	Ubicación Política	77
4.1.3.	Límites	77
4.2.	Vías de acceso y Comunicaciones.....	78
4.2.1.	Vías de acceso	78
4.2.2.	Comunicaciones.....	78
4.3.	Diagnóstico Físico de la subcuenca	79
4.3.1.	Geología.....	79
4.3.2.	Geomorfología	81
4.3.2.1.	Geomorfología local	81
4.3.2.2.	Geomorfología Cuantitativa	83
4.3.3.	Climatología.....	100
4.3.3.1.	Registros históricos de parámetros meteorológicos	100
4.3.4.	Hidrografía	102
4.3.5.	Ecología	104
4.3.6.	Suelos.....	107
4.4.	Diagnóstico Socioeconómico de la Subcuenca	110
4.4.1.	Características de la Población	110
4.4.2.	Características Sociales.....	110
4.4.3.	Características Económicas.....	111

CAPÍTULO V	113
TELEDETECCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA	113
5.1. Preprocesamiento de las Imágenes Satelitales	113
5.2. Procesamiento de las imágenes satelitales	113
5.3. Cuantificación de áreas boscosas en la Subcuenca Yuracyacu	115
5.3.1. Variación de la Cobertura Boscosa	115
5.3.2. Potenciales escenarios futuros en la Subcuenca Yuracyacu	117
5.3.3. Tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu	119
5.3.4. Validación de Resultados	119
CAPÍTULO VI	121
HIDROMETEOROLOGÍA DE LA SUBCUENCA	121
6.1. Pluviometría	121
6.1.1. Estaciones meteorológicas	121
6.1.2. Análisis de la calidad de la información Pluviométrica	122
6.1.3. Determinación de la Precipitación	124
6.1.3.1. Técnica de Isoyetas	126
6.1.4. Generación de registro pluviométrico	129
6.1.5. Distribución mensual de la precipitación	131
6.2. Temperatura	132
6.2.1. Relación Altitud – Temperatura	132
6.2.2. Temperatura en Subcuenca Yuracyacu	133
6.2.3. Generación del registro de temperatura	135
6.2.4. Distribución Mensual de la temperatura	136
6.3. Evaporación	136
6.3.1. Evapotranspiración por el método Turc	136
6.3.2. Evapotranspiración por Coutagne	137
6.3.3. Evapotranspiración por Thornthwaite	138
6.3.4. Evapotranspiración media de la subcuenca	141
6.4. Hidrología	143
6.4.1. Escorrentía	143
6.4.2. Caudal	144
6.4.3. Rendimiento Hídrico	145
CAPÍTULO VII	146
RESULTADOS	146
7.1. Cobertura Boscosa	146
7.2. Tasa de Deforestación	147
7.3. Rendimiento Hídrico	147
CAPÍTULO VIII	151
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	151
CAPÍTULO IX	154
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
9.1. Conclusiones	154
9.2. Recomendaciones	155
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
ANEXOS	164

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1 Tamaño relativo de los sistemas Hidrológicos.....	83
Cuadro N° 2 Forma de la Cuenca, según el Coeficiente de compacidad (Kc).....	84
Cuadro N° 3 Cálculos del rectángulo equivalente - Subcuenca Yuracyacu.....	87
Cuadro N° 4 Cálculos de la Altitud Media Subcuenca Yuracyacu	89
Cuadro N° 5 Cálculos de la altitud media de la Subcuenca de Recepción.....	90
Cuadro N° 6 Cálculos de la Curva Hipsométrica y la frecuencia de altitudes de la Subcuenca Yuracyacu.....	91
Cuadro N° 7 Cálculos de la Curva Hipsométrica y la frecuencia de altitudes de la subcuenca de recepción	91
Cuadro N° 8 Cálculos del Índice de pendiente de la Subcuenca Yuracyacu	95
Cuadro N° 9 Cálculos del Índice de pendiente de la subcuenca de recepción	95
Cuadro N° 10 Grado de ramificación - Subcuenca Yuracyacu	97
Cuadro N° 11 Grado de Ramificación subcuenca de recepción.....	97
Cuadro N° 12 Parámetros fisiográficos de la Subcuenca Yuracyacu y su subcuenca de recepción.....	100
Cuadro N° 13 Cálculo del perfil longitudinal del río Yuracyacu	102
Cuadro N° 14 Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu en las fechas analizadas	115
Cuadro N° 15 Variación de áreas de Cobertura boscosa.....	117
Cuadro N° 16 Cobertura Boscosa en la Subcuenca Yuracyacu para el periodo 2002 - 2010	117
Cuadro N° 17 Potenciales escenarios futuros de Cobertura Boscosa en la Subcuenca Yuracyacu.....	118
Cuadro N° 18 Error producido por el modelo	118
Cuadro N° 19 Tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu.....	119
Cuadro N° 20 Matriz de Confusión.....	120
Cuadro N° 21 Cálculos para el Patrón de Precipitación Anual (PPA)	123
Cuadro N° 22 Precipitación generada para las estaciones utilizadas	125
Cuadro N° 23 Precipitación generada por Áreas parciales	126
Cuadro N° 24 Precipitación generada por altitudes	127
Cuadro N° 25 Precipitación media por rangos de Altitud.....	128
Cuadro N° 26 Precipitación representativa	129
Cuadro N° 27 Factores Adimensionales de la estación Naranjillo.....	130
Cuadro N° 28 Precipitación generada Subcuenca Yuracyacu.....	131
Cuadro N° 29 Isotermas de la Subcuenca Yuracyacu	134
Cuadro N° 30 Isotermas por rangos de altitud de la Subcuenca Yuracyacu	134
Cuadro N° 31 Temperatura media representativa	135
Cuadro N° 32 Altitudes de las estaciones utilizadas	135
Cuadro N° 33 Temperatura media generada en la Subcuenca Yuracyacu	135
Cuadro N° 34 Precipitación y temperatura (1998 - 2010).....	137
Cuadro N° 35 Valores del Parámetro Heliotérmico	137
Cuadro N° 36 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Turc.....	137
Cuadro N° 37 Parámetros de Coutagne.....	137
Cuadro N° 38 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Coutagne	138
Cuadro N° 39 Índice Térmico Mensual - Método Thornthwaite	139
Cuadro N° 40 Parámetro "a" - Método Thornthwaite	139

Cuadro N° 41 Parámetro "c" - Método Thornwaite	139
Cuadro N° 42 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Thornthwaite.....	140
Cuadro N° 43 Evapotranspiración anual representativa.....	141
Cuadro N° 43 Evapotranspiración de las estaciones - Método Turc.....	141
Cuadro N° 44 Evapotranspiración de las estaciones - Método Coutagne	141
Cuadro N° 45 Evapotranspiración representativa de las estaciones.....	141
Cuadro N° 46 Evapotranspiración por áreas parciales	142
Cuadro N° 47 Balance hídrico Subcuenca Yuracyacu	143
Cuadro N° 48 Escorrentía generada por estación.....	143
Cuadro N° 49 Escorrentía por áreas parciales	144
Cuadro N° 50 Caudal medio Subcuenca Yuracyacu	145
Cuadro N° 52 Rendimiento Hídrico Subcuenca Yuracyacu	145
Cuadro N° 53 Cobertura boscosa y Rendimiento Hídrico	149
Cuadro N° 54 Cobertura boscosa y Rendimiento Hídrico (2004 – 2008).....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Variables de la Investigación	24
Tabla N° 2 Superficie Forestal Mundial.....	25
Tabla N° 3 Superficie y porcentajes de bosques naturales en el Perú.....	27
Tabla N° 4 Tipos de Bosques en el Perú y sus principales características.....	28
Tabla N° 5 Proceso de Deforestación en San Martín 1960 - 1980.....	38
Tabla N° 6 Superficie deforestada San Martín 2010 - 2014	38
Tabla N° 7 Resolución espacial y anchura de banda del sensor Thematic Mapper (TM) – Satélite Landsat	48
Tabla N° 8 Resolución temporal del satélite Landsat	49
Tabla N° 9 Características del sensor Thematic Mapper (TM).....	49
Tabla N° 10 Fuentes de error en una Imagen Satelital	52
Tabla N° 11 Tipos de errores geométricos	53
Tabla N° 12 Parámetros para la conversión a radiancia de imágenes Landsat 5 - TM..	55
Tabla N° 13 Valores del Estadístico de Kappa (K)	60
Tabla N° 14 Tipos de cobertura fraccional.....	62
Tabla N° 15 Bandas de salida luego del análisis de AutoMCU	64
Tabla N° 16 Información cartográfica.....	66
Tabla N° 17 Imágenes Satelitales a utilizar.....	67
Tabla N° 18 Estaciones Hidrometeorológicas	67
Tabla N° 19 Descripción del Software y sus aplicaciones	67
Tabla N° 20 Ubicación de la Subcuenca Yuracyacu.....	77
Tabla N° 21 Vías de Acceso.....	78
Tabla N° 22 Formaciones Geológicas de la Subcuenca Yuracyacu.....	80
Tabla N° 23 Geomorfología de la Subcuenca Yuracyacu.....	82
Tabla N° 24 Formaciones Ecológicas de la Subcuenca Yuracyacu	107
Tabla N° 25 Unidades de suelo de la Subcuenca Yuracyacu	109
Tabla N° 26 Población censada al 2007 por distrito	110
Tabla N° 27 Tipo de vivienda por distrito.....	110
Tabla N° 28 Tipo de establecimiento de salud - Provincia Rioja.....	111
Tabla N° 29 P.E.A según Censo 2007.....	111
Tabla N° 30 Actividades realizadas en la Subcuenca Yuracyacu	112
Tabla N° 31 Costo de Rendimiento y Producción de principales cultivos.....	112
Tabla N° 32 Estación Meteorológica Yuracyacu - Subcuenca Yuracyacu	121
Tabla N° 33 Estaciones meteorológicas de apoyo de la Subcuenca Yuracyacu	121
Tabla N° 34 Ecuaciones Regionales Mensuales de precipitación.....	132
Tabla N° 35 Estaciones con registro de temperatura media multianual.....	133
Tabla N° 36 Ecuaciones Regionales Mensuales de temperatura.....	136
Tabla N° 37 Datos considerados de las estaciones.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 La cobertura forestal y el proceso de purificación del aire.....	29
Figura N° 2 La cobertura forestal y la regulación de la temperatura	29
Figura N° 3 El Ciclo Hidrológico.....	31
Figura N° 4 Esquema de la Interceptación de la precipitación	32
Figura N° 5 Elementos de un sistema de teledetección.....	41
Figura N° 6 Sistema de teledetección pasiva	42
Figura N° 7 Sistema de Teledetección Activo	42
Figura N° 8 Onda Electromagnética.....	43
Figura N° 9 Esquema de una Onda Electromagnética	43
Figura N° 10 Clasificación del espectro electromagnético	44
Figura N° 11 Interacción Radiación y Cobertura	45
Figura N° 12 Cubierta especular y Lambertiana	45
Figura N° 13 Absorción Atmosférica.....	46
Figura N° 14 Dispersión Mie	47
Figura N° 15 Combinación 321.....	50
Figura N° 16 Combinación 432.....	50
Figura N° 17 Combinación 754.....	50
Figura N° 18 Combinación 742.....	51
Figura N° 19 Combinación 731.....	51
Figura N° 20 Procedimiento para realizar la combinación de bandas en ENVI 5.1	52
Figura N° 21 Preparación de Imágenes satelitales en CLASlite	69
Figura N° 22 Calibración de las imágenes	70
Figura N° 23 Imagen Landsat de Reflectancia del año 2001	70
Figura N° 24 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 1	71
Figura N° 25 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 2	71
Figura N° 26 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 3	72
Figura N° 27 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 4	72
Figura N° 28 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 5	72
Figura N° 29 Imagen de Cobertura Fraccional.....	73
Figura N° 30 Imagen cruda y de Cobertura Fraccional.....	73
Figura N° 31 Herramienta de Cobertura de Bosque paso 1	74
Figura N° 32 Herramienta de Cobertura de Bosque paso 2	74
Figura N° 33 Rectángulo Equivalente Subcuenca Yuracyacu	88
Figura N° 34 Red Hídrica de la Subcuenca Yuracyacu	103
Figura N° 35 Moena	105
Figura N° 36 Asociación de Musgos y Líquenes	106
Figura N° 37 Imagen de Reflectancia e Imagen Cruda.....	113
Figura N° 38 Reflectancia y Cobertura Fraccional	114
Figura N° 39 Clasificación a nivel de Subpixel	114
Figura N° 40 Cobertura fraccional y Cobertura boscosa.....	115
Figura N° 41 Variación de la cobertura boscosa - Subcuenca Yuracyacu	116
Figura N° 42 Imágenes de la deforestación del bosque tropical en la Subcuenca Yuracyacu.....	120

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1 Formaciones Litoestratigráficas de la Subcuenca Yuracyacu	80
Gráfico N° 2 Curva Hipsométrica y Polígono de Frecuencias de la Subcuenca Yuracyacu	92
Gráfico N° 3 Curva Hipsométrica y Polígono de Frecuencias de la subcuenca de recepción	93
Gráfico N° 4 Relación Numero de ríos vs Longitud – Subcuenca Yuracyacu.....	97
Gráfico N° 5 Relación número de ríos vs longitud – subcuenca de recepción	98
Gráfico N° 6 Perfil Longitudinal del río Yuracyacu	102
Gráfico N° 7 Unidades de suelo de la Subcuenca Yuracyacu	109
Gráfico N° 7 Evolución de las Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu 1989 - 2010..	116
Gráfico N° 8 Correlación del área boscosa de la Subcuenca Yuracyacu en el tiempo	117
Gráfico N° 9 Doble acumulación - Estación Naranjillo.....	123
Gráfico N° 10 Doble Acumulación - Estación Chachapoyas.....	124
Gráfico N° 11 Doble Acumulación - Estación Rioja	124
Gráfico N° 12 Altitud - Precipitación.....	125
Gráfico N° 13 Altitud - Temperatura Subcuenca Yuracyacu.....	133
Gráfico N° 14 Relación Coutagne - Turc	138
Gráfico N° 15 Métodos de Evapotranspiración.....	140
Gráfico N° 16 Relación Altitud - Evapotranspiración	142
Gráfico N° 17 Relación Altitud - Escorrentía	144
Gráfico N° 19 Rendimiento Hídrico Subcuenca Yuracyacu	145
Gráfico N° 19 Evolución de la Cobertura Boscosa	146
Gráfico N° 20 Escorrentía Subcuenca Yuracyacu (1998 - 2010).....	148
Gráfico N° 21 Relación precipitación - escorrentía	148
Gráfico N° 23 Relación Cobertura Boscosa - Rendimiento Hídrico.....	149
Gráfico N° 24 Relación Cobertura Boscosa - Rendimiento Hídrico (2004 – 2008)....	150

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación N° 1 Balance Hídrico	31
Ecuación N° 2 Simplificación del Balance Hídrico.....	32
Ecuación N° 3 Intercepción de lluvia	32
Ecuación N° 4 Evapotranspiración por Turc	33
Ecuación N° 5 Parámetro Heliotérmico.....	33
Ecuación N° 6 Evapotranspiración Coutagne.....	34
Ecuación N° 7 Parámetro λ	34
Ecuación N° 8 Índice térmico mensual.....	34
Ecuación N° 9 Índice térmico anual	34
Ecuación N° 10 Evapotranspiración Thornthwaite.....	34
Ecuación N° 11 Parámetro “a”	35
Ecuación N° 12 Parámetro “c”	35
Ecuación N° 13 Rendimiento hídrico	35
Ecuación N° 14 Modelo 1 – Pares de Cuencas.....	37
Ecuación N° 15 Modelo 2 – Pares de Cuencas.....	37
Ecuación N° 16 Tasa “q” de deforestación.....	40
Ecuación N° 17 Tasa “r” de deforestación	40
Ecuación N° 18 Radiancia espectral	54
Ecuación N° 19 Factor de Ganancia	54
Ecuación N° 20 Factor de Sesgo.....	54
Ecuación N° 21 Reflectancia T.O.A.	55
Ecuación N° 22 NDVI.....	57
Ecuación N° 23 Tamaño de la muestra.....	58
Ecuación N° 24 Fiabilidad Global	59
Ecuación N° 25 Índice Kappa.....	59
Ecuación N° 26 Firma espectral del pixel.....	68
Ecuación N° 27 Precipitación media	76
Ecuación N° 28 Escorrentía	76
Ecuación N° 29 Índice de Gravelius	84
Ecuación N° 30 Ancho medio	85
Ecuación N° 31 Factor forma	85
Ecuación N° 32 Lado mayor rectángulo equivalente	86
Ecuación N° 33 Lado menor rectángulo equivalente	86
Ecuación N° 34 Altitud media	89
Ecuación N° 35 Índice de Pendiente.....	94
Ecuación N° 36 Pendiente media del cauce principal	96
Ecuación N° 37 Pendiente media de la cuenca.....	96
Ecuación N° 38 Densidad de drenaje	98
Ecuación N° 39 Frecuencia de ríos.....	98
Ecuación N° 40 Extensión media de escurrimiento superficial.....	99
Ecuación N° 41 Coeficiente de Torrencialidad	99
Ecuación N° 42 Patrón de precipitación	122
Ecuación N° 43 Modelo regional de precipitación	125
Ecuación N° 44 Cálculo del error	125

Ecuación N° 45 Precipitación areal	126
Ecuación N° 46 Precipitación por curvas de nivel.....	127
Ecuación N° 47 Precipitación por rangos de altitud	128
Ecuación N° 48 Factor adimensional anual	129
Ecuación N° 49 Factor adimensional mensual	129
Ecuación N° 50 Precipitación total anual generada.....	130
Ecuación N° 51 Precipitación mensual generada	131
Ecuación N° 52 Modelo regional de temperatura.....	133
Ecuación N° 53 Temperatura media	134
Ecuación N° 54 Modelo regional de Evapotranspiración.....	142
Ecuación N° 54 Modelo regional de Escorrentía.....	144

INTRODUCCIÓN

La pérdida de bosques se ha convertido en una preocupación a nivel mundial, ya que este ecosistema regula el clima, mitiga el efecto de los gases de efecto invernadero producido por los gases contaminantes de la atmósfera, alberga a la biodiversidad del planeta, provee de alimentos, atenúa los problemas de erosión, que afecta a las poblaciones ubicadas en zonas bajas.

Gracias a su ubicación geográfica el Perú es el 4to país de bosques tropicales en el mundo y el 9no con mayor superficie forestal, abarcando el 60% del territorio nacional. Sin embargo, La Amazonia Peruana es una de las principales regiones en peligro de deforestación, con expectativas de presentar mayor deforestación y degradación de los bosques a nivel mundial para el año 2030. El Perú cuenta con la mayor disponibilidad de agua dulce en América Latina (74 530 millones de metros cúbicos), en donde el 97% de esta agua, se encuentra en la Amazonía, por lo tanto, sin bosques, no habría ríos. Los bosques, en tanto afectan de manera particular a procesos hidrológicos (intercepción de lluvia, infiltración, escorrentía, evapotranspiración, movimiento de agua en el suelo, entre otros), se espera tengan una marcada influencia en el rendimiento de agua de las cuencas hidrográficas la cual dependerá a su vez de los tipos y características de cada cobertura boscosa presente. Al respecto, la investigación en cuanto a hidrología de bosques en el Perú puede considerarse exiguo, donde el impacto de los bosques sobre el rendimiento de agua es una de las interacciones menos comprendidas.

Con la finalidad de detectar el efecto que posee la cobertura de bosque en la regulación hídrica de la Subcuenca Yuracyacu, se inició con el estudio de la cobertura boscosa en la subcuenca mediante técnicas de teledetección utilizando CLASlite, el cual fue proporcionado por el instituto de investigación CARNEGIE de la Universidad de Stanford, para posteriormente cuantificar el rendimiento hídrico mediante el estudio de la relación precipitación – escorrentía y el balance hídrico de la Subcuenca Yuracyacu. El presente trabajo de investigación no pretende discriminar los tipos de cobertura boscosa en la subcuenca, abarca el estudio de la cobertura de bosque en la subcuenca enfatizado en su evaluación hidrológica, contribuyendo al entendimiento de la relación hidrológica Bosque – agua.

CAPÍTULO I

ASPECTOS METODOLÓGICOS

1.1. Antecedentes

El cambio climático, es un problema global donde paradójicamente, el responsable y el afectado es el hombre. En ese contexto, los bosques tropicales de la cuenca amazónica poseen un rol importante en la reducción de este problema, ya que cumplen la función de ser sumideros de carbono y a su vez son responsables que el Perú ocupe el 97% de la disponibilidad de agua dulce en América latina. Sin embargo, la preocupación por la deforestación de los bosques es alarmante, debido a ello se han desarrollado varios estudios, sobre los cuales está basada esta investigación.

1.1.1. Nacionales

- (Mendoza Chichipe, Salas López, & Barboza Castillo, 2017), realizaron la investigación titulada *Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú)*, en la cual se determinaron los cambios en la cobertura de bosques a causa de la deforestación en los años 1987 – 2016 utilizando cuatro (4) imágenes satelitales Landsat de los sensores TM y OLI (1989, 1998, 2007 y 2016). La obtención de cobertura y usos del suelo se realizó mediante la clasificación basada en objetos, de la cual se obtuvieron cinco (5) representaciones de cobertura. En la validación temática se obtuvo una exactitud global de 85,2 % y un índice de kappa de 0,763 que indica una considerable precisión en la clasificación. Asimismo, se encontró una alta deforestación en la temporada 1989-1998, con una tasa de 262,7 ha/año; y, para las temporadas 1998-2007 y 2007-2016, las tasas de deforestación descendieron a 34,8 ha/año y 58,2 ha/año, respectivamente.
- (Gutierrez Paredes, 2013), en su tesis *Monitoreo de la Deforestación del departamento de Ucayali periodo 2005 – 2009*, se cuantificó el monitoreo del avance de la deforestación en los bosques del departamento de Ucayali empleando imágenes de satélite Landsat TM y ETM y los sistemas de información geográfica. Los resultados al año 2005 y 2009 fueron de 610 650.38 y 737 213.46 ha respectivamente. Se concluyó que el área de estudio presentó una superficie anual deforestada de aproximadamente 31 640.77 ha, de las cuales 5.81% le corresponde al año 2005 y 7.01% al año 2009 de una superficie total de 10 512 090.78 ha. Además, se encontró una tasa de deforestación para dicho periodo de

0.30%. Además, se encontró -para el periodo de estudio- una deforestación total de 79 723.01 ha de bosques en la provincia Alto Amazonas, que representa el 4.07% de su superficie total y un incremento de la deforestación para todo el periodo de 75 196.30 ha.

- (Laurante Cajacuri, 2011), en su investigación titulada *Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María – Perú*, evaluó la deforestación en la microcuenca del río Supte (afluente del río Huallaga) en el periodo 1999 – 2005, mediante técnicas de teledetección y SIG, usando dos imágenes del satélite Landsat TM 5. Asimismo, se ubicaron áreas de entrenamiento con un GPS, que sirvieron para realizar la clasificación digital supervisada. Se determinó una tasa de deforestación de 34.8 ha por año, representando el 0,43% del área de estudio y una pérdida de 521.9 ha de bosque en 15 años. En la validación del resultado se obtuvo una Exactitud Global del 64% y un Índice de Kappa de 0,57, indicando la bondad de la clasificación.

1.1.2. Internacionales

- (De Coss Perez, 2017) en su tesis *Impacto de la Pérdida de Cobertura Vegetal en el Balance Hídrico de la Microcuenca La Unión*, determinó los impactos de la pérdida de cobertura vegetal en el balance hídrico de la microcuenca Unión, en la que utilizó imágenes Quickbird y Rapideye para evaluar la cobertura boscosa de los años 2005 y 2011 respectivamente. Se calculó el balance hídrico en temporada seca y húmeda, mediante el método de precipitación – escurrimiento y se obtuvo una precipitación media de 29,7mm y 9,4mm para los años 2005 y 2011 respectivamente. Se concluyó que la microcuenca presenta una pérdida de Cobertura Vegetal de 15,61%. Dichos cambios influyeron en la distribución del balance hídrico ya que las áreas que fueron desprovistas de vegetación poseen mayor escurrimiento superficial, menor infiltración y almacenamiento en el acuífero y que las zonas con mayor almacenamiento hídrico son donde existe cobertura forestal.
- (Montes Galbán, Ariel Insaurralde, & Edin Cuadra, 2017) en su estudio *Evolución y escenarios futuros de la deforestación en el suroeste de la provincia del Chaco, Argentina*, analizaron el proceso de deforestación en el suroeste de la provincia del Chaco, desde 1989 hasta 2010 y su proyección al año 2030, para ello utilizaron imágenes Landsat 5 TM y mediante una clasificación supervisada obtuvieron los cambios en la cobertura de suelo. Asimismo, realizaron simulaciones espaciales

con cadenas de Markov y Automata celular, cuyos resultados indicaron que en dicho periodo, el área de bosque se redujo en 70%. La simulación de cambios para los años 2020 y 2030, señalaron que, si continuaba la tendencia actual, la pérdida de superficie forestal podría alcanzar el 74,64% y el 76,28% respectivamente.

- (Bernal Nieto & Prado Uscategui, 2015) realizaron la investigación *Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías*, en la que evaluaron la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales y analizaron la cobertura mediante interpretación de fotografías aéreas de los años 1993 y 2009. Se obtuvo que el 32,46% y 67,54% cubren el área total de la cuenca para los años 1993 y 2009 respectivamente. Asimismo, con el fin de evaluar la respuesta de la cobertura en escenarios extremos, se calcularon los caudales máximos instantáneos anuales para diferentes periodos de retorno, basados en un modelo lluvia-escorrentía. Se determinó para 1993 valores de 0.5 m³/s, 5,82 m³/s y 9,56 m³/s para 5, 50 y 100 años de tiempo de retorno respectivamente; y, para el 2009, valores de 0.1 m³/s, 1,83 m³/s y 3,67m³/s (en los mismos tiempos de retorno señalados). Adicionalmente, se demostró que la variación de la cobertura vegetal influye en la generación de caudales, ya que estos se reducen en el año 2009 debido a un incremento en la cobertura vegetal.
- (Patiño, León Pelaez, Montes, & Hernandez, 2007) en su investigación *Propuesta Metodológica para comparar el efecto de diferentes coberturas vegetales en la regulación de caudales en cuencas Hidrográficas*, proponen una metodología para evaluar el efecto de diferentes coberturas (Ciprés, Bosque Natural y Pino) sobre el rendimiento hídrico, utilizando líneas de regresión e información hidrológica (precipitación y caudales) aplicada en la microcuenca de la Quebrada La Murciélagos de 563 km² de área. Se instalaron pluviómetros tanto fuera del bosque como dentro de cada cobertura y 4 vertederos permanentes sobre la red de drenaje para el monitoreo de los caudales base asociadas a las coberturas forestales. Los rendimientos hídricos obtenidos fueron 0,56 l/s/ha, 0,15 l/s/ha y 1.85 l/s/ha respectivamente. El efecto que posee la cobertura boscosa es notorio, específicamente en el bosque natural con un rendimiento hídrico menor, el cual supone un mayor consumo y retención de agua. La comparación de las líneas de regresión indica que la de menor pendiente tendrá mayor poder de regulación, manifestándose este comportamiento en el bosque natural.

- (Besteiro, 2015) en su estudio *Incidencia de la cobertura forestal sobre la dinámica del agua en la Cuenca Alta del Arroyo El Pescado*, evaluó el efecto que genera la masa forestal en las variables del ciclo hidrológico, así como sus consecuencias en el manejo de la cuenca alta del Arroyo El Pescado, utilizando información hidrometeorológica del área en estudio y cartografía digital. Los resultados obtenidos indicaron que las forestaciones actúan principalmente aumentando la intercepción del agua de lluvia y disminuyendo la lámina de escurrimiento, resultandos secundarios o de menor magnitud los efectos sobre los componentes de evapotranspiración e infiltración. En ese sentido, se concluyó que el Pino (53% de cobertura) tiende a disminuir la lámina de agua infiltrada, mientras que el eucalipto (37% de cobertura) tiende a aumentarlos; así como también producen un aumento considerable de volumen de agua evapotranspirada en periodos de excesos hídricos, atenuando el efecto degradativo de las lluvias intensas por impacto de gotas y aumento de escurrimiento, propiciando la acumulación de agua en condiciones de déficit hídrico.
- (Asner, Knaap, Balaji, & Perez-Acosta, 2009) *Automated mapping of Tropical deforestation and forest degradation: CLASlite*, monitoreó la deforestación y degradación forestal, utilizando imágenes Landsat 7 ETM+ que cubrió 900 km² de la Amazonía peruana. Los resultados indicaron que el bosque intacto está dominado por altas fracciones de vegetación fotosintética (90-98%), bajas fracciones de vegetación no fotosintética (2-10%) y el sustrato (0.01%) y que la deforestación está asociada a la expansión de la ganadería y agricultura de cultivos.
- (Silva A., 2016) *Evaluación del efecto de la variación de la superficie bajo bosque sobre el rendimiento de agua en una cuenca de lluvia mediante un modelo de simulación*. Evaluó el impacto que ocasionarían cambios en la superficie de bosque sobre el rendimiento de agua en la cuenca mediante el modelo de simulación SWAT previamente calibrado. El efecto sobre el rendimiento de agua fue menor en la medida que aumentó la superficie bajo bosque de 299 mm a 246 mm en 4 escenarios distintos, dicha relación inversa estaría explicada por el incremento de la evapotranspiración, ya que es el único componente del balance hidrológico que presenta incrementos apreciables, al aumentar la superficie de bosque. Además al aumentar la superficie de bosque, puede aumentar el consumo de agua por parte de los bosques.

1.2. Planteamiento del Problema

1.2.1. Descripción del Problema

Los bosques tropicales representan aproximadamente la mitad de la superficie boscosa del mundo y la mitad de ellos están en América Latina, principalmente en América del Sur. Sin embargo, en las últimas décadas la deforestación de estos bosques ha contribuido significativamente al aumento de emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero (IPCC, 2007).

Además, la pérdida y degradación del bosque conlleva a una reducción en los bienes y servicios ambientales que prestan, incluidos la regulación hídrica, la producción de materias primas y alimentos, el mantenimiento y conservación de la biodiversidad, el uso como hábitat y la relación cultural que muchas sociedades han establecido con los bosques alrededor del mundo (Hassan, Scholes, & Ash, 2005).

La cuenca amazónica registra altas tasas de deforestación, se ha perdido aproximadamente el 15% de bosques amazónicos desde 1970 (Soares - Filho, y otros, 2006). Sin embargo, las tasas de deforestación varían sustancialmente entre regiones, y el bosque tropical de neblina (BTN) ha sido el área más vulnerable (Bruijnzeel, Scatena, & Hamilton, 2010).

Asimismo, el Perú tiene más de 72 millones de hectáreas (Ha) de bosques con gran biodiversidad, y es el segundo país con mayor extensión forestal en América Latina, el cuarto con mayor área de bosques tropicales y está entre los 10 países del planeta con mayor extensión de masas arbóreas (FAO, 2009). No obstante, se pierden anualmente 120 782 Ha de bosques a causa de la deforestación. Entre los años 2001 y 2014 el departamento que acumuló más pérdidas de bosques fue San Martín con 359 945 Ha, (Ministerio del Ambiente, 2016).

A pesar de su importancia hidrológica y alta biodiversidad, los esfuerzos de conservación del Bosque Tropical de Neblina han sido algo reducidos, limitándose solamente al establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP), por ejemplo, el Bosque de Protección del Alto Mayo. Pero la deforestación continúa fuera de las ANP, por ejemplo, en la cuenca del Alto Mayo se ha perdido aproximadamente 10 % de Bosque Tropical de Neblina durante el período 2000 - 2012 (Hansen, y otros, 2013).

Las cuencas de neblina tropical son sistemas complejos, representan estructuras geológicas complejas, áreas de topografía variada, alta intemperización de suelos -susceptibles de erosión hídrica- y poseen cobertura vegetal y climatología variada. Siendo que la

deforestación afecta severamente los procesos hidrológicos locales y regionales en su calidad y cantidad (Neary, Ice, & Jackson, 2009).

La deforestación para uso agrícola y ganadera cambia estas condiciones del suelo forestal, los cuales generalmente resultan elevando las tasas de escorrentía superficial (Croke & Hairsine, 2006; Creed et al. 2011) citado en (Gonzales Inca & Llanos López, 2015, pág. 3).

Hamilton y King, 1983; Bruijnzeel, 1990; citados en (FAO, 2016) afirman que la eliminación parcial o completa de la cubierta arbórea aumenta el total del caudal fluvial que llega a una zona de captación, debido en gran medida a la disminución de la evapotranspiración de los árboles, que funcionan como “bombas de agua” profundamente arraigadas aumentando así el rendimiento hídrico pudiendo este presentar problemas en la estación húmeda, cuando el aumento del caudal amenaza con posibles inundaciones, problemas de erosión, etc.

En tal sentido, para evaluar la problemática de la cobertura boscosa y la influencia en su regulación hídrica, se iniciará con el estudio de la cobertura boscosa, utilizando herramientas de la teledetección, el cual permitirá determinar el área boscosa y posteriormente realizar el estudio de rendimiento hídrico con las mediciones de caudales en la Subcuenca Yuracyacu, con la finalidad de conocer cómo influye la cobertura boscosa en la regulación hídrica de la subcuenca.

1.2.2. Formulación del Problema

1.2.2.1. Problema Principal

- ¿En qué medida los cambios en la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu modifican el rendimiento hídrico?

1.2.2.2. Problemas Secundarios

- ¿Qué cambios han ocurrido en la cobertura boscosa de la Subcuenca Yuracyacu?
- ¿Cuál es la tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu?
- ¿De qué manera se puede determinar el rendimiento hídrico de la subcuenca y su relación con los cambios en su cobertura boscosa?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Conocer los cambios en la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu y la influencia en su regulación hídrica.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la Subcuenca Yuracyacu mediante las técnicas de SIG y Teledetección a fin de determinar los cambios ocurridos en la cobertura boscosa para el periodo 1989 - 2010.
- Determinar la tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu para el periodo 1989 – 2010.
- Calcular el rendimiento hídrico de la Subcuenca Yuracyacu y su relación con los cambios en la cobertura boscosa.

1.4. Hipótesis

La disminución de la cobertura boscosa de la Subcuenca Yuracyacu influirá desfavorablemente en el rendimiento hídrico de la subcuenca.

1.5. Población y Muestra

1.5.1. Población

Se considera como población las nueve (9) subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Mayo, comprendida entre las coordenadas geográficas 76°45' y 77°43' de longitud Oeste y 5°23' y 6°06' de latitud Sur.

1.5.2. Muestra

El área de estudio se encuentra situada en la región hidrográfica del río Yuracyacu, desarrollada sobre la cuenca del río Mayo, siendo su afluente por la margen derecha. El área de la Subcuenca Yuracyacu abarca una extensión de 220.8 km² aproximadamente. Políticamente se encuentra ubicada en el departamento de San Martín, provincia de Rioja.

1.6. Variables

Se definirán las siguientes variables independientes y dependientes según corresponda al objetivo de la investigación.

Tabla N° 1 Variables de la Investigación

Categoría	Variables		Indicador
	Dependientes	Independientes	
Cobertura boscosa de la subcuenca	Bosques y no bosque	Áreas boscosas	km ²
		Áreas no boscosas	km ²
	Cobertura Fraccional de bosque	Vegetación fotosintética	µm
		Vegetación no fotosintética	µm
Hidrología de la subcuenca	Rendimiento Hídrico	Sustrato	µm
		Precipitación	mm
		Escorrentía	mm

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Justificación

La cobertura boscosa, regula el clima y los recursos hídricos, así como también sirve de hábitat para las plantas y los animales.

Asimismo, se estima que más del 60% de toda el agua del planeta se capta y almacena en áreas de bosque por lo que son considerados ecosistemas estratégicos para asegurar el Bienestar de las Poblaciones (Victorino A., 2012).

En ese sentido, la mayor disponibilidad hídrica de agua dulce la posee el Perú, equivalentes a 74530 mmc por persona al año (97% de toda Latinoamérica). El aumento del rendimiento parece conveniente cuando el caudal es escaso, durante el estiaje, pero puede presentar problemas en la estación húmeda, cuando el aumento del caudal amenaza con posibles inundaciones.

En este contexto, la presente investigación pretende establecer si la eliminación de la cobertura boscosa ha influido en los caudales, mediante el estudio del rendimiento hídrico, en la Subcuenca Yuracyacu, ubicado en la provincia de Rioja. Esto se realiza a partir del análisis dos variables hidrológicas: caudales y precipitaciones.

1.8. Importancia

La presente investigación aportará al entendimiento de la función de la regulación hidrológica que cumple la cobertura boscosa en cuencas hidrográficas boscosas, como es su rendimiento hídrico y que se puede utilizar como una herramienta para evaluar la disponibilidad hídrica en la subcuenca. Además, los resultados del estudio permitirán comprender el efecto de la cobertura boscosa en la regulación de caudales en la Subcuenca Yuracyacu y servirá de base a las autoridades locales y regionales en la toma de decisiones para promover estudios relacionados a la conservación de los bosques y a los posibles cambios que puedan sufrir en la hidrología de la subcuenca asociados a la regulación hídrica.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Crisis de la Cobertura Boscosa

La Evaluación de los Recursos Forestales Ambientales Mundiales, señaló que el área total de bosque existente en el mundo asciende a algo más de 4000 millones de hectáreas (Ha), que corresponden al 31% de la superficie total de la tierra (Victorino A., 2012, pág. 21). Ver Tabla N° 2.

Tabla N° 2 Superficie Forestal Mundial

ID	País	Superficie (Millones de Ha)
1	Rusia	809
2	Brazil	520
3	Canadá	310
4	Estados Unidos de América	304
5	China	207
6	R.D. del Congo	154
7	Australia	149
8	Indonesia	94
9	Perú	78
10	Sudán	70
11	India	68
12	Otros	1269
Total		4032

Fuente: Adaptado de (FAO, 2010, pág. 16).

Los bosques son recursos importantes, ya que proporcionan diversos beneficios ambientales, económicos y sociales, debido a que suministran productos como madera, fibras y otros productos forestales madereros y no madereros, contribuyendo a las comunidades rurales, además de desempeñar una función importante en el mantenimiento de los valores sociales y culturales. Asimismo, protegen las cuencas hidrográficas, regulan el clima y conservan la diversidad biológica (FAO, 2012, pág. 1).

(FAO, 2009, pág. 1) menciona que los bosques influyen en la cantidad de agua disponible de las aguas subterráneas, las corrientes y las aguas superficiales al interceptar la lluvia, mediante la evaporación de la humedad superficial de la vegetación, la transpiración de la humedad del suelo, la captación del agua de la bruma y el mantenimiento de la infiltración del suelo.

Las cuencas de captación boscosas suministran una gran parte del agua que se destina a satisfacer las necesidades domésticas, agrícolas, industriales y ecológicas de las zonas “aguas arriba” y “aguas abajo” de los ríos (FAO, 2009).

Sin embargo, cada año desaparecen más de 13 millones de Ha de bosques en el mundo, debido a la sobreexplotación y la tala ilegal, la conversión a tierras agrícolas y ganaderas, la recolección insostenible de la madera, la gestión inadecuada de la tierra, la creación de asentamientos humanos, las explotaciones mineras y petrolíferas, la construcción de embalses y carreteras, las especies invasoras, los incendios forestales, los cultivos para agrocombustibles, la fragmentación de los ecosistemas y la contaminación atmosférica, afectando la vida de más 1600 millones de personas que dependen directamente de los bosques (Victorino A., 2012, pág. 22).

En 1990, el mundo tenía 4 128 millones de Ha de bosque; en 2015, esa área había disminuido a 3 999 millones de Ha. En el periodo de 1990 al 2015 se registró una pérdida neta de unos 129 millones de Ha de bosque, que representa una tasa anual de pérdida de 0,13 %, una superficie total del tamaño aproximado de Sudáfrica (FAO, 2016, pág. 3).

Los bosques capturan y almacenan agua y desempeñan una función importante en su suministro para millones de personas en el planeta; sin embargo, se estima que para el año 2025, cerca de 1 800 millones de personas vivirán en regiones de total escasez de agua y dos terceras partes de la población mundial podrían sufrir condiciones relacionadas con su escasez (Victorino A., 2012, págs. 23,24).

Además, sin bosques, existiría un desequilibrio entre la liberación de oxígeno (O₂) y la captura de dióxido de carbono (CO₂), haciendo la disponibilidad de O₂ mucho menor, aumentando severamente los niveles de gases de efecto invernadero, agravando el problema del cambio climático.

(FAO, 2009, pág. 4) señala que se producirá un impacto en la hidrología y recursos hídricos manifestándose en catástrofes, como inundaciones, sequías y deslaves, en los cuales puede influir la cubierta forestal.

Es imprescindible entonces, diseñar y ejecutar estrategias del manejo del bosque, que aumenten su capacidad de capturar o mantener el carbono almacenado, ayuden a mitigar los cambios climáticos y garanticen el suministro de servicios tan importantes para nuestra supervivencia como el agua (Victorino A., 2012, pág. 23).

2.2. Bosques

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CNUCC), señala que: “el bosque es la superficie mínima de tierras de entre 0,05 y 1 Ha, con una cubierta de copa que excede del 10 al 30% y con árboles que pueden alcanzar una altura mínima de entre dos (2) y cinco (5) metros a su madurez in situ” (CNUCC, 2002, pág. 61).

Por la ubicación geográfica del Perú (cercanía a la línea ecuatorial), la totalidad de los bosques peruanos son tropicales, siendo que es el cuarto país en extensión de bosques tropicales en el mundo. Los bosques amazónicos (que se desarrollan alrededor del río Amazonas en América del Sur), son los bosques tropicales más extensos del planeta. (Ministerio del Ambiente, 2017).

En el Perú, estos bosques constituyen el ecosistema de mayor superficie, con 73 280 424 Ha, que representan el 57,3% del territorio nacional. Se clasifican de manera general en bosques húmedos amazónicos (cubren el 53,9% del país), bosques secos de la costa (cubren el 3,2% del país) y bosques húmedos relictos andinos (cubren el 0,2% del país) (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 29).

Además, mantiene el décimo puesto en el ranking mundial de áreas con mayor densidad forestal, de los cuales, más de la mitad del país, aproximadamente 260 millas cuadradas (673,109 km²), se encuentra cubierta por bosques. Esto hace que el Perú sea considerado uno de los diez (10) países con mayor diversidad en el mundo, con más de 330 000 personas que dependen directamente de los bosques nacionales para su subsistencia y muchos más que dependen de los numerosos productos y servicios ecosistémicos provistos por estos bosques (Smith & Schwartz, 2015, pág. 2).

2.2.1. Tipos de Bosques

La clasificación de los bosques varía, según sea su origen, composición, diámetro de sus árboles, el clima en el que crecen, su función e incluso su edad.

Según el Mapa de Cobertura Vegetal 2015 – MINAM, el Perú tiene cuarenta y dos (42) tipos de bosques, agrupados en tres (3) grandes bloques. Ver Tabla N° 3.

Tabla N° 3 Superficie y porcentajes de bosques naturales en el Perú

Bosques Naturales	Superficie		
	Hectáreas (Ha)	% del País	% del total de bosques
Bosques húmedos de la Amazonía	68 961 682	53,9	94,1
Bosques húmedos relictos andinos	211 625	0,2	0,3
Bosques secos costeros y andinos	4 107 118	3,2	5,6
Total	73 280 424	57,3	100,0

Fuente: Adaptado de (Ministerio del Ambiente, 2016).

Según (Ministerio del Ambiente, 2011, pág. 31), en el Perú, la cobertura boscosa es muy variada, según las características comunes entre ellos y las especies animales y vegetales distintivas en cada zona, se diferencian seis (6) grandes tipos de bosques:

- Bosques de Selva baja.
- Bosques de Selva Alta.
- Bosques montanos occidentales del norte.
- Bosques andinos.
- Bosques secos del Marañón.
- Bosques secos del norte.

A continuación, en la Tabla N° 4, se detallan algunas de sus características:

Tabla N° 4 Tipos de Bosques en el Perú y sus principales características

Tipo	Ubicación	Extensión (Hectáreas)	Altitud
Bosque de Selva Baja	Loreto, Ucayali, Cusco y Madre de Dios.	53 432,618 Ha	No superan los 800 m.s.n.m.
Bosques de Selva Alta	Ocupan la Llanura Aluvial Amazónica abarcando los departamentos de Amazonas, Loreto, San Martín, Ucayali, Huánuco, Pasco y Junín.	15 736,03 Ha	1000 – 3000 m.s.n.m.
Bosques Andinos	Huánuco, Junín, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, parte de Cajamarca y Cusco.	385,005 Ha	Entre los 2000 a 4000 m.s.n.m.
Bosques Secos del Marañón	Se ubican a lo largo de la cuenca del río Marañón entre los departamentos de Ancash, Huánuco, La Libertad, Amazonas, parte de Piura y Cajamarca.	372,915 Ha	600 m.s.n.m. – 1200 m.s.n.m.
Bosques Secos del Norte	Se extienden a lo largo de la costa norte del Perú, por los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque y pequeñas zonas de Cajamarca y la Libertad.	3 235,012 Ha	100 m.s.n.m. hasta 800 m.s.n.m.
Bosques Montanos Occidentales del norte	Se encuentran en los departamentos de Piura y Cajamarca.	133,378 Ha	Oscilan entre los 1800 a 3800 m.s.n.m.

Fuente: Adaptado de “El Perú de los Bosques” – Ministerio del Ambiente, 2011.

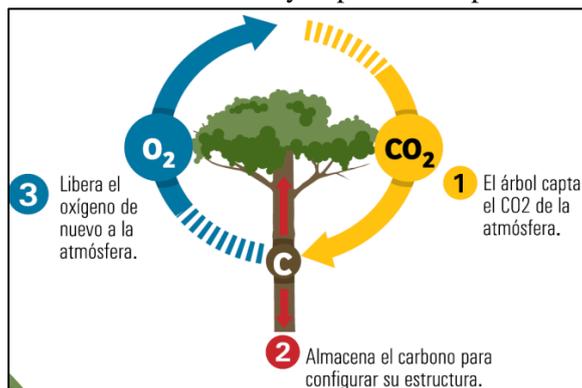
2.2.1.1. Funciones Ambientales de los Bosques

La cubierta forestal bajo condiciones ecológicas naturales, poseen las siguientes funciones ambientales:

a. Purificación del aire

A través de la fotosíntesis y la respiración, los árboles reciclan el carbono atmosférico y capturan CO₂ para liberar O₂, lo que los convierte en los pulmones del planeta. Ver Figura N° 1.

Figura N° 1 La cobertura forestal y el proceso de purificación del aire



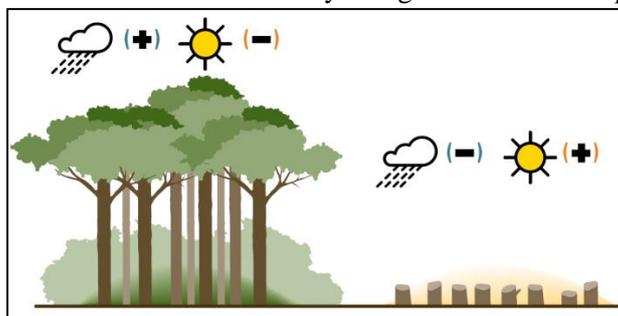
Fuente: Ministerio del Ambiente, 2011.

Según el Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), cada hectárea de bosque tropical amazónico alberga 380 toneladas de CO₂ (Ministerio del Ambiente, 2011, pág. 93).

b. Regulación del Clima

El bosque genera un ecoclima particular, en comparación con el de un sitio descubierto, dado que al interior de éste se produce una reducción de la luminosidad hasta en un 90%, disminuyendo la temperatura media anual en unos 4°C (Pizarro T., et al., 2005, p. 78). Ver Figura N° 2.

Figura N° 2 La cobertura forestal y la regulación de la temperatura



Fuente: Ministerio del Ambiente, 2011.

c. Protección de los suelos

La cubierta boscosa atenúa el viento, a la vez que sus densas raíces mantienen fijo el suelo, esta característica protege al suelo de la erosión producida por el viento y el agua, el movimiento de tierras, y en climas fríos el riesgo de avalanchas. La combinación de una menor dispersión de agua, y su penetración en las capas freáticas, el bosque ejerce un efecto de amortiguación que protege contra las inundaciones y la erosión de las riberas de los ríos (Gottle & Séne, 1997).

d. Conservación del hábitat natural y de la diversidad biológica

El bosque ofrece un hábitat a la flora y la fauna, y dependiendo de sus condiciones de salud y de la manera en que es gestionado y protegido, asegura su perpetuación mediante

el funcionamiento de los procesos ecológicos. Debido a su tamaño y diversidad estructural, se encuentran más especies animales en el bosque que en cualquier otro ecosistema. La capacidad del bosque para aportar un hábitat apropiado también depende de la composición, densidad y estructura. La composición y la estructura influyen fuertemente sobre la diversidad, mientras que la densidad puede mejorar la protección. Se admite que los bosques de especies mixtas ofrecen un mejor hábitat a la vida silvestre que las masas forestales puras. Esto debería tenerse presente cuando se considera hacer plantaciones o en la gestión y silvicultura de ecosistemas forestales profundamente modificados (Gottle & Séne, 1997).

e. Regulación Hídrica

La cubierta boscosa cumple un papel fundamental para el mantenimiento de los caudales, para el consumo agrícola y humano al ser la receptora, acumuladora y reguladora del flujo de agua en las cuencas (Ministerio del Ambiente, 2011, pág. 62).

Tal es así que, está demostrado que la eliminación parcial o completa de la cubierta arbórea acelera la descarga de agua e incrementa el riesgo de que se produzcan inundaciones durante la temporada de lluvias, y sequía en la estación seca (FAO, 2009).

2.2.2. Influencia de la Cobertura Boscosa en Cuencas Hidrográficas

(Ameghino, 1884; Pritchett, 1991; Mármol, 2006) indican que la instalación y manejo de masas forestales en una cuenca hidrográfica permite amortiguar problemas de inundación, así como también déficit hídricos, disminuyendo la erosión del suelo, por intersección de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial; mejorando la estructura del suelo forestal, su infiltración y la acumulación de agua en el mismo. Citados en (Besteiro, 2015, pág. 9).

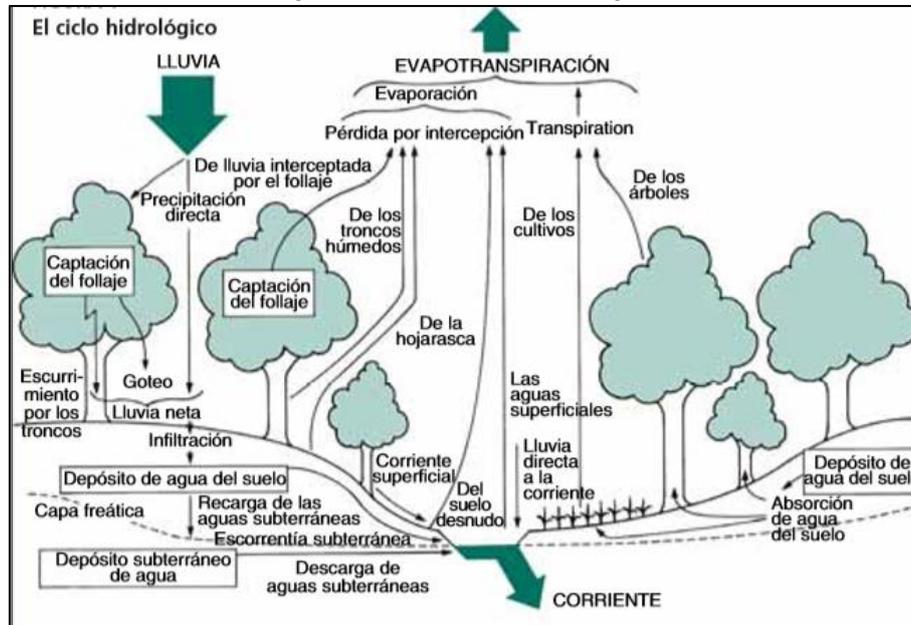
Mármol (2006) citado en (Besteiro, 2015, pág. 10) menciona que por ser los bosques una cobertura de alto consumo hídrico, se ha atendido también a otro aspecto, la influencia sobre la cantidad de agua que fluye desde las cuencas forestales, teniendo dos (2) implicancias: a) la protección contra la erosión, las crecientes e inundaciones; y, b) el rendimiento hídrico de la cuenca.

2.2.2.1. Balance Hídrico

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, no posee ni principio ni fin y sus procesos ocurren de forma continua (Chow, 1994, pág. 2).

Se le considera como un sistema, de entradas y salidas, en donde la entrada principal y más importante del sistema es la precipitación. En la Figura N° 3 se esquematizan los componentes del ciclo hidrológico.

Figura N° 3 El Ciclo Hidrológico



Fuente: (FAO, 2009, pág. 3).

La ecuación del Balance Hidrológico se deriva del axioma de Lavoisier “nada se crea ni se destruye”, esta ecuación es aplicable a cualquier unidad o región y en cualquier periodo de tiempo. Cuando la unidad de tiempo es muy grande, las variaciones por almacenamiento se vuelven despreciables, por lo que se le extrae de esta ecuación, y en ese caso, las entradas son iguales a las salidas (Custodio & Lamas, 1996) citado en (Besteiro, 2015, pág. 13).

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de Almacenamiento}$$

Los componentes principales del ciclo hidrológico en una cuenca son ilustrados por la ecuación de Balance Hídrico (Ward & Robinson, 1990) citado en (Bruijnzeel L. , 1997).

$$P = E + Q + \Delta W$$

Ecuación N° 1 Balance Hídrico

Donde:

- P : Precipitación.
- E : Evaporación.
- Q : Caudal.
- ΔW : Variación de almacenamiento.

Los valores expresados en mm de agua por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).

Por lo tanto, al ser despreciable las variaciones de almacenamiento, la ecuación puede simplificarse de la siguiente forma:

$$P - E = Q$$

Ecuación N° 2 Simplificación del Balance Hídrico

Expresándose de dicha forma el caudal producido por una cuenca, donde P es la precipitación y E es la evaporación.

A continuación, se mencionan las variables que integran el balance hidrológico:

a. Precipitación

La precipitación constituye el elemento primario del ciclo hidrológico, y es, en sí mismo, el componente que alimenta el ciclo. Se la define como el agua que llega a la superficie de la tierra, tanto en su estado líquido como sólido (Besteiro, 2015, pág. 15).

En una cuenca boscosa, la precipitación se distribuye y es importante en el balance hídrico, cuyos procesos involucrados son:

- Intercepción:

Es el proceso por el cual el agua lluvia es retenida temporalmente por las copas de los árboles y regresa a la atmósfera por evaporación. El resto de agua se redistribuye en agua que llega al suelo (precipitación interna) y la que escurre por los tallos (Et). Ver Figura N° 4.

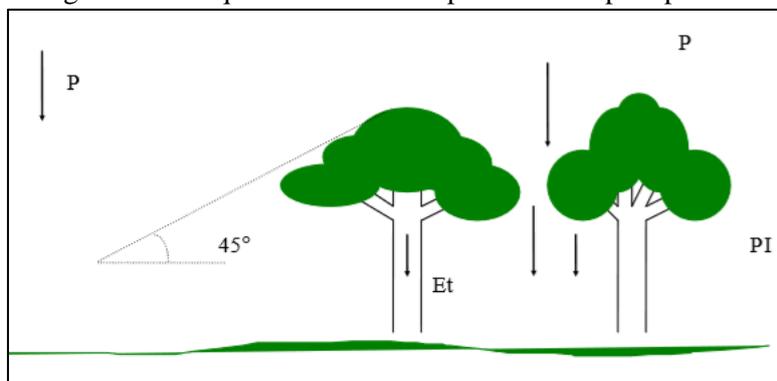
$$I = PP - (P_i + E_t)$$

Ecuación N° 3 Intercepción de lluvia

Donde:

- I : Pérdida por intercepción (mm)
- PP : Precipitación (mm)
- Pi : Precipitación interna (mm)
- Et : Escurrimiento por el tallo (mm)

Figura N° 4 Esquema de la Intercepción de la precipitación



Fuente: (Gonzaga Giraldo, 2002, pág. 61).

Existen modelos para determinar la interceptación de la lluvia por la cobertura boscosa, entre ellos se encuentran el Modelo Analítico de Gash, El modelo Rutter y modelos lineales simples basados en regresiones.

b. Evaporación

La evaporación es un proceso físico en el cual el agua es devuelta a la atmósfera en forma de vapor, esta proviene de los océanos, mares, ríos, y otras masas de agua; además del agua interceptada por la vegetación, siendo este proceso físico-biológico denominándose transpiración.

Ambos procesos ocurren de manera simultánea e independiente, bajo el concepto de evapotranspiración (ETP), el cual se define como el agua que vuelve a la atmósfera desde un suelo cuya superficie se encuentra completamente cubierta por vegetación y carece de limitaciones de humedad (Besteiro, 2015, pág. 16).

En cuencas boscosas, las mayores pérdidas de agua se presentan por la interceptación de la lluvia y su posterior evaporación, dada la alta velocidad del viento generalmente en altitudes altas (Tobón, 2009, pág. 21).

Debido a que los métodos de medición directa de la evapotranspiración resulta complicada, ya sea por los costos del instrumental o lo laboriosa que es su implementación a campo, es común recurrir a métodos indirectos o empíricos, tales como:

- Thornthwaite y Matter.
- Penman.
- Blaney y Criddle.
- Turc.
- Hargreaves.

Estos métodos utilizan principalmente datos de precipitación y temperatura media mensual.

▪ Fórmula de Turc (1995)

Utiliza como parámetros la precipitación y la temperatura. Su expresión es:

$$ET = \frac{P}{[0,9 + (P/F)^2]^{1/2}}$$

Ecuación N° 4 Evapotranspiración por Turc

Donde:

$$F = 300 + 25 \times T + 0,05 \times T^3$$

Ecuación N° 5 Parámetro Heliotérmico

Siendo:

ET : evapotranspiración media (mm).
F : parámetro heliotérmico.
P : precipitación media (mm).
T : temperatura media (°C).

▪ **Fórmula de Coutagne**

Pérdidas por evapotranspiración también pueden ser estimadas mediante el procedimiento de Coutagne, basado en la precipitación y la temperatura del lugar.

Su expresión está dada por:

$$E = P - \lambda x P^2$$

Ecuación N° 6 Evapotranspiración Coutagne

Donde:

$$\lambda = \frac{1}{0,8+0,14 x T}$$

Ecuación N° 7 Parámetro λ

Siendo:

E : evapotranspiración media (m)
P : precipitación media (m)
T : temperatura media (°C).

▪ **Fórmula de Thornthwaite**

Este procedimiento consiste en la estimación para cada mes de la evapotranspiración y a partir de su suma calcular el valor anual. Está en función de la temperatura media anual y la latitud, que implícitamente introduce la duración teórica de la insolación. El método consta de los siguientes pasos:

- Cálculo del índice térmico “i” de cada mes:

$$i(t) = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

Ecuación N° 8 Índice térmico mensual

Siendo

T : temperatura media mensual en °C.

- Cálculo del índice anual:

$$I = \sum_{t=1}^{12} i(t)$$

Ecuación N° 9 Índice térmico anual

- Cálculo de la evapotranspiración mensual:

$$ET_m = c x T^a$$

Ecuación N° 10 Evapotranspiración Thornthwaite

Siendo:

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 \times x - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,492$$

Ecuación N° 11 Parámetro "a"

$$c = 16 \times \left[\frac{10}{I} \right]$$

Ecuación N° 12 Parámetro "c"

Luego, la evapotranspiración total anual se calcula sumando los valores calculados para cada mes.

c. Escurrimiento

(Aparicio Mijares, 1992, pág. 27) indica que el escurrimiento es el agua que proviene de la precipitación que circula sobre o bajo de la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Por su parte, (Meunier M., 1996) indica que, al precisar resultados de las mediciones de los efectos del bosque sobre la escorrentía, es necesario precisar tres (3) tipos de datos:

- Escala temporal (anual, mensual, estacional o episodio pluvial).
- Escala espacial (parcelas de bosques, cuenca hidrográfica).
- Tipo de acción que se mide (efecto del bosque únicamente sobre la lluvia, o la acción del bosque sobre la escorrentía, que comprende la suma de 2 clases de efectos: en primer lugar, la acción sobre las lluvias y posteriormente la acción a través del suelo).

En un suelo sin vegetación, la escorrentía será fundamentalmente superficial, con una infiltración mínima. Por consiguiente, el funcionamiento hidrológico de una cuenca con una elevada presencia de minerales puede estudiarse considerando que se produce sobre todo escorrentía superficial, en cambio en una cuenca con cubierta vegetal, la escorrentía superficial es poca o nula comparada con la infiltración, el cual a su vez dependerá de las condiciones del suelo y de la geología del área.

2.2.2.2. Rendimiento Hídrico

El rendimiento hídrico se refiere al caudal específico y se utiliza para comparar el régimen hidrológico de las cuencas. Se expresa en $m^3/seg./Km^2$ o $lt/seg./ha$. Es una medida de volumen de escorrentía directa, la cantidad de agua disponible para el consumo y uso múltiple.

Siendo:

$$Lámina_{escurrida}(mm) = \frac{Volumen\ escurrido}{Área\ drenada}$$

Ecuación N° 13 Rendimiento hídrico

La eliminación parcial o completa de la cobertura forestal aumenta el total del caudal fluvial que llega a la zona de captación, debido en gran medida a la disminución de la evapotranspiración de los árboles (Hamilton & King, 1983; Bruijnzeel, 1990) citado en (FAO, 2009, pág. 7). Así, los efectos en el caudal serán más notorios conforme aumente la cantidad de árboles eliminados.

El aumento del rendimiento hídrico parece conveniente cuando el caudal es escaso, durante el estiaje, pero puede presentar problemas en la estación húmeda, cuando el aumento del caudal amenaza con posibles inundaciones (FAO, 2009, pág. 7).

Los efectos del caudal, se perciben debido a varios factores:

- a. Duración e Intensidad de lluvias.
- b. Morfometría de la cuenca
- c. Tamaño de la cuenca.

(Gonzaga Giraldo, 2002, pág. 159) indica que para detectar los efectos del bosque sobre las características del flujo o caudal, normalmente se desarrollan tres (3) operaciones: (i) calibración de la cuenca, (ii) tratamiento de la cuenca; y, (iii) análisis de los datos resultantes.

i. Calibración

Significa determinar la relación entre las características del caudal y las otras variables, calibrando la cuenca con datos climáticos. Generalmente se utilizan pluviómetros, pluviógrafos, y una estación hidrológica (Reigner, 1964) citado en (Gonzaga Giraldo, 2002, pág. 159).

ii. Tratamiento

Significa evaluar la cobertura boscosa, es decir los cambios en su cobertura, con la finalidad de evaluar el caudal de la cuenca en estudio.

(Hewlett, 1982) citado en (Gonzaga Giraldo, 2002, pág. 159) menciona un método denominado de cuencas pares o pareadas.

iii. Pares de cuencas o cuencas pareadas

Es la selección de dos (2) cuencas comparables, donde se miden las variables hidrológicas de interés, obviando las influencias del clima o de la precipitación durante un período llamado de calibración; éste puede variar de dos (2) a cinco (5) años; en una segunda fase se entra al período de tratamiento; la cuenca que se va a tratar es sometida a una modificación del porcentaje de cobertura vegetal.

El método se basa en la alta correlación que puede existir entre la descarga anual de la cuenca X y la descarga anual de la cuenca Y, en condiciones de misma cobertura boscosa.

Q_x : Caudal de la cuenca X.

Q_y : Caudal de la cuenca Y.

Además, se puede utilizar el siguiente modelo:

$$ETP = PP - Q$$

Ecuación N° 14 Modelo 1 – Pares de Cuencas

El cual genera un valor aproximado de la evapotranspiración anual (ETP)

La variación de la evapotranspiración en un periodo es:

$$\Delta ETP_x = -(Q_x - \widehat{Q}_x)$$

Ecuación N° 15 Modelo 2 – Pares de Cuencas

ΔETP_x : Cambio de evapotranspiración en la cuenca X (que posee cambios en su cobertura).

Q_x : Caudal de la cuenca en estudio.

\widehat{Q}_x : Caudal estimado por el modelo de regresión lineal.

2.2.2.3. Caudales Máximos

La sustitución o eliminación de una cubierta vegetal, altera de la misma forma a las reservas de agua como a los caudales punta o máximos, especialmente en los meses de verano, ya que durante estos meses, dichos caudales no se encuentran influenciados por las precipitaciones, sino que responden mas bien a la existencia de reservas de agua (Pizarro T., y otros, 2005, pág. 79).

Aunque los bosques pueden contribuir a retrasar y reducir localmente los caudales máximos de las inundaciones, estos no pueden impedir las grandes inundaciones catastróficas, comúnmente causadas por los fenómenos meteorológicos extremos (FAO Y CIRFOR, 2005) citado en (FAO, 2009, pág. 9).

Sin embargo, con una mínima disturbación del suelo, volúmenes del caudal y tasas del caudal pico, pueden incrementarse, después de la remoción del bosque. Esto se debe a que la reducción de la evapotranspiración hará que los suelos sean más húmedos, lo cual, a su vez, los hará menos capaces de acomodar la precipitación adicional. Además, esta humedad extra mantendrá una extensa faja de saturación a través de la corriente, el cual producirá un gran volumen de rendimiento hídrico de la escorrentía de la tormenta (Bruijnzeel L. , 1997).

2.2.3. Deforestación

(Smith & Schwartz, 2015, pág. 5) señala que la deforestación es la conversión de bosque a otro tipo de uso territorial o la reducción significativa a largo plazo de la cubierta

forestal. Esto incluye la conversión del bosque natural a plantaciones de árboles, agricultura, pastizales, reservas de agua y áreas urbanas; y, excluye áreas para talar donde el bosque es manejado para regenerarse naturalmente o con la ayuda de medidas de silvicultura.

De la Amazonia Peruana, la región San Martín presenta una elevada tasa de deforestación. Este problema se viene acentuando desde la década de los años 60, así lo manifiesta el estudio presentado por APECO en 1995, en la que se indica que la deforestación para 1963 – 1987 fue de 318 151 Ha a 1 296 068 Ha (Laínez Guerrero, 2006, pág. 14).

Tabla N° 5 Proceso de Deforestación en San Martín 1960 - 1980

Departamento	Década 60	Década 80	Promedio Ha/año
San Martín	318 150	1 296,068	40,7

Fuente: (Laínez Guerrero, 2006).

Para el periodo 2010 – 2014, los resultados indican que la deforestación acumulada en el departamento fue 97 200,58 Ha, siendo la superficie deforestada para el periodo 2010 – 2011 igual a 27 180,2 Ha, en 2011 – 2013 igual a 21 541,9 Ha y en el periodo 2013 – 2014 se calculó una superficie deforestada de 48 478,48 Ha.

Tabla N° 6 Superficie deforestada San Martín 2010 - 2014

Departamento	Superficie deforestada por periodo			Def. Acum. 2010 – 2014 (Ha)	Tasa def. 2010 - 2014
	2010 - 2011	2011 - 2013	2013 - 2014		
San Martín	27 180,2	21 541,9	48 478,48	97 200,58	24 300,15

Fuente: Adaptado de (Ministerio del Ambiente, 2015).

2.2.3.1. Impacto en el ambiente

La calidad de las aguas en la parte baja se ve afectada debido a la gran cantidad de sedimentos que puede contener el río al no poseer una cubierta forestal en las partes altas. Estos sedimentos son producto del desprendimiento del material orgánico y suelo fragmentado debido principalmente a la erosión hídrica. Es el caso particular, la cobertura boscosa actúa como un filtro superficial.

Además, (Gonzaga Giraldo, 2002, pág. 135) indica que los bosques pueden reducir los problemas de contaminación agrícola en una cuenca, ya que la vegetación actúa disminuyendo la concentración de nitratos en el flujo del río, proveniente de las actividades agrícolas.

2.2.3.2. Impacto en la biodiversidad

(Laínez Guerrero, 2006, pág. 24) señala que se reduce la población de la flora y fauna, así como de comunidades florísticas, generándose la desaparición de especies, entre ellas endémica, así como de los productos hidrobiológicos.

2.2.3.3. Impacto en el medio hidrológico

Los impactos son múltiples, tal como se indican a continuación:

- Erosión hídrica

Esta puede ser violenta, produciendo aluviones, huaicos, y derrumbes. Además, la erosión en cuencas a causa de la deforestación produce pérdidas de fertilidad del suelo y acarrea la acumulación de sedimentos, lo cual impacta en el lecho de los ríos (Laínez Guerrero, 2006, pág. 24).

- Alteración del régimen fluvial

Lo que se traduce en reducción del potencial hidroenergético, potencial hidrobiológico, agrícola y para consumo humano, debido a la disminución de caudal.

2.2.3.4. Impacto en el medio ecoturístico

La destrucción de paisajes provoca la reducción del potencial turístico y recreativo; además, la deforestación de los bosques tropicales amazónicos provoca la extinción de ciertas especies que son atractivas para el turismo (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 15).

2.2.3.5. Impacto en el medio económico

Al producirse la deforestación de los bosques tropicales amazónicos, la economía se ve afectada, especialmente la de los pueblos indígenas quienes se proveen de alimentos en forma de frutos, así como productos, por ejemplo la madera, fibras, latex, resinas, gomas, entre otros que posee diversos usos en la construcción, industria y farmacia (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 14).

2.2.4. Cuantificación de áreas boscosas y deforestadas

Actualmente, el monitoreo de la cobertura boscosa tropical en la Amazonía peruana, está siendo tratada con técnicas mejoradas, a su vez se utilizan imágenes satelitales de mejor resolución con la finalidad de obtener resultados más precisos sobre la evolución temporal y dinámica de los bosques.

A pesar de los esfuerzos que se han realizado para cuantificar el proceso de la deforestación, las diferentes escalas de análisis, los distintos tiempos y superficies considerados en la mayoría dificultan la comparación de los datos obtenidos en diferentes regiones (Carnevale, N. J., Alzugaray, C., & Di Leo, N, 2007, pág. 50)

La deforestación es uno de los problemas ambientales más importantes a escala global, lo que ha llevado a que se realicen numerosos esfuerzos para cuantificarla (Gasparri, Parmuchi, Manghi, Strada, & Bono, 2004, pág. 13).

Existen métodos para calcular las áreas deforestadas, entre ellas se tienen:

- Tasa anual de cambio de la cobertura boscosa o forestal.
- Tasa anual de deforestación.

La tasa anual de deforestación se utiliza comúnmente ya que es un indicador de dicho proceso y no considera otros tipos de cambios en la cobertura boscosa, como la regeneración, fragmentación de bosques y otros (Gasparri, Parmuchi, Manghi, Strada, & Bono, 2004, pág. 13).

Esta ha sido utilizada para analizar los cambios de cobertura boscosa, pero, debido a las escalas de trabajo, los períodos de tiempo y los procedimientos aplicados no siempre permiten que los resultados de distintas investigaciones o estudios sean comparables.

La pérdida de cobertura boscosa se mide usando imágenes de satélite y análisis espacial. La tasa anual de pérdida se calcula comparando el área de cobertura boscosa de una misma área en dos (2) diferentes periodos. De acuerdo con (FAO, 1995) citado (Puyravaud, 2003, pág. 593) se calcula mediante:

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

Ecuación N° 16 Tasa “q” de deforestación

La segunda (r) es la propuesta por (Puyravaud, 2003), y es la siguiente.

$$r = \frac{1}{(t_2-t_1)} * \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

Ecuación N° 17 Tasa “r” de deforestación

Dicha fórmula, se desprende de la ley de interés compuesto. Esta se considera más intuitiva que la fórmula expresada por la FAO (Puyravaud, 2003, pág. 593).

Donde:

A_1 : Superficie de bosque al inicio del periodo.

A_2 : Superficie de bosque al final del periodo.

t_1 : Año de inicio del periodo.

t_2 : Año final del periodo.

2.3. Teledetección

La observación remota de la superficie terrestre engloba el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción del término inglés *Remote Sensing*, el cual fue ideado a inicio de los años 60 para designar cualquier medio de observación remota (fotografías aéreas, por ejemplo).

2.3.1. Bases de la Teledetección

La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen satelital, sino también su posterior tratamiento e interpretación. Una de las definiciones más

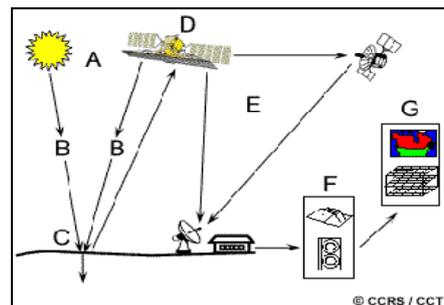
sencillas y precisas de la teledetección es la de (Chuvieco, 2010, pág. 18), definiéndola como aquella técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre, existiendo entre estos una interacción continua.

2.3.1.1. Elementos de un sistema de Teledetección:

(Chuvieco, 2010, pág. 19), considera a los siguientes elementos en un sistema de teledetección espacial. Ver Figura N° 5.

- a. Fuente de energía (A - B): Es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. La fuente de energía más importante es el sol (fuente natural), pero también puede realizarse teledetección desde fuentes artificiales.
- b. Cubierta terrestre (C): Puede estar formada por la vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, la cual recibe energía electromagnética procedente de una fuente, que como se mencionó puede ser natural (el sol) o artificial (emitida por otros sensores). Posteriormente esta energía electromagnética es reflejada y/o absorbida, esto dependerá de las características físicas de cada cubierta.
- c. Sistema Sensor (D): El sistema sensor es el encargado de captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, y enviarla al sistema de recepción.
- d. Sistema de Recepción (E - F): La información, se graba en un formato apropiado, se realizan correcciones, para posteriormente ser distribuido a los interesados.
- e. Intérprete (G): Es el encargado de convertir la data en información temática de interés, ya sea física o digital, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- f. Usuario Final: Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación.

Figura N° 5 Elementos de un sistema de teledetección



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A, pág. 5).

2.3.1.2. Formas de un sistema de Teledetección

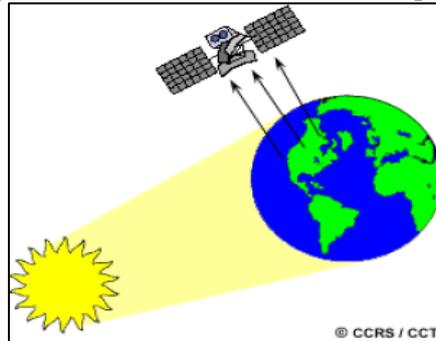
Según el tipo de fuente de energía, se pueden diferenciar dos (2) formas de Teledetección:

- a. Teledetección Pasiva:

Se denomina así, cuando la fuente de energía es natural, en este caso particular el Sol, principal fuente de energía del planeta. Este emite energía electromagnética a la cubierta

terrestre, la cual es reflejada en función del tipo de cubierta presente. Este flujo reflejado o reflexión es captado por el Sistema Sensor, que posteriormente lo transmite a las estaciones receptoras. Ver Figura N° 6.

Figura N° 6 Sistema de teledetección pasiva

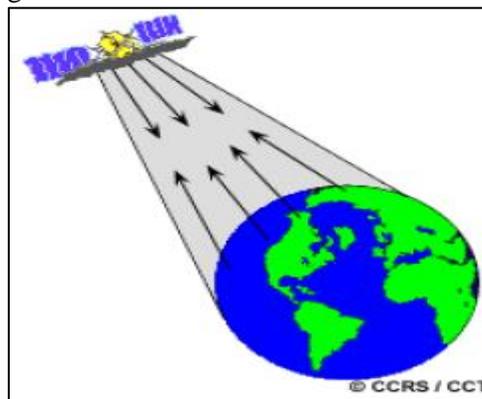


Fuente: (Natural Resources Canada, S/A, pág. 19).

b. Teledetección Activa:

Se denomina así, cuando la fuente de energía es artificial, basándose en energía emitida por las propias cubiertas (emisión), o en la que podríamos enviar desde un sensor que sea capaz de generar su propio flujo energético y emitirlo hacia la cubierta terrestre, así como de recoger posteriormente su reflexión sobre la cubierta terrestre (reflexión – emisión). En cualquiera de los dos (2) casos, este flujo energético, constituye una forma de radiación electromagnética. Las propiedades de esta radiación electromagnética se han explicado por dos (2) teorías contrapuestas, una la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell) y la otra la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Ver Figura N° 7.

Figura N° 7 Sistema de Teledetección Activo



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A, pág. 19).

2.3.1.3. Principios Físicos de la Teledetección

a. Radiación electromagnética:

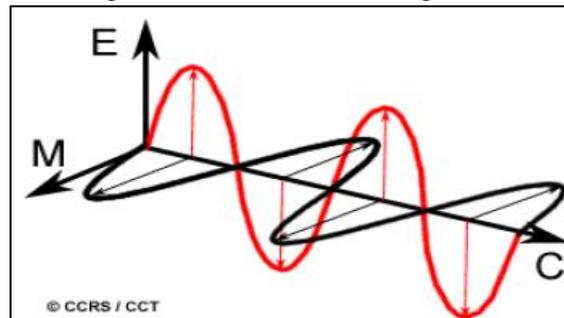
Conocida como energía electromagnética, es un tipo de energía que proviene de la oscilación de cargas eléctricas, producida por el sol en forma natural o emitida por fuentes

artificiales como son la televisión, la radio o el microondas. Esta se transmite de un lugar a otro por medio de ondas electromagnéticas.

b. Onda Electromagnética:

La radiación electromagnética está compuesta por ondas electromagnéticas, las que poseen un campo eléctrico (E) el cual tiene una dirección perpendicular en su recorrido con el campo magnético (M). Ambos campos se desplazan a la velocidad de la luz (Natural Resources Canada, S/A, pág. 7). Ver Figura N° 8 y 9.

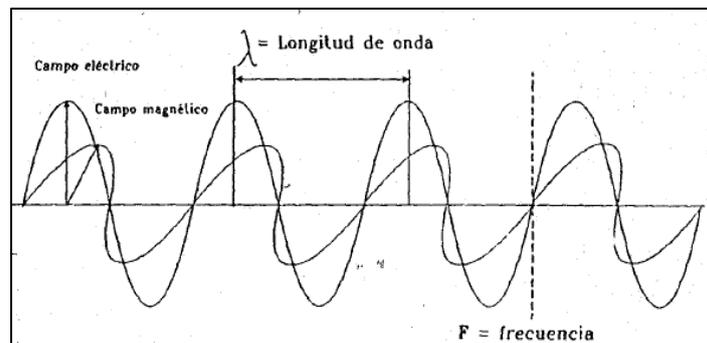
Figura N° 8 Onda Electromagnética



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A, pág. 7).

Las características de la onda electromagnética pueden describirse por dos (2) elementos fundamentales: la longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia entre dos (2) picos sucesivos, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo (Chuvieco, 2010).

Figura N° 9 Esquema de una Onda Electromagnética



Fuente: (Chuvieco, 2010).

Ambos están inversamente relacionados, la cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$c = \lambda * \nu$$

Donde c, indica la velocidad de la luz, λ expresa la longitud de onda en micrómetros (μm) y la frecuencia en Hertz (Hz). Según la ecuación podemos concluir que, a mayor longitud de onda, menor será la frecuencia y viceversa.

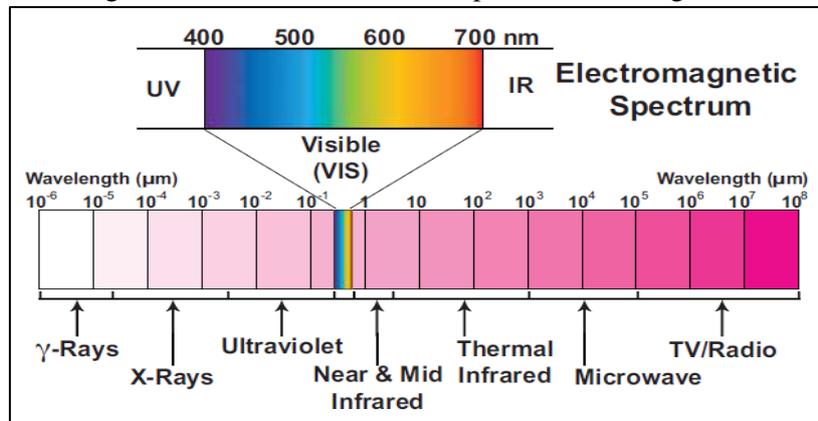
c. Espectro electromagnético:

El espectro electromagnético posee tres (3) escalas de valores diferentes, una para la frecuencia, otra para la longitud de onda y otra para la energía. La división básica del espectro electromagnético se hace atendiendo a los rangos de frecuencias o de longitudes de onda, en orden creciente de frecuencias o decreciente en longitudes de onda. El espectro electromagnético abarca las siguientes regiones: ondas de baja frecuencia, y radiofrecuencia, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X, rayos Gamma (Ver Figura N° 10).

Para la Teledetección solo algunas de estas bandas de frecuencias son utilizadas para obtener información de la superficie de la Tierra o de la atmósfera:

- Visible (0,38 μm – 0,75 μm).
- Infrarrojo cercano (IRC) (0,75 μm – 1,2 μm).
- Infrarrojo medio (1,2 μm – 8 μm).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT) (8 μm – 14 μm).
- Microondas (> 1 mm).

Figura N° 10 Clasificación del espectro electromagnético



Fuente: (Camps-Valls, Tuia, Gómez - Chócova, Jimenez, & Malo, 2011).

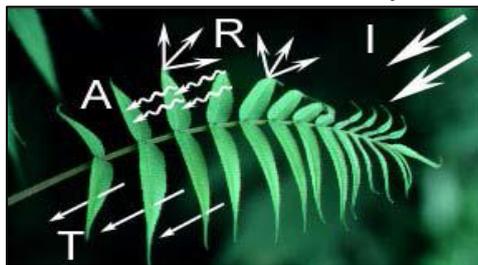
2.3.2. Interacción de la Radiación con la superficie

La energía incidente (I) que llega a la superficie sostiene tres (3) procesos, es decir, puede ser: reflejada (R), absorbida (A) y transmitida (T), por lo tanto la energía que incide sobre la superficie terrestre es la suma de estos procesos. Ver Figura N° 11.

$$I = R + A + T$$

La energía incidente, puede interactuar con la superficie en una o más de las tres (3) formas de interacción. Esto dependerá de la longitud de onda y de las condiciones y características de la superficie.

Figura N° 11 Interacción Radiación y Cobertura



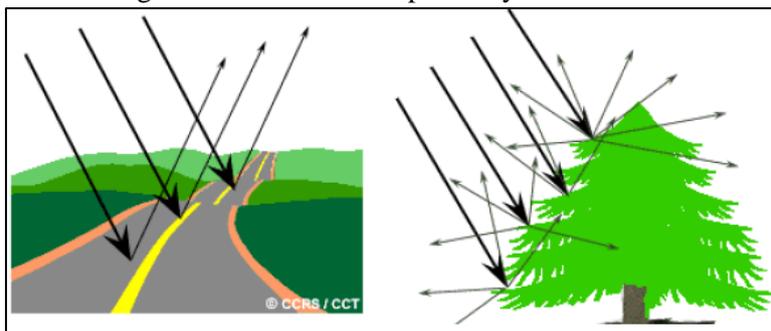
Fuente: (Natural Resources Canada, S/A).

La absorción (A) ocurre cuando la radiación es absorbida en la cubierta, mientras que la transmisión (T) se da cuando la radiación rebota de la cubierta y es redireccionada.

En la teledetección, lo más importante abarca en medir la radiación reflejada de las diferentes cubiertas. Según esto nos podemos referir a dos (2) tipos de reflexión: especular y difusa.

La reflexión especular hace referencia a cubiertas que reflejan energía con el mismo ángulo incidente, y la reflexión difusa se genera en cubiertas Lambertiana donde la radiación es reflejada uniformemente en todas las direcciones. Ver Figura N° 12.

Figura N° 12 Cubierta especular y Lambertiana



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A).

La proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida es variable según los tipos de cubiertas, esto depende mayormente del tipo de material y de su condición. Estas propiedades de cada cubierta son aprovechadas por la teledetección con la finalidad de establecer mecanismos para identificar distintos elementos geográficos de las cubiertas. Gracias a las medidas de reflexión, absorción y emisión de energía radiante en el espectro visible e infrarrojo de las distintas cubiertas, se pueden calcular las firmas espectrales para los distintos tipos de paisaje y cubierta vegetal de la Tierra, la cual se detallará más adelante.

2.3.3. Interacción de la Radiación con la Atmósfera

La atmósfera está compuesta de gases, de los cuales, el CO₂, O₃ y el vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. Su efecto

es triple ya que por un lado, absorben la energía incidente en determinadas bandas del espectro, dispersan determinados flujos y emiten otros, debido a que estos gases son cuerpos calientes. Estos procesos introducen modificaciones en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor, por lo que es necesario tenerlos en cuenta con la finalidad de obtener una medición más precisa de las características del territorio observado (Chuvienco, 2010). Estos procesos son:

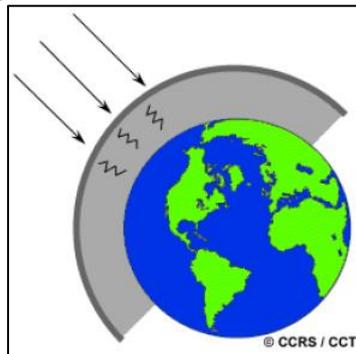
A. Absorción atmosférica

Este proceso genera que la atmósfera se comporte como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que algunas bandas del espectro eliminan prácticamente cualquier posibilidad de observación remota (Chuvienco, 2010). Ver Figura N° 13.

Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno atómico (O_2).
- Ozono (O_3).
- Vapor de agua (H_2O).
- Dioxido de Carbono (CO_2).

Figura N° 13 Absorción Atmosférica



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A).

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Las principales ventanas atmosféricas son el espectro visible y el IRC. Estas ventanas son idóneas para realizar procesos de teledetección, por lo que el diseño de los sensores tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que se pretende observar, salvo la presencia de nubes.

B. Dispersión atmosférica

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son las gotas de agua y los aerosoles. Estos al entrar en contacto con la radiación electromagnética (choque), suponen un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre, lo que implica una

reducción de la radiancia directa y un aumento de la difusa. En función a las características de estas partículas atmosféricas existen diferentes tipos de dispersión (Chuvienco, 2010), los cuales se detallan a continuación:

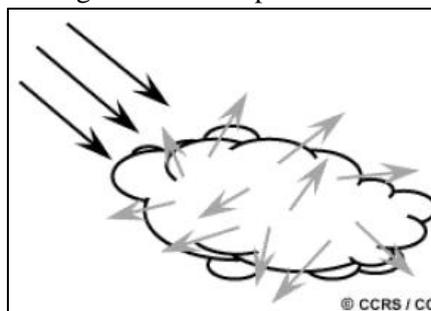
- Dispersión Rayleigh

Es producida por las moléculas de los gases atmosféricos y es una de las principales causas de bruma, lo cual genera una disminución del contraste de la imagen (Tagestad, 2000). Es la más conocida y de mayor influencia en la teledetección; asimismo, causa, por ejemplo, el color azul del cielo y afecta a las longitudes de onda más cortas.

- Dispersión Mie

Los aerosoles y el polvo atmosféricos son los principales responsables de este tipo de dispersión, aunque también está presente en incendios forestales y bruma costera. Ver Figura N° 14.

Figura N° 14 Dispersión Mie



Fuente: (Natural Resources Canada, S/A).

- Dispersión no Selectiva

Afecta por igual a las diversas longitudes de onda; por ello, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

C. Emisión atmosférica

El efecto de emisión atmosférica resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretende obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes espaciales.

2.3.4. Resolución de las Imágenes Satelitales

Estes y Simonett, 1975, definen como resolución de un sistema sensor, a la habilidad que posee de discriminar información de detalle. Citado en (Chuvienco, 2010). A continuación, se mencionan los tipos de resolución de una Imagen satelital.

a. Espacial

Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen; esto es, la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información en la imagen. Depende principalmente de a la altura orbital, la longitud focal y el número de detectores

(Chuvienco, 2010). Para el sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5, la resolución espacial es de treinta (30) metros.

b. Espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas (Chuvienco, 2010).

El sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5 posee siete bandas espectrales (Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo próximo, Infrarrojo lejano, Térmica lejana y térmica próxima).

c. Radiométrica

Éste se refiere a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Para la mayoría de los equipos las imágenes se codifican en un formato binario, por lo que la resolución radiométrica suele identificarse con el rango posible de valores que almacena el sensor.

Por ejemplo, los primeros Satélites Landsat llevaban un sensor que ofrecía un rango de 128 niveles de codificación ($128 = 2^7$) (7 bits) por pixel con 64 niveles (2^6) de codificación (6 bits) para la banda del infrarrojo cercano. Actualmente, la mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel (8 bits), aunque otros extienden ese rango notablemente, como son el satélite NOAA-AVHRR, el IKONOS o el Quickbird.

A continuación, en la Tabla N° 7 se presentan las características más importantes del sensor Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 5.

Tabla N° 7 Resolución espacial y anchura de banda del sensor Thematic Mapper (TM) – Satélite Landsat

Banda	Longitud de Onda (μm)	Región	Resolución Espacial (m)
1	0,45 – 0,52	Visible Azul	30
2	0,52 – 0,60	Visible Verde	30
3	0,63 – 0,69	Visible rojo	30
4	0,76 – 0,90	Infrarrojo próximo	30
5	1,55 – 1,75	Infrarrojo lejano	30
6	10,4 – 12,5	Térmico Lejano	30
7	2,08 – 2,35	Término próximo	30

Fuente: (Fernandez Copper & Herrero Llorente, 2001).

d. Temporal

Este concepto alude a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre (Chuvienco, 2010). El tiempo que tarda el sensor en pasar sobre la misma porción de la tierra se denomina ciclo de recubrimiento.

Tabla N° 8 Resolución temporal del satélite Landsat

Satélite	Resolución temporal
Landsat 1 – 3	18 días
Landsat 4, 5 y 6	16 días
Landsat 7	17 días

Fuente: (Fernandez Copper & Herrero Llorente, 2001).

2.3.5. Composición a color de las imágenes satelitales

El análisis visual de imágenes se realiza empleando tres (3) bandas del sensor. Para el caso de imágenes del Satélite Landsat 5, el sensor se llama Thematic Mapper.

La composición a color se emplea para analizar visualmente la imagen, combinando las bandas de manera que se da un primer acercamiento al contenido de la misma. Se pueden emplear por ejemplo para discriminar geología, usos de suelo, cobertura boscosa, etc. (Fernandez Copper & Herrero Llorente, 2001).

Este sensor opera en siete bandas espectrales diferentes, las que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas (Richards & Jia, 2006).

Cada una de estas bandas presenta diferentes características y resoluciones radiométricas, las cuales se explican en la tabla N° 9.

Tabla N° 9 Características del sensor Thematic Mapper (TM)

Banda	Región	Característica
1	Visible Azul	Diseñada para la penetración en cuerpos de agua, también es útil para la diferenciación entre suelo y vegetación.
2	Visible Verde	Puede evaluar el vigor de la vegetación sana, también posee buena penetración en cuerpos de agua.
3	Visible Rojo	Es la banda de absorción de la clorofila, útil para la clasificación de las cubiertas vegetales, ya que presenta un buen contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal.
4	Infrarrojo Próximo	Útil para determinar el contenido de la biomasa. Presenta sensibilidad a las rugosidades de las copas de los árboles de selvas y bosques. Sirve para separar zonas donde existen pinos o eucaliptos. Permite mapear áreas ocupadas por vegetación que fue destruida por el fuego y la identificación de áreas agrícolas.
5	Infrarrojo Lejano	Presenta sensibilidad a la humedad de las plantas, sirviendo para observar el estrés en la vegetación. También es indicador del contenido de humedad del suelo.
6	Térmico Lejano	Es útil en el análisis del estrés de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo.
7	Térmico Próximo	Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para mapeo hidrotermal. Presenta sensibilidad a la morfología del terreno, permitiendo obtener informaciones sobre geomorfología y geología.

Fuente: Adaptación de NASA – U.S.G.S.

Dentro de las combinaciones que se realizan con las bandas del sensor TM, a continuación, mencionamos algunas de ellas (Fernandez Copper & Herrero Llorente, 2001).

a. Combinación en color Natural RGB (321)

Es la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color verdadero. Ver Figura N° 15.

Figura N° 15 Combinación 321

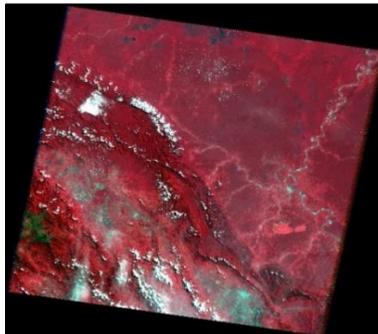


Fuente: Satélite Landsat 5 TM – Path 008 y Row 064 / Elaboración propia.

b. Combinación en falso color RGB (432)

Tiene buena sensibilidad a la vegetación verde la cual esta delineada como rojo, también representa bien los caminos y masas de agua (azul oscuro a negro). Muestra bosques de coníferas como un rojo más oscuro distinto que los bosques caducifolios.

Figura N° 16 Combinación 432

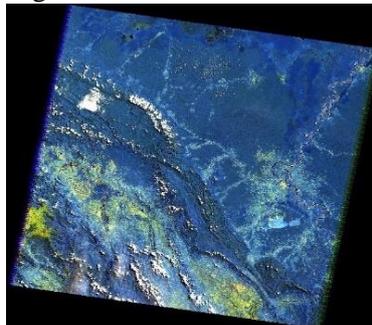


Fuente: Satélite Landsat 5 TM – Path 008 y Row 064 / Elaboración propia.

c. Combinación en falso color RGB (754)

Esta combinación ha sido encontrada para mostrar clases de texturas de tierra (arcilla, tierra de moldeo y arenosa) y aplicaciones en Geología. Ver Figura N° 17.

Figura N° 17 Combinación 754

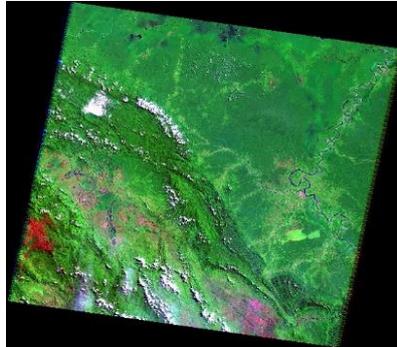


Fuente: Satélite Landsat 5 TM – Path 008 y Row 064 / Elaboración propia.

d. Combinación en falso color RGB (742)

Permite discriminar los tipos de rocas, ayuda a la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones volcano – tectónicos. Ver Figura N° 18.

Figura N° 18 Combinación 742

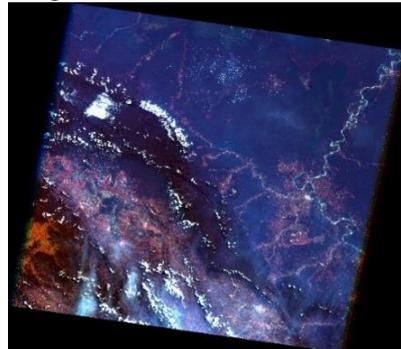


Fuente: Satélite Landsat 5 TM – Path 008 y Row 064 / Elaboración propia.

e. Combinación en falso color RGB (731)

Ayuda a diferenciar los diferentes tipos de roca, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscura a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones de azules a celestes.

Figura N° 19 Combinación 731



Fuente: Satélite Landsat 5 TM – Path 008 y Row 064 / Elaboración propia.

Las combinaciones de las bandas de la imagen satelital Landsat 5 TM, se realizan gracias a la herramienta Layer stacking, del software ENVI 5.1. Las imágenes son obtenidas del portal de la U.S.G.S.

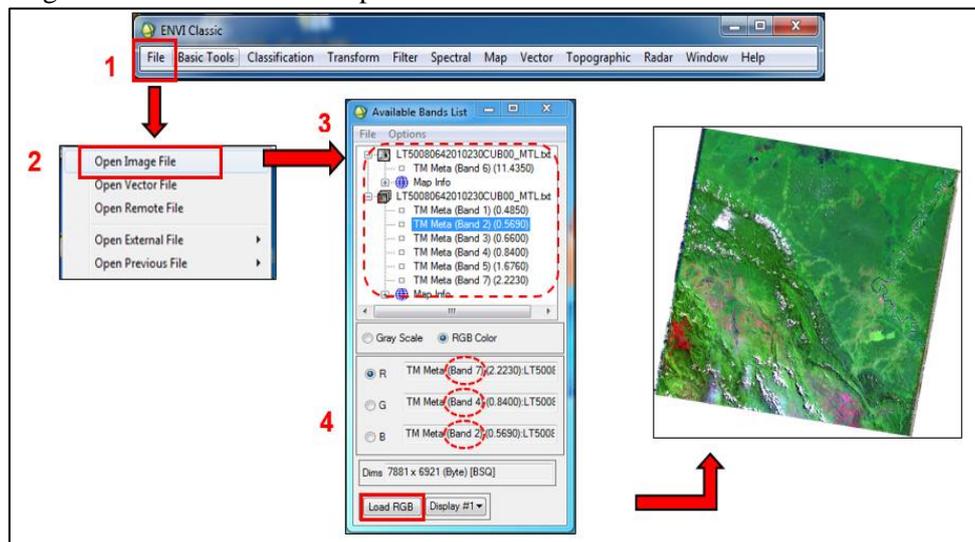
El procedimiento para realizar esta técnica es el siguiente.

1. En ENVI 5.1. se dirige a la opción file, ahí se proporcionan diferentes herramientas, de la cual elegiremos la primera opción mostrada.
2. Para visualizar nuestra imagen, se dirige a **Open Imagen File**, posteriormente se dirige a la carpeta que contiene la imagen, se carga el archivo de la metadata (MTL.txt) el cual contiene toda la información que respecta a la imagen satelital a utilizar.

3. A continuación aparece una ventana llamada **Available Band List**, ahí se muestran todas las bandas correspondientes a la imagen satelital. Existen dos (2) formas de visualización, la primera en escala de grises (Gray scale) y la segunda combinando tres (3) bandas (RGB Color).
4. Luego, haciendo uso de las bandas 7, 4 y 2 de la imagen, el resultado es una imagen en la cual se pueden distinguir de forma concreta cobertura vegetal (color verde), color cian (zonas intervenidas o degradadas) y cuerpos de agua (color azul).

A continuación, en la Figura N° 20 se muestra la metodología a seguir para realizar la combinación de bandas:

Figura N° 20 Procedimiento para realizar la combinación de bandas en ENVI 5.1



Fuente: Elaboración propia.

2.3.6. Pre-Procesamiento de Imágenes Satelitales

Son todos los procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, o en la radiometría de los píxeles que la componen (Chuvieco, 2010).

(Chuvieco, 2010), afirma que cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones o deformaciones radiométricas y geométricas debido a muchos factores. Las deformaciones más frecuentes, pueden agruparse en la tabla N° 10.

Tabla N° 10 Fuentes de error en una Imagen Satelital

Tipo de distorsión	Origen	Efectos
Originadas por la plataforma	Variaciones en la altitud de la órbita del satélite.	Cambios en la escala de la imagen.
	Variaciones en la velocidad u orientación del satélite.	Distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición.
Provocadas por la rotación terrestre	La curvatura terrestre.	Variación del tamaño del pixel.

Provocadas por el sensor	Movimiento anómalo del sensor.	Cambios en el intervalo de recogida de la información.
	Ángulo de barrido.	Deformaciones geométricas y atmosféricas.
	Falta de calibración.	Bandeado en la imagen final.
Originadas por la atmósfera	Presencia de aerosoles, gases y vapor de agua.	Modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre.

Fuente: Adaptado de (Chuvienco, 2010).

El Preprocesamiento de las imágenes satelitales puede ser dividido en dos (2) procesos: las correcciones geométricas y las radiométricas. Las correcciones geométricas detallan procedimientos de georreferenciación de los píxeles de la imagen (localización), y las correcciones radiométricas se refieren a la remoción de distorsiones en los valores de ND de los píxeles de la imagen, para lo cual se aplican procedimientos específicos con la finalidad de corregir esos valores distorsionados.

2.3.6.1. Corrección Geométrica

Las distorsiones que alejan la posición del píxel registrado en la localización que tendría si la captura se hubiera realizado correctamente se clasifica en dos (2) tipos, los cuales se observan en la tabla N° 11.

Tabla N° 11 Tipos de errores geométricos

Tipos de errores geométricos	Características
Sistemáticos	Provocado principalmente por la rotación y curvatura terrestre, y por la observación panorámica del sensor.
No Sistemáticos	Provocadas por la variación en la orientación, altura y velocidad de la plataforma y/o introducidas por el relieve.

Fuente: Adaptado de (García Martín, 2012).

Como señala (Chuvienco, 2010), la corrección geométrica de imágenes puede abordarse de acuerdo con dos (2) procedimientos.

- **Modelos orbitales:** Los cuales pretenden modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición, gracias a este tipo de corrección pueden corregirse errores sistemáticos. Para ello, es preciso disponer con bastante precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor.
- **Modelos empíricos:** Son aquellos que pretenden modelar el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control. En este caso, el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las

fuentes de error, asumiendo, como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

2.3.6.2. Corrección Radiométrica

Son todas aquellas técnicas que modifican los Niveles Digitales (ND) originales, con el objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen, en el caso de una recepción ideal (Chuvieco, 2010).

a. Conversión a radiancia espectral:

Según (Chander, Markham, & Helder, 2009), el cálculo de la radiancia, es un paso fundamental para convertir los datos de imagen de cualquier sensor a una escala radiométrica común.

(Martinez Beltrán, 2014), afirma que la calibración radiométrica del sensor TM, implica reescalar los números digitales sin procesar (Q) transmitidos desde el satélite a números digitales calibrados (Q_{cal}), que son los Niveles Digitales (ND) que los usuarios reciben con los productos de nivel 1 del Satélite Landsat.

Las ecuaciones N°1, 2 y 3 son usadas para convertir los Niveles Digitales (ND) en valores de radiancia espectral, a partir de los coeficientes de calibración, propuestas por (Chander, Markham, & Helder, 2009).

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

Ecuación N° 18 Radiancia espectral

Donde:

L_{λ} : Radiancia espectral del sensor.

Q_{cal} : Valor del pixel calibrado expresado en Nivel Digital (ND)

Además:

$$G_{rescale} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}}$$

Ecuación N° 19 Factor de Ganancia

$$B_{rescale} = L_{min\lambda} - \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) * Q_{cal\ min}$$

Ecuación N° 20 Factor de Sesgo

Donde:

$L_{max\lambda}$: Radiancia espectral que es escalada a $Q_{cal\ máx.}$ en $w / m^2.sr.\mu m.$

$L_{min\lambda}$: Radiancia espectral que es escalada a $Q_{cal\ mín.}$ en $w / m^2.sr.\mu m.$

$Q_{cal\ máx.}$: Valor máximo del pixel calibrado a Nivel Digital.

$Q_{cal\ mín.}$: Valor mínimo del pixel calibrado a Nivel Digital.

A continuación, en la Tabla N° 12, se presentan los parámetros para la conversión a radiancia de imágenes Landsat 5 - TM.

Tabla N° 12 Parámetros para la conversión a radiancia de imágenes Landsat 5 - TM

Banda (TM)	$L_{\min \lambda}$ (w / m ² .sr.μm)	$L_{\max \lambda}$ (w / m ² .sr.μm)	G _{rescale}	B _{rescale}	ESUN _λ
1	-1,52	169	0,671339	-2,19	1983
	-1,52	193	0,765827	-2,29	
2	-2,84	333	1,322205	-4,16	1796
	-2,84	365	1,448189	-4,29	
3	-1,17	264	1,043976	-2,21	1536
4	-1,51	221	0,876024	-2,39	1031
5	-0,37	30,2	0,120354	-0,49	220
6	1,2378	15,3032	0,055376	1,18	---
7	-0,15	16,5	0,06551	-0,22	83,44

Fuente: Adaptado de (Chander, Markham, & Helder, 2009).

b. Cálculo de la reflectividad aparente:

Según (Sobrinho, 2000) la reflectividad nace de la relación entre la energía reflejada por cualquier material y la energía incidente, siendo esta de carácter adimensional y con un elevado interés debido a que los datos captados por el sensor provienen de esta interacción.

La determinación de esta variable en superficie parte de la obtención de la reflectividad en el techo de la atmósfera (T.O.A), esto quiere decir, sin tomar en cuenta las perturbaciones causadas debido a efectos atmosféricos haciendo uso de parámetros como la irradiancia solar extraterrestre, ángulo cenital solar, y el factor de corrector de la distancia Tierra – Sol (Cabrera Torres, 2015).

Es así como posterior al cálculo de la radiancia espectral, se procede a calcular la reflectividad aparente también llamada Reflectividad en el tope de la atmósfera (T.O.A.), por sus siglas en ingles Top Of Atmosphere.

Para calcular la reflectividad debemos conocer los siguientes parámetros:

- Ángulo Cenital solar.
- Distancia de la tierra al sol justo en el momento de la toma de la imagen.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos \theta}$$

Ecuación N° 21 Reflectancia T.O.A.

Donde:

- L_{λ} : Radiancia espectral
- d : Distancia Tierra – Sol en el momento de la toma de la imagen.
- ESUN : Irradiancia espectral solar exoatmosférica
- θ : 90 – ángulo de elevación solar.

2.3.6.3. Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes satelitales, con la finalidad de eliminar los efectos provocados por la interacción del sensor con la

atmosfera. Estos procesos ya mencionados son la: adsorción, dispersión y emisión atmosférica.

Según (Tagestad, 2000), el resultado de los efectos provocados por estos tres (3) procesos, se manifiestan en un difuminado en la imagen, disminución de contraste y la cantidad total de radiación que llega al sensor.

El objetivo de esta corrección es disminuir o eliminar estas distorsiones que se introducen en las imágenes producto de la interacción de la atmósfera con el sensor con la finalidad de determinar el valor real de reflectancia de la superficie de la tierra conocida por sus siglas en inglés T.O.C (Top of Canopy) a partir de la reflectancia aparente medida por el sensor, también conocida como reflectancia T.O.A (Top of Atmosphere).

Para (Hadjimitsis, 2010), la corrección atmosférica constituye la parte más importante del pre-procesamiento de datos obtenidos mediante teledetección por satélite.

(Lopez, 1991), señala que es necesario aplicar el proceso de corrección atmosférica cuando se realizan cálculos; o bien correlaciones donde intervienen diferentes bandas de una imagen multispectral, ya que la dispersión aumenta inversamente con la longitud de onda y los demás canales se verán afectados de diferentes formas. Así también, en estudios multitemporales, cuando se comparan propiedades o magnitudes en fechas diferentes, la atmósfera cambia de una fecha a otra, por consiguiente, se deben corregir los valores de radiancias registradas por el sensor para cada una de las bandas.

Los procedimientos más conocidos de corrección atmosférica se pueden agrupar en modelos físicos de transferencia radiactiva (a partir de información obtenida de la misma imagen) y en modelos de ajuste empírico. Los modelos de Transferencia Radiactiva se basan en simular las condiciones de la atmósfera en función de las características fisicoquímicas de la misma y el día y la hora de la adquisición de la imagen (muchos de estos datos se encuentran incluidos en el archivo de la metadata de la imagen (MTL), que es un archivo de texto (con extensión *.txt*).

Asimismo (Hedley, 2013), indica que, si no se dispone de los parámetros fisicoquímicos para los modelos de transferencia radiactiva, se puede utilizar algún modelo estándar. Uno de los más usados es el Método de Sustracción de píxeles oscuros, comúnmente conocido como el Método de Chávez.

2.3.7. Procesamiento de Imágenes satelitales

Luego de realizar el pre-procesamiento de las imágenes satelitales, el procesamiento de estas, son las técnicas que permiten obtener resultados a partir de la transformación de los datos que han sido procesados anteriormente, cuando se aplicaron las correcciones

respectivas. Finalmente, la información obtenida se utiliza para su posterior interpretación.

Existen diversos índices para determinar diferentes tipos de superficies en una imagen satelital; por ejemplo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es utilizado para caracterizar coberturas vegetales y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

Ecuación N° 22 NDVI

Donde:

NIR : Reflectancia corregida atmosféricamente, perteneciente al infrarrojo cercano.

R : Reflectancia corregida atmosféricamente, correspondiente al rojo visible.

El NDVI (Rouse Jr., 1973) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones, debido a que su cálculo es muy sencillo y dispone de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, entre otros. Además, permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo, el cual está determinado por las condiciones climáticas. La interpretación del índice debe considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución temporal y espacial causados por otros factores (Di et al., 1994) citado en (Merg, y otros, 2011, pág. 5).

2.3.8. Clasificación de Imágenes satelitales

Es el proceso mediante el cual una imagen satelital multibanda son etiquetados, según la categoría a la que pertenecen. A partir de esta imagen puede generarse una cartografía temática y el inventario estadístico de la superficie involucrada en cada categoría (Jensen, 1996; Chuvieco, 2010) citado en (Mendoza Robles, 2012, pág. 32).

2.3.8.1. Clasificación Supervisada

(Chuvieco, 2010) indica que la clasificación supervisada parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con la zona permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda, denominándose áreas de entrenamiento. El término indica que tales áreas sirven para 'entrenar' al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías, en otras palabras, de estos campos de entrenamiento el ordenador calcula los Niveles

Digitales (ND) que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND.

2.3.8.2. Clasificación No Supervisada

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen, la cual no implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación de los resultados. Para esto, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones llamados “*Clusters*” los cuales equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés (Chuvieco, 2010).

2.3.9. Evaluación de la Precisión de la Clasificación

(Chuvieco, 2010) señala que toda clasificación conlleva un grado de error en función de la calidad de los datos o de la rugosidad del método que se empleó; por lo cual, es vinculante aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar dicho error y en función de este, valorar la calidad final del trabajo entregado y su aplicabilidad. La evaluación de la precisión alcanzada se realiza posterior a la clasificación, mediante una serie de áreas test, que permitan obtener una medida independiente del acuerdo entre el mapa y la verdad en el terreno.

Para ello, se realiza un muestreo del área de estudio, en la cual deben asignarse puntos de verificación al área y así hacer la verificación de los resultados.

Asimismo, el citado autor, indica que el número de puntos de la muestra (N) se obtiene mediante la distribución binomial de probabilidad, la cual se expresa bajo la siguiente fórmula:

$$N = \frac{z^2 * p * q}{E^2}$$

Ecuación N° 23 Tamaño de la muestra

Donde:

- n : Tamaño de la muestra.
- z : La abscisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad.
- p : % de aciertos estimados.
- q : % de errores estimados (1 – p).
- E : nivel permitido de error.

El número de puntos que se obtiene mediante la fórmula señalada, corresponden tanto para la clasificación utilizada y para su cobertura real. Es decir, la validación puede hacerse en campo y ser comparada con la clasificación trabajada. En su defecto puede ser

comparada con una imagen satelital de mejor resolución que la utilizada en la clasificación.

(Chuvieco, 2010) indica que estos datos pueden agruparse en una matriz de confusión que recoge los conflictos que se presentan en las categorías asignadas.

- Matriz de Confusión

Esta matriz es una prueba de estadística descriptiva usada para comparar una clasificación resultante con información fehaciente de terreno (visita de campo o una imagen de alta resolución).

Con los datos obtenidos en campo como los de referencia, se realiza esta matriz; siendo que en sus columnas se indican las clases de referencia (reales) y las filas las categorías deducidas de la clasificación. La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce el acuerdo entre dos (2) fuentes (mapa y realidad), mientras que los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total, expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en columnas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa; mientras que los residuales en filas implican categorías del mapa que no se ajustan a la realidad (Jensen, 1996; Chuvieco, 1996, 2010) citado en (Mendoza Robles, 2012, pág. 33)

A partir de la Matriz de confusión pueden desarrollarse medidas estadísticas que concluyan el proceso de validación. La más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa (F), relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados.

$$F = \frac{\text{Número de puntos correctamente asignados}}{\text{Números de puntos totales}} \times 100$$

Ecuación N° 24 Fiabilidad Global

- Índice Kappa (K)

Es una medida de la exactitud de la clasificación y su varianza es usada, en la comunidad de teledetección, para realizar pruebas estadísticas de diferencias significativas (Hudson y Ramm, 1987, Alarcón, et al., 2010) citado en (Mendoza Robles, 2012, pág. 33).

(Chuvieco, 2010) menciona que el estadístico Kappa intenta delimitar el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación. La estimación de K se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Hudson y Ramm, 1987) citado en (Chuvieco, 2010).

$$K = \frac{N \cdot \sum X_{ij} - \sum X_{i+} \cdot X_{+j}}{N^2 - \sum X_{i+} \cdot X_{+j}}$$

Ecuación N° 25 Índice Kappa

Donde:

N : Número total de observaciones.

X_{ij} : Número de observaciones en la fila i y columna j .

$X_{j+} - X_{+i}$: Totales marginales para el acuerdo esperado para la fila i y columna j .

El valor de este índice puede variar desde -1 hasta 1, entendiéndose que valores cercanos a la unidad representa mayor concordancia con la realidad. Ver Tabla N° 13.

Tabla N° 13 Valores del Estadístico de Kappa (K)

Estadístico Kappa	Concordancia
< 0	Pobre
0 – 0,2	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,81	Considerable
0,80 – 1	Casi perfecto

Fuente: Adaptado y traducido de (Landis & Koch, 1977, pág. 165).

2.3.10. Teledetección de la cobertura boscosa

Los cambios en la cobertura boscosa (deforestación y degradación) deben ser monitoreados, de forma que, la información obtenida pueda ser de utilidad para establecer posibles soluciones, acordes con la realidad de un área determinada.

Actualmente este monitoreo, es posible en gran medida gracias a las imágenes satelitales de los diferentes sensores de mediana y alta resolución, el cual brindan información periódica de una determinada área.

En ese sentido, en el Perú, actualmente se desarrollan plataformas que contribuyan a esta labor, con la finalidad de generar información que pueda ser distribuida a través de mapas, informes, visores, etc.

2.3.10.1. Avances en la detección de cambios de la cobertura boscosa

El software Sistema de Análisis Landsat de Carnegie - Lite (CLASlite) es una herramienta altamente automatizada utilizada para la cuantificación de la cobertura Boscosa, el cual fue diseñado para su uso en coberturas de bosques tropicales. Este software ha sido diseñado para la identificación automatizada de la deforestación y la degradación de bosques a partir de imágenes de satélite de sensores remotos (Déborah, 2014, pág. 6).

Fue utilizado por el Ministerio del Ambiente para realizar la cuantificación y análisis de la deforestación en la Amazonía Peruana en el periodo 2010 – 2014. Para adquirir la licencia de CLASlite, por un año, se debe matricular en el curso virtual que ofrece el instituto CARNEGIE para la ciencia de la Universidad de Standford, una vez aceptado en el curso, este se debe aprobar con un puntaje superior a 70% para adquirir la licencia,

la cual puede ser renovada, para lo cual se debe presentar un trabajo de investigación usando CLASlite, que actualmente se encuentra en su versión 3.3.

(Déborah, 2014, pág. 6) indica que CLASlite es el resultado de más de una década de investigación en sensores remotos biofísicos y trabajo de campo que ofrece un enfoque de mapeo satelital automatizado para determinar los componentes importantes de la estructura del bosque, tales como la cobertura fraccional del dosel del bosque, vegetación muerta y superficies expuestas.

Las coberturas fraccionales son las determinantes principales de la composición, fisiología, estructura, biomasa y procesos biogeoquímicos del ecosistema. El análisis de la cobertura fraccional es el corazón de CLASlite, el cual lo hace una herramienta estable y de base biofísica que permite un monitoreo de bosques rápido con rastreo de errores (Déborah, 2014, pág. 6).

2.3.10.2. Procedimiento de Análisis usando CLASlite

La clasificación en cobertura boscosa, no boscosa, deforestación y perturbación de CLASlite, es posible gracias a la imagen de cobertura fraccional, que lo realiza en base a un análisis de mezcla espectral (AUTOMCU), en la cual se clasifican los pixeles en: vegetación fotosintética, no fotosintética y superficie descubierta.

a. Preparación de las imágenes satelitales

Este procedimiento aplica para todas las imágenes satelitales que se utilicen en el análisis. Se sigue el siguiente procedimiento. El resultado es una imagen cruda y una imagen térmica.

b. Calibración de las imágenes satelitales

En este paso, se realizan dos (2) operaciones importantes en las imágenes:

- Calibración radiométrica

A medida que la energía es irradiada de la superficie, pasa a través de la atmósfera interactuando con los componentes que la constituyen (aerosoles, vapor de agua, oxígeno, ozono, etc.), influenciando en el valor de reflectancia de cada pixel, por lo cual es necesario realizar una corrección que elimine dichos efectos.

- Corrección atmosférica

Mediante el modelo 6S para corregir errores atmosféricos, el resultado es una imagen corregida atmosféricamente en unidades de reflectancia superficial. Esta es la imagen sobre la cual se van a estudiar los cambios que ocurren en la cobertura boscosa.

- Enmascaramiento

Las nubes y sus sombras, así como las del terreno, y los cuerpos de agua, se enmascaran en los pasos 1 (preparación de imágenes) y 2 (calibración de imágenes).

c. Cobertura Fraccional

Aquí se determinan las características más importantes de cualquier bosque: la cobertura fraccional de la vegetación viva de dosel (PV), vegetación muerta (NPV) y superficie expuesta (S) en un ecosistema de bosque. Estas coberturas son los determinantes principales de la composición, estructura, biomasa, fisiología y procesos biogeoquímicos del bosque (CLASlite Team, 2013, pág. 14). Ver Tabla N° 14.

Este proceso es llevado a cabo mediante el submodelo llamado Automatec Monte Carlo Unmixing (AutoMCU), el cual proporciona un análisis cuantitativo de la cobertura fraccional (de 0 a 100%) a nivel de subpixel de la cobertura boscosa mediante tres (3) clases:

Tabla N° 14 Tipos de cobertura fraccional

Tipo	Símbolo	Clase espectral	Descripción
Vegetación Fotosintética	PV	$\rho_{pv}(\lambda)$	Vegetación viva.
Vegetación no Fotosintética	NPV	$\rho_{npv}(\lambda)$	Vegetación muerta o senescente.
Sustrato expuesto	S	$\rho_{substrate}(\lambda)$	Suelo mineral expuesto y materia orgánica.

Fuente: Adaptado de (Asner, Knaap, Balaji, & Perez-Acosta, 2009).

La segregación espectral automatizada Monte Carlo, se realiza a nivel de subpixel, para lo cual estos se descomponen mediante el Análisis de Mezcla Espectral (SMA) en las clases de cobertura terrestre existente, para esto CLASlite incluye colecciones de espectros de caracteres espectrales puros para los tres (3) tipos de clases, denominados Bibliotecas de Caracteres Espectrales Puros, a fin de determinar las clases mencionadas. Estas bibliotecas están compuestas por observaciones aéreas y de campo que en total abarcan mas de 250.000 caracteres espectrales puros. A pesar de que estas bibliotecas provienen de bosques tropicales, funcionan también para otros tipos de bosque. Esto se debe a que el grado de variación en estos tres tipos de caracteres espectrales puros es igual al de todos los tipos de vegetación del planeta, combinados.

Los espectros de NPV y S fueron colectados usando espectralradiómetros de campo ubicados en tierra (FR y FS-3 Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado USA). Para S, incluyen tipos de suelo, con diversos niveles de materia orgánica de diferentes condiciones de humedad del suelo. Para NPV incluye hojarasca superficial, pastos

senescentes, residuos de deforestación (tala), y otros constituyentes de carbonos secos colectados entre una amplia variedad de especies y estados en descomposición (CLASlite Team, 2013, pág. 15).

En contraste con estas observaciones de campo, los espectros de PV se colectaron con el sensor Earth Observing-1 Hyperion. El Hyperion es un generador de imágenes que suministra observaciones detalladas de la superficie, atmósfera y biomasa de la Tierra. Este sensor, es el único espectrómetro de imágenes espacial lanzado por la NASA para aplicaciones ambientales. Dichos datos, se colectaron en diversos sitios control en bosques tropicales en Brazil, Perú, y otros lugares desde 1999 hasta 2012, resultando en millones de observaciones espectrales con una resolución de 30 metros, además se corrigieron atmosféricamente a reflectancia y se retornaron a los canales espectrales usados por los sensores Landsat, ALI, ASTER y SPOT en CLASlite (CLASlite Team, 2013, pág. 15).

El AutoMCU es un enfoque probabilístico basado en la física del dósel (Asner, 1998) citado en (CLASlite Team, 2013, pág. 15) que reduce cada pixel de la imagen en tres fracciones de coberturas constituyentes (NPV, PV y S).

CLASlite posee un método monte carlo, ya que las combinaciones de los caracteres puros de las fracciones de cobertura, se precomputarizan y se aplican durante la corrida del modelo, produciéndose una selección aleatoria de las fracciones de cobertura con los caracteres espectrales puros de la biblioteca de CLASlite, este proceso de selección se realiza hasta 50 veces o hasta que la solución converja en un valor medio para cada fracción de cobertura de superficie (CLASlite Team, 2013, pág. 16)

Las iteraciones por pixel, producen una desviación estándar para las fracciones de PV, NPV y S, expresadas en imágenes de desviación estándar. La salida del AutoMCU genera una imagen de siete (7) bandas, la cual contiene información sobre la cobertura fraccional de la Vegetación Fotosintética (PV) así como de la NPV y el sustrato expuesto.

Estas bandas generadas luego de las iteraciones poseen las siguientes características, tal como se puede visualizar en la Tabla N° 15.

Tabla N° 15 Bandas de salida luego del análisis de AutoMCU

Bandas	Característica
1	Cobertura fraccional de sustrato expuesto (S) expresado en % (0-100).
2	Cobertura fraccional de vegetación fotosintética (PV) expresado en % (0-100).
3	Cobertura fraccional de vegetación no fotosintética (NPV) expresado en % (0-100).
4	Incertidumbre de la fracción S, se expresa como la desviación estándar de las iteraciones de AutoMCU.
5	Incertidumbre de la fracción PV, se expresa como la desviación estándar de las iteraciones de AutoMCU.
6	Incertidumbre de la fracción NPV, se expresa como la desviación estándar de las iteraciones de AutoMCU.
7	Error total, se expresa como el error medio cuadrático de la firma de reflectancia modelada vs observada.

Fuente: Adaptado de (Déborah, 2014, pág. 20).

d. Clasificación de la cobertura boscosa

Se clasifican los patrones de la imagen mediante un árbol de decisión el cual convierte los resultados del AutoMCU, en una estimación de la cobertura boscosa y no boscosa.

Bosque : $PV \geq 80 \wedge S < 20$

Área no boscosa : $PV < 80 \vee S \geq 20$

Donde:

PV : Cobertura fraccional de vegetación fotosintética.

S : Substrato expuesto.

Además de la condición de que PV sea mayor que 80, también está la condición de que S sea menor que 20. El objetivo es evitar que la vegetación no boscosa se clasifique como bosque.

Este árbol de decisión simple para cobertura boscosa, basado en el ajuste por defecto de Sval de 20, es lo suficientemente general para permitir que el algoritmo se ajuste a una amplia variedad de bosques tropicales (CLASlite Team, 2013, pág. 20).

El resultado de esto es un mapa de cobertura boscosa. Este mapa tiene tres clases. Los pixeles enmascarados se muestran en negro, los pixeles de bosque en gris y los pixeles de áreas no boscosas se muestran en blanco.

(CLASlite Team, 2013, pág. 21) indica que los mapas de cobertura boscosa pueden incorporarse en otros Sistemas de Información Geográfica (G.I.S.) para el cálculo de estadísticas espaciales o para la conversión en mapas visuales e imprimibles. Si bien las áreas no boscosas representadas en el mapa de cobertura boscosa pueden ser el resultado de la deforestación, es importante notar que ni la deforestación ni la perturbación se

pueden mapear con una sola imagen satelital. La deforestación y la perturbación son cambios del bosque, y por ende se requieren varias imágenes para su detección

e. Detección de cambios

CLASlite incluye la capacidad automatizada para detectar el cambio del bosque entre una serie temporal de imágenes tomadas en la misma área geográfica en un periodo de tiempo. El análisis multi-imagen es el enfoque más preciso para la detección de la pérdida de bosque (deforestación), ganancia (crecimiento secundario) o degradación (áreas con perturbaciones boscosas persistentes) (Déborah, 2014, pág. 22).

Para detectar el cambio en la cobertura boscosa, se deben utilizar dos (2) o más imágenes realizando un análisis multi-imagen, el cual es el más apropiado para detectar la pérdida de bosque (deforestación) y degradación de bosque (áreas de perturbación).

Donde:

- PV₁ : Cobertura fraccional fotosintética de la imagen 1.
- NPV₁ : Cobertura fraccional No fotosintética de la imagen 1.
- S₁ : Cobertura fraccional de Substrato de la imagen 1.
- PV₂ : Cobertura fraccional fotosintética de la imagen 2.
- NPV₂ : Cobertura fraccional No fotosintética de la imagen 2.
- S₂ : Cobertura fraccional de Substrato de la imagen 2.

Los pixeles se clasifican como deforestación y perturbación, en base a sus valores de cobertura fraccional que cumplen con ciertos criterios. El árbol de decisión para deforestación es el siguiente:

- Deforestación:

$$PV_1 - PV_2 \geq 25$$

Significa que la disminución de pixeles de vegetación fotosintética captura la mayor parte de la deforestación.

$$\forall S_1 \leq 5 \wedge (S_2 - S_1) \geq 15$$

Significa que el incremento de pixeles de sustrato expuesto captura la deforestación, seguida por el crecimiento secundario temprano del bosque.

$$PV_2 < 80 \wedge (NPV_2 - NPV_1) \geq 20$$

Significa un crecimiento en la cobertura de vegetación no fotosintética. Así también, existen árboles de decisión para perturbación y degradación forestal. Los árboles de decisión de CLASlite se han calculado con base en la investigación mediante imágenes de la cuenca amazónica y la cordillera andina (Déborah, 2014, pág. 29).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

a. Información Cartográfica

La información cartográfica que se utilizará para el presente estudio, son las Cartas Nacionales 12-i y 13-i, las cuales tienen una escala de 1: 100 000, elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.).

Tabla N° 16 Información cartográfica

Código	Nombre	Escala
12 – i	Nueva Cajamarca	1 : 100 000
13 – i	Rioja	1 : 100 000

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.).

Esta información fue descargada del portal de descargar de información espacial del Ministerio de Educación (MED), siguiendo el siguiente enlace <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>.

b. Mapas temáticos

Se utilizaron Mapas temáticos elaborados por instituciones nacionales, y son los siguientes:

- ✓ Mapa Ecológico, elaborado por la Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales (ONERN) en el año 1972 a escala 1 : 1 000 000.
- ✓ Mapa Geológico de los cuadrángulos 12-i y 13-i elaborado por el INGEMENT en el año 1990 a escala 1 : 100 000.
- ✓ Mapa geomorfológico de la región San Martín, elaborado por el INGEMENT en el año 2010 a escala 1 : 300 000.
- ✓ Mapa de Suelos, de la Zonificación Ecológica Económica de la Región San Martín en el año 2005 a escala 1 : 250 000.
- ✓ Mapa vial distrital elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el año 2016 a escala 1 : 65 000.

c. Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales corresponden al satélite Landsat del sensor Thematic Mapper (TM), adquiridas por el U.S. Geological Survey (U.S.G.S.). A continuación, se muestra la siguiente tabla con la relación de imágenes a utilizar.

Tabla N° 17 Imágenes Satelitales a utilizar

ID	Tipo de Imagen	Path / Row	Fecha	Sensor	Tamaño del Pixel
1	Imagen satelital	008 / 064	23 / 07 / 1989	TM	30 metros
2	Imagen satelital	008 / 064	09 / 08 / 1995	TM	30 metros
3	Imagen satelital	008 / 064	25 / 08 / 2001	TM	30 metros
4	Imagen satelital	008 / 064	08 / 09 / 2006	TM	30 metros
5	Imagen satelital	008 / 064	12 / 08 / 2008	TM	30 metros
6	Imagen satelital	008 / 064	18 / 08 / 2010	TM	30 metros

Fuente: U.S. Geological Survey (U.S.G.S.).

Las imágenes satelitales descargadas pertenecen a la colección L1TP, esto significa que se encuentran calibradas radiométricamente y ortorectificadas utilizando un grupo de puntos de control y un Modelo Digital de Elevación (DEM).

d. Información Hidrometeorológica

Tabla N° 18 Estaciones Hidrometeorológicas

ID	Nombre de estación	Tipo	Coordenadas		Altitud (msnm)	Distrito	Periodo utilizado (años)
			Latitud	Longitud			
1	Naranjillo	CO	5°49'34''S	77°23'14''W	1090	Nueva Cajamarca	1995 - 2005
2	Rioja	CO	6°2'48''S	77°10'1''W	880	Rioja	1996 - 2005
3	Chachapoyas	CO	6°12'S	77°52'W	2450	Chachapoyas	1995 - 2005
4	La Florida	Aforos	5°56,8' S	77°22,3' W	1900	Nueva Cajamarca	2001 - 2013

CO: Climatológica Ordinaria.

Fuente: Adaptado de visor de data histórica del SENAMHI.

e. Equipos

Son parte de los equipos básicos para el procesamiento de la información.

- Computadora DELL: para la sistematización y procesamiento de la información.
- Impresora y Plotter A3: para las impresiones del informe de tesis y mapas.
- GPS MAP64S Garmin: para el levantamiento de puntos en campo.

f. Software

Para realizar la investigación se integró las aplicaciones de ArcGIS, Global Mapper, y CLASlite, permitiendo así realizar un análisis sofisticado (Ver Tabla N° 19).

Tabla N° 19 Descripción del Software y sus aplicaciones

Programa	Descripción
CLASlite 3.3	Proporcionado por el Instituto de Investigación CARNIGE , de la universidad de Stanford , exclusivo para análisis de cobertura boscosa.
Envi 5.1	Visualización de imágenes de reflectancia y cobertura fraccional de bosque
ArcGIS 10.3	Generación e integración de las bases de datos, junto al diseño de la Subcuenca Yuracyacu.
Global Mapper	Manejo de Modelos Digitales de Elevación (DEM) para generar información geográfica de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Métodos

En este ítem se detallan los procedimientos que se desarrollaron en la investigación para analizar el efecto de los cambios ocurridos en la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu.

- La investigación es cuantitativa, ya que las variables (Cobertura boscosa, no boscosa, precipitación, escorrentía) se miden en cantidades (km², mm).
- El nivel de la investigación explicativa, ya que se buscan las razones que provocan el problema.
- El tipo de investigación es No Experimental, ya que no existe el control de variables, y evolutivo ya que se realiza con el propósito de analizar los cambios a través del tiempo.

A continuación, se describen los métodos utilizados para alcanzar los objetivos planteados.

3.2.1. Determinación de los cambios de la Cobertura Boscosa

Se realizó utilizando el CLASlite 3.3, este software proporcionado por el Instituto CARNIGE de la Universidad de Stanford y es exclusivo para determinar cambios en la cobertura de bosques, está basado en la siguiente ecuación:

$$\rho(\lambda)pixel = \left[(C_{pv} * \rho_{pv}(\lambda)) + (C_{npv} * \rho_{npv}(\lambda)) + (C_{substrate} * \rho_{substrate}(\lambda)) \right] + \varepsilon$$

Ecuación N° 26 Firma espectral del pixel

Donde:

- $\rho(\lambda)pixel$: Biblioteca de firmas de reflectancia.
 C_{pv} : Subpixel de cobertura fotosintética
 C_{npv} : Subpixel de cobertura no fotosintética.
 $C_{substrate}$: Subpixel del substrato o suelo.

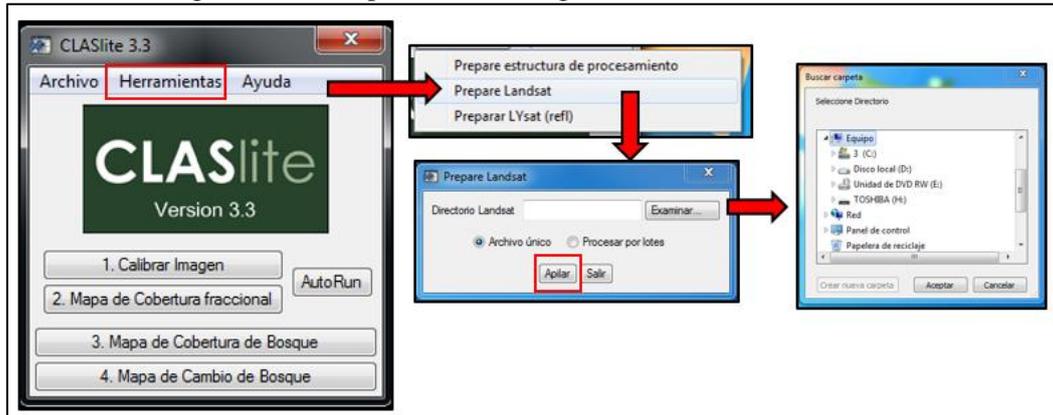
Para esto, se realizan los pasos que se mencionan a continuación

PASO 1: Preparación de las imágenes

Esto se aplica a todas las imágenes utilizadas en la investigación, cuyo procedimiento se explica en la Figura N° 21. Se hará uso de la herramienta “Prepare Landsat”, la cual tiene como función realizar el apilamiento de las imágenes de satélite a trabajar en la investigación.

Se debe tener en cuenta que las imágenes deben estar georeferenciadas (UTM – WGS84), en el caso de las imágenes Landsat 5 y 7, estas deben empezar con “L5” o “LT5” y “L7” o “LT7”, según sea el caso.

Figura N° 21 Preparación de Imágenes satelitales en CLASlite



Fuente: Elaboración propia.

PASO 2: Calibración de las imágenes

En este paso, se realizan dos (2) operaciones importantes en las imágenes:

○ **Calibración radiométrica**

Los sensores TM y ETM del satélite Landsat, detectan la energía reflejada de la superficie y de la atmósfera, esta energía queda registrada en cada pixel de la imagen, llamado Niveles Digitales (ND).

El objetivo de la calibración radiométrica es convertir esta data en unidades que podamos usar cuantitativamente (unidades de radiancia), para lo cual CLASlite utiliza factores de conversión (gains y offset) que son proporcionados por los proveedores de los sensores satelitales (USGS).

De dicho procesamiento, se obtiene una imagen en unidades de radiancia (es decir vatios por metros cuadrados por unidad de ángulo sólido), también conocida como la energía medida por el sensor satelital (CLASlite Team, 2013, pág. 9).

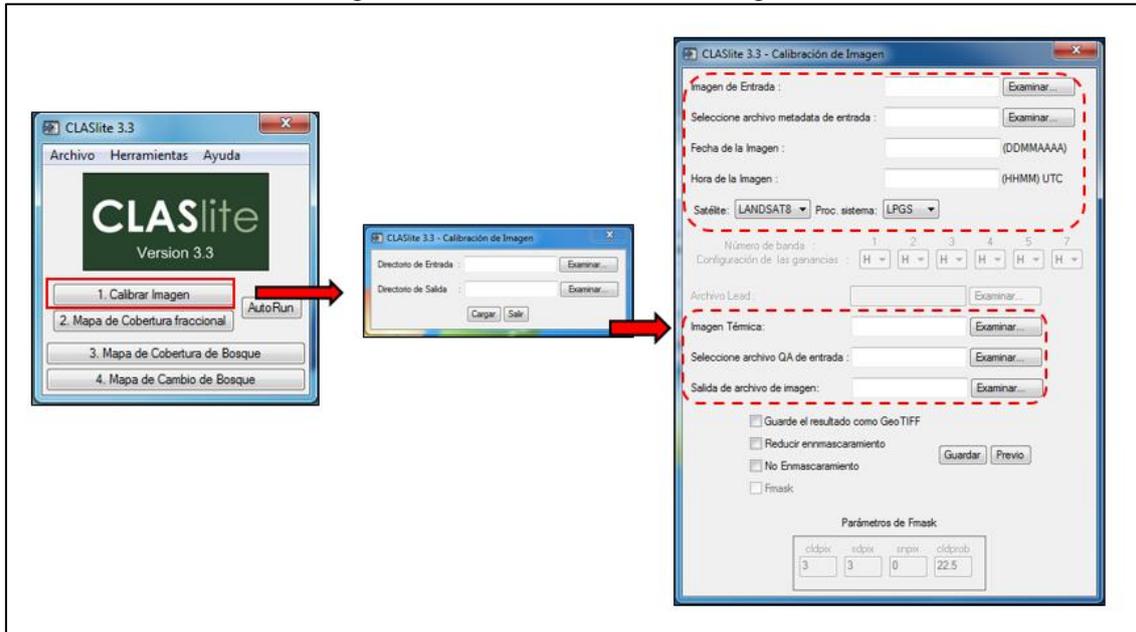
Esta imagen, no se aprecia, ya que el resultado final de este paso es la imagen de reflectancia.

○ **Corrección atmosférica**

CLASlite utiliza el modelo de Transferencia Radiactiva 6S (Vermote, Tange, Deuze, Herman, & Morcette, 1997), mediante datos de vapor de agua y aerosoles atmosféricos del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) de la NASA. El 6S modela el efecto de la atmósfera sobre la luz solar a medida que pasa a través de la atmósfera, interactúa con la superficie terrestre y regresa a través de la atmósfera al sensor satelital. La imagen cruda entonces se “corrige” eliminando el modelo estimado de la atmósfera (Déborah, 2014, pág. 9).

En la figura N°22, se muestra el procedimiento para realizar la calibración a reflectancia superficial.

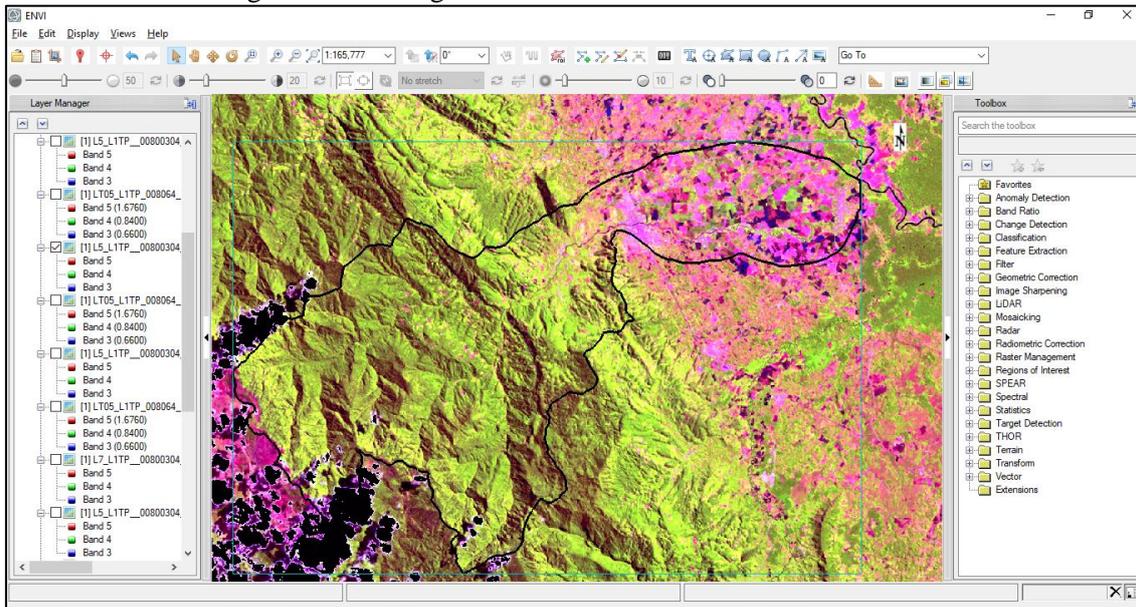
Figura N° 22 Calibración de las imágenes



Fuente: Elaboración propia.

La visualización de la calibración de imágenes puede hacerse en ENVI, o en otro software de procesamiento de imágenes de satélite (Ver Figura N° 23).

Figura N° 23 Imagen Landsat de Reflectancia del año 2001



Fuente: Elaboración propia.

PASO 3: Determinación de la Cobertura Fraccional

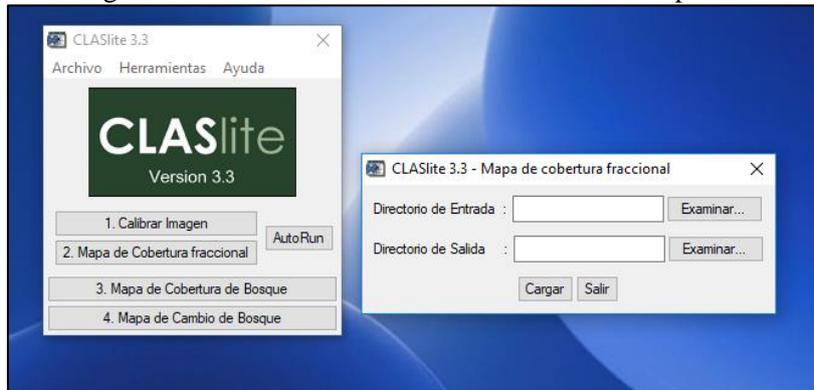
En este paso, el objetivo es determinar la cobertura terrestre a nivel de subpixel, en todas las imágenes usadas en la investigación. Así, nuestras imágenes de reflectancia se convertirán en coberturas de vegetación.

Esta clasificación a nivel de subpixel, es posible gracias a la función Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo (AutoMCU) de CLASlite usando las bibliotecas espectrales de bosques tropicales.

Estas bibliotecas poseen las firmas de reflectancia espectral que utiliza el submodelo AutoMCU: $\rho_{pv}(\lambda)$, $\rho_{npv}(\lambda)$, $\rho_{substrate}(\lambda)$.

Se dirige a la herramienta de Cobertura Fraccional (Ver Figura N° 24), en el directorio de entrada se escribe la ruta donde se encuentran las imágenes utilizadas en la investigación, igual para el directorio de salida (Ver figura N° 24)

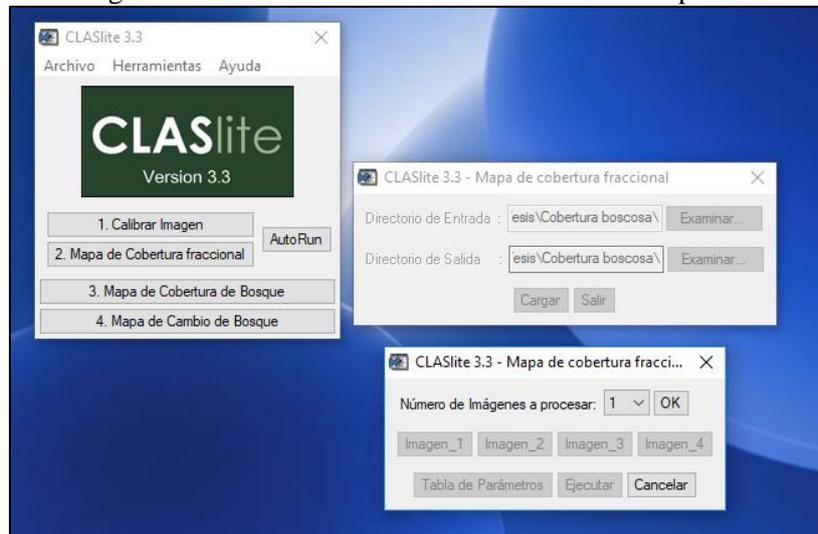
Figura N° 24 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 1



Fuente: Elaboración propia.

Se selecciona la imagen a procesar (Ver Figura N° 25), se pueden procesar más de una imagen a la vez, en este caso, se hará el proceso para cada imagen por separado.

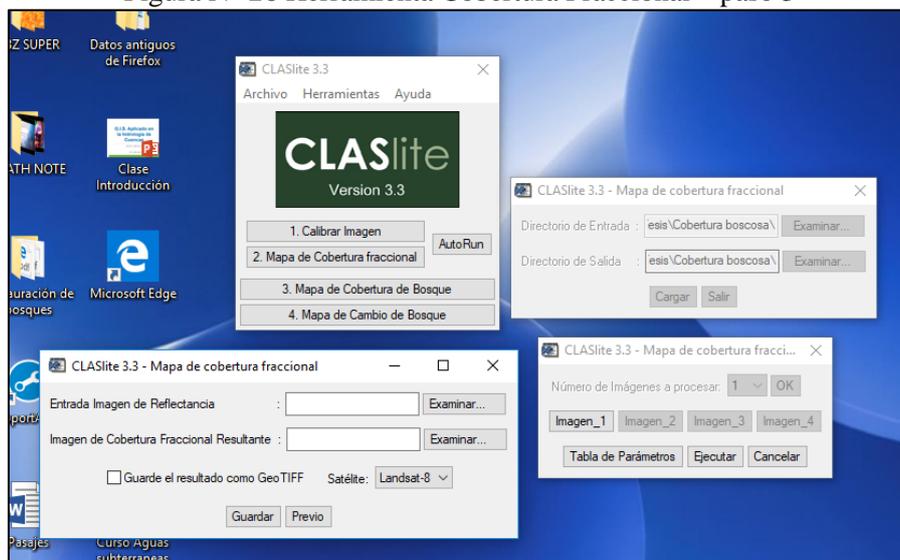
Figura N° 25 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 2



Fuente: Elaboración propia.

Se ingresan los archivos de reflectancia de la imagen a procesar, luego escribe donde se guardará la imagen de cobertura fraccional resultante, además se selecciona el satélite, se hace clic en guardar y luego en ejecutar (Ver Figura N° 26).

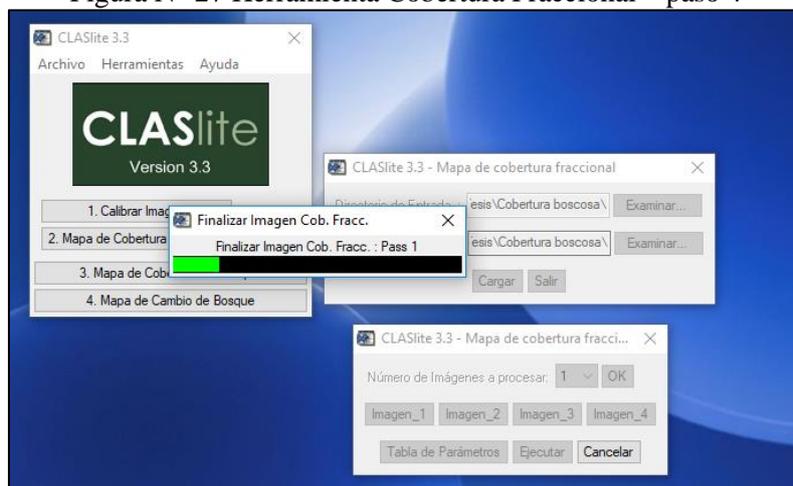
Figura N° 26 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 3



Fuente: Elaboración propia.

CLASlite, procesará la imagen de reflectancia a cobertura fraccional (Ver Figura N° 27), este proceso puede demorar entre 10 a 13 minutos por imagen.

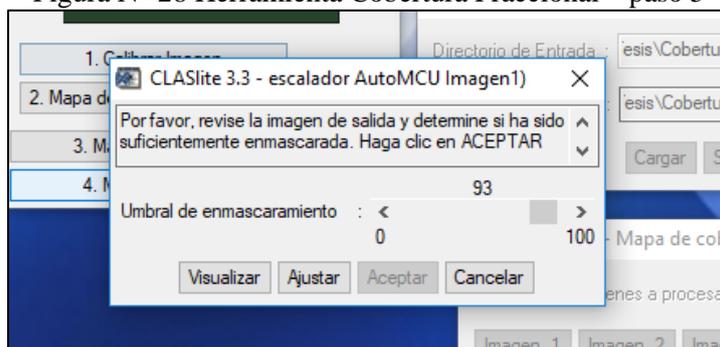
Figura N° 27 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 4



Fuente: Elaboración propia.

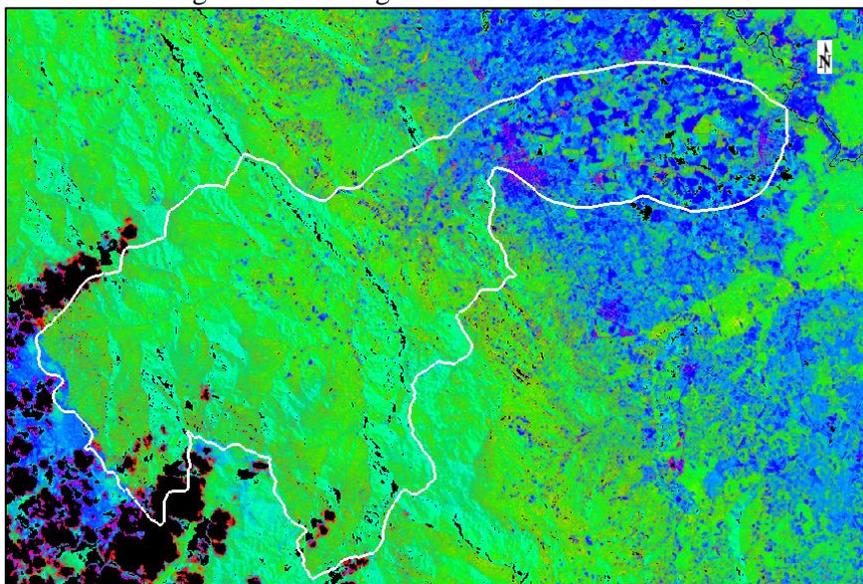
La ventana que muestra la Figura N° 28, permite ajustar el enmascaramiento de nubes, luego se da clic en Aceptar. Finalmente se obtienen las imágenes de cobertura fraccional (Ver Figura N° 28 y 29).

Figura N° 28 Herramienta Cobertura Fraccional – paso 5



Fuente: Elaboración propia.

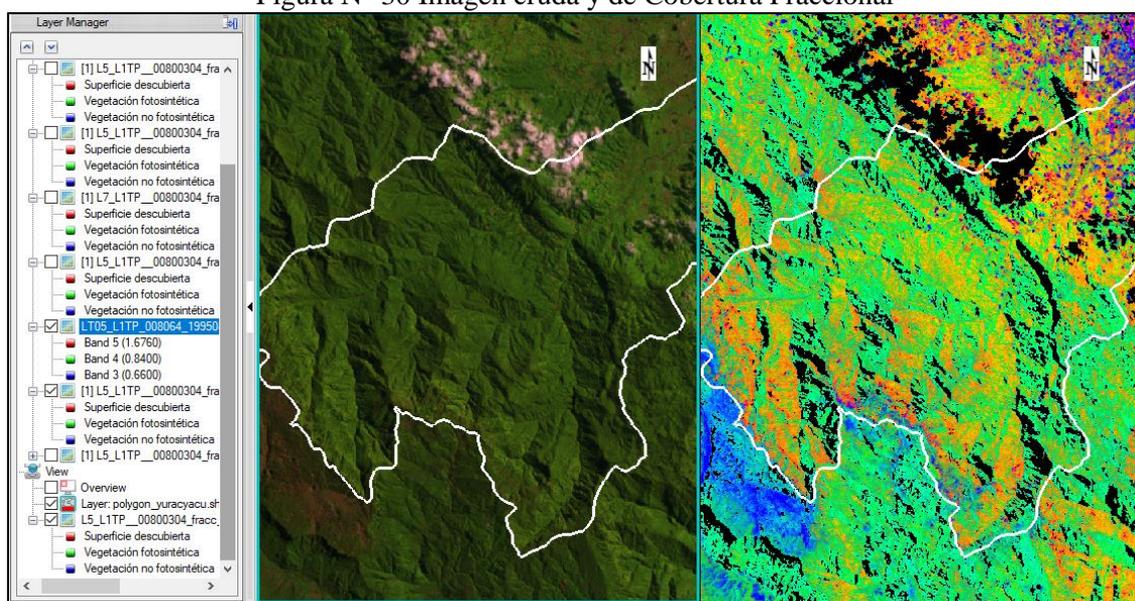
Figura N° 29 Imagen de Cobertura Fraccional



Fuente: Elaboración propia.

Los umbrales de enmascaramiento pueden ajustarse, como es el caso de la imagen del año 1995, donde el umbral tuvo que ajustarse, ya que hay zonas con sombra, que se enmascaran. Ver Figura N° 30.

Figura N° 30 Imagen cruda y de Cobertura Fraccional



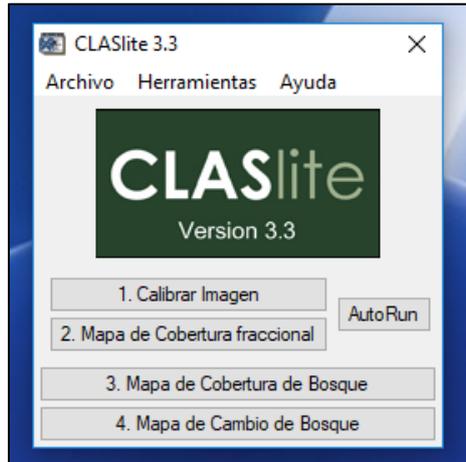
Fuente: Elaboración propia.

PASO 4: Clasificación de la Cobertura Boscosa

Aquí tomaremos las imágenes de cobertura fraccional y la convertiremos en un mapa de cobertura boscosa y no boscosa.

Para esto, seleccionamos la herramienta “Mapa de Cobertura de Bosque” (Ver Figura N° 31). Se procede a realizarlo para cada imagen.

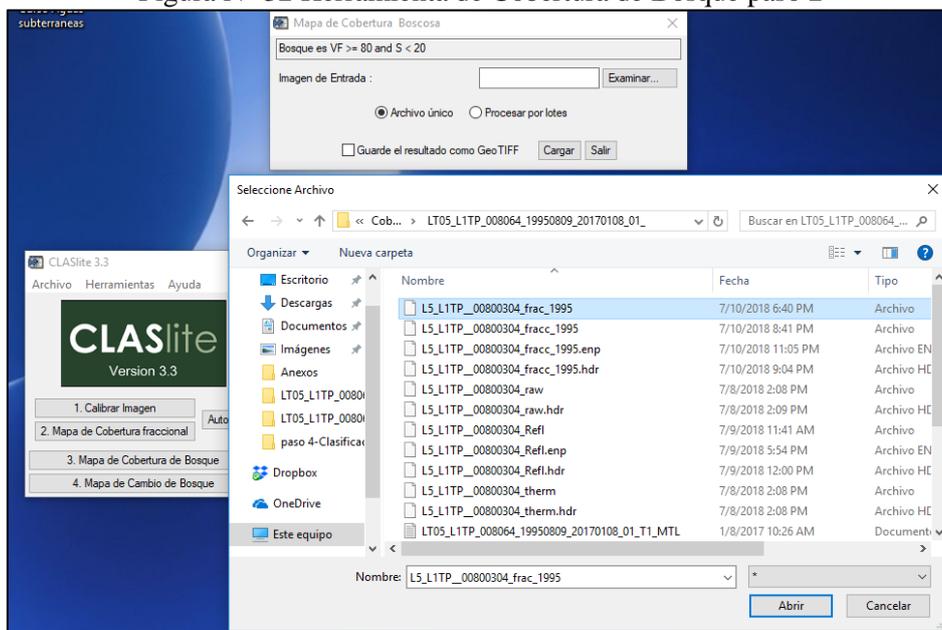
Figura N° 31 Herramienta de Cobertura de Bosque paso 1



Fuente: Elaboración propia.

Se debe seleccionar la imagen de cobertura fraccional del año a evaluar haciendo clic en abrir, el ejemplo mostrado en la figura N° 32, es un ejemplo para el año 1995. Luego se hace clic en guardar como imagen TIFF, y hacer clic en cargar.

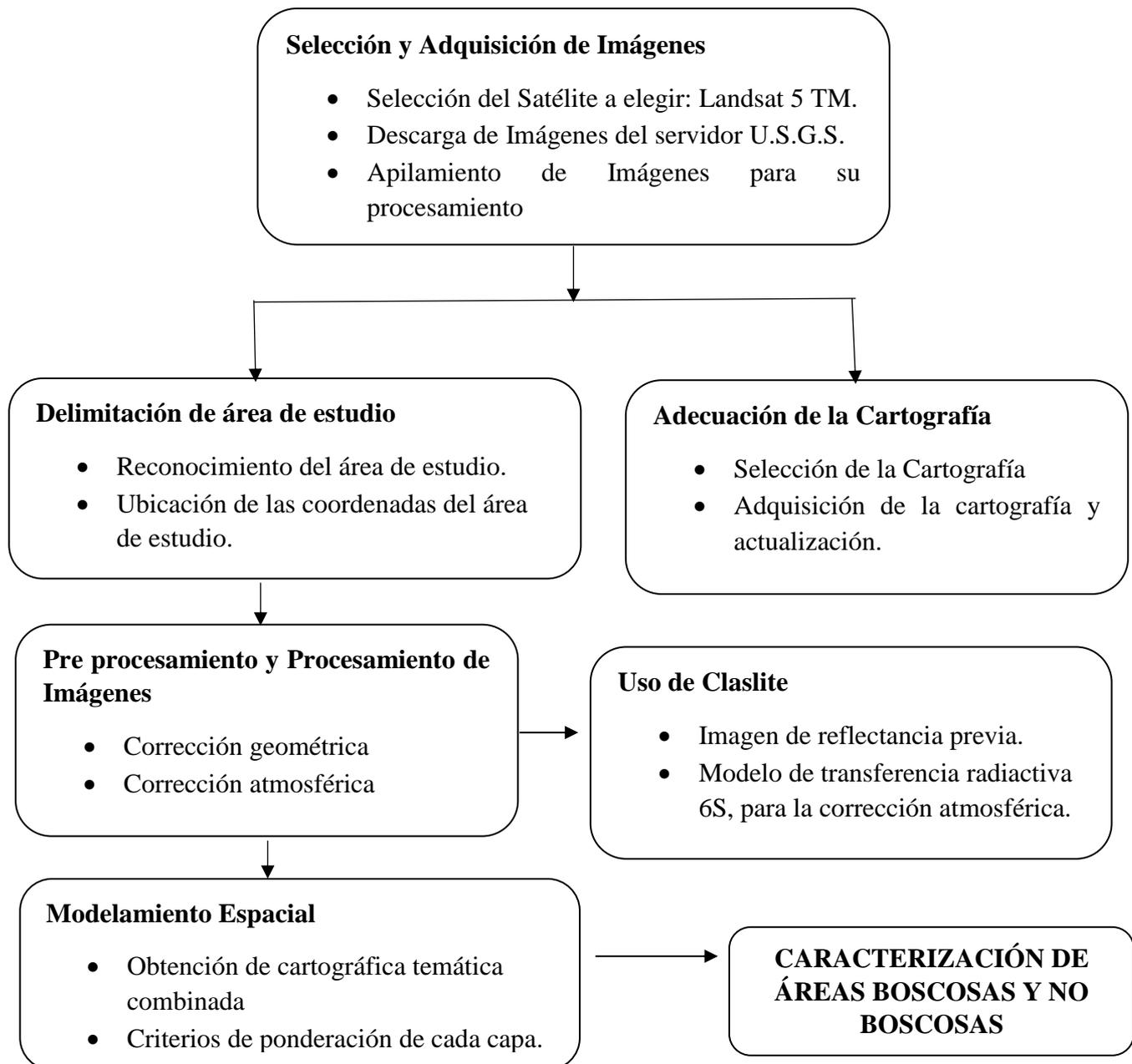
Figura N° 32 Herramienta de Cobertura de Bosque paso 2



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra un diagrama, esquematizando los procesos para la determinación de la cobertura fraccional en la Subcuenca Yuracyacu usando Claslite.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA Y NO BOSCOSA



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Regulación hídrica de la subcuenca

Relación precipitación - escorrentía

▪ Precipitación por el método regional

En Perú existen zonas donde no se tiene medición de la lluvia debido a que la densidad pluviográfica es pobre, sin embargo, es prioridad conocer el valor precipitado, por tal razón se utilizan las estaciones de una zona pluviométrica que en el ámbito puedan contribuir a determinar la ecuación regional que defina el comportamiento de la

precipitación a nivel anual o mensual. En tal sentido, el método regional, se utilizará en zonas de información limitada con la finalidad de conocer la precipitación media en la Subcuenca Yuracyacu, en base a las estaciones Naranjillo, Rioja y Chachapoyas.

a. Técnica de isoyetas

Consiste en dibujar líneas de igual valor de precipitación en la subcuenca, luego se determina la precipitación por áreas parciales formadas entre dos (2) isoyetas de la subcuenca de la siguiente forma:

$$Pp \text{ media} = \frac{\sum_1^i \left(\frac{P_i + P_{i-1}}{2} \times A_i \right)}{\sum_1^i A_i}$$

Ecuación N° 27 Precipitación media

Donde:

- $P_1 \dots P_i$: Valor en mm de cada isoyeta.
 $A_1 \dots A_i$: Área parcial en km^2 entre 2 isoyetas.

▪ **Escorrentía**

Se utilizó con los caudales mensuales (m^3/s) medidos en la estación de aforos, y fueron convertidos a escorrentía mensual, mediante la siguiente forma:

$$E = \frac{Q \times T}{A}$$

Ecuación N° 28 Escorrentía

Donde:

- Q : Caudal medio mensual (m^3/s).
 T : Es el tiempo en el que se midió dicho caudal (s).
 A : Es el área de la subcuenca de recepción en donde se mide el caudal. (km^2).

3.3. Etapas de la investigación

a. **Etapa de Gabinete**

Se clasifica la información que se ha recolectado y se sistematiza la información.

b. **Etapa de Campo**

Consiste en reconocer el área de estudio, así también para corregir o confirmar y complementar lo planteado en Gabinete.

c. **Etapa final de Gabinete**

En esta etapa se efectúan los ajustes que sean necesarios, utilizando los Mapas temáticos e información de campo relevante. Así también, la consulta a los expertos de las instituciones tales como el Servicio Nacional de Meteorología y Climatología (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

CAPITULO IV

CARACTERISTICAS DE LA SUBCUENCA

4.1. Ubicación Geográfica

4.1.1. Localización

El ámbito del estudio se encuentra situado en la región hidrográfica del río Yuracyacu, desarrollada sobre la cuenca del río Mayo, siendo el río Yuracyacu su afluente por la margen derecha y posee en su recorrido una longitud aproximada de 35 km. Altitudinalmente se desarrolla desde los 810 m.s.n.m hasta los 3400 m.s.n.m, abarcando parte del Bosque de Protección del Altomayo.

La Subcuenca del río Yuracyacu se encuentra comprendida entre las coordenadas geográficas 5°52'30'' y 6°2'30'' de latitud Sur (S) y 77°24'16'' y 77°16'32'' en la longitud Oeste (W).

4.1.2. Ubicación Política

La Subcuenca Yuracyacu se encuentra ubicada al Noroeste del departamento de San Martín, en la provincia de Rioja, formando parte de los distritos de Nueva Cajamarca, Yuracyacu y San Fernando. Ver Mapa N°1 y Tabla N° 20.

Tabla N° 20 Ubicación de la Subcuenca Yuracyacu

Subcuenca	Ubicación		
	Departamento	Provincia	Distritos
Yuracyacu	San Martín	Rioja	Nueva Cajamarca Yuracyacu San Fernando

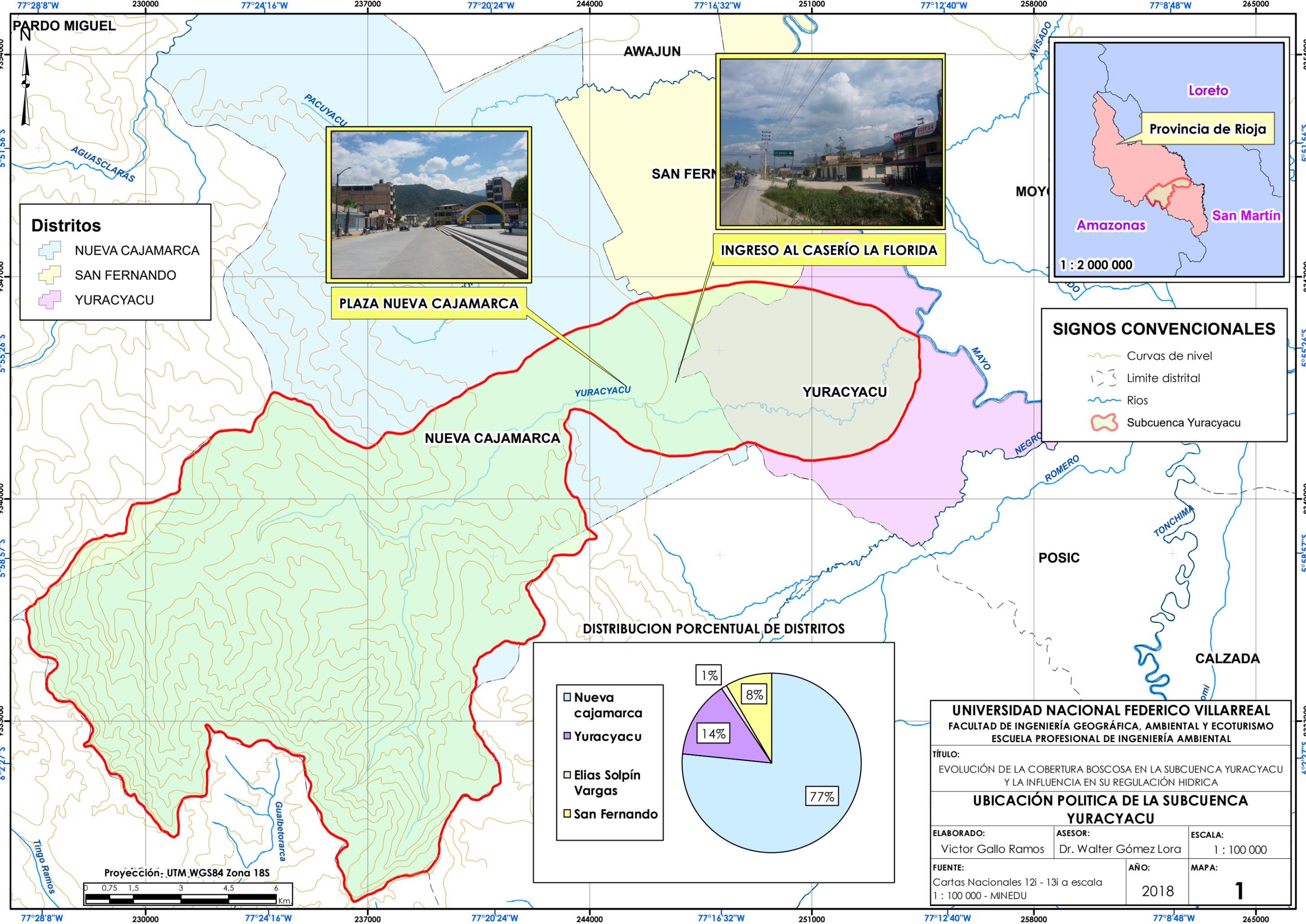
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Límites

El área de estudio posee los siguientes límites:

- Norte : Subcuenca Alto Mayo medio.
- Sur : Subcuenca Tonchima.
- Este : Bosque de protección del Altomayo y Subcuenca Naranjillo.
- Oeste : Subcuenca del río Negro.

De la Superficie total de la subcuenca, el 57% del área pertenece al Bosque de Protección Altomayo y el 23% a su área de amortiguamiento (Ver Mapa N° 20).



Distritos

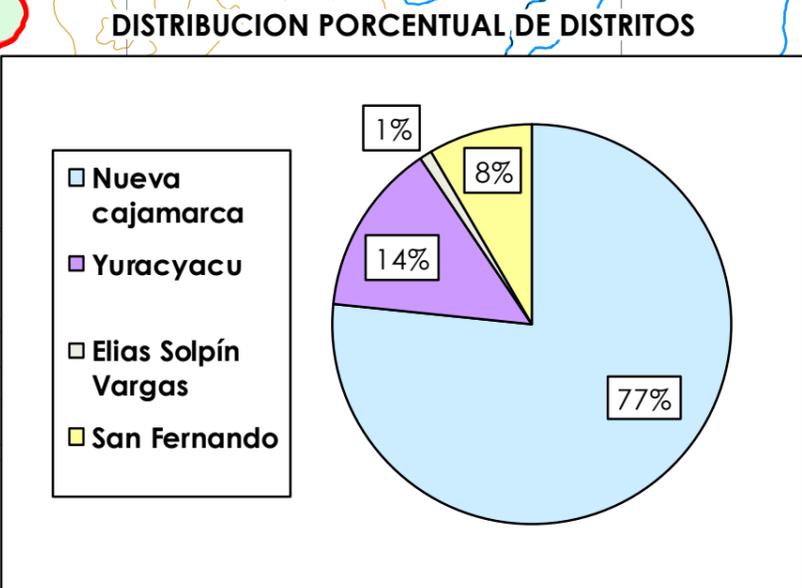
- NUEVA CAJAMARCA
- SAN FERNANDO
- YURACYACU

Provincia de Rioja

1 : 2 000 000

SIGNOS CONVENCIONALES

- Curvas de nivel
- Limite distrital
- Rios
- Subcuenca Yuracyacu



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

UBICACIÓN POLITICA DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - MINEDU	AÑO: 2018	MAPA: 1

Proyección: UTM, WGS84 Zona 18S

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA

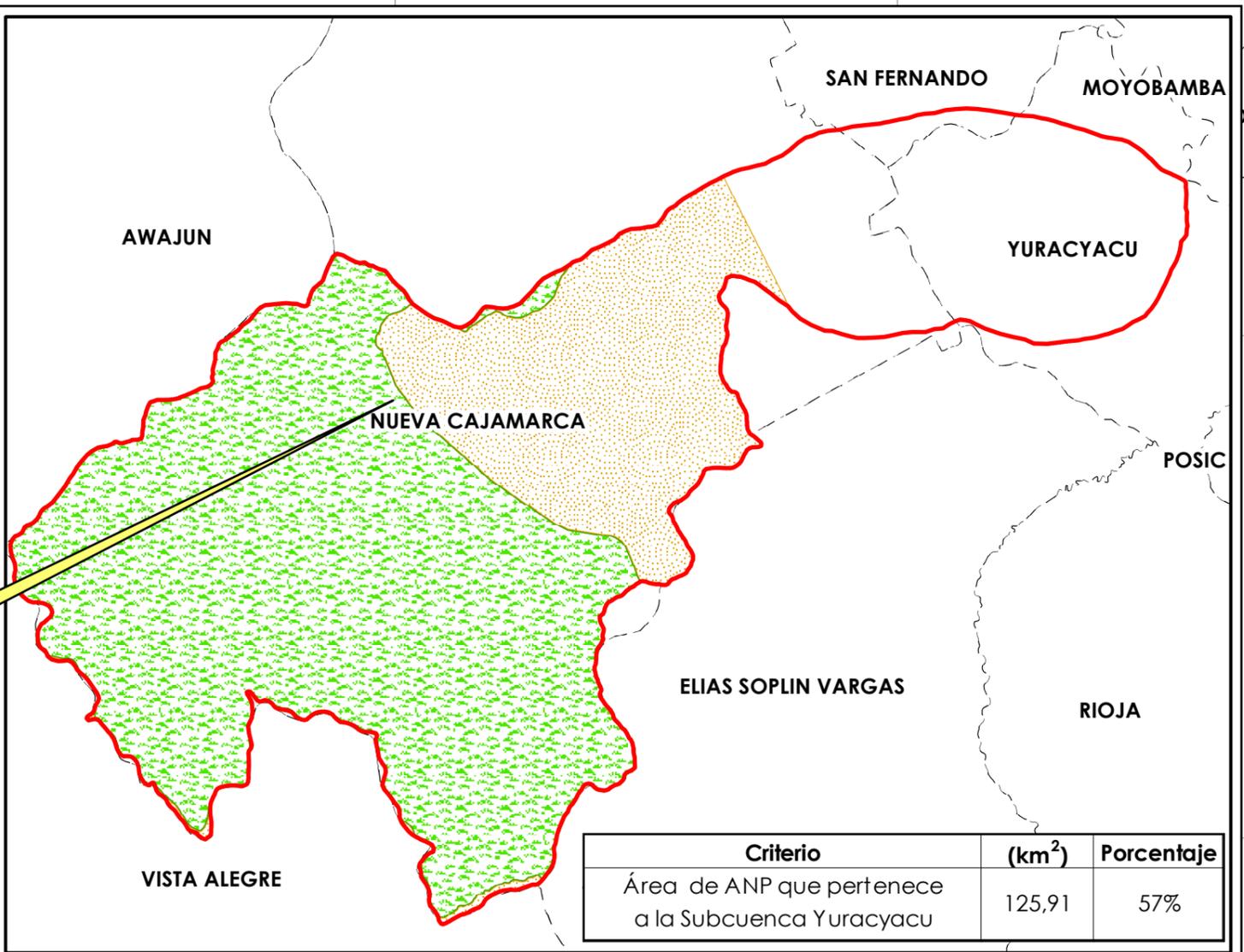
Color	Area Natural Protegida	Código	Nombre	Área (km ²)	Creación	Fecha de Creación
	Bosque de Protección	BPO6	Altomayo	1820	R.S. N° 0293 - 87 AG/DGFF	23/07/1987



BOSQUE DE PROTECCIÓN ALTOMAYO



SECTOR ALTO FLORIDA



Criterio	(km ²)	Porcentaje
Área de ANP que pertenece a la Subcuenca Yuracyacu	125,91	57%

LEYENDA

-  Subcuenca Yuracyacu
-  Bosque de Protección Altomayo
-  Zona de Amortiguamiento
-  Limite distrital

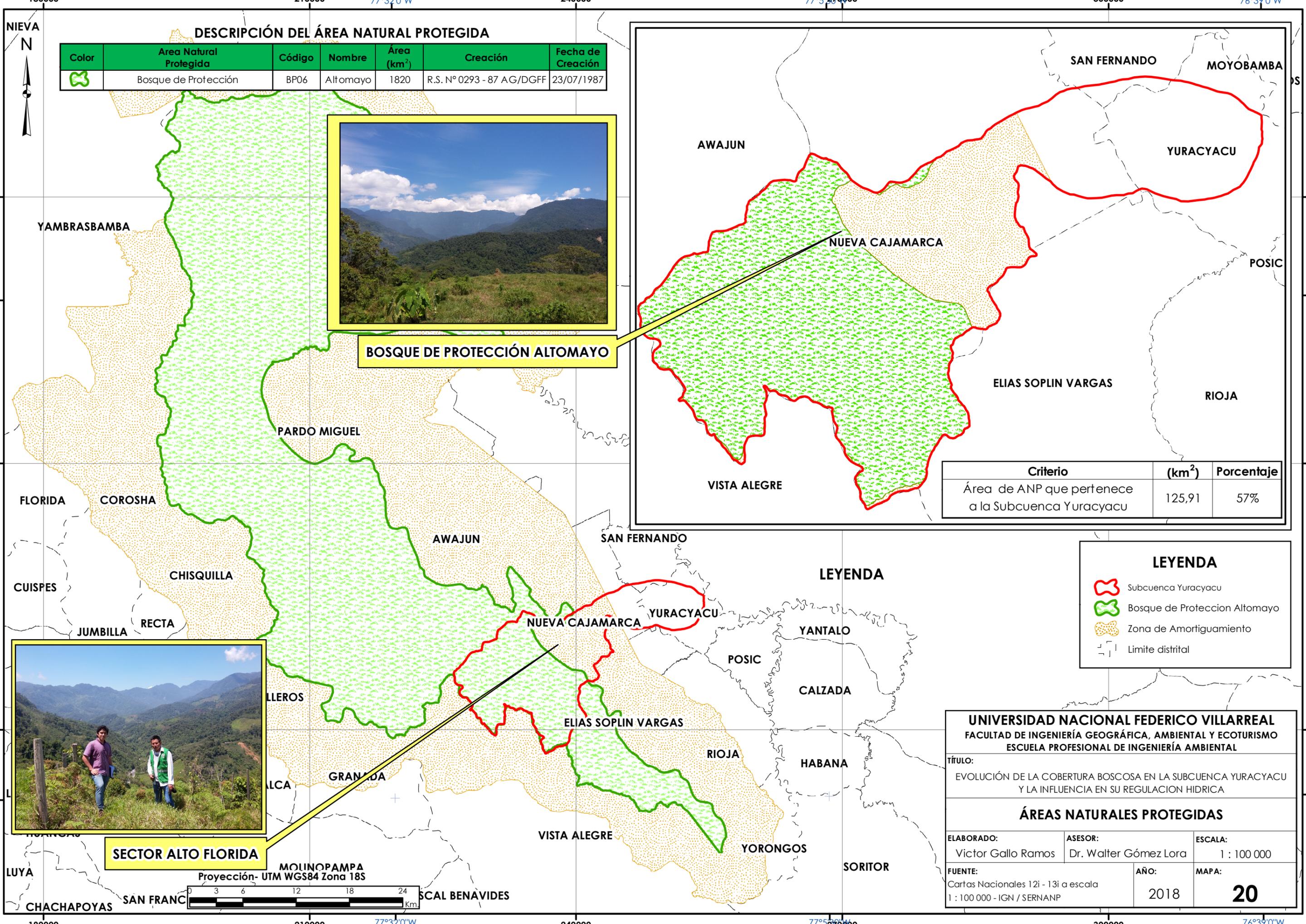
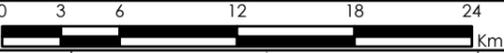
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACION HIDRICA

ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN / SERNANP	AÑO: 2018	MAPA: 20

Proyección- UTM WGS84 Zona 18S



4.2. Vías de acceso y Comunicaciones

4.2.1. Vías de acceso

La carretera Fernando Belaunde Terry (Ex carretera Marginal de la selva) es la vía de acceso y comunicación más importante, a donde llegan los ejes secundarios que unen entre sí a los distritos que conforman la Subcuenca Yuracyacu. Entre ellas tenemos a la Carretera Nueva Cajamarca – Ucrania – Yuracyacu, que es una vía afirmada con aproximadamente 11 km de longitud y une los distritos de Nueva Cajamarca y Yuracyacu, conectándose al eje principal cerca al puente Yuracyacu. Ver Tabla N° 21 y Mapa N° 2.

Desde la ciudad de Lima hasta Yuracyacu, el recorrido promedio es de 1 110 km, en un tiempo aproximado de veintitrés (23) horas. Dicho recorrido terrestre se da por la carretera Panamericana norte hasta el cruce de Olmos y luego por la carretera Fernando Belaunde Terry pasando por Pedro Ruiz y llegando a Nueva Cajamarca.

Tabla N° 21 Vías de Acceso

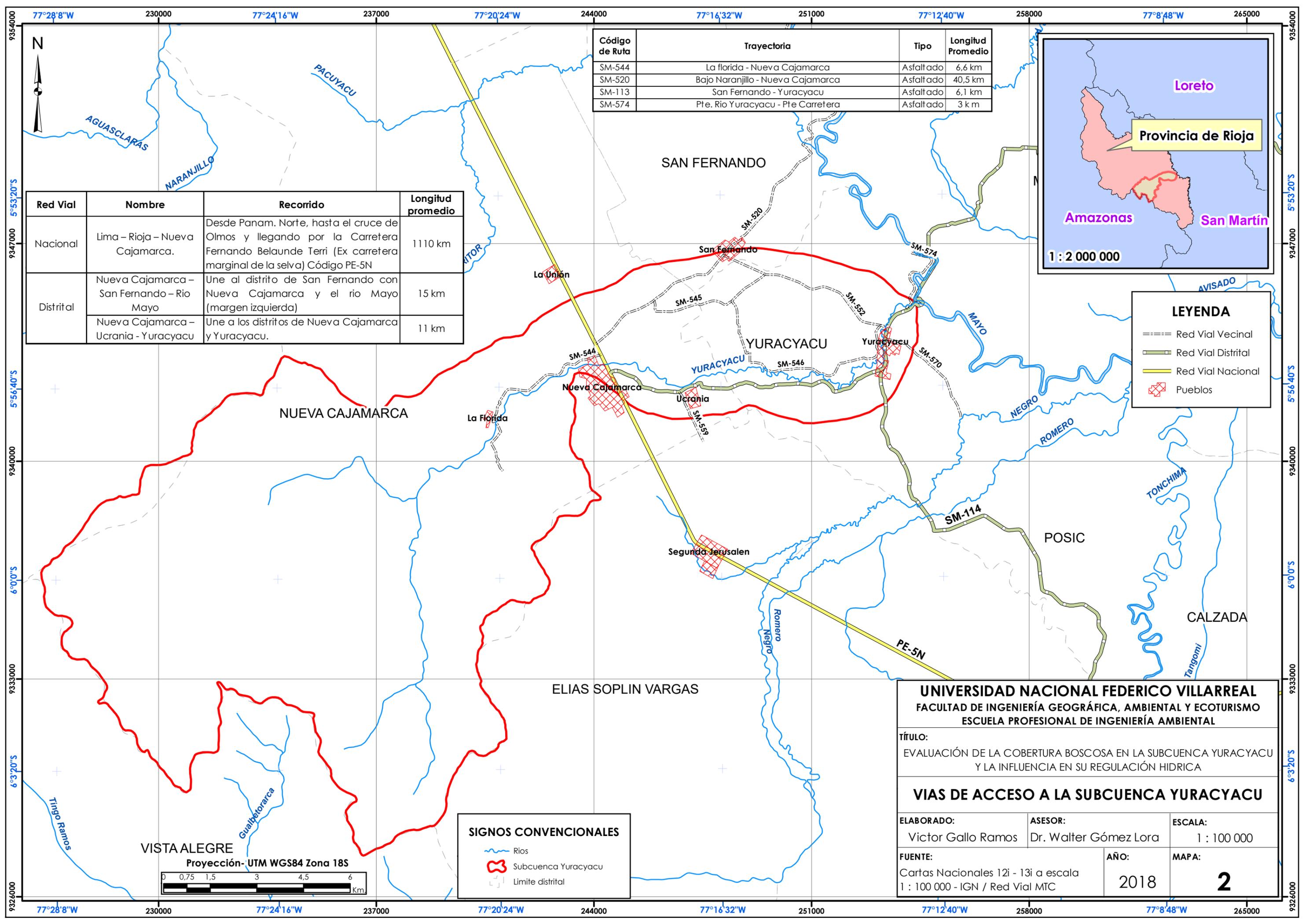
Red Vial	Nombre	Recorrido	Longitud promedio
Nacional	Lima – Rioja – Nueva Cajamarca	Desde Panamericana Norte, hasta el cruce de Olmos y llegando por la Carretera Fernando Belaunde Terry hasta Pedro Ruiz Gallo.	1 110 km
Distrital	Nueva Cajamarca – San Fernando – Rio Mayo	Une al distrito de San Fernando con Nueva Cajamarca y el rio Mayo (margen izquierda).	15 km
	Nueva Cajamarca – Ucrania - Yuracyacu	Une a los distritos de Nueva Cajamarca y Yuracyacu.	11 km
	Yuracyacu – El Avisado – Pueblo Libre	Une al distrito de Yuracyacu con la margen izquierda del río.	13 km

Fuente: Base GIS del M.T.C – Adaptado para la Subcuenca Yuracyacu.

Así también, el recorrido puede darse desde Lima hasta Tarapoto -por vía aérea-, y posteriormente por vía terrestre desde Tarapoto hasta Rioja y Nueva Cajamarca.

4.2.2. Comunicaciones

En la provincia de Rioja se encuentra el “Aeropuerto Rioja”, el cual se encuentra bajo la administración de CORPAC S.A. a veintiún (21) km de la ciudad de Nueva Cajamarca y posee una superficie no asfaltada.



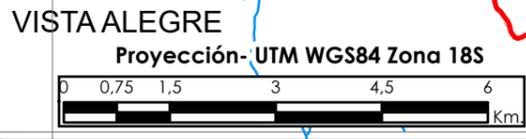
Código de Ruta	Trayectoria	Tipo	Longitud Promedio
SM-544	La florida - Nueva Cajamarca	Asfaltado	6,6 km
SM-520	Bajo Naranjillo - Nueva Cajamarca	Asfaltado	40,5 km
SM-113	San Fernando - Yuracyacu	Asfaltado	6,1 km
SM-574	Pte. Rio Yuracyacu - Pte Carretera	Asfaltado	3 km

Red Vial	Nombre	Recorrido	Longitud promedio
Nacional	Lima - Rioja - Nueva Cajamarca.	Desde Panam. Norte, hasta el cruce de Olmos y llegando por la Carretera Fernando Belaunde Terri (Ex carretera marginal de la selva) Código PE-5N	1110 km
Distrital	Nueva Cajamarca - San Fernando - Rio Mayo	Une al distrito de San Fernando con Nueva Cajamarca y el rio Mayo (margen izquierda)	15 km
	Nueva Cajamarca - Ucrania - Yuracyacu	Une a los distritos de Nueva Cajamarca y Yuracyacu.	11 km



LEYENDA	
	Red Vial Vecinal
	Red Vial Distrital
	Red Vial Nacional
	Pueblos

SIGNOS CONVENCIONALES	
	Rios
	Subcuenca Yuracyacu
	Limite distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

VIAS DE ACCESO A LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN / Red Vial MTC	AÑO: 2018	MAPA: 2

4.3. Diagnóstico Físico de la subcuenca

4.3.1. Geología

La Geología de la Subcuenca Yuracyacu, se elaboró con ayuda del Mapa Geológico Nacional a escala 1: 100 000 (Cuadrángulos de Nueva Cajamarca 12i y Rioja 13i) y también al estudio de Riesgos Geológicos de la Región San Martín del año 2010.

Según lo señalado, la Subcuenca Yuracyacu presenta Características Litoestratigráficas, donde la unidad más antigua son los sedimentos del Pérmico Superior del Grupo Mitu hasta llegar a los depósitos inconsolidados del cuaternario de naturaleza fluvial y aluvial. Ver Tabla N° 22 y Gráfico N°1.

4.3.1.1. Depósitos Inconsolidados

Los depósitos inconsolidados del Cuaternario son de naturaleza Fluvial y Aluvial y presentan las siguientes características:

- **Depósitos fluviales**

Están conformados por materiales ubicados en el cauce o lecho de los ríos y/o quebradas, terrazas bajas inundables y llanuras de inundación. Son depósitos heterométricos constituidos por bolos, cantos y gravas poco redondeadas en matriz arenosa o limosa, presentando alta permeabilidad (INGEMMET, 2010, pág. 25). Además, estos depósitos abarcan una superficie de 6,4 km², lo que representa el 3% del área de estudio.

- **Depósitos aluviales**

Los depósitos aluviales pertenecen al Holoceno y Pleistoceno, conformadas por extensas llanuras aluviales y terrazas (altas), a diferentes niveles sobre los valles, los que están ubicados en los márgenes del río Mayo y tributarios mayores (Yuracyacu) (INGEMMET, 2010, pág. 25).

Los depósitos aluviales poseen una extensión de 47,15 km² de los cuales 42,6 km² representan a los depósitos aluviales del Holoceno y 4,55 km² a los depósitos aluviales del Pleistoceno, los que en su totalidad representan el 21% de la subcuenca.

4.3.1.2. Unidades de Sustrato

Las unidades de sustrato identificadas en la Subcuenca Yuracyacu son las Rocas Volcánico – Sedimentarias, las cuales se describen a continuación:

- **Rocas Volcánico – Sedimentarias**

En esta unidad se ubican las secuencias del Grupo Mitu, correspondiente al sistema Triásico y Pérmico de la Era Paleozoica y está constituido por una secuencia de areniscas, lodolitas rojizas y grises. Presentan laderas con pendientes muy fuertes (casi verticales),

un relieve muy agreste y conspicuo y son susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos y derrumbes de grandes magnitudes (INGEMMET, 2010, pág. 27).

Esta unidad abarca una extensión de 23,24 km² y representa el 11% de la Subcuenca Yuracyacu.

▪ **Rocas Sedimentarias**

Dentro de las unidades representativas se encuentra el Grupo Pucará (Formación Condorsinga, Aramachay y Chambará), el cual abarca una superficie de 132,8 km², siendo la unidad más representativa de la subcuenca, ya que corresponde al 60% del área total. De éste total, el 87,3 km² corresponde a la formación Chambará, 31,6 km² a la formación Aramachay y 13,6 km² a la formación Condorsinga.

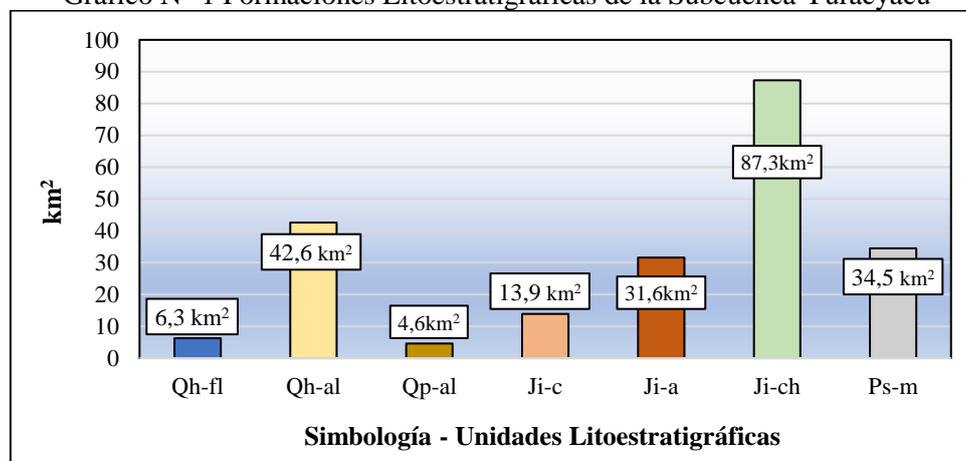
Esta unidad es susceptible a la formación de movimientos en masa de tipo derrumbes y caídas de roca (INGEMMET, 2010, pág. 27).

Tabla N° 22 Formaciones Geológicas de la Subcuenca Yuracyacu

Era	Sistema	Serie	Unidades Litoestratigráficas	Símbolo	Extensión (km ²)	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos fluviales	Qh-fl	6,3	
		Pleistoceno	Depósitos Aluviales	Qh-al	42,6	
				Qp-al	4,6	
Mesozoico	Jurásico	Inferior	Grupo Pucará	Formación Condorsinga	Ji-c	13,9
				Formación Aramachay	Ji-a	31,6
				Formación Chambará	Ji-ch	87,3
	Triásico	Grupo Mitu	Ps-m		34,5	
Paleozoico	Pérmico					Superior

Fuente: INGEMMET-Mapa Geológico del Perú 1:1 000000 Adaptado para la Subcuenca Yuracyacu.

Gráfico N° 1 Formaciones Litoestratigráficas de la Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

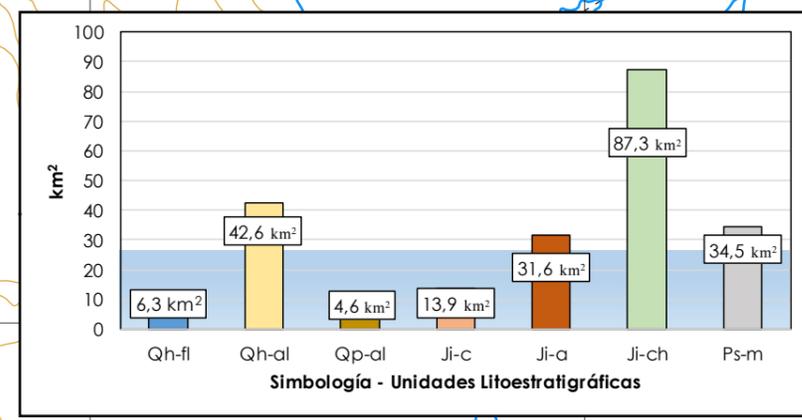
FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

Era	Sistema	Serie	Unidades Litoestratigráficas	Símbolo	Extensión (km ²)	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos fluviales	Qh-fl	6,3	
		Pleistoceno	Depósitos Aluviales	Qh-al	42,6	
				Qp-al	4,6	
Mesozoico	Jurásico	Inferior	Grupo Pucará	Formación Condorsinga	Ji-c	13,9
			Formación Aramachay	Ji-a	31,6	
			Formación Chambará	Ji-ch	87,3	
	Triásico					
Paleozoico	Pérmico	Superior	Grupo Mitu	Ps-m	34,5	



LEYENDA

	Ji-a		Qh-al
	Ji-c		Qh-fl
	Ji-ch		Qp-al
	Ps-m		

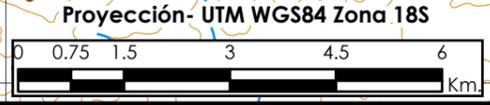
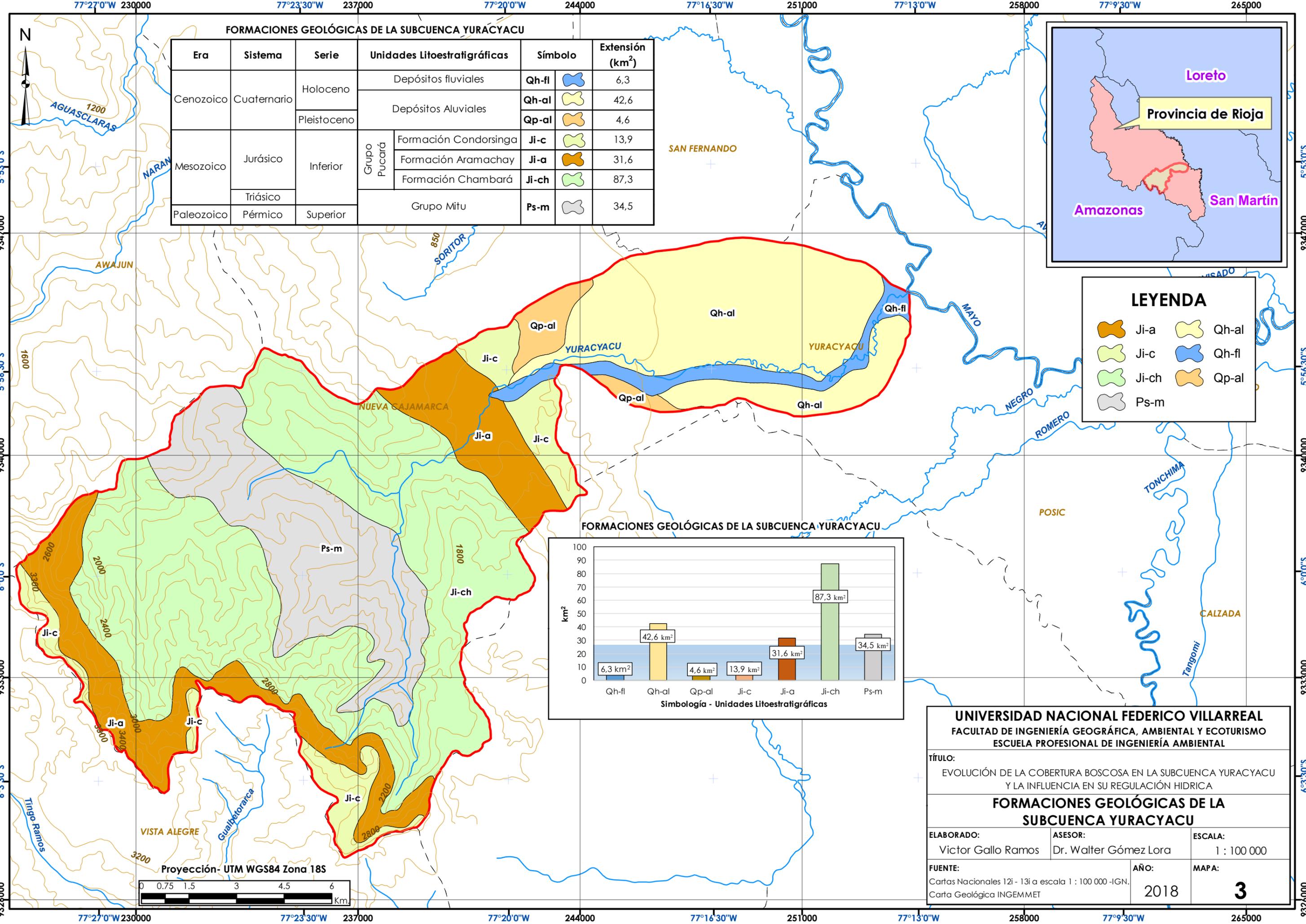


UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

FORMACIONES GEOLÓGICAS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 -IGN, Carta Geológica INGEMMET	AÑO: 2018	MAPA: 3



4.3.2. Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas del relieve terrestre teniendo en cuenta el transcurso del tiempo geológico. Así como su origen, naturaleza de las rocas, el clima de la región las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general entran como factores constructores del paisaje (INGEMMET, 2010, pág. 39).

En ese sentido, la Geomorfología de la Subcuenca Yuracyacu se elaboró en base al estudio de Riesgos Geológicos de la Región San Martín del año 2010, la cual se describe a continuación. Ver Tabla N° 23.

4.3.2.1. Geomorfología local

▪ Montaña de Pendiente Alta

Abarca una superficie de 1,67 km² lo que representa el 0,7% de la Subcuenca Yuracyacu. Se encuentra distribuida en la parte sur de la subcuenca, donde las pendientes son muy pronunciadas, limitando con el distrito de Vista Alegre.

Según (INGEMMET, 2010, pág. 40) esta unidad forma parte de la Cordillera Oriental y pueden presentarse algunos fenómenos de remoción en masa como caída de rocas, derrumbes y deslizamientos. Está compuesta por rocas sedimentarias del Grupo Pucará, donde se forman cañones profundos.

▪ Montaña de Pendiente Media

Presenta una superficie igual a 85,55 km², que representa el 39% de la subcuenca y se encuentra distribuida en el lado Oeste y Sur, limitando con los distritos de Awajun, Vista Alegre y Elías Soplín Vargas.

Esta unidad posee laderas con pendientes entre pronunciada y fuerte, habitualmente entre 20° y 30° y suelen estar conformadas por rocas Sedimentarias. Los movimientos de masa asociados a esta unidad son deslizamientos, derrumbes, caídas de rocas y procesos de erosión de laderas (INGEMMET, 2010, pág. 40).

▪ Montaña con ladera estructural

Esta unidad geomorfológica posee una superficie de 81,36 km², el cual representa el 37% de la subcuenca. Se encuentra distribuida en la zona centro de la subcuenca, abarcando el distrito de Nueva Cajamarca, limitando por el este con el distrito de Elías Soplín Vargas y por el Oeste con el distrito de Awajun.

Las pendientes en esta zona varían desde moderadas hasta muy abruptas y pueden presentar peligros de remoción en masa tales como caída de rocas, derrumbes, deslizamientos, erosión de laderas y flujo de detritos (INGEMMET, 2010, pág. 40).

- **Planicie Aluvial o Terraza Alta / Fondo de Valle Fluvial**

Son terrenos ubicados encima del cauce, de ancho variable y limitados a los valles, y abarcan una superficie de 30,45 km², lo que representa el 14% de la subcuenca. Esta unidad geomorfológica se ubica en los márgenes derecho e izquierdo del río Yuracyacu, cerca de su confluencia con el río Mayo.

Pueden mostrar pendientes suaves de entre 1° a 5° y en sus márgenes se pueden producir procesos de erosión fluvial y socavamiento de taludes, generando derrumbes y erosión de tierras (INGEMMET, 2010, pág. 53).

- **Planicie Alta (Pa)**

Presenta una superficie de 11,37 km² lo que representa el 5% de la subcuenca, se encuentra distribuida en el distrito de Nueva Cajamarca, limitando por el norte con el distrito de San Fernando.

Geodinámicamente, pueden presentarse procesos de erosión fluvial y de laderas, causados por socavamiento del río (INGEMMET, 2010, pág. 58).

- **Llanura o Planicie Inundable**

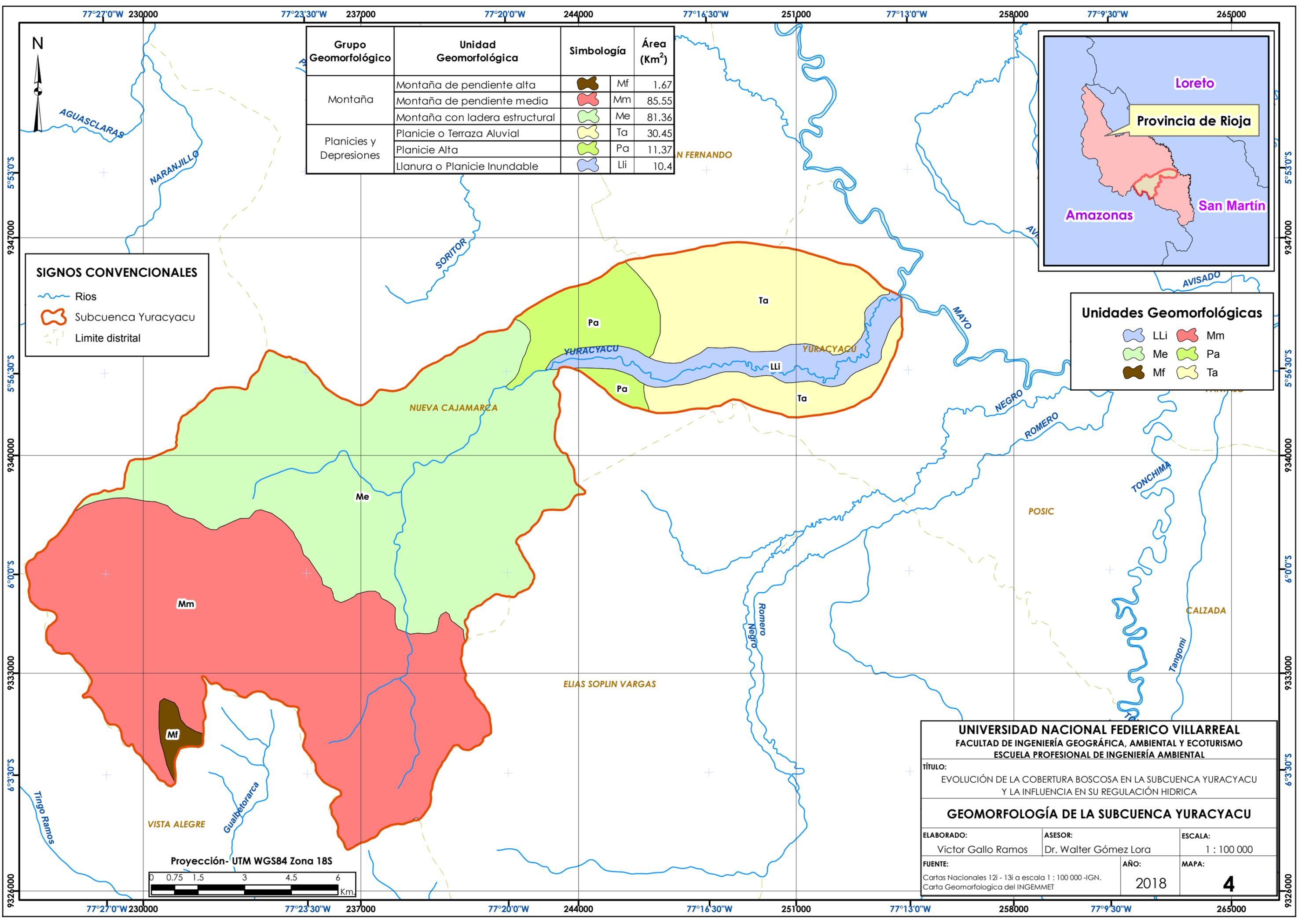
Esta unidad posee una extensión igual a 10,4 km², representando el 5% de la subcuenca. Comprende la parte baja de la Subcuenca Yuracyacu, encontrándose distribuida en la parte baja del curso fluvial del río Yuracyacu.

Se caracteriza por poseer superficies bajas y morfológicamente se distinguen como terrenos planos compuestos de material no consolidado y removible; además, están sujetas a inundaciones recurrentes, ya sean estacionales o excepcionales (INGEMMET, 2010, pág. 53).

Tabla N° 23 Geomorfología de la Subcuenca Yuracyacu

Grupo Geomorfológico	Unidad Geomorfológica	Simbología		Extensión (km ²)
Montaña	Montaña de pendiente alta		Mf	1,67
	Montaña de pendiente media		Mn	85,55
	Montaña con ladera estructural		Me	81,36
Planicies y Depresiones	Planicie o Terraza Aluvial		Ta	30,45
	Planicie Alta		Pa	11,37
	Llanura o Planicie Inundable		Lli	10,4

Fuente: INGEMMET, 2010. Adaptado para la Subcuenca Yuracyacu.



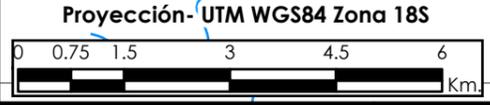
Grupo Geomorfológico	Unidad Geomorfológica	Simbología	Área (Km ²)
Montaña	Montaña de pendiente alta	Mf	1.67
	Montaña de pendiente media	Mm	85.55
	Montaña con ladera estructural	Me	81.36
Planicies y Depresiones	Planicie o Terraza Aluvial	Ta	30.45
	Planicie Alta	Pa	11.37
	Llanura o Planicie Inundable	Lli	10.4

SIGNOS CONVENCIONALES

- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

Unidades Geomorfológicas

- LLi
- Mm
- Me
- Pa
- Mf
- Ta



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

GEOMORFOLOGÍA DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Víctor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 -IGN. Carta Geomorfológica del INGEMMET	AÑO: 2018	MAPA: 4

4.3.2.2. Geomorfología Cuantitativa

La Geomorfología Cuantitativa o Morfometría es el estudio geomorfológico de la superficie de una cuenca, el cual permite analizar los parámetros fisiográficos (red de drenaje, pendiente, forma de la cuenca, entre otros) a partir de cálculos numéricos. En ese sentido, se muestran los parámetros fisiográficos de la subcuenca en estudio.

▪ Parámetros Fisiográficos

El análisis de los parámetros fisiográficos describe las características más importantes del complejo físico de la subcuenca y de su determinación para el estudio de la geometría y los aspectos matemáticos de la tesis. En la presente investigación se desarrollaron los parámetros fisiográficos de la Subcuenca Yuracyacu y del área de la subcuenca de recepción Yuracyacu, tomando como base la información cartográfica digital del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) a escala 1: 100 000. Su análisis nos permite conocer las características físicas de la subcuenca mediante el estudio de su superficie, relieve e hidrografía, el cual permite entender su funcionamiento hidrológico, así como realizar comparaciones con otras cuencas.

Superficie de la Subcuenca Yuracyacu

a. Área (A)

Superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes. En este caso están constituidas por el río Yuracyacu y sus tributarios, el cual comprenden una superficie de:

$$A = 220,8 \text{ km}^2$$

La superficie de la subcuenca de recepción Yuracyacu es de 161,5 km², la cual representa el 75% del área total de la subcuenca.

Cabe agregar que, el tamaño de la cuenca influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, tanto directa como de flujo base (Vera, 2004, pág. 2). El tamaño relativo de estos espacios hidrológicos, determinan de alguna manera, los nombres de microcuenca, subcuenca o cuenca, según lo explica el cuadro N° 1.

Cuadro N° 1 Tamaño relativo de los sistemas Hidrológicos

Unidad Hidrológica	Área (km ²)	Numero de Orden
Microcuenca	10 – 100	1, 2, 3
Subcuenca	101 – 700	4, 5
Cuenca	más de 700	6 a más

Fuente: (Vera, 2004, pág. 3).

Del cuadro N°1, se concluye que la unidad hidrográfica del río Yuracyacu, es una subcuenca. Además, se puede estimar que será de un orden de ríos de cuatro (4) o cinco (5).

b. Perímetro (P)

Esta característica tiene influencia en el tiempo de concentración de la cuenca, que es el tiempo de duración necesaria para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de la superficie llegue hasta su salida o desembocadura (Gómez Lora, 1987, pág. 45).

$$P = 95,1 \text{ km}$$

El perímetro de la Subcuenca Yuracyacu es de 95.1 km y el de la subcuenca de recepción es de 68,1 km.

Forma de la Subcuenca Yuracyacu

a. Coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius (Kc)

Es un índice que da una idea de la forma de la cuenca e indica la regularidad de la forma de la cuenca (Gómez Lora, 1987).

Expresa la relación entre el perímetro de la misma con un círculo de área idéntica a la cuenca. Por lo general, para unidades hidrográficas alargadas se espera que $K > 1$. Las cuencas de forma alargada reducen las probabilidades de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que afecta el tipo de respuesta en el río (Villón Vejar, 2002, pág. 42).

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación N° 29 Índice de Gravelius

Donde:

P: Perímetro de la cuenca.

A: Área de la cuenca en km^2 .

A continuación, se presenta el cuadro propuesto por (Vera, 2004) para evaluar la forma de una cuenca. Ver Cuadro N° 2.

Cuadro N° 2 Forma de la Cuenca, según el Coeficiente de compacidad (Kc)

Kc	Forma de la Cuenca
1 – 1,25	De casi redonda a oval redonda.
1,26 – 1,5	De oval redonda a oval alargada.
1,51 – 1,8	De oval alargada a alargada.

Fuente: (Vera, 2004, pág. 3).

$$Kc = 0.28 * \frac{95,1km}{\sqrt{220,8km^2}} = 1,8$$

La Subcuenca Yuracyacu tiene un valor de Coeficiente de compacidad igual a 1,8. Es de forma alargada e irregular siendo poco probable que sea cubierta en su totalidad por una tormenta, ya que permite la evacuación de las crecientes a través de los lechos fluviales, produciendo erosión. Asimismo, para la subcuenca de recepción presenta un valor de 1,5; siendo el tiempo de concentración de la lluvia ligeramente menor al de la subcuenca.

b. Factor de Forma (F_f)

Es la relación entre el ancho medio de la cuenca (Δm) y la longitud total del río principal. El ancho medio se obtiene dividiendo el área total de la subcuenca y la longitud total del río Yuracyacu.

$$\Delta m = \frac{A}{L}$$

Ecuación N° 30 Ancho medio

Donde:

L: Longitud del río más grande.

A: Área de la cuenca en Km².

El factor de forma nos da indicación de la tendencia de las avenidas en el cauce; es decir, muestra que la subcuenca está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma, que tendrá una mayor tendencia a concentrar las intensidades de lluvia (Villón Vejar, 2002, pág. 40).

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación N° 31 Factor forma

Donde:

L: Longitud del río más grande.

A: Área de la cuenca en Km².

Luego, tenemos:

$$F_f = \frac{220,8 \text{ km}^2}{(32\text{km})^2} = 0,2$$

La Subcuenca Yuracyacu, al poseer un factor de forma menor, tiene menos tendencia a concentrar las intensidades de lluvia, es decir, posee una forma alargada. Además, indica que los ríos tributarios producirán crecientes rápidos, como consecuencia de las precipitaciones pluviales que ocurren en la zona. La subcuenca de recepción presenta un factor forma igual a 0,6; esto indica que esta zona puede presentar crecidas más rápidas y turbulentas en comparación a toda la subcuenca.

c. Rectángulo Equivalente

Permite representar a la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo, que tiene la misma área y perímetro, y por lo tanto el mismo Índice de Gravelius; además, igual distribución de altitudes, y consecuentemente igual curva hipsométrica. En este rectángulo, las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas al lado menor (l), siendo estos lados, la primera y última curva de nivel (Villón Vejar, 2002, pág. 42).

A continuación, se presentan las ecuaciones para realizar los cálculos de Lado mayor (L) y el lado menor (l) del rectángulo equivalente.

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A}$$

Ecuación N° 32 Lado mayor rectángulo equivalente

$$l = \frac{P}{2} - L$$

Ecuación N° 33 Lado menor rectángulo equivalente

Donde:

L: Lado mayor del rectángulo.

l: lado menor del rectángulo.

P: Perímetro de la subcuenca.

A: Área de la subcuenca.

Para el Lado mayor del rectángulo equivalente, se tiene:

$$L = \frac{95,1\text{km}}{4} + \sqrt{\left(\frac{95,1\text{km}}{4}\right)^2 - 220,8\text{km}^2} = 42,33 \text{ km}$$

Y para el lado menor del rectángulo equivalente:

$$l = \frac{95,1\text{km}}{2} - \sqrt{\left(\frac{95,1\text{km}}{4}\right)^2 - 220,8\text{km}^2} = 5,22 \text{ km}$$

Dicho rectángulo tiene como base el lado menor con 5,22 km y el lado mayor de 42,3 km, constituyendo un rectángulo alargado, corroborando la forma de la subcuenca. (Ver Figura N°1). Es decir, el rectángulo equivalente de la subcuenca expresa su comportamiento hidrológico.

En la subcuenca de recepción se encontró que su lado mayor es de 28,1 km y su lado menor es de 5,95 km.

A continuación, se presenta el procedimiento para graficar el rectángulo equivalente de la Subcuenca Yuracyacu:

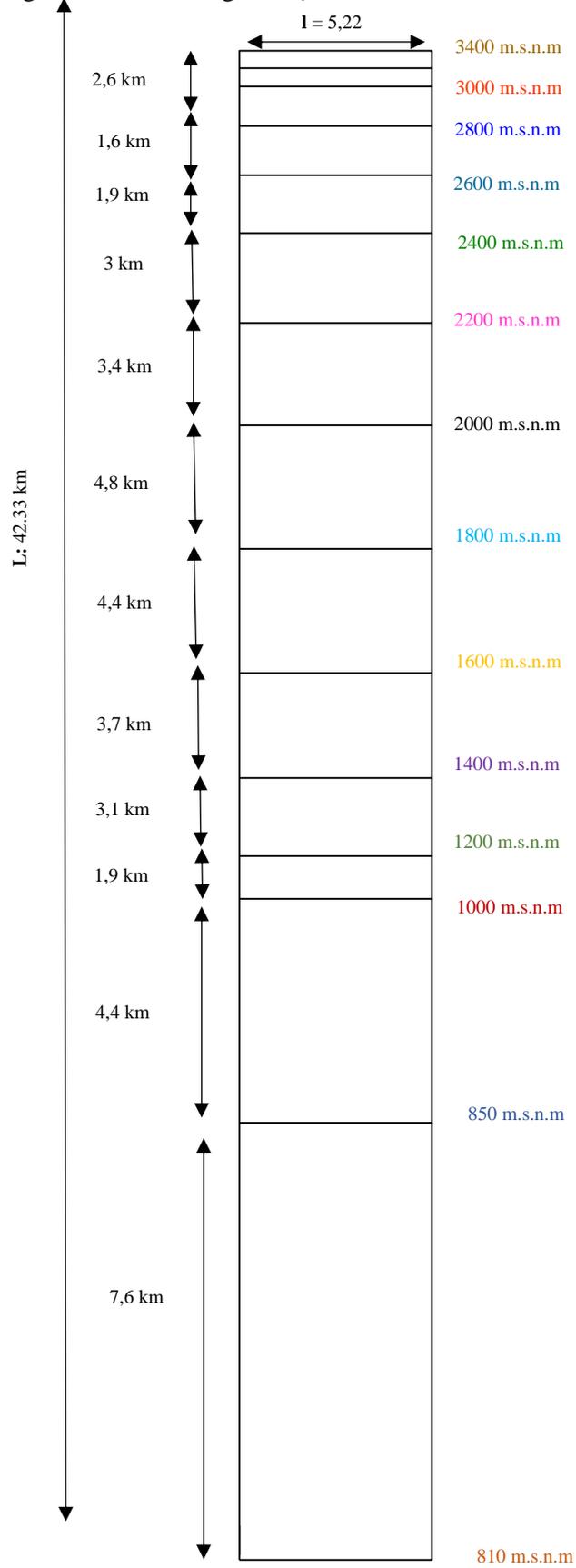
1. La cartografía faltante en el área de estudio fue completada mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM) del satélite ALOS PALSAR con resolución 12,5 m y la imagen satelital topográfica de ESRI.
2. Se establecieron los rangos de altitud de la subcuenca y se determinaron las áreas parciales por rango de altitud (A).
3. Para determinar la longitud entre cada curva de nivel se divide el área parcial por rango de altitud (A) entre el lado menor del rectángulo (B) calculado mediante la ecuación respectiva. Ver Cuadro N° 3.
4. Se dibuja el rectángulo equivalente de la Subcuenca Yuracyacu en AutoCAD, donde los lados horizontales del rectángulo representan las curvas de nivel.

Cuadro N° 3 Cálculos del rectángulo equivalente - Subcuenca Yuracyacu

Rango de Altitud (m.s.n.m.)		(A) Área parcial (km ²)	% Área	(B) Lado menor (km)	(A)/(B) (km)
810	850	39,5	17,8%	5,22	7,6
850	1000	23,1	10,5%	5,22	4,4
1000	1200	9,9	4,5%	5,22	1,9
1200	1400	16,1	7,3%	5,22	3,1
1400	1600	19,1	8,7%	5,22	3,7
1600	1800	22,9	10,4%	5,22	4,4
1800	2000	25,2	11,4%	5,22	4,8
2000	2200	17,7	8%	5,22	3,4
2200	2400	15,5	7%	5,22	3,0
2400	2600	9,9	4,5%	5,22	1,9
2600	2800	8,5	3,8%	5,22	1,6
2800	3400	13,4	6,1%	5,22	2,6
		220,8			42,3

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 33 Rectángulo Equivalente Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

Relieve de la Subcuenca Yuracyacu

a. Altitud Media (H_m)

Es el parámetro ponderado de las altitudes de la subcuenca, obtenidas en el mapa topográfico. Su valor se relaciona con la magnitud de la lámina de precipitación; además es importante en estudios regionales donde la información local es escasa.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H_m = \frac{\sum(H_{media} * \text{Área parcial})}{A}$$

Ecuación N° 34 Altitud media

Donde:

H_m: Altura media.

H_{mi}: Altura media entre 2 curvas de nivel.

A_i: Área entre 2 curvas de nivel.

A_t: Área total de la cuenca.

A continuación, se presentan los cuadros N° 4 y 5, con los cálculos para determinar la Altitud Media de la Subcuenca Yuracyacu y la subcuenca de recepción respectivamente.

Cuadro N° 4 Cálculos de la Altitud Media Subcuenca Yuracyacu

N°	Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	H _{media}	Área parcial * H _{media}
1	810	850	39,5	830	32 785
2	850	1000	23,1	925	21 367,5
3	1000	1200	9,9	1100	10 890
4	1200	1400	16,1	1300	20 930
5	1400	1600	19,1	1500	28 650
6	1600	1800	22,9	1700	38 930
7	1800	2000	25,2	1900	47 880
8	2000	2200	17,7	2100	37 170
9	2200	2400	15,5	2300	35 650
10	2400	2600	9,9	2500	24 750
11	2600	2800	8,5	2700	22 950
12	2800	3000	6,8	2900	19 720
13	3000	3200	3,2	3100	9 920
14	3200	3400	3,4	3300	11 154
Total			220,8		362 812,5

Fuente: Elaboración propia.

$$H_m = \frac{362746,5 \text{ km}^2 * \text{m. s. n. m}}{220,8 \text{ km}^2} = 1 643,2 \text{ m. s. n. m}$$

La altitud media de la Subcuenca Yuracyacu es 1 643,2 m.s.n.m.

Cuadro N° 5 Cálculos de la altitud media de la Subcuenca de Recepción

N°	Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	H _{media}	Área parcial * H _{media}
1	900	1000	5,5	950	5 225
2	1000	1200	98,2	1100	9 020
3	1200	1400	15,6	1300	20 280
4	1400	1600	19,1	1500	28 650
5	1600	1800	22,9	1700	38 930
6	1800	2000	25,2	1900	47 880
7	2000	2200	17,7	2100	37 170
8	2200	2400	15,5	2300	35 650
9	2400	2600	9,9	2500	24 750
10	2600	2800	8,5	2700	22 950
11	2800	3000	6,8	2900	19 720
12	3000	3200	3,2	3100	9920
13	3200	3400	3,4	3300	11 154
Total			161,5		311 299

Fuente: Elaboración propia.

$$H_m = \frac{311\,299\text{km}^2 * \text{m. s. n. m}}{161,5\text{ km}^2} = 1\,927,8\text{ m. s. n. m}$$

La altitud media de la subcuenca de recepción es 1 927,8 m.s.n.m.

b. Curva Hipsométrica y Polígono de frecuencia de Altitudes

El polígono de frecuencia de altitudes es un diagrama de relación entre áreas parciales de la cuenca, expresadas en porcentaje y la altitud relativa a dichas áreas, comprendidas entre curvas de nivel. Además, indica la distribución de la superficie de la subcuenca en relación a su altitud media.

La generación de la curva hipsométrica fue sugerida por Langbein et al., (1947) citado en (Gaspari, Senisterra, Delgado, Besteiro, & Rodriguez Vagaría, 2013, pág. 55) para proporcionar información sintetizada sobre la altitud de la subcuenca por tramos de altitud. En la presente tesis se determinó a partir de las curvas de nivel a escala 1:100 000 del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.).

A continuación, en los cuadros N° 6 y 7 se presentan los cálculos para determinar la Curva Hipsométrica de la Subcuenca Yuracyacu y la subcuenca de recepción respectivamente.

Cuadro N° 6 Cálculos de la Curva Hipsométrica y la frecuencia de altitudes de la Subcuenca Yuracyacu

Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	Área por encima		Área por debajo		% Área por intervalo
			Acumulada	% Acumulada	Acumulada	% Acumulada	
810	850	39,5	220,78	100,00%	39,5	17,89%	17,9%
850	1000	23,1	181,28	82,11%	62,6	28,35%	10,5%
1000	1200	9,9	158,18	71,65%	72,5	32,84%	4,5%
1200	1400	16,1	148,28	67,16%	88,6	40,13%	7,3%
1400	1600	19,1	132,18	59,87%	107,7	48,78%	8,7%
1600	1800	22,9	113,08	51,22%	130,6	59,15%	10,4%
1800	2000	25,2	90,18	40,85%	155,8	70,57%	11,4%
2000	2200	17,7	64,98	29,43%	173,5	78,59%	8,0%
2200	2400	15,5	47,28	21,41%	189	85,61%	7,0%
2400	2600	9,9	31,78	14,39%	198,9	90,09%	4,5%
2600	2800	8,5	21,88	9,91%	207,4	93,94%	3,8%
2800	3000	6,8	13,38	6,06%	214,2	97,02%	3,1%
3000	3200	3,2	6,58	2,98%	217,4	98,47%	1,4%
3200	3400	3,38	3,38	1,53%	220,78	100,00%	1,5%

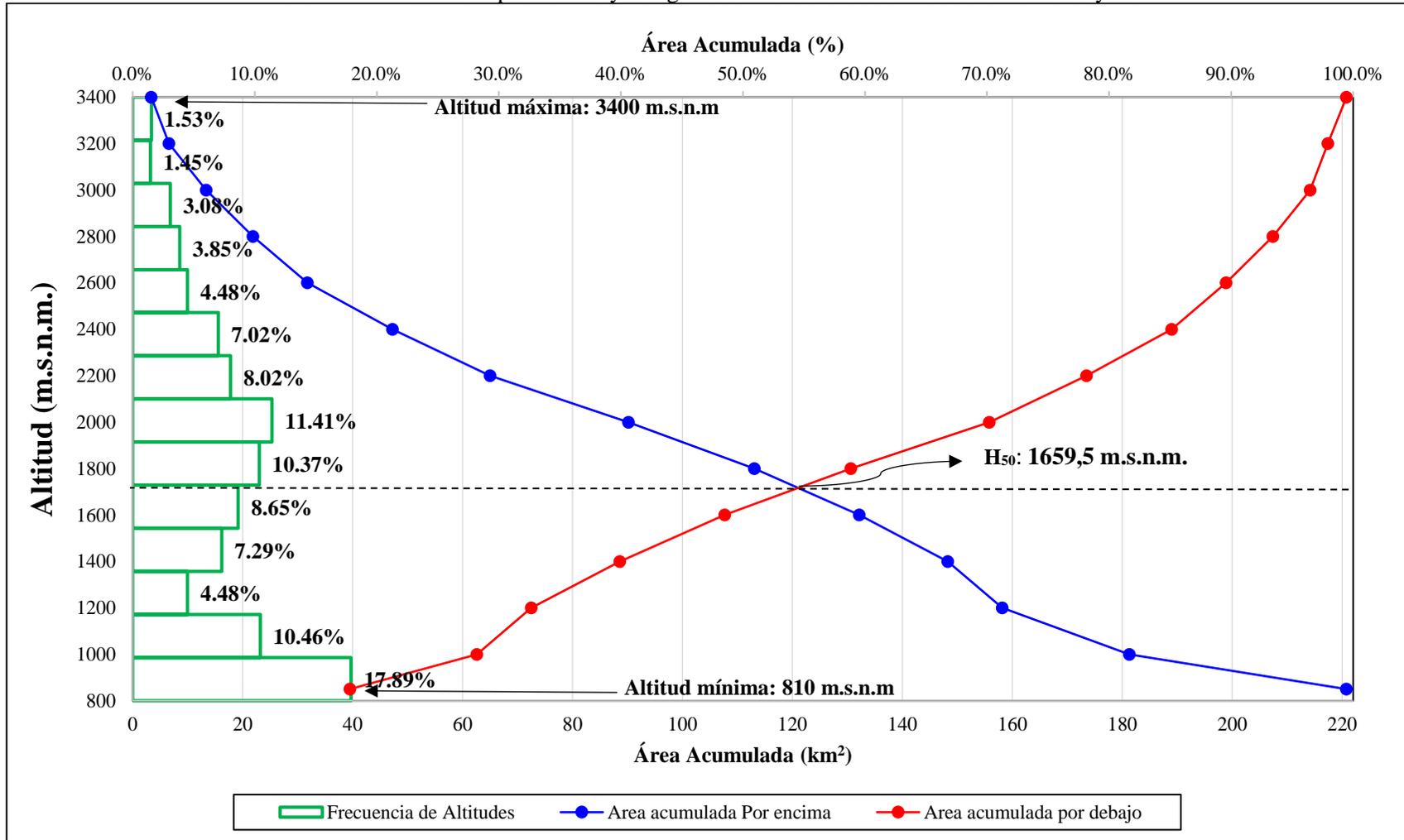
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 7 Cálculos de la Curva Hipsométrica y la frecuencia de altitudes de la subcuenca de recepción

Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	Área Por encima		Área Por debajo		% Área por intervalo
			Acumulada	% Acumulada	Acumulada	% Acumulada	
900	1000	5,5	161,48	100%	5,5	3%	3%
1000	1200	8,2	155,98	97%	13,7	8%	5%
1200	1400	15,6	147,78	92%	29,3	18%	10%
1400	1600	19,1	132,18	82%	48,4	30%	12%
1600	1800	22,9	113,08	70%	71,3	44%	14%
1800	2000	25,2	90,18	56%	96,5	60%	16%
2000	2200	17,7	64,98	40%	114,2	71%	11%
2200	2400	15,5	47,28	29%	129,7	80%	10%
2400	2600	9,9	31,78	20%	139,6	86%	6%
2600	2800	8,5	21,88	14%	148,1	92%	5%
2800	3000	6,8	13,38	8%	154,9	96%	4%
3000	3200	3,2	6,58	4%	158,1	98%	2%
3200	3400	3,4	3,4	2%	161,5	100%	2%

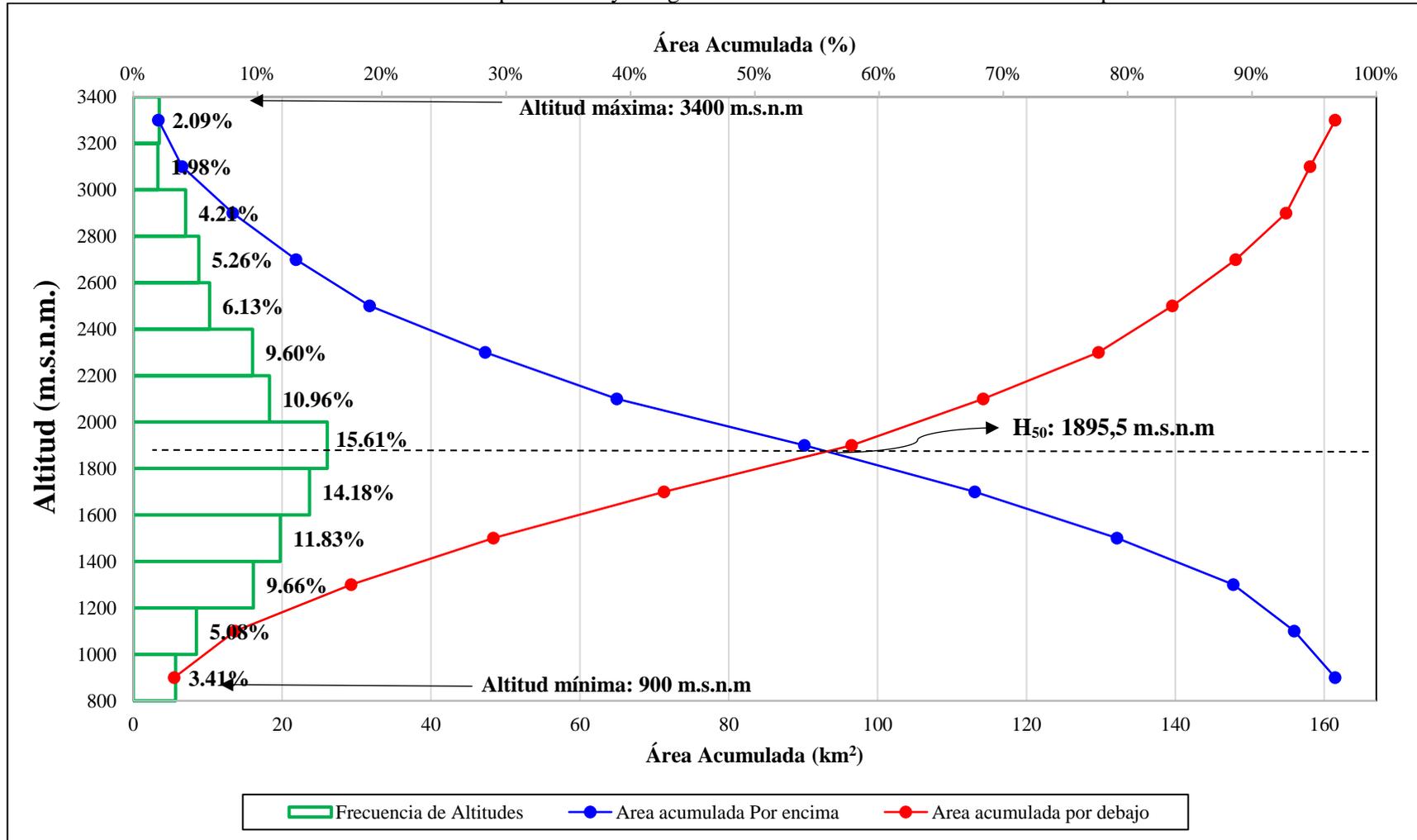
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 2 Curva Hipsométrica y Polígono de Frecuencias de la Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 3 Curva Hipsométrica y Polígono de Frecuencias de la subcuenca de recepción



Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico N°1 se observa los polígonos de frecuencias de la Subcuenca Yuracyacu, que señala que la mayor distribución de áreas se encuentra entre 800 m.s.n.m a 1000 m.s.n.m (17,89%). Asimismo, se observa la curva hipsométrica (curva color azul) que indica que se trata de una subcuenca en fase de madurez, con potencial erosivo, además se observa la curva hipsométrica adimensional (curva color rojo).

Asimismo, la subcuenca de recepción se encuentra en estado de juventud (Ver Gráfico N°2), así lo indica su curva hipsométrica (curva color azul), presentando un potencial erosivo alto. También, se observa que la mayor distribución de áreas se encuentra entre 1800 m.s.n.m a 2000 m.s.n.m (15,17%).

c. Índice de pendiente

El índice de pendiente es una ponderación que se establece entre las pendientes y el tramo recorrido por el río y expresa en cierto modo el relieve de la subcuenca (Villón Vejar, 2002, pág. 49).

Representa la pendiente promedio de todas las áreas elementales de la subcuenca, siendo un valor de gran importancia para el estudio de infiltración y recarga de acuíferos (Gómez Lora, 1987, p. 11).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ip = \sum \sqrt{Bi(a_n - a_{n-1})} * \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Ecuación N° 35 Índice de Pendiente

Donde:

- Ip : Índice de pendiente.
- $a_n \dots a_{n-1}$: Cotas de las n curvas de nivel consideradas.
- Bi : La fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas a_n y a_{n-1} .
- L : Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente.

A continuación, se presenta los cuadros N° 8 y 9 con los cálculos para hallar el Índice de pendiente de la Subcuenca Yuracyacu y de la subcuenca del área de recepción respectivamente.

De los cuadros mencionados se observa que el índice de pendiente para la Subcuenca Yuracyacu es de 20% y para la subcuenca de recepción es de 30% respectivamente.

Cuadro N° 8 Cálculos del Índice de pendiente de la Subcuenca Yuracyacu

Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	H _{max} - H _{min} (km)	B _i	(H _{max} - H _{min}) * B _i	$\sqrt{(H_{max} - H_{min}) * B_i}$
H _{min}	H _{max}					
810	850	39,5	0,04	0,18	0,01	0,11
850	1000	23,1	0,15	0,15	0,02	0,15
1000	1200	9,9	0,20	0,03	0,01	0,08
1200	1400	16,1	0,20	0,05	0,01	0,10
1400	1600	19,1	0,20	0,07	0,01	0,12
1600	1800	22,9	0,20	0,08	0,02	0,13
1800	2000	25,2	0,20	0,08	0,02	0,13
2000	2200	17,2	0,20	0,07	0,01	0,12
2200	2400	15,5	0,20	0,06	0,01	0,11
2400	2600	9,9	0,20	0,04	0,01	0,09
2600	2800	8,50	0,20	0,03	0,01	0,08
2800	3000	6,8	0,20	0,03	0,01	0,07
3000	3200	3,2	0,20	0,01	0,002	0,05
3200	3400	3,4	0,20	0,01	0,002	0,05
Total		220,8				1,47

Fuente: Elaboración propia.

$$I_p = \frac{1,47}{\sqrt{45,33}} = 0,22 * 100\% = 22\%$$

Cuadro N° 9 Cálculos del Índice de pendiente de la subcuenca de recepción

Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	H _{max} - H _{min} (km)	B _i	(H _{max} - H _{min}) * B _i	$\sqrt{(H_{max} - H_{min}) * B_i}$
H _{min}	H _{max}					
900	1000	5,5	0,10	0,05	0,00	0,06
1000	1200	8,2	0,20	0,04	0,01	0,10
1200	1400	15,6	0,20	0,09	0,02	0,14
1400	1600	19,1	0,20	0,12	0,02	0,15
1600	1800	22,9	0,20	0,14	0,03	0,17
1800	2000	25,2	0,20	0,14	0,03	0,17
2000	2200	17,7	0,20	0,12	0,02	0,15
2200	2400	15,5	0,20	0,10	0,02	0,14
2400	2600	9,9	0,20	0,07	0,01	0,11
2600	2800	8,5	0,20	0,06	0,01	0,11
2800	3000	6,8	0,20	0,04	0,01	0,09
3000	3200	3,2	0,20	0,02	0,004	0,06
3200	3400	3,4	0,20	0,02	0,004	0,07
Total		161,5				1,52

Fuente: Elaboración propia.

$$I_p = \frac{1,52}{\sqrt{28,11}} = 0,3 * 100\% = 30\%$$

d. Pendiente media del cauce principal

Comprende los puntos extremos en los cuales se encuentra el río Yuracyacu, es decir desde su punto más alto, hasta la confluencia con el río Mayo. La pendiente media del cauce principal de la subcuenca es de 3% y su determinación se basa en la siguiente ecuación:

$$I_C = \frac{H_M - H_m}{1000 * L}$$

Ecuación N° 36 Pendiente media del cauce principal

Donde:

H_M: Cota mayor.

H_m: Cota menor.

L: Longitud del curso de agua más largo.

$$I_C = \frac{1700 - 810}{1000 * 35,56} = 3 \%$$

e. Pendiente media de la cuenca

Esta característica controla en parte la velocidad con la que se da la escorrentía superficial y afecta, por tanto el tiempo que lleva el agua de lluvia para concentrarse en el lecho fluvial que constituye la red de drenaje de la cuenca (Monsalve Saenz, 1999, pág. 40).

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$S = 100 * \left(\frac{D}{l} \right)$$

Ecuación N° 37 Pendiente media de la cuenca

Donde:

D: Desnivel total de la cuenca.

l: Lado menor del rectángulo equivalente.

$$S = 100 * \left(\frac{2,59}{5,22} \right) = 49,6\%$$

La pendiente media de la Subcuenca Yuracyacu es de 49,3 % y para la subcuenca de recepción es de 42%.

Sistema de la red de drenaje

a. Grado de ramificación

La red de drenaje es el sistema jerarquizado de cauces, desde los pequeños surcos hasta los ríos que confluyen entre sí formando un colector común o río principal en la cuenca. Existen diversos criterios para el ordenamiento de los cauces en la red de drenaje de una

cuenca, destacando Horton (1945) y Strahler (1964). Horton propuso un sistema de ordenamiento para la red de drenaje conocido como las leyes de Horton.

Strahler perfeccionó el esquema de Horton, dando lugar al esquema de clasificación de Horton – Strahler, hoy en día el más utilizado en hidrología. (Perez Campomanes, 2015, pág. 26). El orden de una cuenca estará dado por el número de orden del cauce principal Ver cuadro N°10.

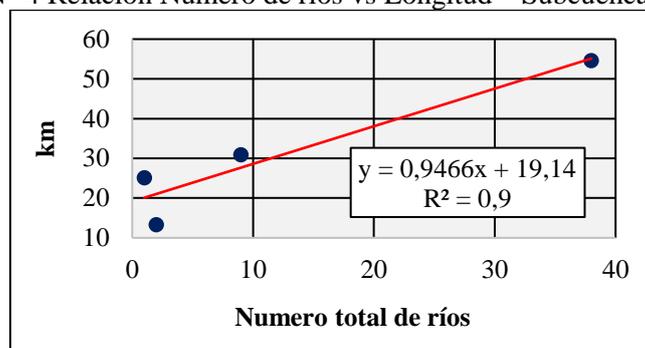
La red hídrica se completó con ayuda de una imagen satelital Landsat 5 del año 2010 utilizando una técnica de teledetección llamada combinación de bandas. Teniendo en cuenta la dirección del drenaje de la Subcuenca Yuracyacu, luego se estableció una relación entre el número total de ríos y su longitud (km), a fin conocer la fiabilidad de la red hídrica completada y sus tributarios (ríos, quebradas inactivas y secas). Ver Gráfico N°4 y 5.

Cuadro N° 10 Grado de ramificación - Subcuenca Yuracyacu

Orden	N° Total de ríos	Longitud total de ríos (km)	Longitud promedio de los ríos
1	38	54,62	1,44
2	9	30,9	3,43
3	2	13,3	6,65
4	1	25,07	25,07
Total	50	123,89	36,59

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 4 Relación Numero de ríos vs Longitud – Subcuenca Yuracyacu



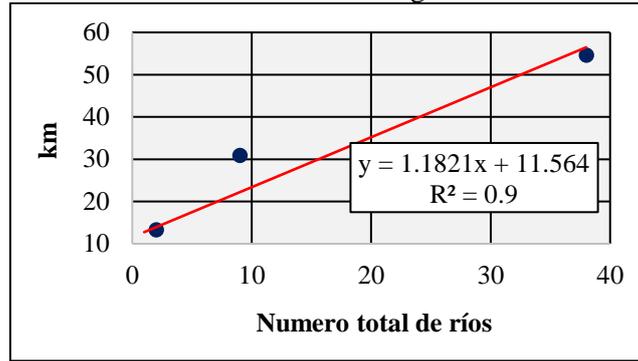
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 11 Grado de Ramificación subcuenca de recepción

Orden	N° Total de ríos	Longitud total de ríos (km)	Longitud promedio de los ríos
1	38	54,62	1,44
2	9	30,9	3,43
3	2	13,3	6,65
4	1	6,54	6,54
Total	50	105,36	

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 5 Relación número de ríos vs longitud – subcuenca de recepción



Fuente: Elaboración propia.

b. Densidad de drenaje (Dd)

La longitud total de los cauces de una cuenca dividida por el área total del drenaje define la densidad de drenaje o longitud de cauces por unidad de área (Perez Campomanes, 2015, pág. 28).

Según (Monsalve Saenz, 1999, pág. 39), la densidad de drenaje toma valores entre 0,5 km/km² para cuencas con drenaje pobre y hasta 3,5 km/km² para cuencas muy bien drenadas. Se relaciona la longitud de la totalidad de los cauces con el área de la cuenca, en la siguiente ecuación:

$$Dd = \frac{\sum L}{A}$$

Ecuación N° 38 Densidad de drenaje

Donde:

L: Longitud de los cauces de la cuenca en km

A: Área de la cuenca en km².

$$Dd = \frac{123,89\text{km}}{220,8\text{km}^2} = 0,6\text{km}/\text{km}^2$$

La densidad de drenaje de la Subcuenca Yuracyacu es de 0,6 km/km² y la subcuenca de recepción un valor de 0,7 km/km².

c. Frecuencia de ríos

Es un parámetro que relaciona el total de cursos de agua con el área de la cuenca, expresándose en ríos/km² (Gomez Lora, 2016), según la siguiente ecuación:

$$\text{Frecuencia de ríos} = \frac{\text{Total de cursos de agua}}{A}$$

Ecuación N° 39 Frecuencia de ríos

Donde:

A: Área de la cuenca.

$$\text{Frecuencia de ríos} = \frac{123,89}{220,8\text{km}^2} = 0,6 \text{ ríos}/\text{km}^2$$

La frecuencia de ríos en la Subcuenca Yuracyacu es de 0,6 ríos/km², y para la subcuenca de recepción es de 0,7 ríos/km².

d. Extensión media del escurrimiento superficial(l)

Se define como la distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una cuenca, en caso de que la escorrentía fuera en línea recta desde donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo al lecho de una corriente cualquiera de la cuenca (Monsalve Saenz, 1999, pág. 39). La ecuación utilizada para su determinación es la siguiente:

$$l = \frac{A}{4 * L}$$

Ecuación N° 40 Extensión media de escurrimiento superficial

Donde:

A: Área de la cuenca (km²).

L: Longitud total de las corrientes de agua en la cuenca (km).

$$l = \frac{220,8 \text{ km}^2}{4 * 123,89 \text{ km}} = 0,5 \text{ km}$$

Entonces, se tiene que en la Subcuenca Yuracyacu la lluvia recorre en promedio de 0,5km antes de llegar a un curso de agua de su sistema de drenaje, mientras que para la subcuenca de recepción, es de 0,4 km.

e. Coeficiente de Torrencialidad (C_T)

Este parámetro resulta de la relación entre el número de cauces de agua de orden 1 y el área de la cuenca. A mayor número de cauces y menor área la Torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Diaz, 1987, pág. 53).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_t = \frac{N_1}{A}$$

Ecuación N° 41 Coeficiente de Torrencialidad

Donde:

N₁: Número de cauces de orden 1.

A: Área de la cuenca en km².

$$C_t = \frac{38 \text{ ríos}}{220,8 \text{ km}^2} = 0,17 \text{ ríos/km}^2$$

El coeficiente de Torrencialidad de la Subcuenca Yuracyacu es de 0,14 ríos/km² y para la subcuenca de recepción es de 0,25 ríos/km².

A continuación, en el Cuadro N° 12, se observa los parámetros fisiográficos que describen la morfometría de la subcuenca Yuracyacu y su subcuenca de recepción.

Cuadro N° 12 Parámetros fisiográficos de la Subcuenca Yuracyacu y su subcuenca de recepción

ID	Parámetros	Unidad	Resultado	
			Subcuenca Yuracyacu	Subcuenca de recepción
Superficie	Área	km ²	220,8	161,5
	Perímetro	km	95,1	68,1
Forma	Coefficiente de Compacidad	Adimensional	1,77	1,5
	Factor de Forma	Adimensional	0,39	0,53
	Lado mayor del rectángulo equivalente	km	42,33	28,11
	Lado menor del rectángulo equivalente	km	5,22	5,26
Relieve	Pendiente media de la Cuenca	%	49,3	42
	Pendiente media del cauce principal	%	3	5
	Altitud Media de la Cuenca	m.s.n.m.	1603	1 903
	Índice de Pendiente	%	20	30
Sistema de Drenaje	Grado de Ramificación	Adimensional	4	4
	Densidad de Drenaje	km / km ²	0,6	0,7
	Frecuencia de Ríos	ríos / km ²	0,5	0,7
	Extensión media del escurrimiento superficial	km	0,5	0,4
	Coefficiente de Torrencialidad	ríos / km ²	0,17	0,25

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Climatología

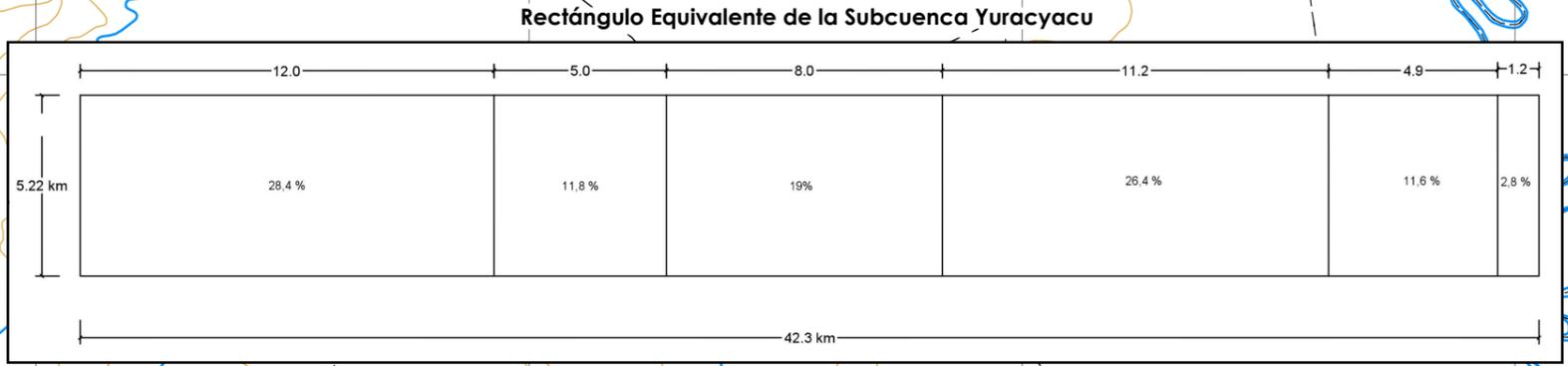
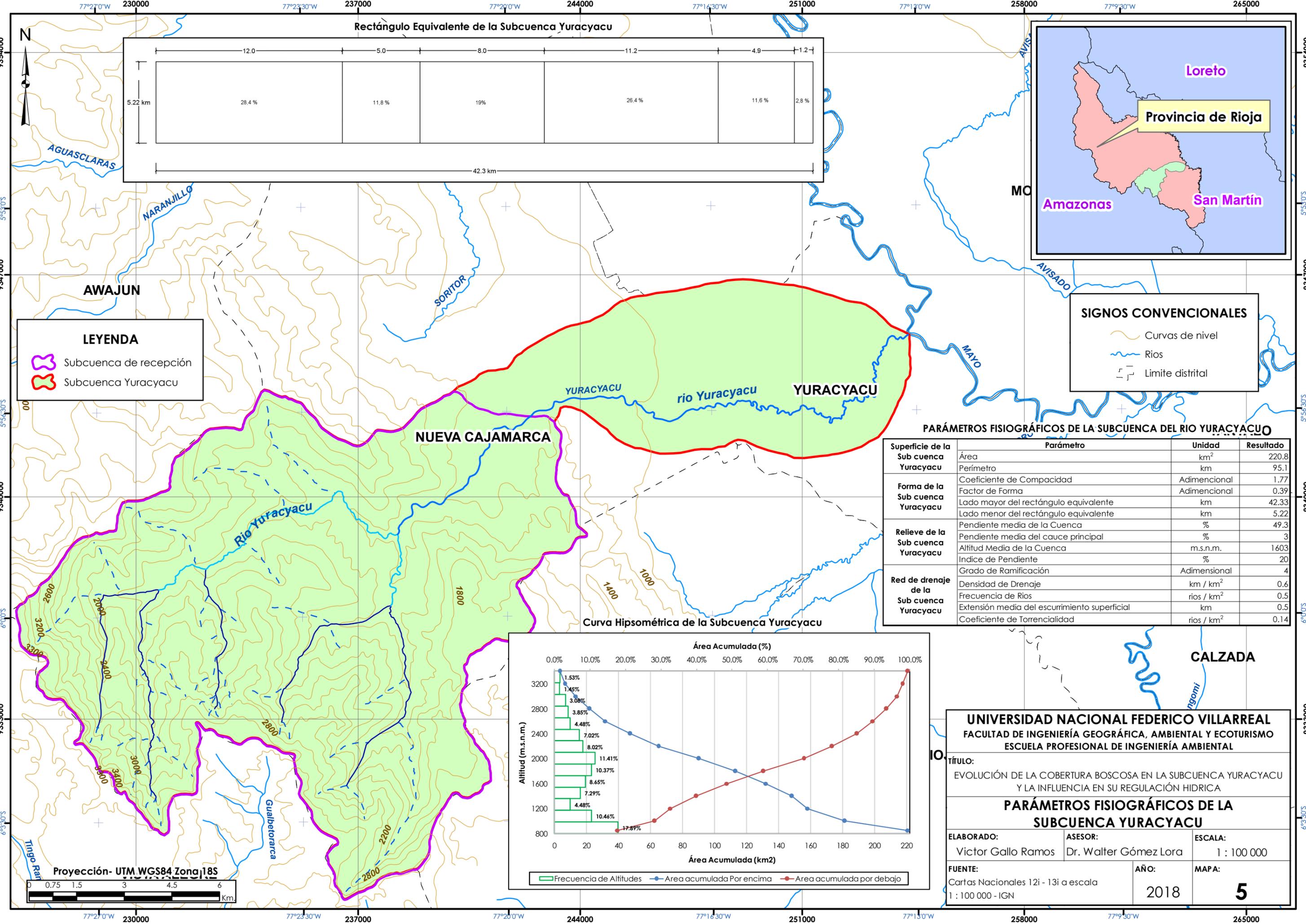
El clima es el estado medio de los elementos meteorológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa, evaporación, horas de sol, etc.) de una localidad para un periodo largo; además, depende de factores como la latitud, longitud, altitud, orografía y la continentalidad, entre otros factores.

Las ciudades de Nueva Cajamarca y Yuracyacu se ubican en la provincia de Rioja, donde aproximadamente a 800 m.s.n.m. confluyen el río Yuracyacu con el río Mayo en la planicie amazónica. La clasificación climática de Thornthwaite realizada por el SENAMHI, señala que presenta un clima cálido, lluvioso, generalmente con precipitaciones abundantes en todas las estaciones con lluvias deficientes en otoño e invierno y presenta humedad relativa muy elevada.

4.3.3.1. Registros históricos de parámetros meteorológicos

a. Precipitación

La distribución territorial de la precipitación en la cuenca del río Mayo, es compleja. Básicamente, está determinada por su situación geográfica y la configuración de la



LEYENDA

- Subcuenca de recepción
- Subcuenca Yuracyacu

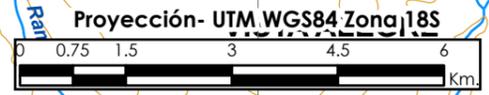
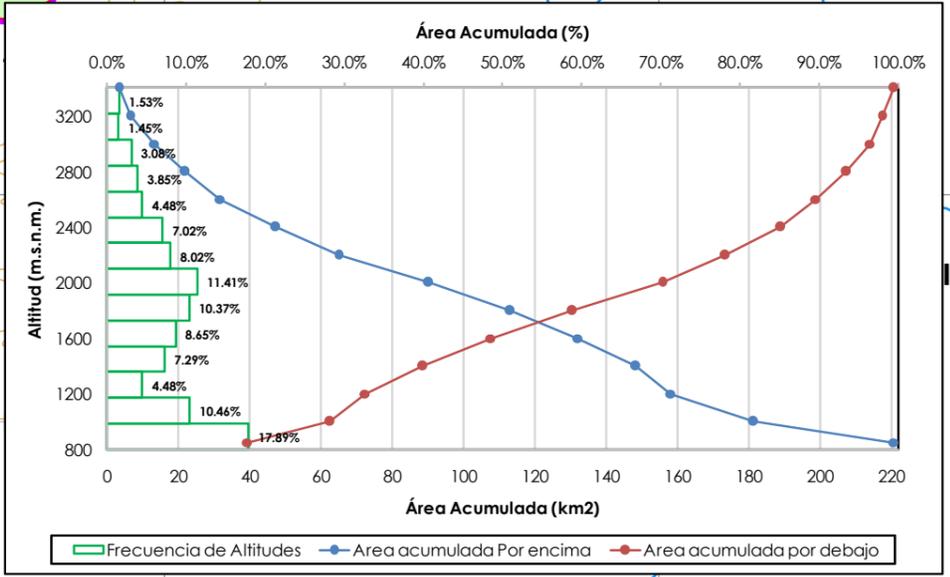
SIGNOS CONVENCIONALES

- Curvas de nivel
- Rios
- Limite distrital

PARÁMETROS FISIográfICOS DE LA SUBCUENCA DEL RIO YURACYACU

Superficie de la Sub cuenca Yuracyacu	Parámetro	Unidad	Resultado
Superficie de la Sub cuenca Yuracyacu	Área	km ²	220.8
	Perímetro	km	95.1
Forma de la Sub cuenca Yuracyacu	Coefficiente de Compacidad	Adimensional	1.77
	Factor de Forma	Adimensional	0.39
	Lado mayor del rectángulo equivalente	km	42.33
	Lado menor del rectángulo equivalente	km	5.22
Relieve de la Sub cuenca Yuracyacu	Pendiente media de la Cuenca	%	49.3
	Pendiente media del cauce principal	%	3
	Altitud Media de la Cuenca	m.s.n.m.	1603
	Índice de Pendiente	%	20
Red de drenaje de la Sub cuenca Yuracyacu	Grado de Ramificación	Adimensional	4
	Densidad de Drenaje	km / km ²	0.6
	Frecuencia de Rios	rios / km ²	0.5
	Extensión media del escurrimiento superficial	km	0.5
	Coefficiente de Torrencialidad	rios / km ²	0.14

Curva Hipsométrica de la Subcuenca Yuracyacu



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

PARÁMETROS FISIográfICOS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2018	MAPA: 5

topografía, ya que se encuentra encerrada por las estribaciones andinas orientales de los andes (APODESA, 1987, pp. 24,26).

En ese sentido, la única estación ubicada dentro de la subcuenca es la Estación Yuracyacu (actualmente cerrada) y fuera del ámbito de la subcuenca se encuentran las estaciones de Moyobamba, Rioja, Naranjillo, siendo estas las más cercanas. El sector alto de la Subcuenca Yuracyacu, no cuenta con información meteorológica, por lo que, para efectuar análisis regionales deben utilizarse también la estación Chachapoyas, que actualmente se encuentra operativa.

(ONERN, 1982, pág. 47), indica que la precipitación promedio en la zona baja es de 1400mm, además señala que en la zona llueve durante todo el año, siendo el periodo más lluvioso entre los meses de Octubre a Marzo y los menos lluviosos de Julio a Agosto.

Asimismo, (SENAMHI, 2009, pág. 4) afirma que las precipitaciones aumentan del sureste al noreste con valores que fluctúan los 800 mm/año hasta los 2000 mm/año para el integro de la cuenca del río Mayo. Las zonas de menores precipitaciones son las partes altas de la cuenca, donde llueve menos de 1000 mm/año.

b. Temperatura

(ONERN, 1982, pág. 48) señala que en los sectores de menor elevación existen promedios anuales de temperatura, alcanzando valores ligeramente superiores a los 22°C, el mismo que puede ser generalizado hasta los 1000 m.s.n.m. En cuanto a las partes altas, factores de orden altitudinal y vegetación, indican que a medida que se asciende a las nacientes del río Mayo, las temperaturas disminuyen hasta alcanzar promedios anuales entre 12°C y 13°C sobre los 3000 m.s.n.m.

(APODESA, 1987, p. 43) indica que la temperatura media posee una fuerte dependencia con la altitud, presentando valores mayores en la parte baja, determinando que el gradiente térmico vertical es de 0,54°C cada 1000 m.

c. Evapotranspiración

La evaporación es el proceso mediante el cual la precipitación que llega a la superficie es devuelta a la atmósfera en forma de vapor, por ello existe evaporación del río y del suelo. Mientras que la transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor de las plantas en general. Estos procesos suceden simultáneamente en la cuenca, y su estudio en conjunto se denomina evapotranspiración, siendo importante para cuantificar las pérdidas hídricas generalmente a través de fórmulas empíricas.

La evapotranspiración en la parte baja de la cuenca del río Mayo presenta 1100 mm anuales, en los cuales, los valores menores se localizan en su nacimiento alcanzando alrededor de 100 mm (APODESA, 1987, p. 93).

4.3.4. Hidrografía

La red de drenaje de la cuenca del río Yuracyacu está constituida por el cauce principal y la integridad de sus tributarios. El drenaje se inicia por dos (2) quebradas que colectan las aguas que precipitan en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes.

a. Río Yuracyacu

Según la metodología de la red de drenaje propuesta por Horton, el río principal Yuracyacu es de cuarto orden, el cual constituye uno de los principales afluentes del río mayo por la margen derecha con una longitud de treinta y dos (32) km y posee una orientación SO – NE hasta su desembocadura.

El perfil longitudinal del curso principal es una curva que representa la relación entre la altitud y la longitud del curso de agua. Es muy importante porque permite conocer su pendiente en diferentes tramos de su recorrido (Vasquez Villanueva, 2000, pág. 84).

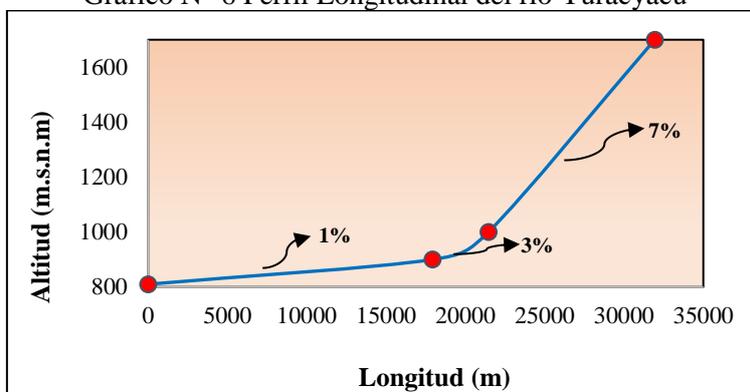
A continuación, se presenta el cuadro N° 13 con los cálculos para determinar el perfil longitudinal del río Yuracyacu.

Cuadro N° 13 Cálculo del perfil longitudinal del río Yuracyacu

Altitud mínima (m.s.n.m)	Altitud máxima (m.s.n.m)	Diferencia de Altitudes	Longitud del tramo (km)	Pendiente (%)
810	900	90	17 920	1%
900	1000	100	3 530	3%
1000	1700	700	10 490	7%

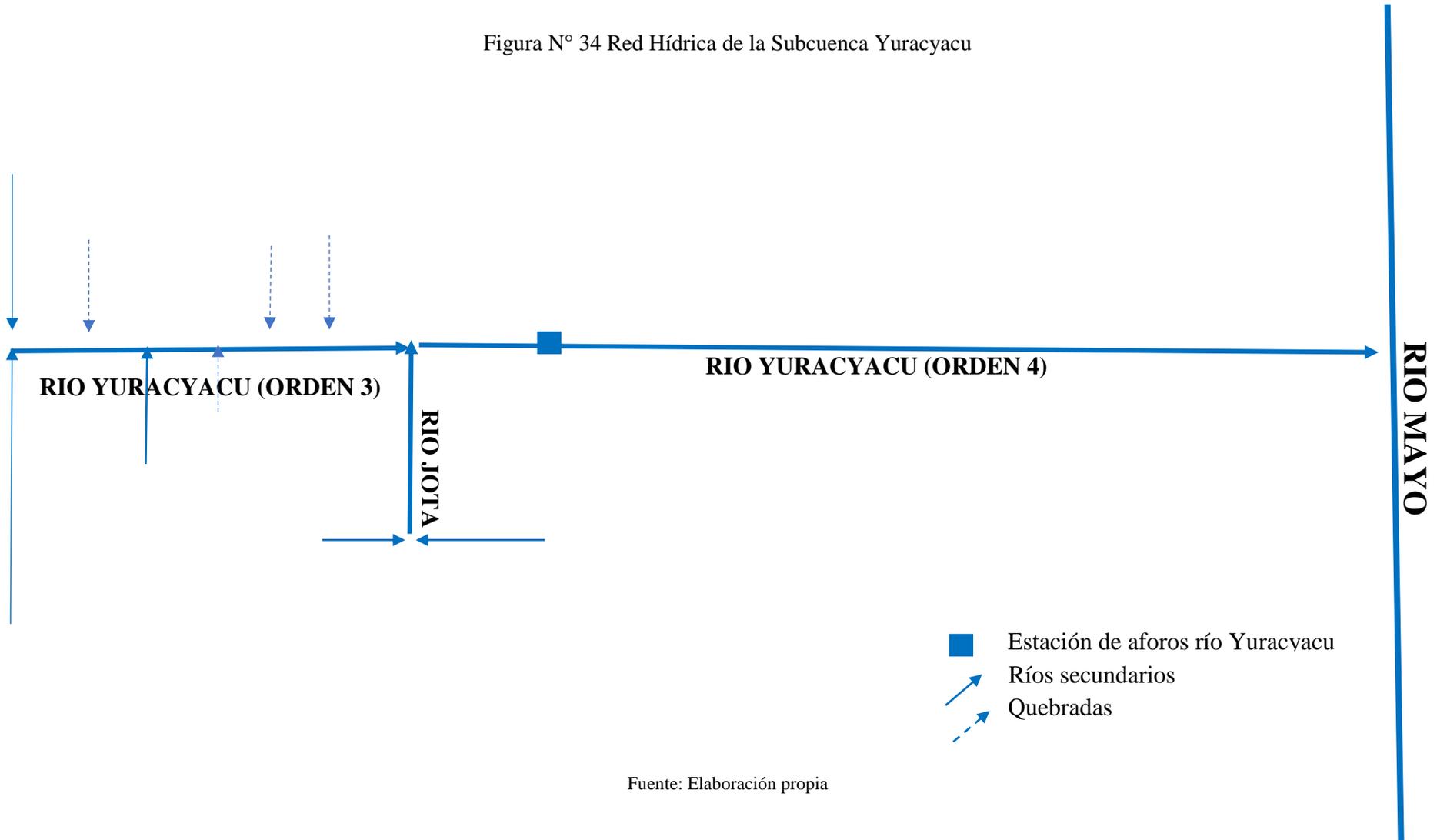
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 6 Perfil Longitudinal del río Yuracyacu

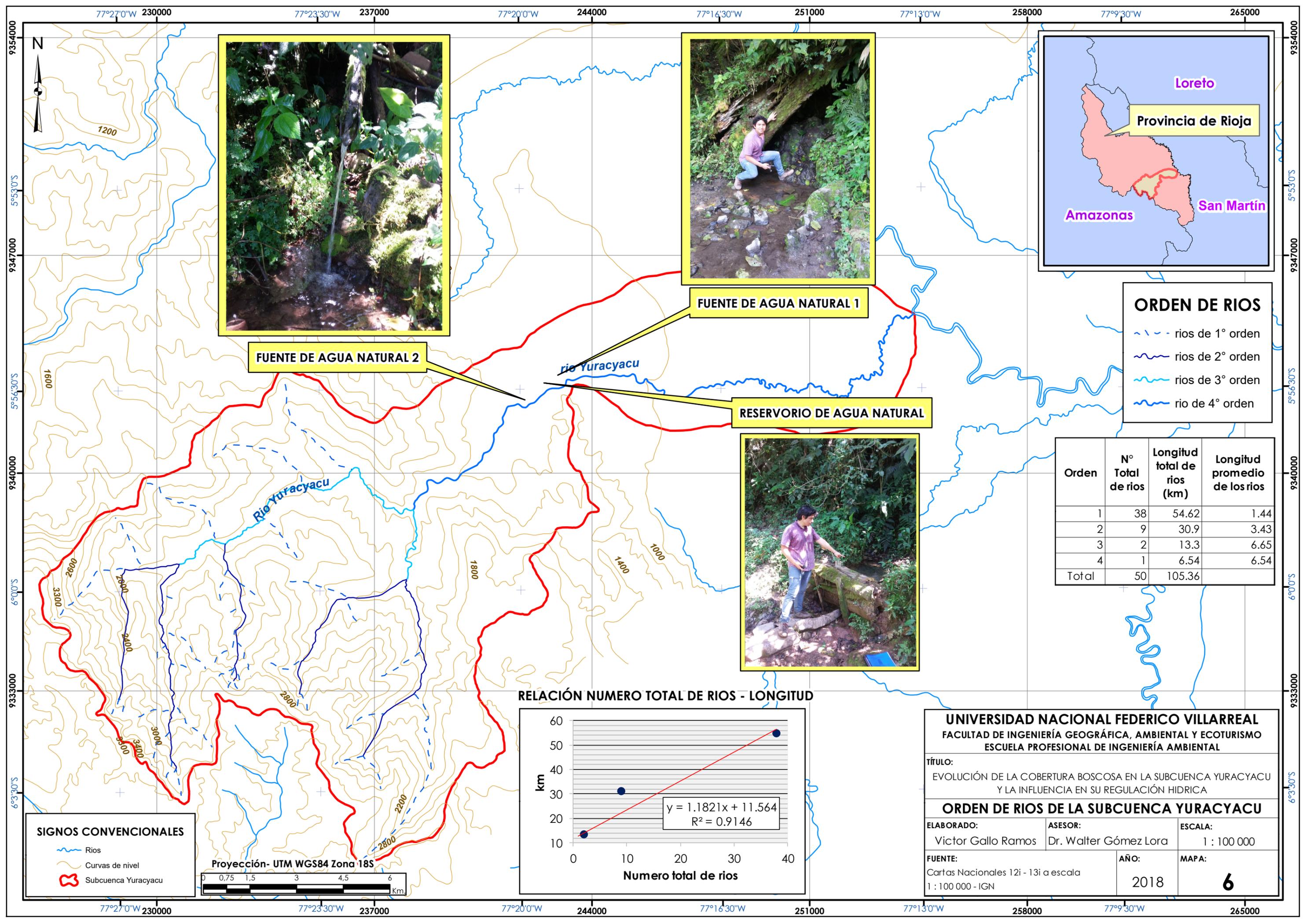


Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 34 Red Hídrica de la Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia

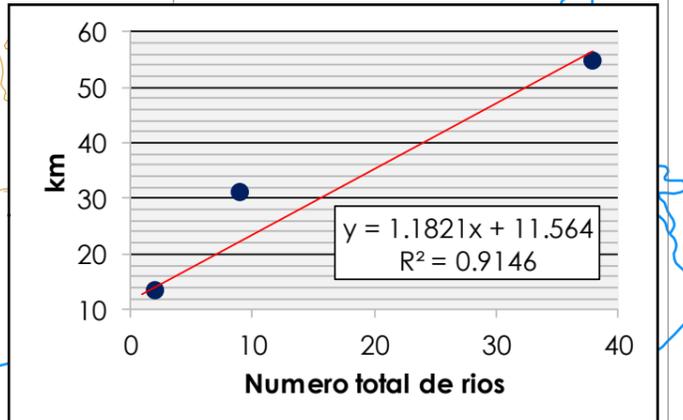


ORDEN DE RIOS

- rios de 1° orden
- ~ rios de 2° orden
- ~ rios de 3° orden
- ~ rios de 4° orden

Orden	N° Total de rios	Longitud total de rios (km)	Longitud promedio de los rios
1	38	54.62	1.44
2	9	30.9	3.43
3	2	13.3	6.65
4	1	6.54	6.54
Total	50	105.36	

RELACIÓN NUMERO TOTAL DE RIOS - LONGITUD



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

ORDEN DE RIOS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos **ASESOR:** Dr. Walter Gómez Lora **ESCALA:** 1 : 100 000

FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN **AÑO:** 2018 **MAPA:** 6

SIGNOS CONVENCIONALES

- ~ Rios
- ~ Curvas de nivel
- Subcuenca Yuracyacu

Proyección- UTM WGS84 Zona 18S

4.3.5. Ecología

(ONERN, 1982), en el Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales de la cuenca del río Alto Mayo, realizó la clasificación de zonas de vida teniendo como base el Sistema de Clasificación de Holdridge. Para la Subcuenca Yuracyacu, se identificaron las siguientes formaciones ecológicas. Ver Tabla N° 24.

a. bosque pluvial Montano Tropical (bp – MT)

Las condiciones climáticas de esta zona se caracterizan por su alta nubosidad, se estima una precipitación total anual entre 3000 mm y cerca de los 4200 mm. En referencia a la biotemperatura, constituye el ecosistema más frío dentro de trópicos húmedos, estimándose un valor promedio anual de 11°C, con oscilaciones entre 10°C y 12°C. El valor de la relación de la evapotranspiración potencial se estima en 0,20, calificando a este ecosistema de carácter supe húmedo (ONERN, 1982, pág. 65).

La vegetación presente, posee una fisionomía de bosque corto, debido a los factores adversos de topografía, suelos, y atmosféricos. Además, el bosque es de tipo mixto, conformando una asociación homogénea, ya que presenta un máximo de 15 especies arbóreas, entre las más significativas se tienen: *Hesperomeles* sp., *Hypericum* sp., *Ribes* sp., *Calceolaria* sp., *Chusquea* sp., *Nacifolium* sp. (ONERN, 1982, pág. 65).

Esta formación abarca un área de 90,6 km² y representa el 41% de la Subcuenca Yuracyacu. Corresponde a la parte alta de la subcuenca desde los 2000 m.s.n.m. hasta el límite de la subcuenca sobre los 3400 m.s.n.m.

b. bosque húmedo Premontano Tropical (bh -PT)

Esta formación ecológica, se extiende en la parte baja de la subcuenca cerca a los 800 m.s.n.m., con una extensión de 14 km² equivalentes al 7% de la parte baja de la subcuenca. Según (ONERN, 1982, pág. 57), esta zona de vida representa un ecosistema de caracteres intermedios hacia el bosque muy húmedo pre – montano tropical. Las condiciones bioclimáticas de este ecosistema señalan precipitaciones entre 2000 mm y 2400 mm, con una biotemperatura de 20°C como promedio anual, oscilando entre 21°C y 19°C. El valor de la relación de la evapotranspiración potencial se encuentra entre 0,5 y 0,6. Este ecosistema es importante para la explotación racional de madera derivado del bosque (ONERN, 1982, pág. 58).

El escenario edáfico de esta formación, está representado por suelos superficiales y de fuerte pendiente, siendo muy susceptible a la erosión pluvial. Además, el suelo es de naturaleza ácida, sumando a sus condiciones físicas desfavorables, le confiere baja productividad y muy limitada aptitud para cultivos agronómicos tradicionales. Su

vegetación se caracteriza por el predominio de especies arbóreas como “moena”, “Chimicua”, “tornillo”, y “machinga” (ONERN, 1982, pág. 58).

En la Figura N° 35 se observa la especie de nombre común “Moena”, la cual fue identificada en el reconocimiento de campo de la subcuenca.

Figura N° 35 Moena



Fuente: Elaboración propia

c. bosque muy húmedo Montano Bajo Tropical (bmh – MBT)

Este ecosistema presenta una precipitación promedio total anual del orden de 3000 mm, con rangos que van entre los 2800 mm y 3200 mm anuales. La biotemperatura promedio anual debe ser alrededor de 15,5°C, oscilando entre 14°C y 17°C. Se estima que el valor de la evapotranspiración potencial es de 0,3, calificado como ecosistema per-húmedo (ONERN, 1982, pág. 60).

Las especies arbóreas representativas pertenecen a los géneros Podocarpus, Anibal, Ocotea, Nectandra, Bocconia, y Tovaria, entre las más importantes. En asociación con estas especies se tiene la presencia de lianas y un marcado y extenso epifitismo, destacando las orquídeas, bromeláceas, helechos, musgos y líquenes, estos últimos tapizando tallos y ramas (ONERN, 1982, pág. 61).

En la Figura N° 36, se observa asociaciones de musgos adheridos a las rocas y en troncos de formaciones arbóreas, que se identificó en el reconocimiento de campo de la Subcuenca Yuracyacu.

Figura N° 36 Asociación de Musgos y Líquenes



Fuente: Elaboración propia

Además, en ciertas áreas, debido a condiciones micro climáticas aparecen los denominados pajonales, cubiertos por especies como el “atino” (muy parecido al ichu), “villano”, “suro” (*Chusquea* sp.) y “helechos” tapizando el suelo y las rocas. También, son comunes las palmeras pertenecientes a los géneros *Ceroxilon* y *Geonoma* (ONERN, 1982, pág. 61).

Comprende la parte media alta aproximadamente desde los 1200 m.s.n.m. hasta los 2200 m.s.n.m., abarcando un área de 75,7 km², equivalentes al 34% de la Subcuenca Yuracyacu.

d. Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical (bmh – PT)

Se caracteriza por presentar un promedio de la precipitación pluvial total anual de 3200 mm, con variaciones entre 2400 mm y 4000 mm. La biotemperatura promedio anual se estima en 18°C con oscilaciones entre 17°C y 19°C. La relación de evapotranspiración es 0,45, calificándolo de carácter per – húmedo. Este ecosistema es susceptible a presentar erosión pluvial y los suelos presentan una alta escorrentía superficial, además, mantiene una actividad primordialmente agrícola de subsistencia (ONERN, 1982, pág. 59).

(ONERN, 1982, pág. 59), señala que la vegetación predominante son especies arbóreas, como son moena (*Aniba* sp.), chimicua (*Perbea* sp.), manchinga (*Brosimum uleanum*), remo caspi (*Swartzia* sp.) y chope (*Gustavia* sp.); además de abundancia de epifitas, destacando las bromeleaceas cubiertas por musgos y líquenes.

Corresponde a la parte baja – media, hasta los 1200 m.s.n.m y tiene un área de 40,48 km², equivalentes al 18% de la Subcuenca Yuracyacu.

FORMACIONES ECOLÓGICAS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

Formación Ecológica	Simbología	Precipitación media (mm)	Biotemperatura promedio (°C)	Factor de EVTP	Área (Km ²)
Bosque Pluvial Montano tropical	bp - MT	3000 - 4200	11	0,30	90.6
Bosque Húmedo Premontano tropical	bh -PT	2000 - 2400	20	0,5 - 0,6	14
Bosque Muy húmedo Montano bajo tropical	bmh - MBT	2800 - 3200	15,5	0,3	75.7
Bosque Muy húmedo Premontano Tropical	bmh - PT	2400 - 4000	18	0,45	40.48



"ASOCIACIONES DE MUSGOS Y LIQUENES"



"SECTOR ALTO FLORIDA"



"MOENA"



LEYENDA

Formaciones ecológicas

- bh - PT
- bmh - MBT
- bp - MT
- bmh - PT

SIGNOS CONVENCIONALES

- Subcuenca Yuracyacu
- Rios
- Limite distrital

Proyección- UTM WGS84 Zona 18S

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

FORMACIONES ECOLÓGICAS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 -IGN. Mapa Ecológico ONERN 1984	AÑO: 2018	MAPA: 7

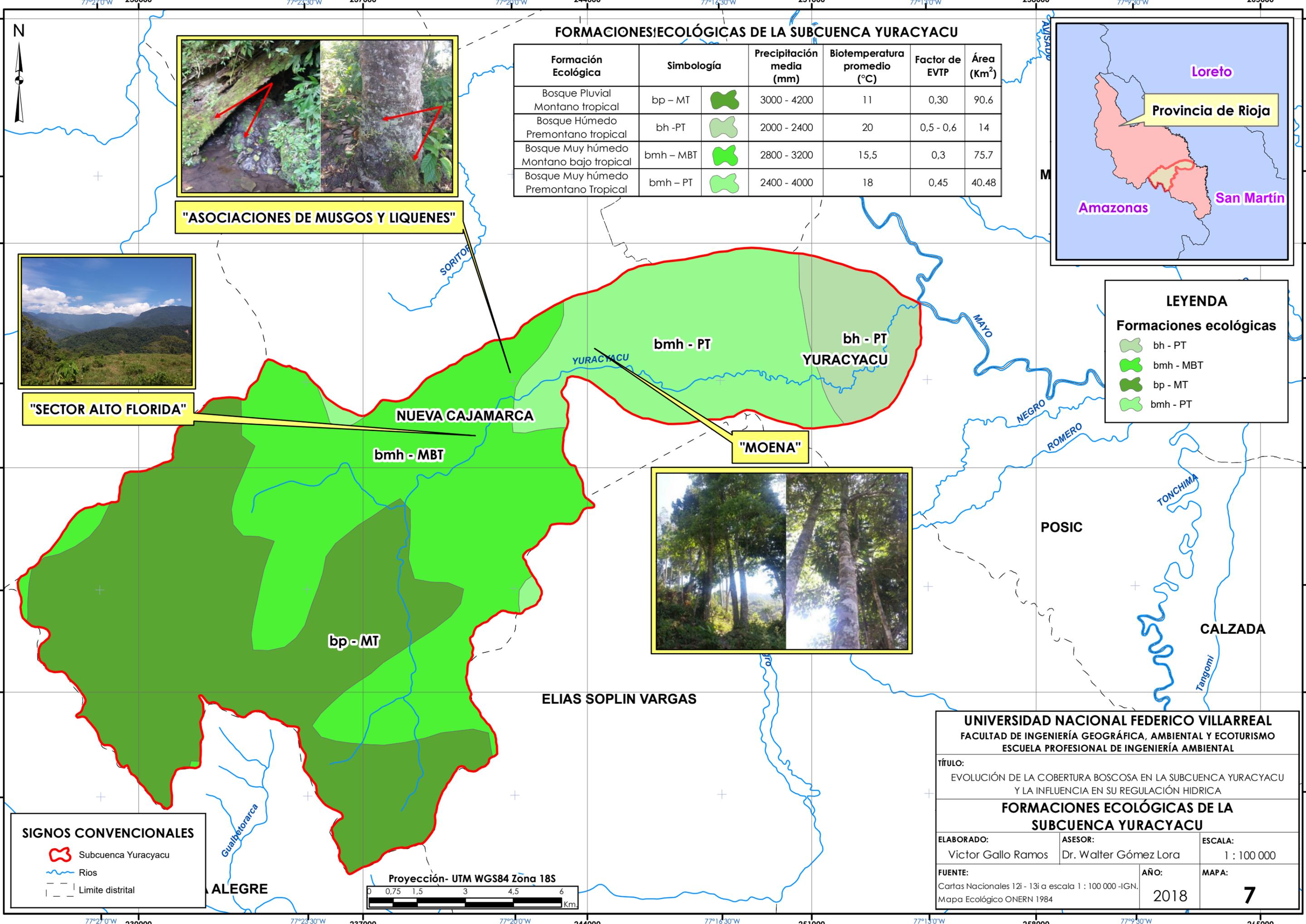


Tabla N° 24 Formaciones Ecológicas de la Subcuenca Yuracyacu

Formación Ecológica	Simbología	Precipitación media (mm)	Biotemperatura promedio (°C)	Factor de EVTP
Bosque Pluvial Montano Tropical	bp – MT	3000 - 4200	11°C	0,3
Bosque Húmedo Premontano Tropical	bh -PT	2000 - 2400	20°C	0,5 – 0,6
Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical	bmh – MBT	2800 - 3200	15,5°C	0,3
Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical	bmh – PT	2400 - 4000	18°C	0,45

Fuente: Adaptado de ONERN, 1982. Inventario y Evaluación de los recursos Naturales de la cuenca del Alto Mayo. Adaptado para la Subcuenca Yuracyacu.

4.3.6. Suelos

Las unidades edáficas, fueron descritas en base al Inventario y Evaluación de los Recursos Naturales de la cuenca del río Altomayo, desarrollado por la Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales (ONERN) en 1982 y al Documento desarrollado por (Escobedo Torres, 2005) para la Zonificación Ecológica Económica de la región San Martín. Ver Tabla N° 25 y Gráfico N° 7.

a. Aguajal

Estos suelos cubren una superficie de 0,2 km² (0,08% de la Subcuenca Yuracyacu). Asimismo, (ONERN, 1982, pág. 151) señala que son suelos derivados de materiales aluviales antiguos, con características hidromórficas, los cuales se ubican en áreas depresionadas de terrazas bajas y medias. Presentan pobre drenaje y son suelos no aptos para la actividad agropecuaria y forestal.

Asimismo, (ONERN, 1982, pág. 152) indica que debido a la presencia de palmeras hidromórficas (aguaje) estos suelos pueden ser aprovechados industrialmente para la producción de aceites comestibles. Sin embargo, (Escobedo Torres, 2005, pág. 20) en el estudio de suelos y capacidad de uso mayor para la región San Martín, indica que estos suelos deben catalogarse como de protección.

b. Cerro Amarillo

Están ubicados en áreas de topografía moderadamente empinada y empinada, presentan buen drenaje, con riesgos de erosión pluvial, incrementándose estos, cuando aumenta la pendiente (ONERN, 1982, pág. 163).

Estos suelos son aptos para la producción forestal, así lo mencionan (ONERN, 1982, pág. 164) y (Escobedo Torres, 2005, pág. 21).

Comprenden una extensión igual a 7,1 km², lo que representa el 3,2% de la Subcuenca Yuracyacu.

c. Calera

Según (ONERN, 1982, pág. 150) estos suelos se ubican en áreas de topografía muy agreste (colinas y montañas principalmente), de pendientes muy pronunciadas. Son suelos muy superficiales, de escorrentía superficial muy rápida y se encuentran expuestos a peligros de erosión pluvial.

(ONERN, 1982, pág. 151) y (Escobedo Torres, 2005, pág. 22) expresan que este tipo de suelos es exclusivo para fines de protección, debido a las características mencionadas. Comprende una extensión de 158,8 km² (71,9%), cuyo tipo de suelo se encuentra desarrollado en toda la subcuenca de recepción.

d. Alto mayo

Fisiográficamente, estos suelos se ubican en terrazas bajas, planas (0 – 5%) en la terraza inundable del río Yuracyacu, presentan drenaje bueno a moderado y con escurrimiento superficial lento. Este tipo de suelos está asociado con suelos de la serie Rumi Bajo (ONERN, 1982, pág. 142).

Por ello, (Escobedo Torres, 2005, pág. 51) lo considera como Asociación Alto Mayo – Rumi Bajo y comprende una extensión de 0,2 km² (0,09% de la subcuenca).

(ONERN, 1982, pág. 145) menciona que estos suelos representan los de mayor potencialidad para la realización de una agricultura intensiva de cultivos tropicales anuales, por la susceptibilidad a las inundaciones se recomiendan cultivos de corto periodo vegetativo (frijol, maíz, maní) y otras adaptables al medio ecológico.

e. Nuevo Tambo

(Escobedo Torres, 2005, pág. 53) y (ONERN, 1982, pág. 155) indican que estos suelos son aptos para cultivo permanente.

Se encuentran asociados con el grupo edáfico Gravilla, ubicándose en zonas de colinas bajas con pendiente de 15 a 25% (ONERN, 1982, pág. 154). El estudio de suelos parte de la Zonificación Ecológica Económica de la región San Martín, donde se indica que esta es una asociación llamada Nuevo Tambo – Gravilla y comprende una extensión de 7,9 km² (3,5% de la Subcuenca Yuracyacu).

f. Valle Grande

Son suelos desarrollados a partir de materiales aluviales antiguos, ubicados en terrazas medias, planas (0 – 5%), de drenaje moderado y se encuentran asociados a la serie Nuevo Tambo (ONERN, 1982, pág. 160).

(Escobedo Torres, 2005, pág. 64) determina dos (2) asociaciones, Valle Grande – Benedicto (Valle Grande 60% y Benedicto 40%) distribuyéndose en terrazas altas con

pendientes de 0 a 5%. Su aptitud de uso es de cultivos en limpio y abarca una extensión igual a 1,68 km² (0,76% de la Subcuenca Yuracyacu). La segunda asociación es Valle Grande – Nuevo Tambo, que ocupa un área igual a 35,47 km² (16% de la subcuenca) encontrándose en zonas de pendientes moderadas.

g. Gravilla – La Florida

Cubre una superficie aproximada de 9,4 km² que representa el 4,3% de la Subcuenca Yuracyacu.

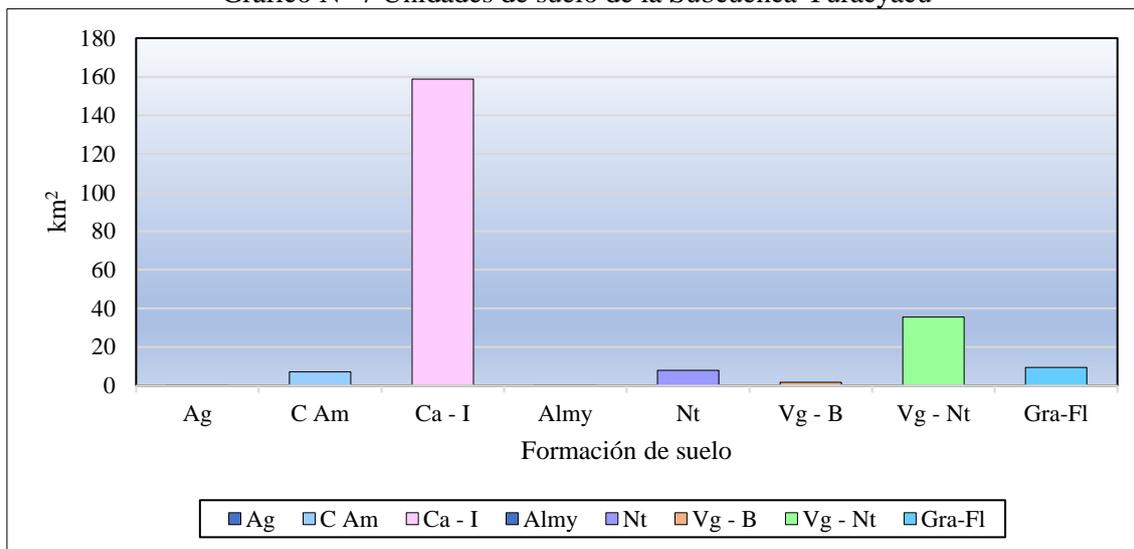
(Escobedo Torres, 2005, pág. 65) indica que el 60% de esta asociación corresponde a Gravilla y el 40% a La Florida, distribuyéndose en terrazas altas de relieve plano a ligeramente ondulada con pendientes de 0 – 5%. Su aptitud es de uso para cultivos permanentes asociados con producción forestal.

Tabla N° 25 Unidades de suelo de la Subcuenca Yuracyacu

Unidad Edáfica	Simbología	Área	Aptitud de uso
Aguajal	Ag	0,2 km ²	Protección
Cerro Amarillo	C Am	7,1 km ²	Producción forestal
Calera	Ca – I	158,8 km ²	Protección
Altomayo	Almy	0,2 km ²	Cultivos de corto periodo vegetativo
Nuevo tambo	Nt	7,9 km ²	Cultivo permanente
Valle grande – Benedito	Vg – B	1,7 km ²	Cultivos en limpios
Valle grande – Nuevo Tambo	Vg - Nt	35,5 km ²	
Gravilla–La Florida	Gra-Fl	9,4 km ²	Cultivos permanentes y producción forestal.

Fuente: Adaptado de (ONERN, 1982) y (Escobedo Torres, 2005) para la Subcuenca Yuracyacu.

Gráfico N° 7 Unidades de suelo de la Subcuenca Yuracyacu



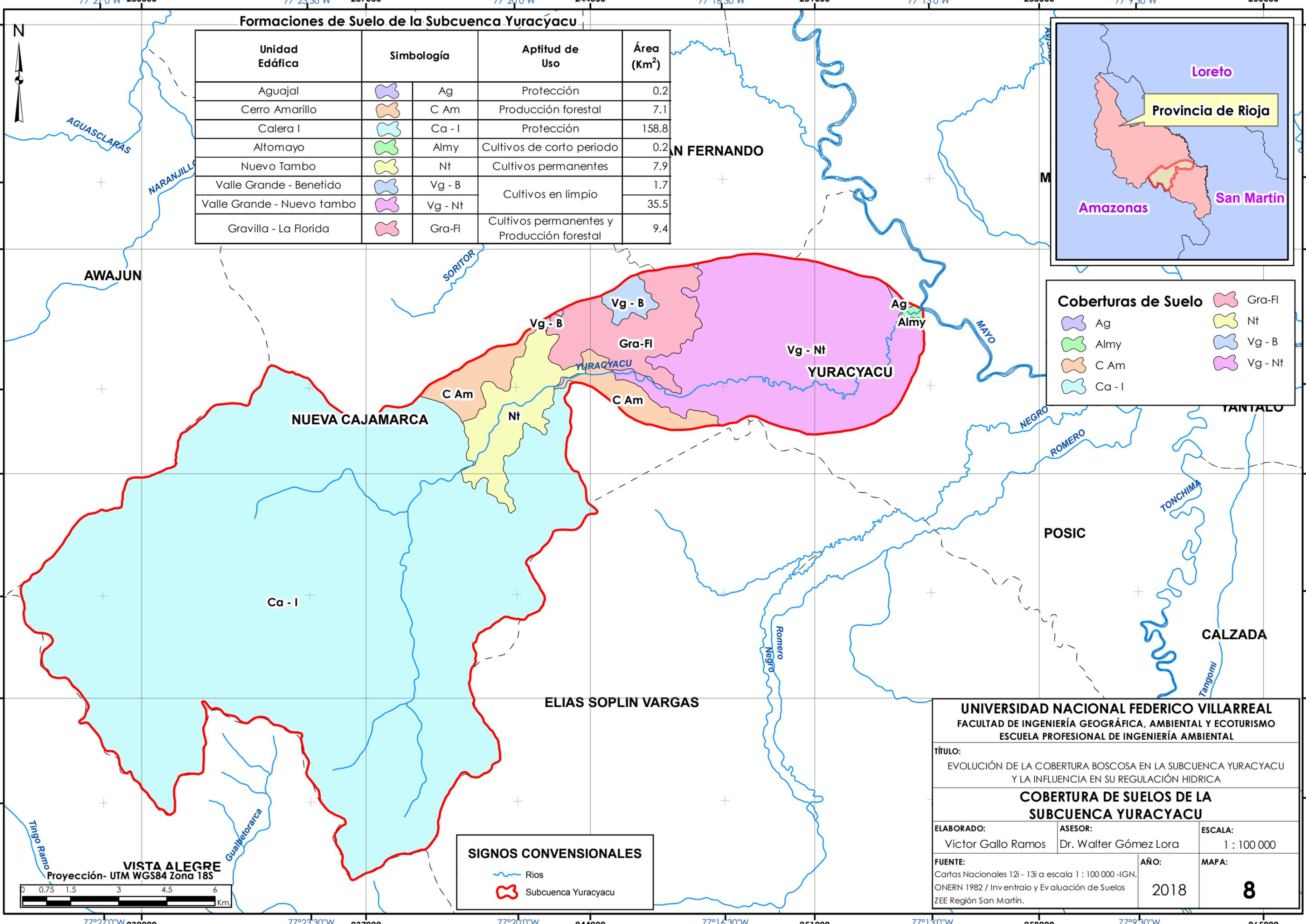
Fuente: Elaboración Propia

Formaciones de Suelo de la Subcuenca Yuracyacu

Unidad Edáfica	Simbología	Aptitud de Uso	Área (Km ²)
Aguajal		Ag	0.2
Cerro Amarillo		C Am	7.1
Calera I		Ca - I	158.8
Altomayo		Almy	0.2
Nuevo Tambo		Nt	7.9
Valle Grande - Benetido		Cultivos en limpio	1.7
Valle Grande - Nuevo tambo			35.5
Gravilla - La Florida		Cultivos permanentes y Producción forestal	9.4

Coberturas de Suelo

	Ag		Gra-Fl
	Almy		Nt
	C Am		Vg - B
	Ca - I		Vg - Nt



SIGNOS CONVENSIONALES

	Rios
	Subcuenca Yuracyacu



VISTA ALEGRE
Proyección- UTM WGS84 Zona 18S

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA DE SUELOS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 -IGN, ONERN 1982 / Inv entraio y Ev aluación de Suelos ZEE Región San Martín.		AÑO: 2018
		MAPA: 8

4.4. Diagnóstico Socioeconómico de la Subcuenca

4.4.1. Características de la Población

En la Subcuenca Yuracyacu se desarrollan importantes distritos, como son Yuracyacu y San Fernando en la parte baja, y el distrito de Nueva Cajamarca, el cual se encuentra situado en la parte media y alta de la subcuenca.

Tabla N° 26 Población censada al 2007 por distrito

Distrito	Población	Superficie (km ²)	Densidad poblacional
Nueva Cajamarca	35 718	330,3	108,2
Yuracyacu	4 267	13,7	304,7
San Fernando	3 799	63,5	59,4

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2011, pág. 35).

4.4.2. Características Sociales

(Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 57) señala que en la Subcuenca Yuracyacu no existen comunidades indígenas.

Los caseríos más representativos son La Florida y Primavera, los cuales empezaron a poblarse en el año 1977. Su principal actividad es la agricultura y la ganadería, poseen vías de comunicación y transporte y pertenecen a la zona de amortiguamiento del Bosque de Protección Altomayo (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 55).

a. Infraestructura

Según (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 57) la mayoría de las viviendas en la Subcuenca Yuracyacu tienen un promedio de 80 m², aunque existen algunas que alcanzan los 400 m².

De acuerdo a los datos proporcionados por Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), Nueva Cajamarca es el distrito de la subcuenca con más viviendas independientes, con 8 511 viviendas, seguido por San Fernando y Yuracyacu, que cuentan con 1 137 y 1 086 viviendas, respectivamente. Asimismo, Nueva Cajamarca es el distrito con mayor cantidad de viviendas con un total de 9 462, San Fernando y Yuracyacu poseen 1 162 tipos de viviendas cada una (Ver Tabla N° 27).

Tabla N° 27 Tipo de vivienda por distrito

Distrito	Tipo de vivienda						
	Casa Independiente	Departamento	Quinta	Vecindad	Choza	Improvisado	Otro
Nueva Cajamarca	8 511	20	439	194	52	198	48
San Fernando	1 137	---	---	11	14	---	---
Yuracyacu	1 086	---	54	---	22	---	---

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2011, pág. 61).

b. Salud

(Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 58), señala que los caseríos no cuentan con centros de salud o postas médicas. Las pocas que existen fueron creadas a partir de la década del 80, pero la atención es pobre debido a la carencia de insumos.

Los establecimientos de salud que se identificaron en la provincia de Rioja, se detalla en el cuadro N° 28.

Tabla N° 28 Tipo de establecimiento de salud - Provincia Rioja

Tipo	Ubicación
Hospital	Nueva Cajamarca
	Rioja
Centro de Salud	Nueva Rioja
	Yuracyacu
	San Fernando
	Naranjos
Posta de Salud	Segunda Jerusalén
	San Juan Rio Soritor

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2011, pág. 87).

c. Empleo

En el diagnóstico Socioeconómico realizado en la Subcuenca Altomayo, realizado por la Cooperación Técnica Alemana, indica que, los pobladores de la Subcuenca Yuracyacu se dedican a la agricultura y al comercio, además de trabajos municipales, docencia, manufacturas y labores profesionales. Las mujeres principalmente son amas de casa, aunque también ayudan en la agricultura, ganadería y crianza de animales (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 57).

Además, según el Censo del 2007 (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2011, pág. 135), se indica la Población Económicamente Activa (PEA) y no PEA de los distritos de la Subcuenca Yuracyacu. Ver Tabla N° 29.

Tabla N° 29 P.E.A según Censo 2007

Distrito	P.E.A		Población Económicamente Inactiva
	Ocupada	Desocupada	
Nueva Cajamarca	12 456	292	10 522
San Fernando	1 242	40	1 200
Yuracyacu	1 472	58	1 368

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2011, pág. 135).

4.4.3. Características Económicas

(Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 59) menciona que las actividades agrícolas en la Subcuenca Yuracyacu genera un fuerte ingreso, así como las actividades pecuarias, comerciales y el turismo. Cabe mencionar que, el distrito de Nueva Cajamarca es el centro de la mayoría de las actividades. Ver Tabla N° 30.

Tabla N° 30 Actividades realizadas en la Subcuenca Yuracyacu

Distrito o Caserío	Actividad agrícola	Actividad Pecuaria	Actividad Comercial	Turismo
San Fernando	Arroz	Vacuno	Bodegas	No tiene
	Maíz			
	Plátano			
	Yuca			
	Pasturas			
Nueva Cajamarca	Arroz	Vacuno Porcino Aves de corral	Ferretería	“Chacra de mi Amigo” “Gran Pajonal” “Cuevas del Nuevo Edén” “Palestino”
	Café		Farmacia	
	Plátano		Agroquímicos	
	Yuca		Abarrotes	
	Frijol		Bares	
	Maíz		Carpintería	
	Hortalizas		Discoteca	
Florida y Primavera	Café	Caza de animales		Cavernas Gallitos de las rocas
	Maíz			
	Yuca		----	
	Plátano			

Fuente: Adaptado de (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 61).

En referencia a los rendimientos y costos de producción de algunos cultivos para los distritos de San Fernando, Nueva Cajamarca y los caseríos de La Florida y Primavera, se muestran en el cuadro N° 31.

Se menciona que en Nueva Cajamarca existen 6 000 Ha de producción de arroz y 2 000 Ha de producción de Café, haciendo un total de 60 000 TN y en San Fernando se tienen 3 500 Ha bajo riego (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 64).

Tabla N° 31 Costo de Rendimiento y Producción de principales cultivos

Producto	San Fernando y Nueva Cajamarca		La Florida y Primavera	
	Rendimiento Kg/Ha	Costo de producción S./Ha	Rendimiento Kg/Ha	Costo de producción S./Ha
Arroz				
Maíz	5 000 – 6 000	3 000	2 000	600
Café orgánico	---	---	850	3 000
Plátano	---	---	500	2 000
Yuca	---	---	15 000	2 000

Fuente: (Cooperación Técnica Alemana (GTZ), S/A, pág. 64).

CAPÍTULO V

TELEDETECCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA

5.1. Preprocesamiento de las Imágenes Satelitales

a. Preparación de las Imágenes Landsat 5

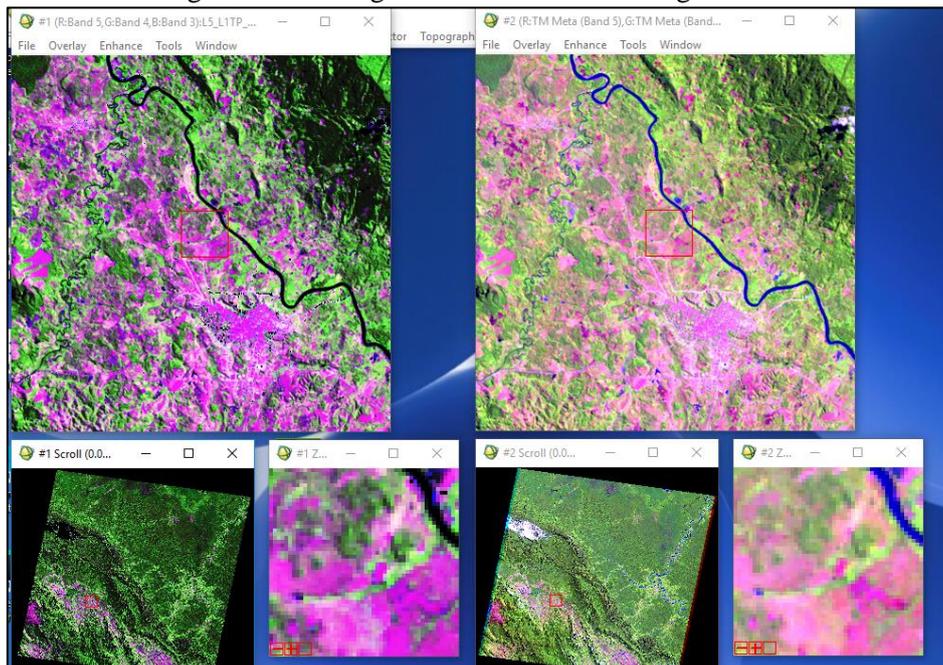
El resultado de este paso son 2 archivos con extensiones “.raw” y “.them”. La primera extensión, indica la salida de la “imagen cruda” y la segunda la imagen térmica.

b. Calibración de las imágenes

La salida de la imagen de reflectancia, a simple vista parece que fuera una imagen igual a la imagen cruda, sin embargo, esta data se almacena como un porcentaje, en números que van desde cero (0) a diez mil (10 000), donde 10 000 equivale al 100%.

En la figura N° 37 se observa de izquierda a derecha la imagen resultante de reflectancia y la imagen cruda correspondiente a la zona de estudio.

Figura N° 37 Imagen de Reflectancia e Imagen Cruda



Fuente: Elaboración propia.

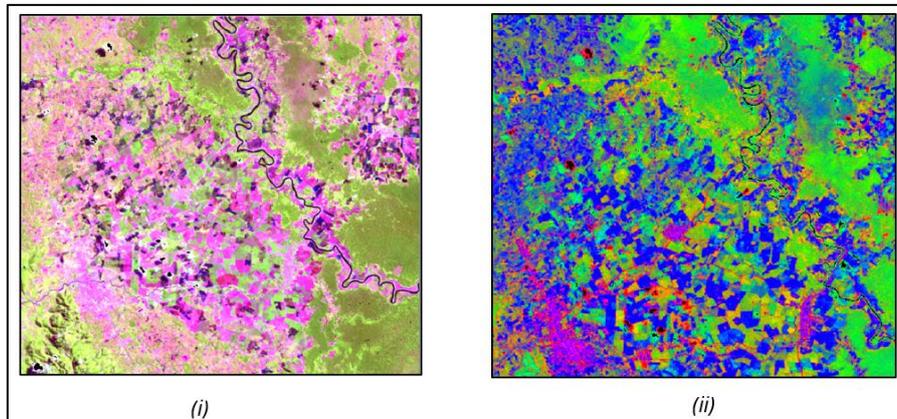
5.2. Procesamiento de las imágenes satelitales

a. Cobertura Fraccional de las imágenes

El objetivo de esta etapa es obtener la imagen de cobertura fraccional (*ii*), a partir de la imagen de reflectancia (*i*), explicado en el paso anterior. Este es el proceso más

importante para determinar los cambios en la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu mediante CLASlite. Ver Figura N° 38.

Figura N° 38 Reflectancia y Cobertura Fraccional

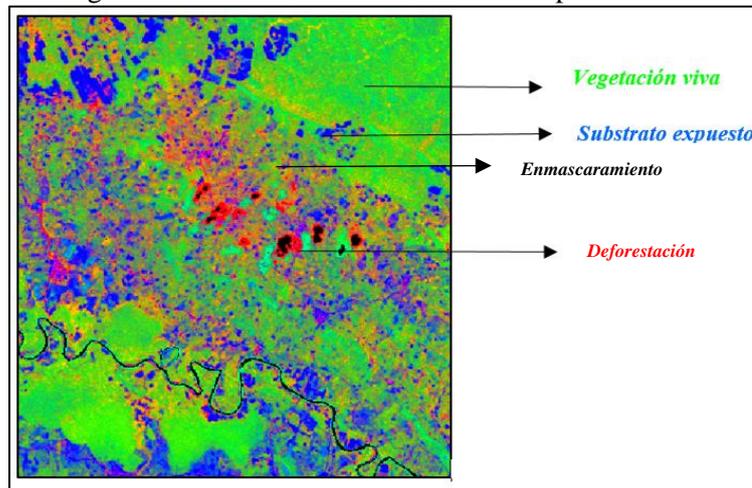


Fuente: Elaboración propia.

Para ello se utiliza el submodelo llamado Automatec Monte Carlo Unmixing (AutoMCU), el cual proporciona un análisis cuantitativo de la cobertura fraccional (de 0 a 100%) a nivel de subpixel de la cobertura boscosa mediante tres (3) clases: Vegetación fotosintética, vegetación no fotosintética y Sustrato, a través de la biblioteca de caracteres espectrales de reflectancia para discriminar cada tipo de cobertura. Ver Figura N° 39.

El resultado es una imagen clasificada en las coberturas a nivel de subpixel, la cual permite establecer la extensión de la cobertura boscosa y sus cambios y los procesos que ocurren a nivel de subpixel.

Figura N° 39 Clasificación a nivel de Subpixel

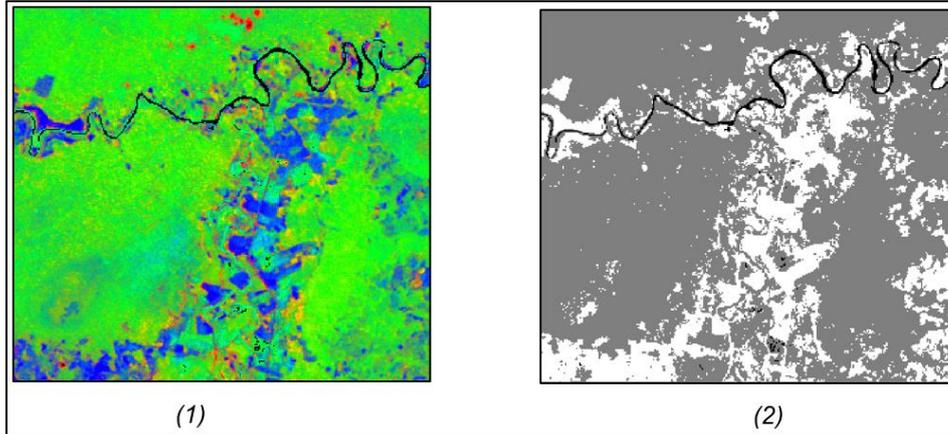


Fuente: Elaboración propia.

b. Clasificación de la Cobertura Boscosa

El principal insumo es la imagen de cobertura fraccional (1), la cual será convertida en una imagen de cobertura boscosa (2). Ver Figura N° 40.

Figura N° 40 Cobertura fraccional y Cobertura boscosa



Fuente: Elaboración propia – Imagen Satelital TM- Path 08 – Row 64.

Así, un píxel con bosque casi siempre tiene un porcentaje de cobertura fraccional de ochenta (80) o más. Además de la condición de que PV sea mayor a ochenta (80), también está la condición de que S sea menor a veinte (20). El objetivo es evitar que la vegetación no boscosa se clasifique como bosque.

La imagen de cobertura boscosa final posee tres (3) clases, los píxeles enmascarados se muestran en negro, los píxeles de bosque en gris y los píxeles de áreas no boscosas se muestran en blanco.

5.3. Cuantificación de áreas boscosas en la Subcuenca Yuracyacu

5.3.1. Variación de la Cobertura Boscosa

Se realizó el análisis multitemporal para el periodo 1989 – 2010 de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu. En el cuadro N° 14 se presentan los datos (en km²) de la superficie cubierta con bosque tropical. En el año 1989 la superficie de bosque tropical de la Subcuenca Yuracyacu asciende a un 64% del total del área, en el año 1995 la cobertura boscosa representaba el 56% de la superficie total de la subcuenca, en el 2001 ascendió al 56% del área total; así mismo para el año 2006 y 2008 la cobertura boscosa representó 54% y 53% respectivamente y para el año 2010 la cobertura boscosa fue del 50% de la subcuenca. Ver Cuadro N° 14.

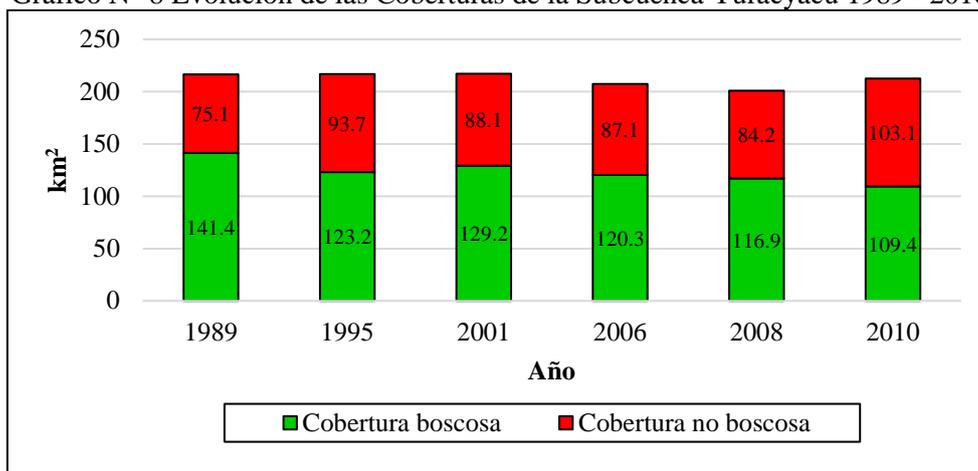
Cuadro N° 14 Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu en las fechas analizadas

Superficie	1989	1995	2001	2006	2008	2010
Cobertura Boscosa (km ²)	141,4	123,2	129,2	120,3	116,9	109,4
Cobertura no Boscosa (km ²)	75,1	93,7	88,1	87,1	84,2	103,1

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico N° 7, se observa la evolución de la cobertura boscosa, en los años de análisis, además la cobertura no boscosa, representa el suelo expuesto, y la vegetación de corto crecimiento en la subcuenca.

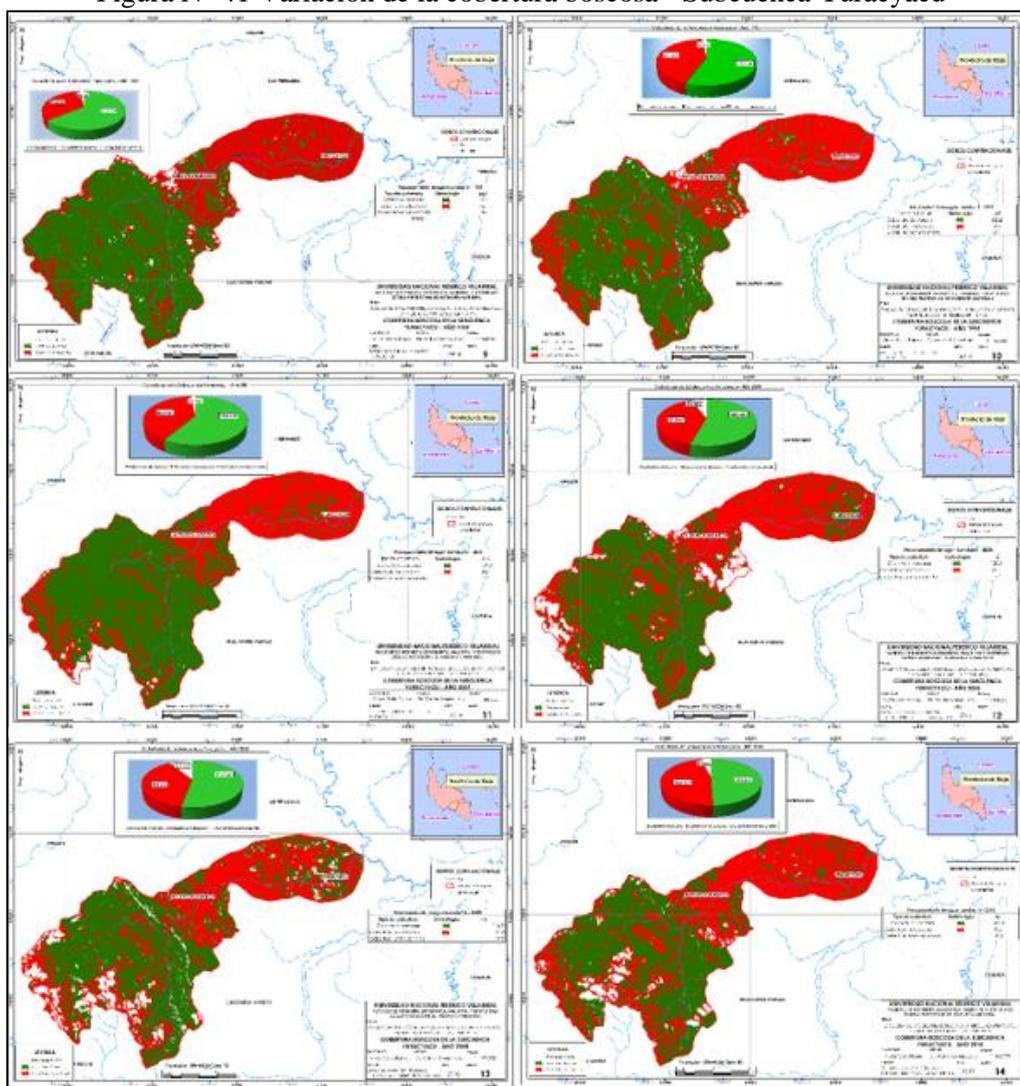
Gráfico N° 8 Evolución de las Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu 1989 - 2010



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 41, se presentan los resultados de las imágenes correspondientes a las cuatro (6) fechas analizadas, donde podemos evidenciar la progresiva disminución de la cobertura boscosa a lo largo del tiempo. Ver Mapas N°9, 10, 11, 12, 13 y 14.

Figura N° 41 Variación de la cobertura boscosa - Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

Las áreas boscosas de la Subcuenca del río Yuracyacu demuestran un retroceso significativo para el periodo de estudio. En tal sentido, se puede distinguir que la mayor pérdida de bosque fue de 18,2 km² en periodo 1989 – 1995, luego hubo una recuperación de cobertura boscosa igual a 6 km² en el periodo 1995 – 2001, además para el periodo 2001 – 2006 existió una variación de cobertura boscosa de 8,9 km², para el periodo 2006 – 2008 también existió una reducción de 3,4 km² de bosque tropical y para el periodo 2008 – 2010, la variación fue de 7,5 km² (Ver Cuadro N° 15).

Cuadro N° 15 Variación de áreas de Cobertura boscosa

Periodo	Cobertura Boscosa (km ²)	Variación de Cobertura boscosa	Superficie de la Subcuenca Yuracyacu	Tasa de Retroceso (km ² /año)
1989	141,4	***	220,8	***
1995	123,2	-18,2	220,8	-3,03
2001	129,2	6,0	220,8	1,0
2006	120,3	-8,9	220,8	-1,78
2008	116,9	-3,4	220,8	-1,70
2010	109,4	-7,5	220,8	-3,75

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Potenciales escenarios futuros en la Subcuenca Yuracyacu

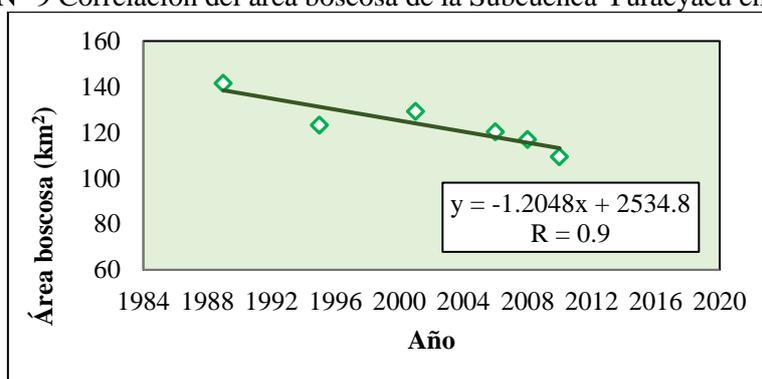
A partir de las superficies de cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu (Ver Cuadro N° 16), se determinó un modelo de regresión lineal (Ver Gráfico N° 8), el cual nos permite definir las potenciales áreas futuras de bosque tropical en la Subcuenca Yuracyacu.

Cuadro N° 16 Cobertura Boscosa en la Subcuenca Yuracyacu para el periodo 2002 - 2010

Tipo de Imagen	Año	Superficie (Km ²)
Landsat TM	1989	141,4
Landsat TM	1995	123,2
Landsat TM	2001	129,2
Landsat TM	2006	120,3
Landsat TM	2008	116,9
Landsat TM	2010	109,4

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 9 Correlación del área boscosa de la Subcuenca Yuracyacu en el tiempo



Fuente: Elaboración propia.

De la correlación mostrada en el Gráfico N° 8 de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu y los años 1989, 1995, 2001, 2006, 2008 y 2010, se definió la siguiente ecuación.

$$\text{Área boscosa} = -1,2048 * (\text{Año}) + 2534,8$$

A partir de dicha ecuación se determinaron los potenciales escenarios futuros de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu (Ver cuadro N° 17), en donde se observa la disminución progresiva de la cobertura de bosque tropical.

Cuadro N° 17 Potenciales escenarios futuros de Cobertura Boscosa en la Subcuenca Yuracyacu

Año	Cobertura Boscosa (km ²)	Año	Cobertura Boscosa (km ²)	Año	Cobertura Boscosa (km ²)
1989	138,5	2003	121,6	2017	104,7
1990	137,2	2004	120,4	2018	103,5
1991	136,0	2005	119,2	2019	102,3
1992	134,8	2006	118,0	2020	101,1
1993	133,6	2007	116,8	2021	99,9
1994	132,4	2008	115,6	2022	98,7
1995	131,2	2009	114,4	2023	97,5
1996	130,0	2010	113,2	2024	96,3
1997	128,8	2011	111,9	2025	95,1
1998	127,6	2012	110,7	2026	93,9
1999	126,4	2013	109,5	2027	92,7
2000	125,2	2014	108,3	2028	91,5
2001	124,0	2015	107,1	2029	90,3
2002	122,8	2016	105,9	2030	89,1

Fuente: Elaboración propia.

Se calculó el error del modelo de regresión lineal determinado en el análisis de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu (Ver Cuadro N° 18), en base a la superficie de bosque tropical calculada. Se observa que los errores son bajos, siendo el error mayor de 7% para el año 1995.

Cuadro N° 18 Error producido por el modelo

Año	Cobertura Boscosa (Km ²)	Cobertura Boscosa en base al modelo de regresión (Km ²)	Error
1989	141,4	138,5	-2%
1995	123,2	131,2	7%
2001	129,2	124,0	-4%
2006	120,3	118,0	-2%
2008	116,9	115,6	-1%
2010	109,4	113,2	3%

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu

La deforestación en la Subcuenca Yuracyacu, se expresa en el cambio que ha sufrido la cobertura boscosa desde el inicio del periodo de análisis (1989). En ese sentido, se utilizaron dos (2) fórmulas matemáticas para el cálculo del cambio anual en la cobertura boscosa, la primera fórmula corresponde al que usa la FAO (Ecuación N° 15), a través del cual se mide el cambio de la cobertura de los bosques (q) y posee un significado matemático y biológico.

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para el periodo 1989 - 1995

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

La segunda tasa de cambio (r) (Ecuación N° 16) es la propuesta por (Puyravaud, 2003), en el ejemplo mostrado, pertenece al periodo 1989 - 1995:

$$r = \frac{1}{(t_2-t_1)} * \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

Mediante la aplicación de las fórmulas descritas anteriormente se obtuvieron los índices q y r que indican la tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu para el periodo de análisis (Ver cuadro N° 19).

Cuadro N° 19 Tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu

Periodo	q (% anual)	r (% anual)
1989 – 1995	-0,0227	-0,023
1995 – 2001	0,008	-0,007
2001 - 2006	-0,0142	-0,014
2006 - 2008	-0,0140	-0,014
2008 - 2010	-0,0326	-0,033
1989 - 2010	-0,0121	-0,012

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Validación de Resultados

Se evaluó la fiabilidad del análisis de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu en base a ciento noventa y cinco (195) puntos de verificación, seleccionado mediante la distribución binomial de probabilidad. Los puntos se establecieron en base a un muestreo sistemático no alineado e interpretados visualmente con una imagen de alta resolución (Portal Google Earth). Se elaboró la matriz de confusión (Ver Cuadro N° 20) con los puntos de muestreo. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce el acuerdo entre las dos (2) fuentes utilizadas. Las columnas se agrupan en las clases de referencia (imagen de alta resolución) y las filas, por las categorías deducidas del análisis de la cobertura boscosa.

Cuadro N° 20 Matriz de Confusión

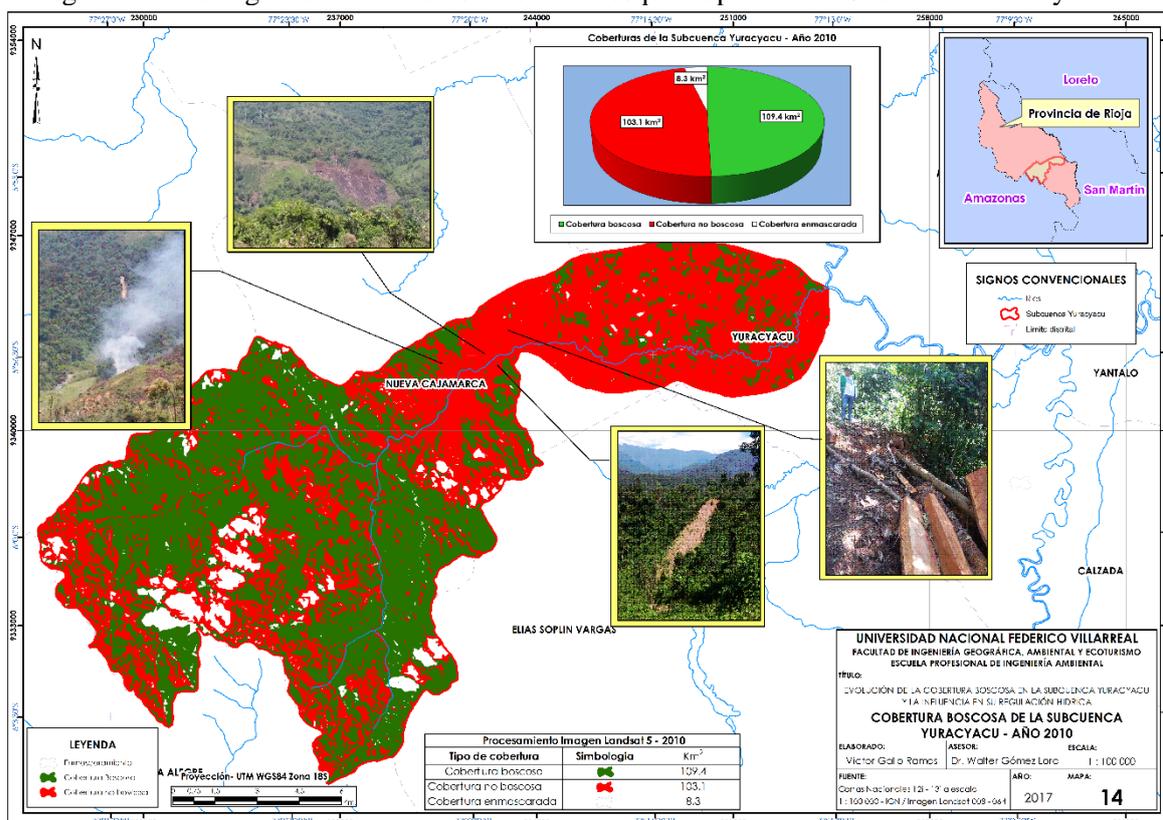
	Clases	Imagen de alta resolución			Total Fila
		Cobertura boscosa	Cobertura enmascarada	Cobertura no Boscosa	
Clasificación	Cobertura boscosa	85	2	12	99
	Cobertura nubes	7	3	1	11
	Cobertura no boscosa	31	1	79	111
Total Columna		123	6	92	195

Fuente: Elaboración propia.

La validación del mapa resultó en un índice Kappa de 0,65, el cual se encuentra dentro del rango 0,61 – 0,8 lo que indica una fuerza de concordancia considerable o sustancial (Landis & Koch, 1977, pág. 165) y una exactitud global de 86%.

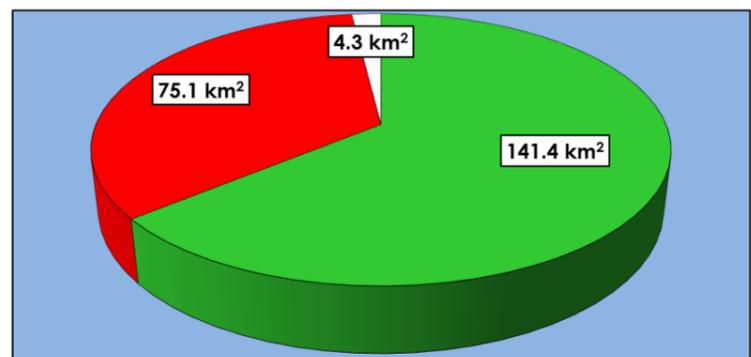
Las Figuras que se muestran a continuación corresponden al levantamiento de información del bosque tropical de la Subcuenca, el cual evidencia la erosión del suelo, la quema y tala de bosque para agricultura y sembríos de café. Mayor detalle ver Anexo 6.

Figura N° 42 Imágenes de la deforestación del bosque tropical en la Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración Propia.

Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu - Año 1989



■ Cobertura boscosa ■ Cobertura no boscosa □ Cobertura enmascarada

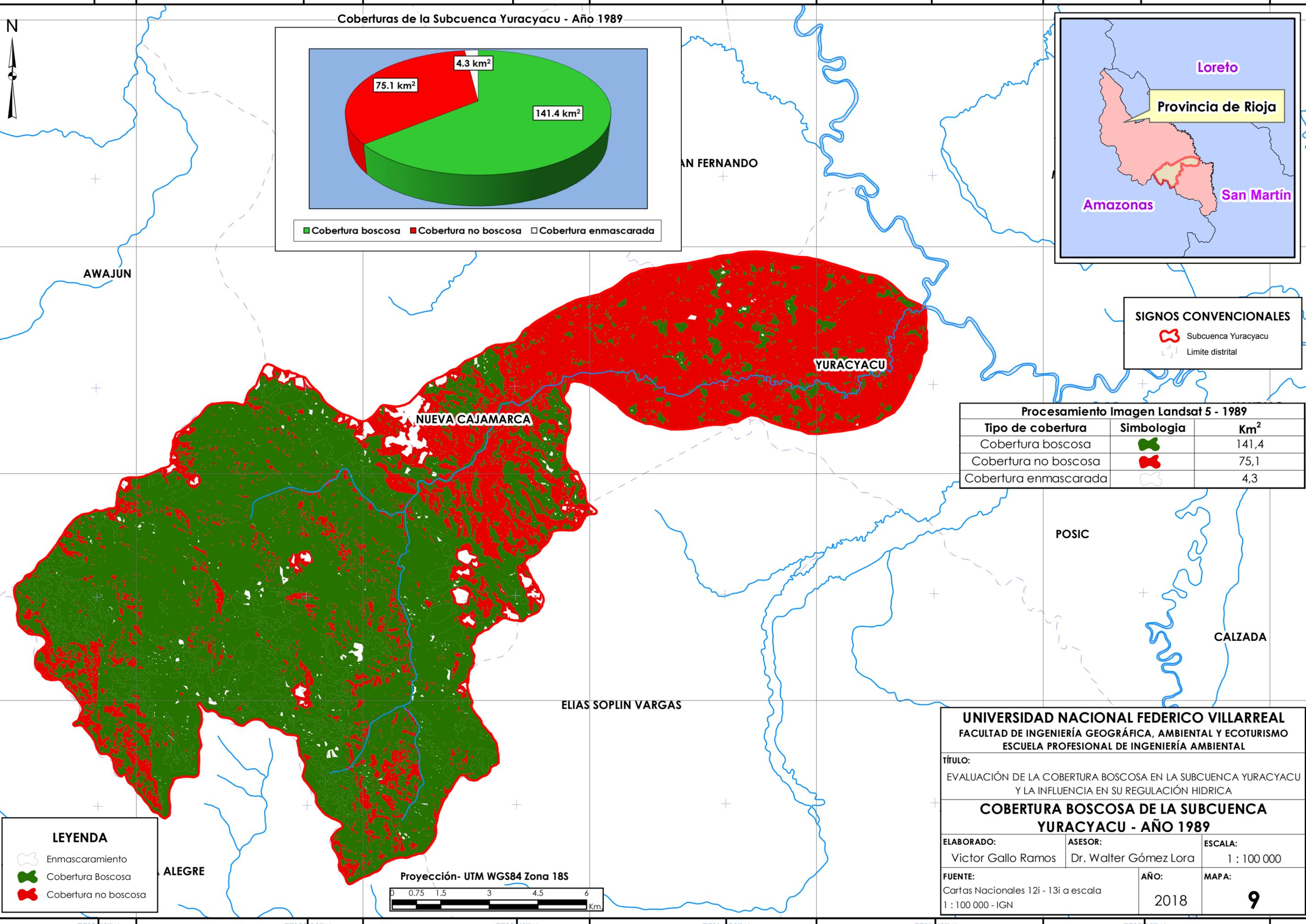


SIGNOS CONVENCIONALES

- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

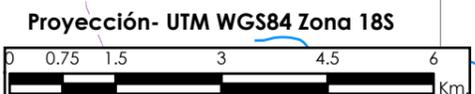
Procesamiento Imagen Landsat 5 - 1989

Tipo de cobertura	Simbología	Km ²
Cobertura boscosa		141,4
Cobertura no boscosa		75,1
Cobertura enmascarada		4,3



LEYENDA

- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa



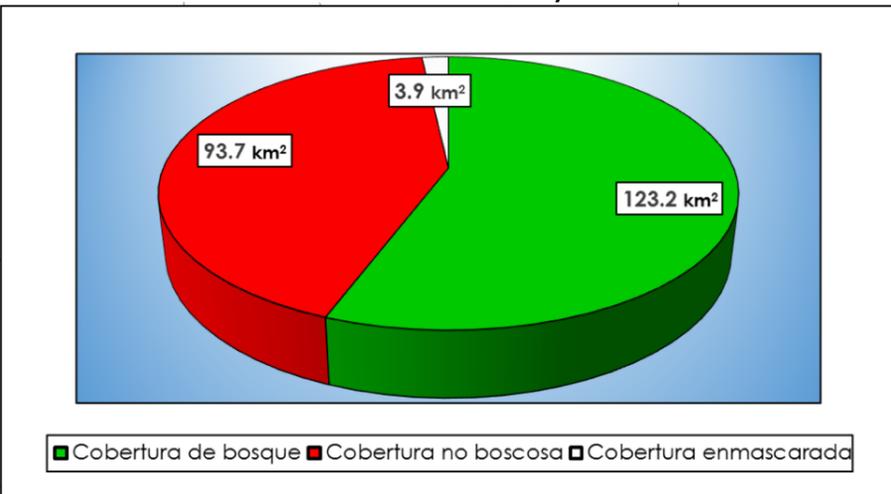
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA BOSCOSA DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 1989

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2018	MAPA: 9

Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu - Año 1995



SIGNOS CONVENCIONALES

- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

Procesamiento Imagen Landsat 5 - 1995

Tipo de cobertura	Simbologia	Km ²
Cobertura de bosque		123.2
Cobertura no boscosa		93.7
Cobertura enmascarada		3.9

LEYENDA

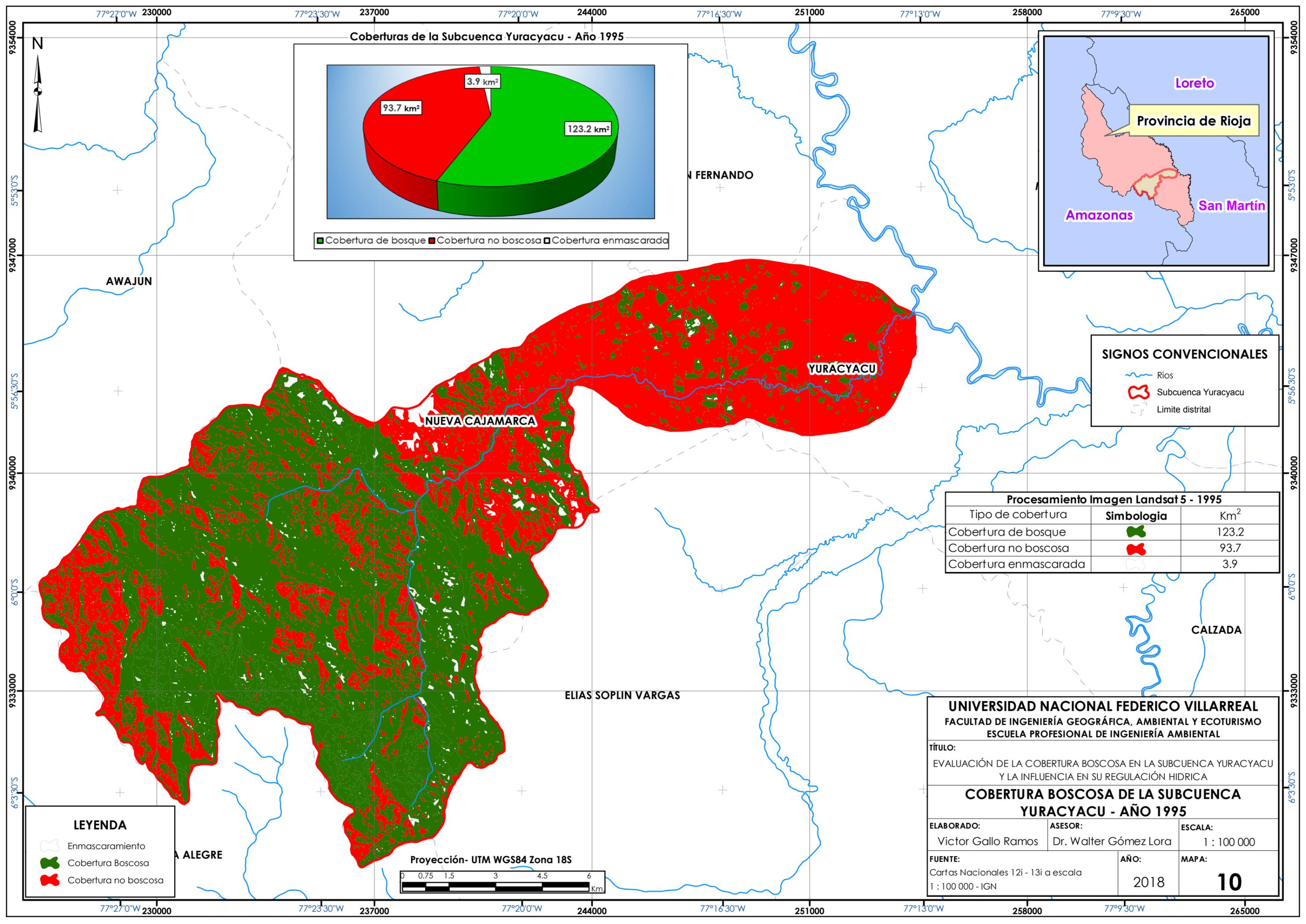
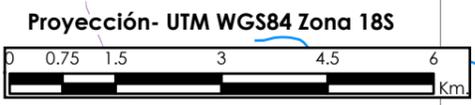
- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa

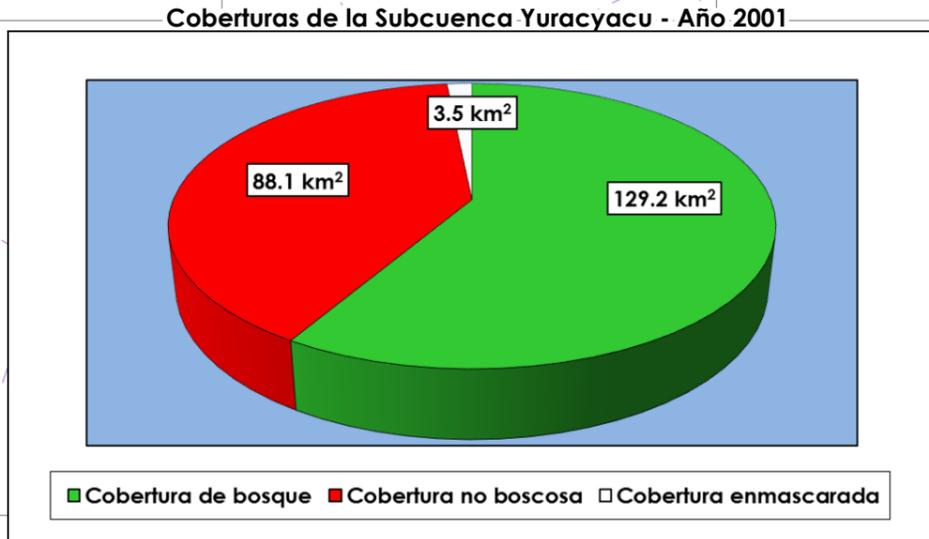
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOScosa EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA BOScosa DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 1995

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2018	MAPA: 10



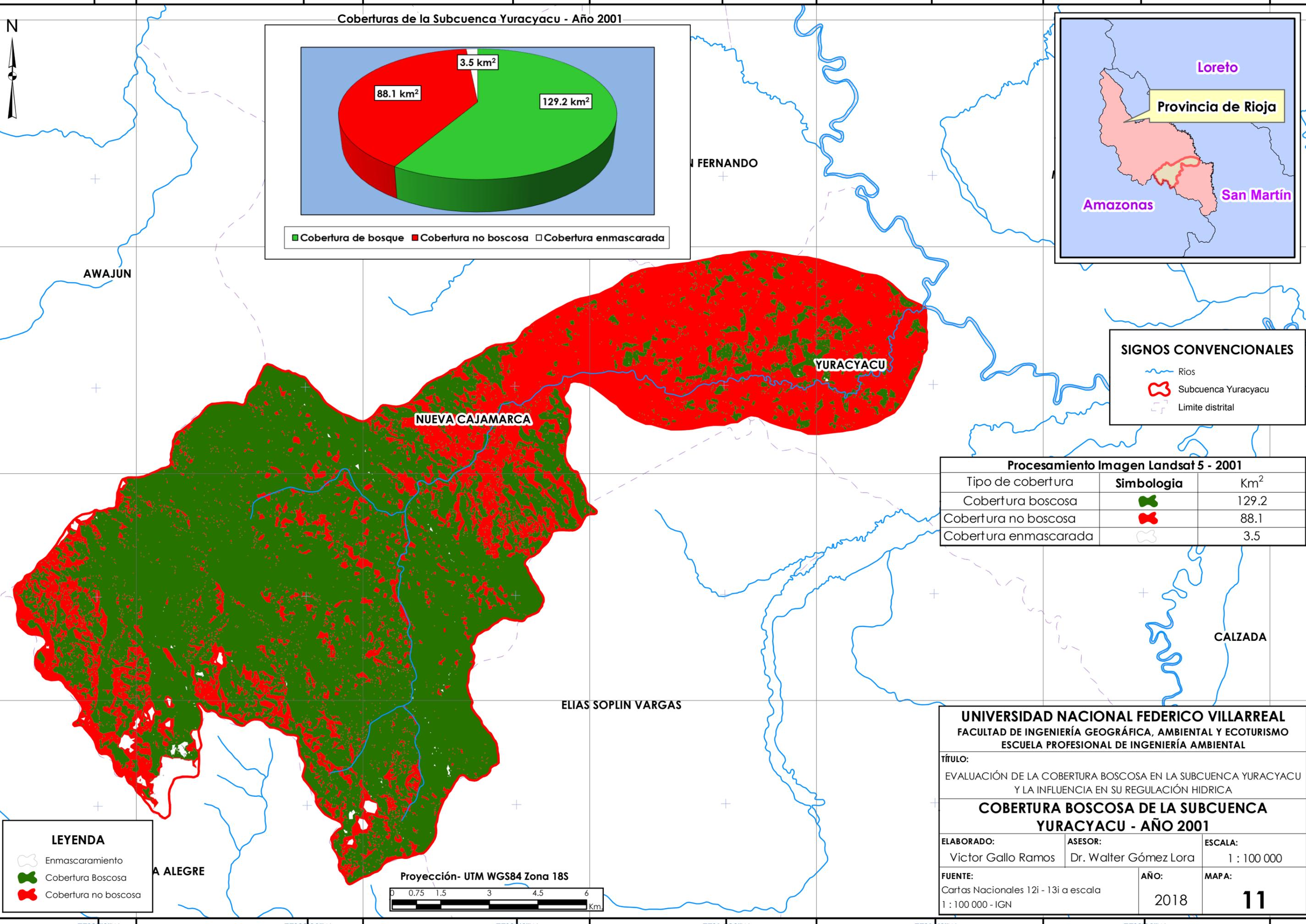


SIGNOS CONVENCIONALES

- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

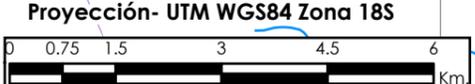
Procesamiento Imagen Landsat 5 - 2001

Tipo de cobertura	Simbología	Km ²
Cobertura boscosa		129.2
Cobertura no boscosa		88.1
Cobertura enmascarada		3.5



LEYENDA

- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa



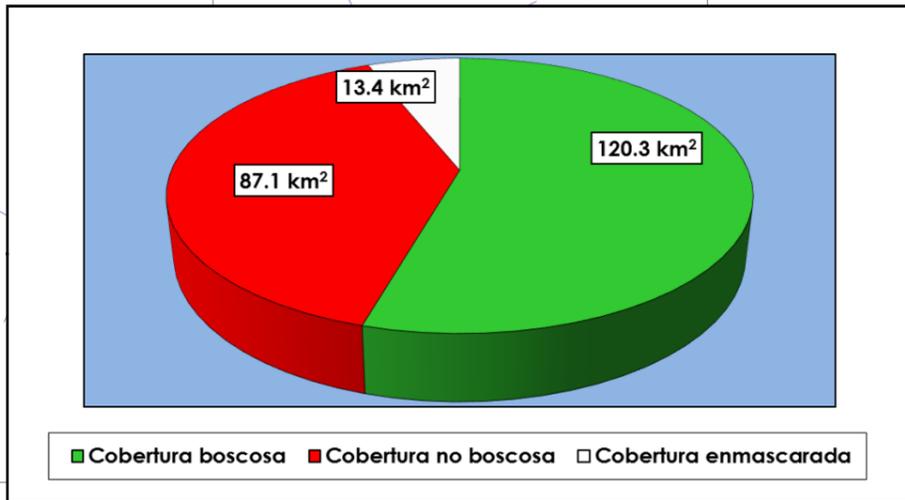
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOScosa EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA BOScosa DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 2001

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2018	MAPA: 11

Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu - Año 2006

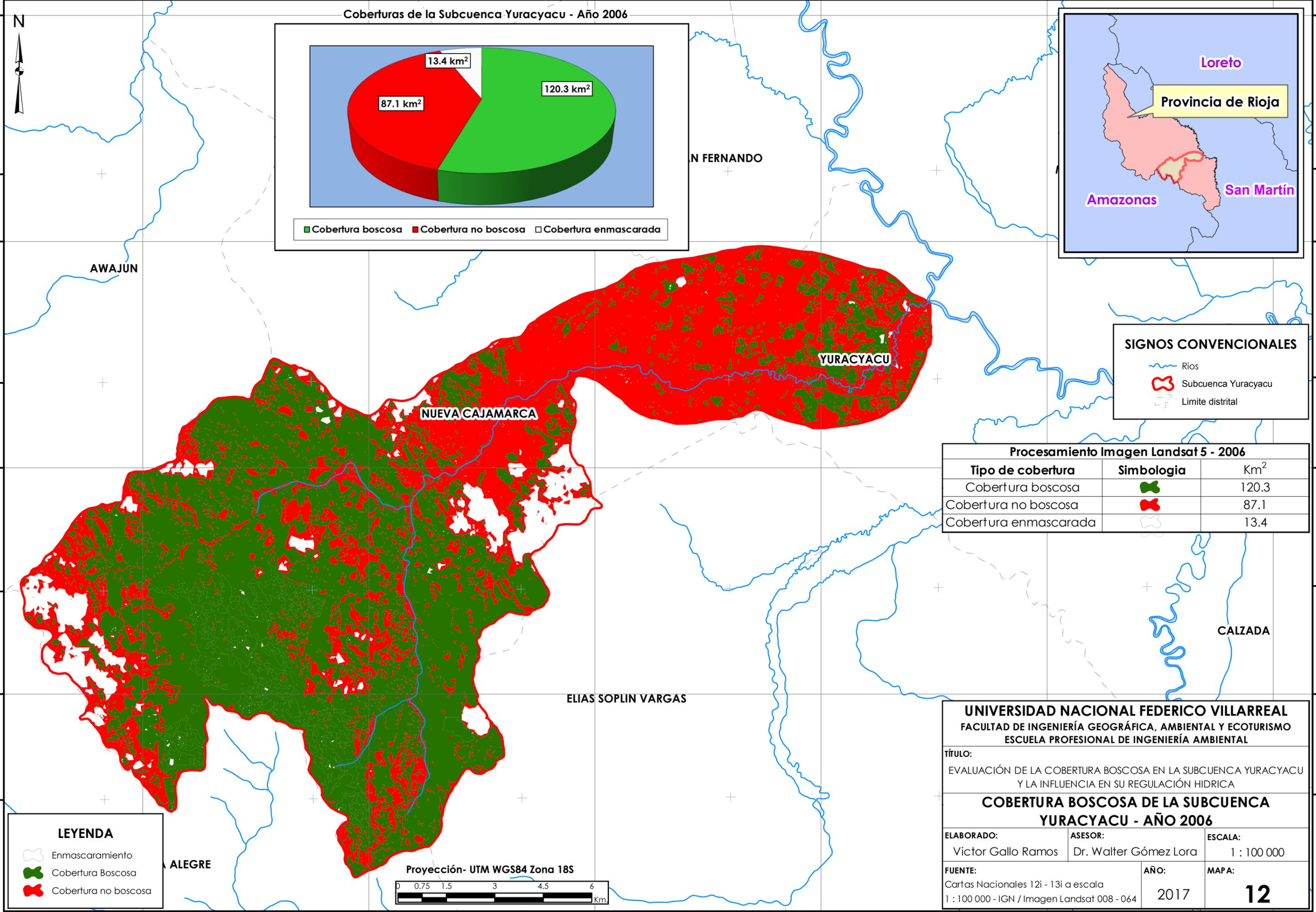


SIGNOS CONVENCIONALES

- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

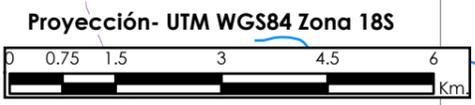
Procesamiento Imagen Landsat 5 - 2006

Tipo de cobertura	Simbología	Km ²
Cobertura boscosa		120.3
Cobertura no boscosa		87.1
Cobertura enmascarada		13.4



LEYENDA

- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa



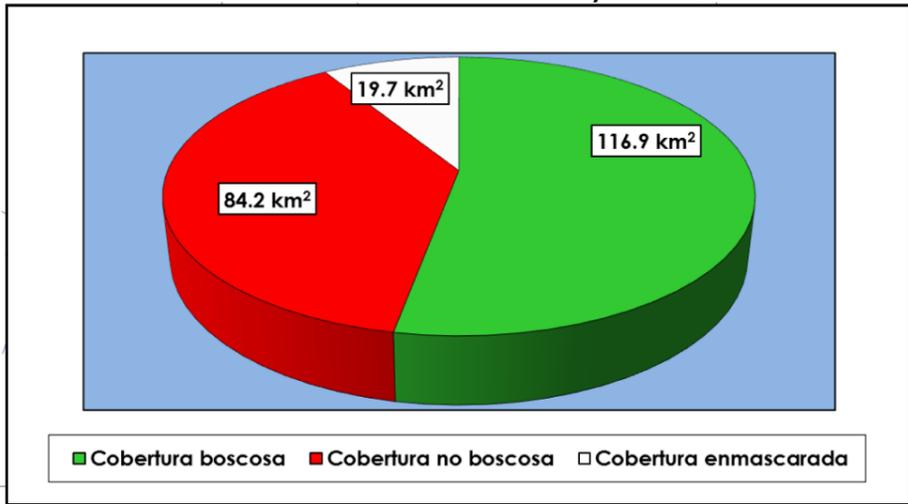
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOScosa EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA BOScosa DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 2006

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN / Imagen Landsat 008 - 064	AÑO: 2017	MAPA: 12

Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu - Año 2008



SIGNOS CONVENCIONALES

- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital

Procesamiento Imagen Landsat 5 - 2008

Tipo de cobertura	Simbologia	Km ²
Cobertura boscosa		116.9
Cobertura no boscosa		84.2
Cobertura enmascarada		19.7

LEYENDA

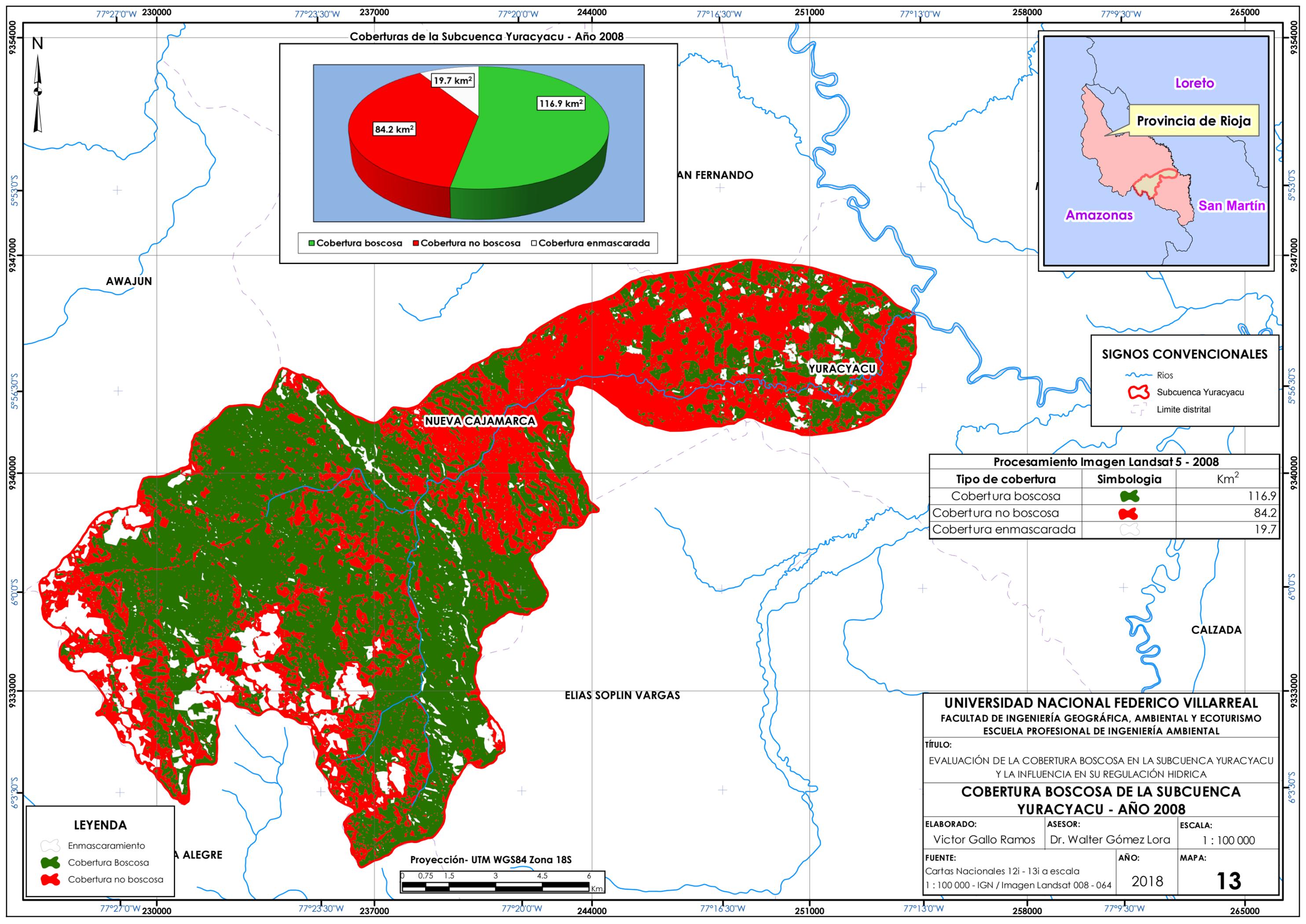
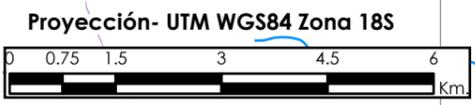
- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa

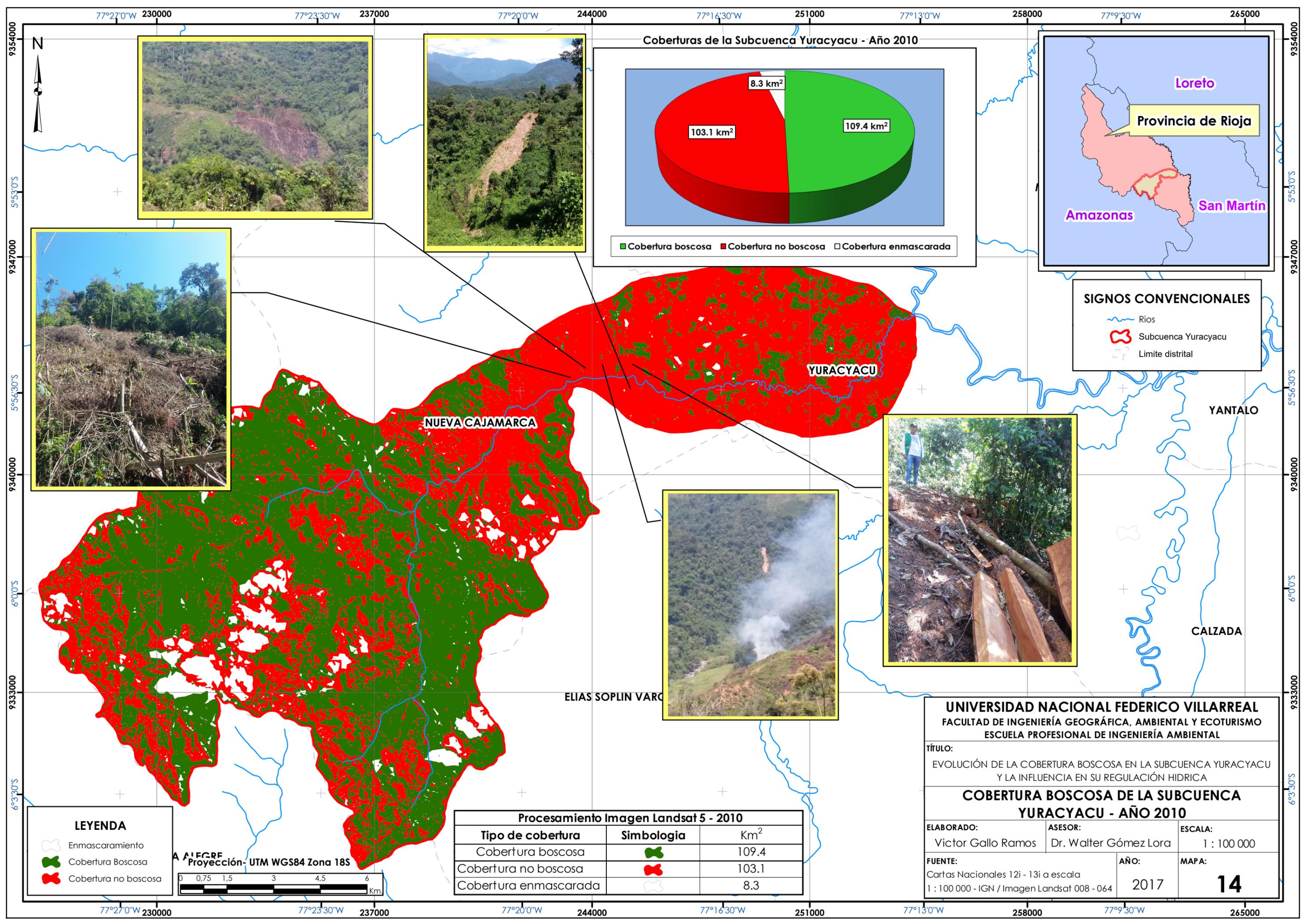
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

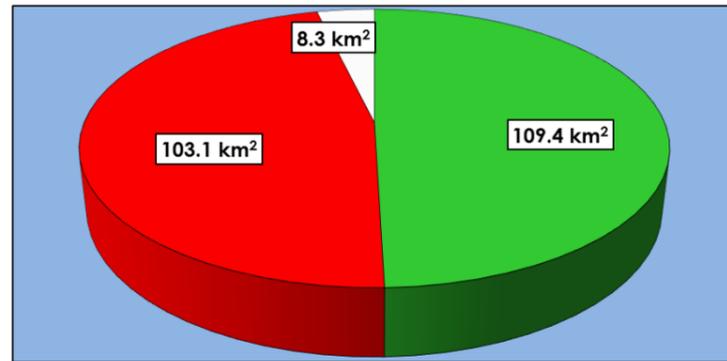
COBERTURA BOSCOSA DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 2008

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN / Imagen Landsat 008 - 064	AÑO: 2018	MAPA: 13





Coberturas de la Subcuenca Yuracyacu - Año 2010



■ Cobertura boscosa ■ Cobertura no boscosa □ Cobertura enmascarada



SIGNOS CONVENCIONALES

- Ríos
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite distrital



LEYENDA

- Enmascaramiento
- Cobertura Boscosa
- Cobertura no boscosa

ALEGRE
Proyección- UTM WGS84 Zona 18S

Procesamiento Imagen Landsat 5 - 2010		
Tipo de cobertura	Simbología	Km ²
Cobertura boscosa		109.4
Cobertura no boscosa		103.1
Cobertura enmascarada		8.3

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOScosa EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

COBERTURA BOScosa DE LA SUBCUENCA YURACYACU - AÑO 2010

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN / Imagen Landsat 008 - 064	AÑO: 2017	MAPA: 14

CAPÍTULO VI

HIDROMETEOROLOGÍA DE LA SUBCUENCA

6.1. Pluviometría

La Subcuenca Yuracyacu en la actualidad no cuenta con información medida dentro de ella, en su ámbito se encuentran estaciones como Jazán, Moyobamba, Soritor, siendo Naranjillo y Rioja las más cercanas.

En el año 1963 funcionó la Estación pluviométrica Yuracyacu, estuvo operativa hasta 1976, según registros obtenidos de La Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales (ONERN), pero actualmente se encuentra cerrada.

Asimismo, la estación Chachapoyas se utilizó en la determinación de la precipitación en el área de estudio.

6.1.1. Estaciones meteorológicas

Según (ONERN, 1984, pág. 190), la estación Yuracyacu perteneció a la Subcuenca Yuracyacu, registrándose información desde 1963 hasta 1976. (Ver Tabla N°32).

Tabla N° 32 Estación Meteorológica Yuracyacu - Subcuenca Yuracyacu

Estación	Altitud m.s.n.m.	Pp promedio Histórico 1965 – 1976	Lat. (S)	Long. (W)	Tipo de información
Yuracyacu	850	1 479 mm	5°57'	72°12'	Pp total anual

Fuente: Adaptado de (ONERN, 1984, págs. 190,193).

En la tabla N°33 se muestran las estaciones que se encuentran en el ámbito de estudio, las que serán requeridas para el análisis regional de la subcuenca y así obtener el valor de la precipitación media multianual.

Tabla N° 33 Estaciones meteorológicas de apoyo de la Subcuenca Yuracyacu

Estación	Altitud m.s.n.m.	Pp promedio Histórico 1999 - 2005	Lat. (S)	Long. (W)	Tipo de información
Naranjillo	890	1498,6	5°49'	77°23'	Precipitación total mensual
Rioja	880	1498,5	6°2'	77°10'	
Chachapoyas	2 450	951,0	6°12'	77°52'	

Fuente: Adaptado del portal de data histórica del SENAMHI.

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA

Nombre de estación	Tipo	Entidad Operadora	Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)	Distrito	Periodo de registro	Periodo
			Latitud sur	Longitud Oeste				
Rio Yuracyacu	Hidrometrica	ANA	5,94	77,33	940	Nueva Cajamarca	2001-2012	12 años



LEYENDA

- Estacion hidrométrica Yuracyacu
- ▲ Estaciones Pluviométricas
- Rios
- Subcuenca Yuracyacu
- Limite de Cuencas

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Nombre de la Estación	Tipo	Entidad Operadora	Coordenadas		Altitud	Distrito	Registro	Periodo en Años
			Latitud (S)	Longitud (W)				
Naranjillo	Meteorológica	SENAMHI	5° 49' 34"	77° 23' 14"	1090	Nueva Cajamarca	1995 - 2010	16 años
Rioja	Meteorológica	SENAMHI	6° 2' 48"	77° 10' 1"	880	Rioja	1995 - 2010	16 años
Chachapoyas	Meteorológica	SENAMHI	6° 12' 29,88"	77° 52' 1,62"	2450	Chachapoyas	1995-2010	16 años

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVALUACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACIÓN HIDRICA

ESTACIONES HIDROMETEREOLÓGICAS DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN		AÑO: 2018
		MAPA: 15

Proyección: UTM WGS84 Zona 18S

6.1.2. Análisis de la calidad de la información Pluviométrica

Se realizó el análisis de la información de las estaciones de la tabla N° 33, con la finalidad de evaluar su consistencia y luego realizar el análisis regional y la generación de información para la Subcuenca Yuracyacu.

Sin embargo, para utilizar la información de las estaciones vecinas y completar la información de la estación de interés, los registros deben ser consistentes. Por ejemplo, en una zona homogénea, una determinada precipitación afectará igual a todas las estaciones que ahí se encuentren y no solo a una en particular, cuya estimación se puede realizar utilizando el análisis doble acumulación.

▪ Análisis de doble acumulación

Este análisis se basa en el hecho de que las estaciones de una zona homogénea con respecto a la variable que se analiza, para este caso la precipitación, debe registrar un régimen similar. Este método consiste en plotear en ejes cartesianos dos (2) acumulaciones:

- Eje de abscisas: Se colocarán valores acumulados promedios de varias estaciones cercanas denominadas “estaciones índices” o “estaciones modelo”.
- Eje de las ordenadas: Valores acumulados de la estación que se analiza.

Estos Valores Acumulados Promedios, son conocidos como Patrón de Precipitación Anual (PPA) (UNESCO, 1982, pág. 30).

Según (UNESCO, 1982, pág. 31), la metodología a seguir para determinar el PPA, es el siguiente:

- a. Entre todas las estadísticas de precipitación de la región, se seleccionan aquellas que tienen un registro más largo y que se consideran mejor observadas, para luego aplicar la curva de doble acumulación o doble masa.
- b. Para cada año se calcula el promedio de las precipitaciones anuales de cada estación, de acuerdo se muestra en el siguiente detalle:

$$PPA = \frac{1}{N} * \sum P_x$$

Ecuación N° 42 Patrón de precipitación

Siendo:

- PPA : Patrón de precipitación de un año.
Px : Precipitación anual de la estación x.
N : Número de estaciones.

- c. Posteriormente los valores de PPA y de las estaciones se acumulan cronológicamente, a partir del año más antiguo al más nuevo.
- d. En un gráfico, se lleva al eje de abscisas los valores de PPA acumulada y en el de las ordenadas los valores de la estación de estudio.
- e. Si los puntos representan una sola tendencia, significa que la data de la estación en estudio es consistente.

- **Análisis para la estación Rioja:**

Ejemplo:

$$PPA (1995) = \frac{(1473,2 + 1417 + 1676,1)}{3} = 1522,1 \text{ mm}$$

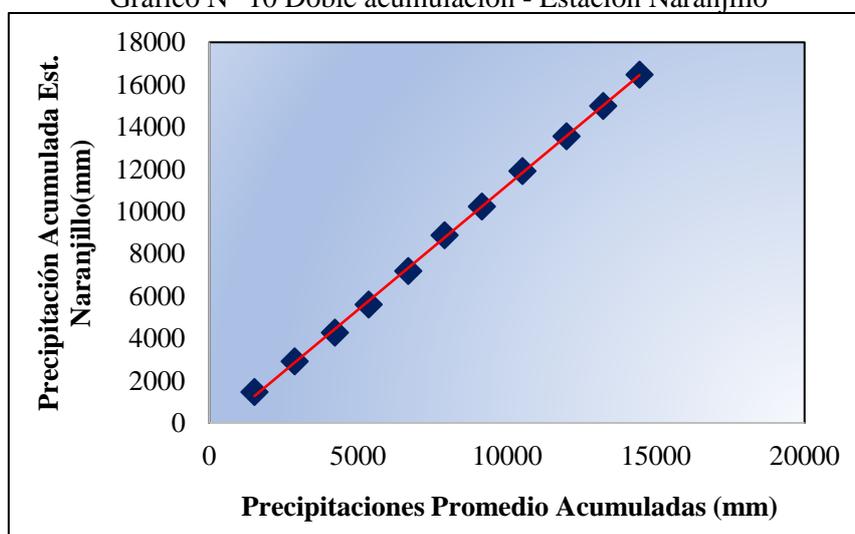
Cuadro N° 21 Cálculos para el Patrón de Precipitación Anual (PPA)

Año	Estación Naranjillo	Estación Rioja	Estación Chachapoyas	PPA	Acum. PPA	Acum. Est. Naranjillo	Acum. Est. Rioja	Acum. Est. Chachapoyas
1995	1473,2	1417,0	1676,1	1522,1	1522,1	1 473,2	1 417,0	1 676,1
1996	1443,2	1315,1	1288,7	1349,0	2871,1	2 916,4	2 732,1	2 964,8
1997	1357,4	1460,5	1246,8	1354,9	4226,0	4 273,8	4 192,6	4 211,6
1998	1338,0	1301,3	767,1	1135,5	5361,5	5 611,8	5 493,9	4 978,7
1999	1581,9	1582,3	798,4	1320,9	6682,3	7 193,7	7 076,2	5 777,1
2000	1686,3	1296,7	688,3	1223,8	7906,1	8 880,0	8 372,9	6 465,4
2001	1359,6	1732,8	683,2	1258,5	9164,6	10 239,6	10 105,7	7 148,6
2002	1678,1	1426,1	977,0	1360,4	10525,0	11 917,7	11 531,8	8 125,6
2003	1639,7	1997,2	782,3	1473,1	11998,1	13 557,4	13 529,0	8 907,9
2004	1440,3	1492,2	789,0	1240,5	13238,6	14 997,7	15 021,2	9 696,9
2005	1486,3	1463,8	694,9	1215,0	14453,6	16 484,0	16 485,0	10 391,8

Fuente: Elaboración propia.

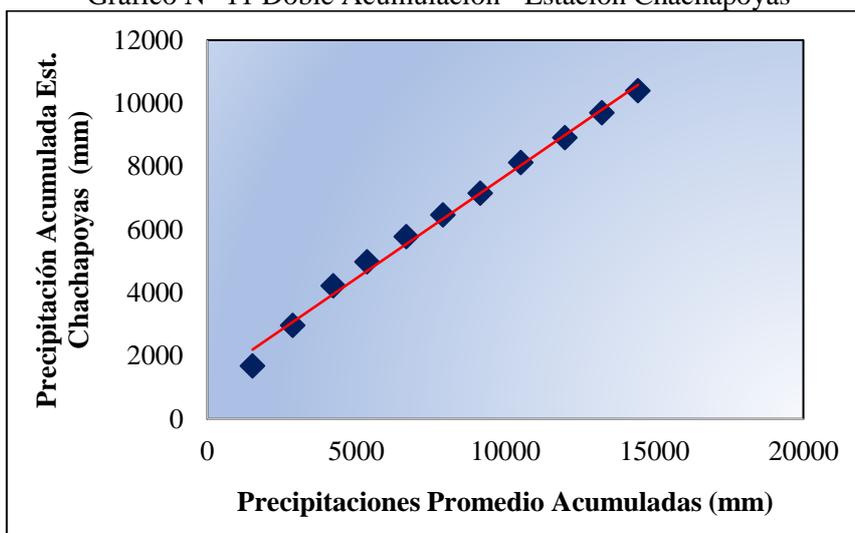
A continuación, se muestran los gráficos de doble acumulación de las estaciones de estudio.

Gráfico N° 10 Doble acumulación - Estación Naranjillo



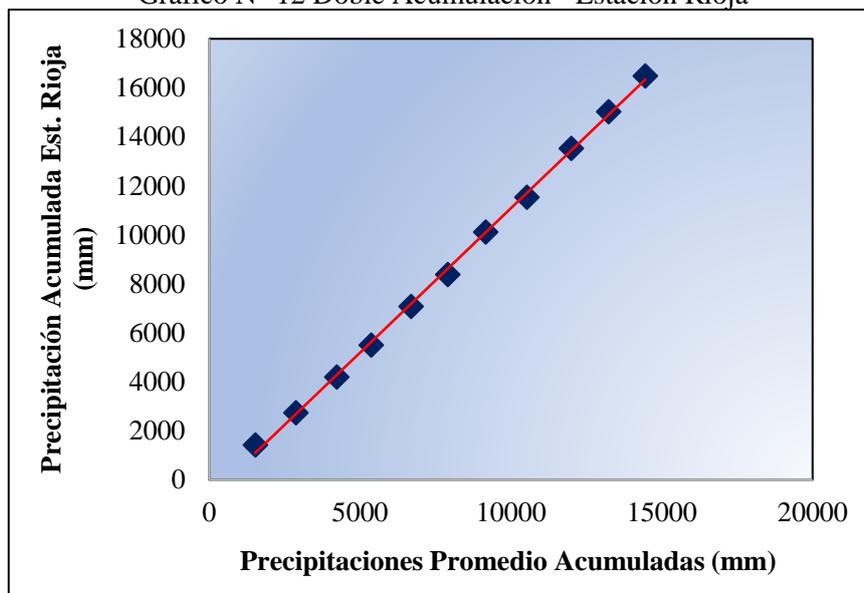
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 11 Doble Acumulación - Estación Chachapoyas



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 12 Doble Acumulación - Estación Rioja



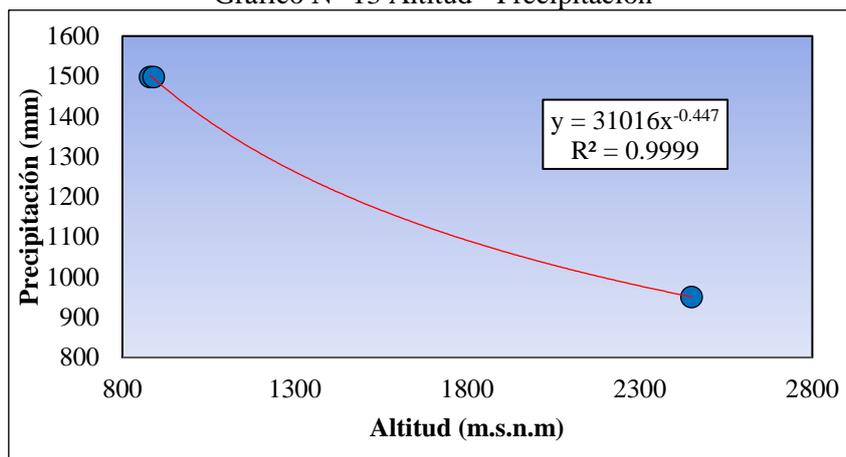
Fuente: Elaboración propia.

De los gráficos N° 9, 10 y 11 se observa que los cambios en la estación patrón y los valores acumulados de precipitación para las estaciones Naranjillo, Rioja y Chachapoyas, tienden a amortiguarse, ya que no existen quiebres significativos, por lo que se puede trazar una sola recta. Al no existir cambios de pendiente entre los puntos ploteados, se evidencia la consistencia en el periodo de análisis.

6.1.3. Determinación de la Precipitación

De las estaciones de apoyo, seleccionadas en la tabla N° 33, se realizó el análisis regional, con la finalidad de conocer el comportamiento de la precipitación respecto de la variable altitud.

Gráfico N° 13 Altitud - Precipitación



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico N° 12, se observa que conforme la altitud aumenta, la precipitación disminuye, estableciéndose una relación inversa entre ambas variables. Asimismo, dicha ecuación regional presenta un coeficiente de correlación (R) igual a 0,9.

$$PP = 29040 x (H)^{-0,43}$$

Ecuación N° 43 Modelo regional de precipitación

Donde:

PP : Precipitación media (mm).

H : Altitud (m.s.n.m.).

La precipitación generada para las estaciones son valores conservadores, es decir valores ligeramente inferiores al valor medido. Además, se calcularon los errores que genera la precipitación que se calculó con el modelo de regresión potencial, mediante la siguiente ecuación

$$E: \left(\frac{Pp_{gen} - Pp_{real}}{Pp_{real}} \right) x 100$$

Ecuación N° 44 Cálculo del error

Donde:

E : error (%)

Pp gen : precipitación generada (mm)

Pp real : precipitación medida en la estación (mm)

Cuadro N° 22 Precipitación generada para las estaciones utilizadas

Estación	Altitud	pp	pp gen	error
Rioja	880	1498,5	1497,62	-0,1%
Naranjillo	890	1498,6	1490,08	-0,6%
Chachapoyas	2450	951	947,61	-0,4%

pp : precipitación (mm)

pp gen : precipitación generada (mm)

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.1. Técnica de Isoyetas

Se dibujaron las isolíneas de precipitación en la Subcuenca Yuracyacu, para esto se distribuyeron en la subcuenca setecientos (700) puntos, de tal forma que, mediante la ecuación regional se determine la precipitación para dichos puntos.

Los puntos con valores de precipitación se plotean en el entorno GIS y se dibujan las isolíneas de precipitación (Isoyetas), luego se realizan las correcciones respectivas. Estas correcciones consisten en eliminar los círculos que genera la herramienta Spline, considerando el sentido físico del comportamiento de la precipitación en la Subcuenca Yuracyacu. La precipitación media en la subcuenca se determinará mediante las áreas parciales, curvas de nivel y por rangos de altitud.

- **Áreas parciales**

El siguiente cuadro muestra el cálculo de las áreas parciales entre Isoyetas, posteriormente se determina la precipitación media en base a la siguiente ecuación, tal como se muestra a continuación en el cuadro N°23.

$$\text{Precipitación media} = \frac{\sum(A_i \times PP_{mi})}{A_t}$$

Ecuación N° 45 Precipitación areal

Donde:

A_i : Área parcial entre isoyeta.

PP_{mi} : Precipitación media entre 2 isoyetas.

A_t : Área total de la Subcuenca Yuracyacu.

Cuadro N° 23 Precipitación generada por Áreas parciales

ID	Precipitación (mm)		Precipitación media (pp _m)	Área parcial (A _i)	A _i *pp _m _i
1	1550	1500	1525	46,4	70784,6
2	1500	1400	1450	14,2	20590,0
3	1400	1300	1350	11,1	14972,9
4	1300	1200	1250	17,4	21750,0
5	1200	1100	1150	35,7	41040,2
6	1100	1000	1050	43,7	45843,2
7	1000	900	950	31,6	30036,8
8	900	950	925	20,7	19148,4
220,8					264166,0

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Precipitación media} = \frac{264166 \text{ km}^2 \times \text{mm}}{220,8 \text{ km}^2} = 1196,5 \text{ mm}$$

Obteniéndose, por áreas parciales una precipitación media igual a 1196,5 mm.

- **Curvas de Nivel**

Las curvas de nivel se convierten en isolíneas de precipitación, reemplazando su valor en la ecuación regional, luego se determina la precipitación media de la siguiente forma en el cuadro N°24:

$$Precipitación\ media = \frac{\sum(A_i * PP_{am})}{A_t}$$

Ecuación N° 46 Precipitación por curvas de nivel

Donde:

PP_{am} : Precipitación en la altitud media del rango.

A_i : Área parcial entre curvas de nivel.

A_t : Área total de la subcuenca.

Cuadro N° 24 Precipitación generada por altitudes

ID	Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		A _i (km ²)	H _{prom}	PP generada (mm)	mm * km ²
1	810	850	39,5	830	1537,3	60723,2
2	850	1000	23,1	925	1464,6	33832,4
3	1000	1200	9,9	1100	1355,4	13418,9
4	1200	1400	16,1	1300	1257,9	20252,5
5	1400	1600	19,1	1500	1180,0	22537,5
6	1600	1800	22,9	1700	1115,8	25551,2
7	1800	2000	25,2	1900	1061,7	26753,7
8	2000	2200	17,7	2100	1015,2	17969,1
9	2200	2400	15,5	2300	974,8	15108,6
10	2400	2600	9,9	2500	939,1	9297,0
11	2600	2800	8,5	2700	907,3	7712,3
12	2800	3000	6,8	2900	878,8	5975,9
13	3000	3200	3,2	3100	853,0	2729,6
14	3200	3400	3,4	3300	829,5	2803,7
			220,8			264665,7

PP: Precipitación.

H_{prom}: Altitud promedio entre el rango.

Fuente: Elaboración propia.

$$Precipitación\ media = \frac{264655,7\ km^2 \times mm}{220,8\ km^2} = 1198,8\ mm$$

Obteniéndose, una precipitación media igual a 1198,8 mm anuales.

- **Rangos de Altitud**

Es de utilidad para conocer el comportamiento de la precipitación por rangos de altitud en la Subcuenca Yuracyacu, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$PP_x = \frac{\left(\frac{I_1+I_2}{2}\right) * A_1 + \left(\frac{I_3+I_4}{2}\right) * A_2 + \dots + \left(\frac{I_{n-1}+I_n}{2}\right) * A_n}{A_t}$$

Ecuación N° 47 Precipitación por rangos de altitud

Donde:

PPx : Precipitación media entre el rango de altitud seleccionado.

I_{1,2,...,n} : Isoyeta dentro del rango de altitud.

A_{1,2,...,n} : Área parcial.

A_t : Área total.

Se elabora un cuadro, el cual permite determinar la precipitación media de la subcuenca, en base a la ecuación anterior.

Cuadro N° 25 Precipitación media por rangos de Altitud

Rango de Altitud (m.s.n.m.)		Isoyetas dentro del rango altitudinal		pp media entre dos isoyetas	Área parcial entre isoyeta	Ai	PPx	Ai x PPx
810	1000	1550	1500	1525	46,4	62,6	1501,7	94074,3
		1500	1400	1450	13,8			
		1400	1300	1350	2,5			
1000	1400	1500	1400	1450	0,5	26,1	1278,2	33376,8
		1400	1300	1350	8,6			
		1300	1200	1250	14,7			
		1200	1100	1150	2,3			
1400	1800	1300	1200	1250	2,8	42,0	1135,9	47691,1
		1200	1100	1150	30,5			
		1100	1000	1050	8,7			
1800	2200	1200	1100	1150	2,9	42,9	1040,1	44628,7
		1100	1000	1050	32,9			
		1000	900	950	7,1			
2200	2600	1100	1000	1050	2,0	25,5	955,7	24407,1
		1000	900	950	21,2			
		900	950	925	2,3			
2600	3400	1000	900	950	3,3	21,7	928,8	20112,5
		900	950	925	18,4			
220,8								264290,55

Ai : área parcial

pp : precipitación (mm)

Fuente: Elaboración Propia.

$$Precipitación\ media = \frac{264290,55\ km^2\ x\ mm}{220,8\ km^2} = 1196,7\ mm$$

Se obtiene una precipitación de 1196,7 mm anual, por el método de rangos de altitud.

Los tres (3) métodos desarrollados para determinar la precipitación media de la Subcuenca Yuracyacu, arrojan valores similares, por tal razón, se optará por valor

ECUACIÓN REGIONAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA

Tipo de Regresión	Ecuación Regional	Coefficiente de Correlación (R)
Potencial	$PP = 31016 \times (H)^{-0,447}$	0,9

PP: precipitación (mm)
H : altitud (m.s.n.m.)

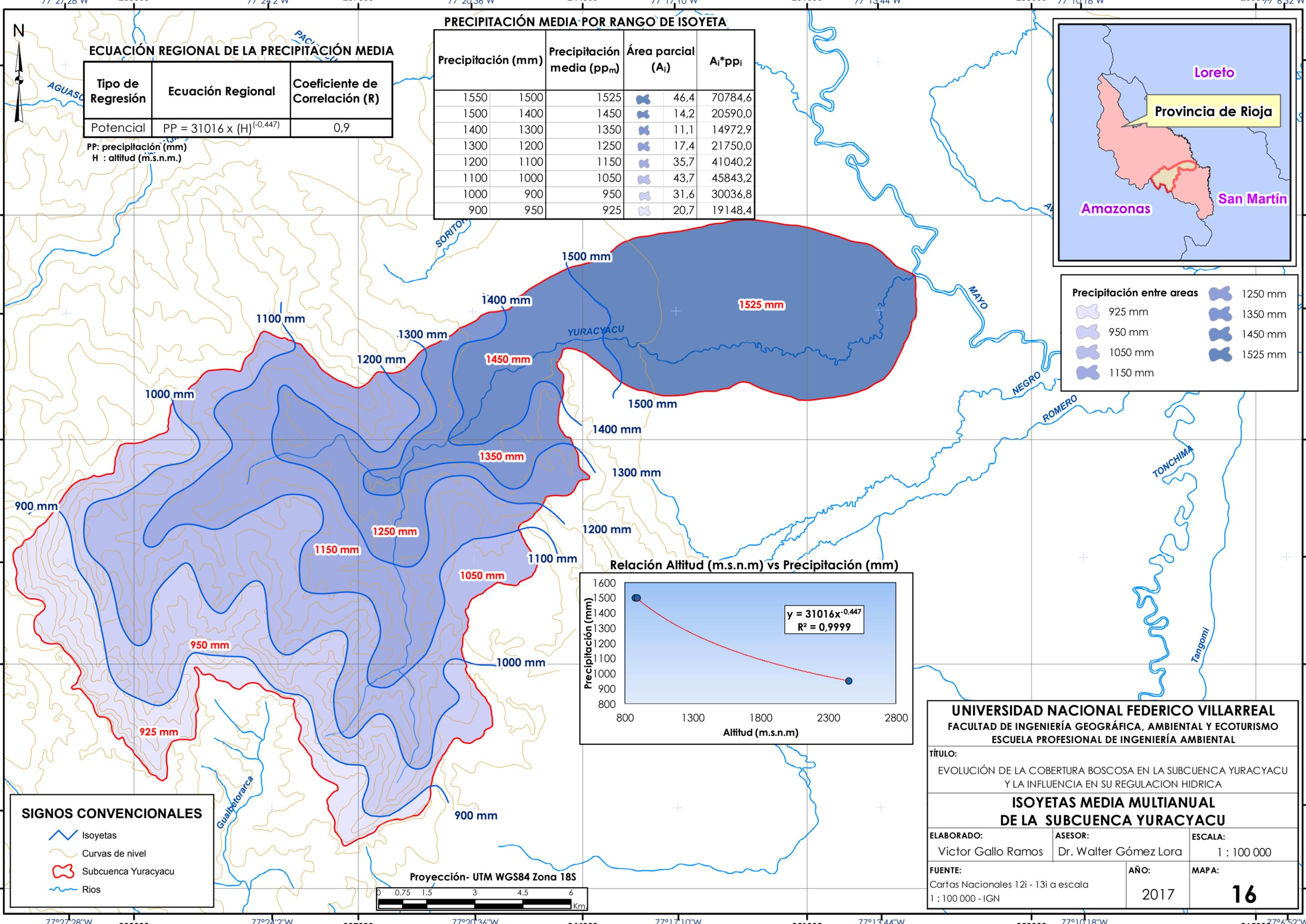
PRECIPITACIÓN MEDIA POR RANGO DE ISOYETA

Precipitación (mm)	Precipitación media (pp _m)	Área parcial (A _i)	A _i *pp _i	
1550	1500	1525	46,4	70784,6
1500	1400	1450	14,2	20590,0
1400	1300	1350	11,1	14972,9
1300	1200	1250	17,4	21750,0
1200	1100	1150	35,7	41040,2
1100	1000	1050	43,7	45843,2
1000	900	950	31,6	30036,8
900	950	925	20,7	19148,4

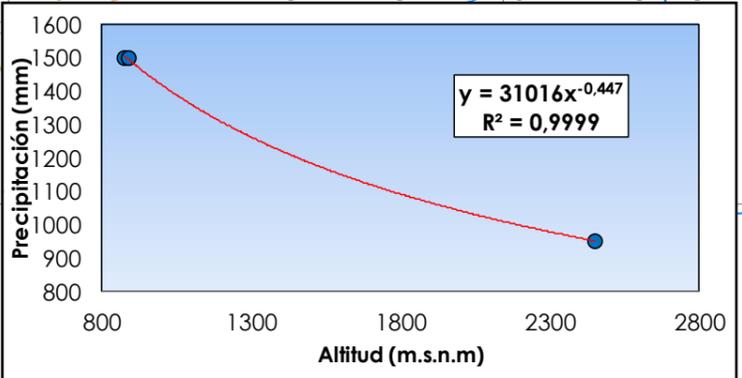


Precipitación entre áreas

	925 mm		1250 mm
	950 mm		1350 mm
	1050 mm		1450 mm
	1150 mm		1525 mm



Relación Altitud (m.s.n.m) vs Precipitación (mm)



SIGNOS CONVENCIONALES

- Isoyetas
- Curvas de nivel
- Subcuenca Yuracyacu
- Rios

Proyección- UTM WGS84 Zona 18S



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACION HIDRICA

ISOYETAS MEDIA MULTIANUAL DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2017	MAPA: 16

representativo al promedio de estos, siendo la precipitación media igual a 1197,3 mm anuales. Ver Cuadro N° 26.

Cuadro N° 26 Precipitación representativa

Áreas parciales	Curvas de nivel	Rangos de altitud	Promedio
1196.5 mm	1198.8 mm	1196.7 mm	1197.3 mm

Fuente: Elaboración Propia.

6.1.4. Generación de registro pluviométrico

Para generar información mensual de precipitación se optó por el método adimensional, para este método se debe calcular el factor adimensional anual (K_a) y los factores adimensionales mensuales (K_m) de cada año. Se utilizó los datos de la estación naranjillo para realizar los cálculos respectivos, por ser una estación cercana a la subcuenca.

A continuación, se muestra las ecuaciones necesarias para calcular los determinantes del Método Adimensional.

- Determinación del factor adimensional anual (K_a):

$$K_a = \frac{P_p}{P_{pm}}$$

Ecuación N° 48 Factor adimensional anual

Donde:

P_p : precipitación promedio de la subcuenca.

P_{pm} : precipitación media multianual del registro.

Entonces, para calcular el factor adimensional anual, se divide la precipitación media de la subcuenca y el valor promedio multianual del registro de la estación naranjillo (1995 – 2010), obteniendo lo siguiente:

$$K_{anual} = \frac{1197.3 \text{ mm}}{1557.5 \text{ mm}} = 0.7687$$

- Determinación del factor adimensional mensual (K_m):

$$K_m = \frac{P_{pi}}{P_{pa}}$$

Ecuación N° 49 Factor adimensional mensual

Donde:

P_{pi} : precipitación media del mes i .

P_{pa} : precipitación total anual

Es así que, los factores adimensionales mensuales, se calcularon dividiendo la precipitación de un mes correspondiente a un determinado año (1995) entre la precipitación total anual de ese mismo año, así:

$$K_{i_{ene\ 1995}} = \frac{82.6\text{mm}}{1473.2\text{mm}} = 0.0561$$

Así para todos los meses del periodo 1995 – 2010 de la estación naranjillo. Como comprobación, la suma de los factores adimensionales para cada año debe ser igual a 1 (Ver Cuadro N° 27).

Cuadro N° 27 Factores Adimensionales de la estación Naranjillo

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	0,0561	0,0895	0,1127	0,1757	0,0388	0,0661	0,0226	0,0092	0,0998	0,0472	0,1468	0,1356	1
1996	0,0628	0,1353	0,1546	0,0661	0,0479	0,0258	0,0069	0,0832	0,0564	0,1626	0,0859	0,1124	1
1997	0,0598	0,2352	0,0810	0,0900	0,0536	0,0439	0,0127	0,0343	0,1034	0,1047	0,1255	0,0560	1
1998	0,0921	0,0888	0,0832	0,1639	0,1190	0,0372	0,0099	0,1158	0,0265	0,1378	0,0517	0,0743	1
1999	0,1653	0,0985	0,1056	0,0716	0,1194	0,0963	0,0269	0,0471	0,0385	0,0929	0,0494	0,0886	1
2000	0,1333	0,1204	0,0951	0,1465	0,0568	0,0814	0,0468	0,0237	0,0950	0,0475	0,0328	0,1207	1
2001	0,0797	0,1339	0,1051	0,0972	0,1267	0,0401	0,0590	0,0260	0,0764	0,1186	0,0741	0,0632	1
2002	0,1141	0,1079	0,1141	0,1087	0,0959	0,0064	0,0790	0,0307	0,0768	0,1183	0,0656	0,0825	1
2003	0,0568	0,0974	0,1516	0,0847	0,0656	0,0737	0,0112	0,0304	0,0967	0,0916	0,1208	0,1194	1
2004	0,0837	0,0619	0,1170	0,1198	0,0899	0,0512	0,0481	0,0391	0,0391	0,1189	0,1347	0,0967	1
2005	0,0519	0,1211	0,0770	0,1451	0,1082	0,0551	0,0349	0,0237	0,0561	0,0661	0,1751	0,0856	1
2006	0,1067	0,1816	0,1005	0,0543	0,0304	0,0250	0,0351	0,0442	0,0556	0,1233	0,1100	0,1332	1
2007	0,1199	0,0551	0,1041	0,0856	0,0234	0,0174	0,0376	0,0711	0,0824	0,1478	0,1868	0,0687	1
2008	0,0351	0,1632	0,1051	0,1356	0,0581	0,0721	0,0751	0,0430	0,0585	0,1430	0,0822	0,0292	1
2009	0,0800	0,0958	0,1238	0,1631	0,0693	0,0744	0,0337	0,0579	0,0850	0,0644	0,1049	0,0478	1
2010	0,0400	0,1210	0,1245	0,1224	0,1003	0,0265	0,0860	0,0331	0,0700	0,0815	0,0918	0,1028	1

Fuente: Elaboración propia

Luego de calcular los factores adimensionales mensuales y el factor adimensional anual, se calcula precipitación total anual y las precipitaciones mensuales, con las siguientes ecuaciones:

- **Cálculo de la precipitación total anual generada (P_{tg}):**

$$P_{tg} = K_a \times P_t$$

Ecuación N° 50 Precipitación total anual generada

Donde:

K_a : factor adimensional anual

P_t : precipitación total anua(mm)

Por ejemplo, la precipitación anual generada para el año 1995 para la Subcuenca

Yuracyacu es:

$$P_{tg_{1995}} = 0.76875 \times 1473.2\text{mm} = 1132.5\text{mm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los demás años.

▪ **Cálculo de la precipitación mensual generada (Pmg):**

$$Pmg = K_m \times Ptg$$

Ecuación N° 51 Precipitación mensual generada

Donde:

Km : factor adimensional mensual.

Ptg : precipitación total anual generada (mm).

Finalmente, para el cálculo de la precipitación mensual, se multiplica el valor de la PPg y el factor adimensional mensual. Teniendo las constantes adimensionales, para todos los meses del periodo de análisis, se generaron las precipitaciones medias mensuales, como se muestran a continuación:

$$Pp_{enero} = 0,0561 \times 1132,5mm = 63,5 mm$$

Finalmente se obtiene el registro generado para la subcuenca (Ver Cuadro N° 28), teniendo como base a la estación naranjillo.

Cuadro N° 28 Precipitación generada Subcuenca Yuracyacu

Año Hidrológico	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
1995-1996	10,4	113,0	53,4	166,3	153,6	69,7	150,2	171,6	73,4	53,2	28,6	7,7
1996-1997	92,4	62,6	180,5	95,4	124,7	62,4	245,5	84,5	93,9	56,0	45,8	13,3
1997-1998	35,8	107,9	109,3	131,0	58,4	94,7	91,3	85,5	168,6	122,3	38,3	10,2
1998-1999	119,1	27,2	141,7	53,1	76,4	201,1	119,8	128,5	87,1	145,3	117,1	32,7
1999-2000	57,3	46,8	113,0	60,1	107,7	170,8	154,3	121,9	187,7	72,7	104,3	60,0
2000-2001	30,4	121,7	60,8	42,1	154,7	86,7	145,8	114,4	105,9	138,0	43,7	64,3
2001-2002	28,3	83,2	129,2	80,7	68,8	147,3	139,3	147,3	140,3	123,8	8,2	101,9
2002-2003	39,6	99,1	152,6	84,6	106,5	76,0	130,3	202,9	113,4	87,8	98,7	14,9
2003-2004	40,7	129,4	122,5	161,6	159,8	92,7	68,5	129,6	132,7	99,6	56,7	53,2
2004-2005	43,3	43,3	131,7	149,2	107,1	59,2	138,0	87,8	165,4	123,3	62,8	39,8
2005-2006	27,0	64,0	75,4	199,6	97,6	121,2	206,4	114,2	61,8	34,5	28,5	39,8
2006-2007	50,2	63,2	140,1	125,0	151,4	169,1	77,7	146,8	120,8	33,0	24,6	53,1
2007-2008	100,3	116,3	208,6	263,5	97,0	55,0	255,6	164,6	212,4	91,0	113,0	117,6
2008-2009	67,3	91,6	224,0	128,7	45,8	90,7	108,6	140,3	184,8	78,5	84,4	38,1
2009-2010	65,6	96,3	73,0	118,9	54,2	45,6	137,8	141,7	139,3	114,2	30,2	98,0
Promedio	53,8	84,4	127,7	124,0	104,3	102,8	144,6	132,1	132,5	91,6	59,0	49,6

Fuente: Elaboración propia

6.1.5. Distribución mensual de la precipitación

También se analizó la distribución mensual de la precipitación respecto a la altitud, desarrollando las doce (12) ecuaciones regionales mensuales de la subcuenca Yuracyacu (Ver Tabla N° 34).

Esto se realizó relacionando la precipitación promedio multianual para todos los meses del año de las tres estaciones utilizadas en la investigación (Ver Anexo 2), con la finalidad

de establecer los modelos regionales mes a mes, para determinar la precipitación en cualquier punto de la subcuenca, si se conoce su valor de altitud.

Tabla N° 34 Ecuaciones Regionales Mensuales de precipitación

Mes	Ecuación regional	Coefficiente de Correlación (R)
Enero	$P = 4237 x H^{-0,515}$	0,9
Febrero	$P = 1031,2 x H^{-0,262}$	0,9
Marzo	$P = 647,9 x H^{-0,193}$	0,9
Abril	$P = 18762 x H^{-0,697}$	0,9
Mayo	$P = 51775 x H^{-0,888}$	0,9
Junio	$P = 1951,8 x H^{-0,508}$	0,7
Julio	$P = 96065 x H^{-1,109}$	0,9
Agosto	$P = 79964 x H^{-1,048}$	0,9
Septiembre	$P = 2477,4 x H^{-0,489}$	0,9
Octubre	$P = 1605,3 x H^{-0,337}$	0,9
Noviembre	$P = 11901 x H^{-0,641}$	0,9
Diciembre	$P = 3655,6 x H^{-0,456}$	0,9

P: precipitación (mm).

H: Altitud (msnm).

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Temperatura

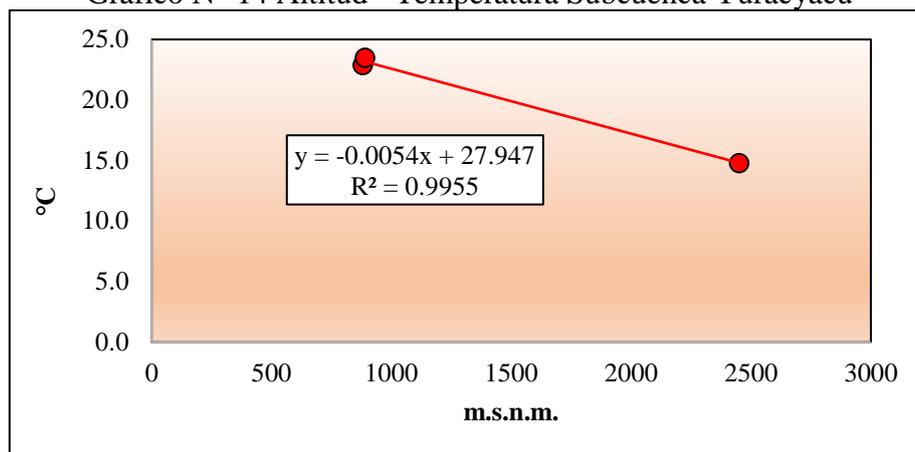
Se analizó la distribución espacial de la temperatura media multianual en la Subcuenca Yuracyacu. Las estaciones de apoyo (Ver Tabla N° 33) también presentan registros de temperatura media mensual.

El registro de información de algunas estaciones es variable, aunque teniendo en cuenta el coeficiente de variación de esta variable, el cual fluctúa entre el 1% y 4% (Ver Anexo), y los fines del presente estudio, se consideran suficientes.

6.2.1. Relación Altitud – Temperatura

El Gráfico N° 13 muestra la relación de la altitud respecto de la temperatura media multianual. Se utilizaron tres (3) estaciones (Ver Tabla N° 35) observándose que la temperatura disminuye conforme aumenta la altitud.

Gráfico N° 14 Altitud - Temperatura Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 35 Estaciones con registro de temperatura media multianual

Estación	Altitud	°C	°C gen (lineal)	Error
Chachapoyas	2450	14,8	15,1	2%
Rioja	880	22,9	23,2	2%
Naranjillo	890	23,5	23,2	-1%

Fuente: Elaboración propia.

La regresión lineal produjo un coeficiente de correlación (R) igual a 0,9 el cual se considera altamente significativo. La ecuación regional definida para la Subcuenca Yuracyacu es:

$$T = 27,947 - 0,0054 x (H)$$

Ecuación N° 52 Modelo regional de temperatura

Donde:

T : Temperatura media (°C).

H : Altitud (m.s.n.m.).

6.2.2. Temperatura en Subcuenca Yuracyacu

La temperatura media en la subcuenca se ha definido mediante el trazo de las isotermas, esto se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento de la temperatura mediante el ploteo de setecientos (700) puntos en la Subcuenca, a los cuales se les calculó su temperatura media, mediante la ecuación regional. Ver Mapa N°17.

Finalmente, con el apoyo de los G.I.S., se dibujaron las isotermas con la finalidad de determinar la temperatura media de la Subcuenca Yuracyacu. Ver Cuadro N°29.

Cuadro N° 29 Isotermas de la Subcuenca Yuracyacu

ID	Isoterma (°C)		Temperatura media (i) (°C)	Área parcial (A _i)		A _i *i
1	23,5	22	22,8	A ₁	65,9	1499,2
2	22	20	21	A ₂	27,1	569,1
3	20	18	19	A ₃	48,9	929,1
4	18	16	17	A ₄	34,2	581,4
5	16	14	15	A ₅	21,5	322,5
6	14	12	13	A ₆	13,3	172,9
7	12	10	11	A ₇	9,9	108,9
Área total (km²)				220,8		4183,1

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la temperatura media para la Subcuenca Yuracyacu, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$T_m = \frac{A_i \times i}{A_t}$$

Ecuación N° 53 Temperatura media

Donde:

T_m : Temperatura media de la Subcuenca Yuracyacu (°C).A_i : Área parcial entre isoterma (km²)A_t : Área total (km²)

Entonces, tenemos lo siguiente:

$$T_m = \frac{4183,1}{220,8} = 18,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Determinándose una temperatura media igual a 18,9 °C.

Así mismo, por rango de altitud, se determinó la temperatura media, mediante el modelo regional de temperatura, obteniendo los resultados que se observan el cuadro N°28.

Cuadro N° 30 Isotermas por rangos de altitud de la Subcuenca Yuracyacu

ID	Rango de Altitudes (m.s.n.m.)		Área Parcial (km ²)	H _{prom}	Temp. Media generada (°C)	°C * km ²
1	810	850	39,5	830	23,5	928,5
2	850	1000	23,1	925	23,0	531,6
3	1000	1200	9,9	1100	22,1	218,8
4	1200	1400	16,1	1300	21,1	339,1
5	1400	1600	19,1	1500	20,0	382,4
6	1600	1800	22,9	1700	19,0	434,7
7	1800	2000	25,2	1900	17,9	452,1
8	2000	2200	17,7	2100	16,9	299,2
9	2200	2400	15,5	2300	15,9	245,9
10	2400	2600	9,9	2500	14,8	146,7
11	2600	2800	8,5	2700	13,8	117,1
12	2800	3000	6,8	2900	12,7	86,6
13	3000	3200	3,2	3100	11,7	37,4
14	3200	3400	3,4	3300	10,7	36,0
			220,8			4256,3

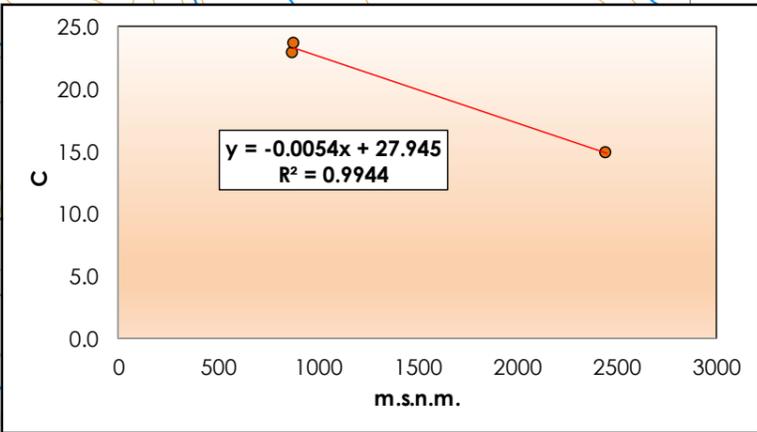
Fuente: Elaboración propia.

ECUACIÓN REGIONAL DE LA TEMPERATURA

Tipo de Regresión	Ecuación regional	Coefficiente de Correlación (R)
Lineal	$T=0,0054 \times (H) + 27,945$	0,9

T: temperatura (°C)
H: altitud (m.s.n.m.)

RELACIÓN ALTITUD - TEMPERATURA MEDIA



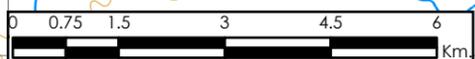
TEMPERATURA MEDIA POR RANGO DE ISOTERMA

Nº	Isoterma (°C)	Temperatura media (°C)	Área parcial (A _i)	A _i *°C	
1	23.5	22	22.8	66.3	1508.1
2	22	20	21	26.8	562.8
3	20	18	19	49.2	934.04
4	18	16	17	34.0	578.68
5	16	14	15	21.3	320.1
6	14	12	13	13.6	176.28
7	12	10	11	9.6	105.6
9	Área total (km²)		220.8	4185.6	

SIGNOS CONVENCIONALES

- Curvas de nivel
- Isotermas
- Subcuenca Yuracyacu
- Rios

Proyección- UTM WGS84 Zona 18S



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACION HIDRICA

ISOTERMAS MEDIA MULTIANUAL DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora ESCALA: 1 : 100 000

FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN AÑO: 2018 MAPA: **17**

Siguiendo el mismo criterio con el que se determinó la temperatura media mediante las isotermas, se calcula una temperatura media igual a 19,3 °C para la Subcuenca Yuracyacu. Se optará como valor representativo de la subcuenca, al promedio de ambos, siendo su valor de 19,2°C. Ver Cuadro N°31.

Cuadro N° 31 Temperatura media representativa

Isotermas	Curvas de nivel	Promedio
19	19,3	19,2

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Generación del registro de temperatura

Según la tabla N° 33, las estaciones de Chachapoyas y Naranjillo poseen una altitud de 2450 msnm y 890 msnm respectivamente, al realizar el promedio entre estas, el valor obtenido es de 1670 msnm. Así mismo, según el cuadro N° 4, la altitud media de la subcuenca es de 1643,2 msnm. Ambos valores son similares, por tal, se optará por promediar los registros de precipitación de las estaciones mencionadas, para obtener valores de temperatura media para el área de estudio. Ver Cuadro N° 32.

Cuadro N° 32 Altitudes de las estaciones utilizadas

Estación	Altitud (m.s.n.m.)
Naranjillo	2450
Chachapoyas	890
Promedio	1670

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el Cuadro N° 26, se observan los registros pluviométricos generados para la Subcuenca Yuracyacu, para el periodo 1995 – 2010, el cual servirá para posteriores análisis.

Cuadro N° 33 Temperatura media generada en la Subcuenca Yuracyacu

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
1998	19,4	19,8	19,8	20,0	19,3	18,4	18,7	19,2	19,3	19,9	20,1	19,9	19,5
1999	19,2	18,7	18,9	18,7	18,5	18,9	17,4	18,0	18,9	19,2	19,8	19,6	18,8
2000	19,1	18,4	18,5	18,7	19,4	18,8	17,9	18,6	19,1	19,5	20,0	19,2	18,9
2001	18,4	18,2	18,6	19,1	19,3	18,1	18,6	18,4	18,8	19,9	19,9	20,0	18,9
2002	19,5	18,6	19,1	19,5	19,3	18,6	18,3	18,4	19,3	19,6	19,3	19,6	19,1
2003	19,3	19,5	19,3	19,6	19,1	19,0	18,1	18,7	19,0	20,0	20,1	19,7	19,3
2004	20,0	19,2	19,2	19,8	19,9	18,1	18,4	18,0	18,6	19,8	20,0	20,0	19,3
2005	20,1	19,9	19,8	19,9	19,7	19,4	18,4	18,9	19,3	19,5	20,0	19,5	19,5
2006	19,2	19,2	19,0	19,4	19,0	19,1	18,3	19,1	19,4	20,2	19,9	19,8	19,3
2007	19,1	19,3	18,9	19,3	19,5	19,1	18,4	18,9	18,5	19,3	19,4	19,6	19,1
2008	18,9	18,6	18,8	19,3	19,1	18,8	18,7	19,2	18,9	19,4	20,0	19,9	19,1
2009	18,8	18,7	19,0	18,9	19,3	18,7	18,8	19,1	19,2	19,9	20,2	19,8	19,2
2010	19,0	19,5	19,6	19,7	19,6	19,2	18,7	19,0	19,3	19,8	19,9	19,7	19,4
Promedio	19,2	19,0	19,1	19,4	19,3	18,8	18,4	18,7	19,0	19,7	19,9	19,7	19,2

Fuente: Elaboración propia.

6.2.4. Distribución Mensual de la temperatura

Se realizó mediante el desarrollo de las doce (12) ecuaciones regionales mensuales para la temperatura media en la Subcuenca Yuracyacu (Ver Tabla N°36).

Para esto, se tuvo en cuenta los promedios mensuales multianuales del periodo 1995 – 2005 para las tres estaciones y se relacionó el valor de la temperatura con la altitud para cada mes del año, para las estaciones de la tabla N° 33 (Ver Anexo 4).

Tabla N° 36 Ecuaciones Regionales Mensuales de temperatura

Mes	Ecuación regional	Coefficiente de Correlación (R)
Enero	$T = 27,554 - 0,005 x (H)$	0,9
Febrero	$T = 27,378 - 0,0051 x (H)$	0,9
Marzo	$T = 28,194 - 0,0054 x (H)$	0,9
Abril	$T = 28,047 - 0,0053 x (H)$	0,9
Mayo	$T = 28,096 - 0,0053 x (H)$	0,9
Junio	$T = 27,564 - 0,0053 x (H)$	0,9
Julio	$T = 27,323 - 0,0054 x (H)$	0,9
Agosto	$T = 27,632 - 0,0054 x (H)$	0,9
Septiembre	$T = 27,88 - 0,0053 x (H)$	0,9
Octubre	$T = 28,329 - 0,0053 x (H)$	0,9
Noviembre	$T = 28,341 - 0,0051 x (H)$	0,9
Diciembre	$T = 28,069 - 0,0051 x (H)$	0,9

T: temperatura media (°C)

H: altitud (msnm)

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Evaporación

Cuantificar la evaporación es importante en los estudios hidrológicos, sin embargo, es difícil obtener valores que representen realmente las condiciones naturales del área en estudio.

Experimentalmente, se puede medir con un tanque de evaporación, pero también existen fórmulas de evapotranspiración potencial, para cuyo fin se necesitan datos de precipitación y temperatura, utilizando las ecuaciones presentes en el ítem 2.2.2.1.

(Gómez Lora, 1987, pág. 65) indica que el objeto de explicar las fórmulas de evapotranspiración es de estricta aplicación en estudios de balance hidrológico.

Es así como, se determinó la evapotranspiración anual de la Subcuenca Yuracyacu mediante los métodos de Turc, Coutange y Thornthwaite.

6.3.1. Evapotranspiración por el método Turc

Se utilizaron los datos de precipitación total anual y la temperatura media anual generada para la Subcuenca Yuracyacu.

Cuadro N° 34 Precipitación y temperatura (1998 - 2010)

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pt	1028,0	1216,1	1281,0	1088,6	1290,0	1337,4	1107,3	1139,6	1136,0	1410,2	1566,1	1132,9	1138,3
Tm	19,5	18,8	18,9	18,9	19,1	19,3	19,3	19,5	19,3	19,1	19,1	19,2	19,4

Pt : precipitación total anual (mm)

Tm : temperatura media (°C)

Fuente: Elaboración propia

Primero se procede a calcular el parámetro heliotérmico “F” (Ver Cuadro N° 35), para cada año mediante la ecuación, reemplazando en T el valor de la temperatura media:

Ejemplo para el año 2010:

$$F = 300 + 25 \times (19,4) + 0,05 \times (19,4)^3 = 1151,6$$

Cuadro N° 35 Valores del Parámetro Heliotérmico

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
F	1155,3	1104,0	1112,2	1112,2	1124,1	1140,3	1138,6	1162,1	1141,3	1126,3	1128,9	1133,8	1151,6

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para calcular la evapotranspiración por Turc (Ver Cuadro N° 36), se utilizará la ecuación, determinando así la evapotranspiración para cada año.

Ejemplo para el año 2010:

$$ET = \frac{1138,3}{\left[0,9 + \left(\frac{1138,3}{1151,6}\right)^2\right]^{1/2}} = 830,9 \text{ mm}$$

Cuadro N° 36 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Turc

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
ET	790,4	836,5	858,5	798,6	866,4	886,6	815,0	835,2	826,1	897,7	931,9	822,2	830,9

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Evapotranspiración por Coutagne

El cálculo de la evapotranspiración por Coutagne para la Subcuenca Yuracyacu, es como se muestra a continuación:

Primero se calcula el parámetro λ (Ver Cuadro N° 37). A continuación, se muestra el cálculo para el año 2010:

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 \times (19,4)} = 0,2844$$

Este método, admite a la precipitación (P) en unidades de metros (Ver Cuadro N° 37), siendo necesario que su valor se encuentre en el siguiente rango $0,44 \leq P \leq 1,76$.

Cuadro N° 37 Parámetros de Coutagne

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
λ	0,284	0,291	0,290	0,290	0,288	0,286	0,286	0,283	0,286	0,288	0,287	0,287	0,284
P (m)	1,03	1,22	1,28	1,09	1,29	1,34	1,11	1,14	1,14	1,41	1,57	1,13	1,14

Fuente: Elaboración propia

Luego, la evapotranspiración para cada año (Ver Cuadro N° 38) se calcula tal como se muestra a continuación en el ejemplo para el año 2010:

$$E = (1,14) - (0,284)x(1,14)^2 = 0,7701 \text{ m}$$

$$E = 770,1 \text{ mm}$$

Cuadro N° 38 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Coutagne

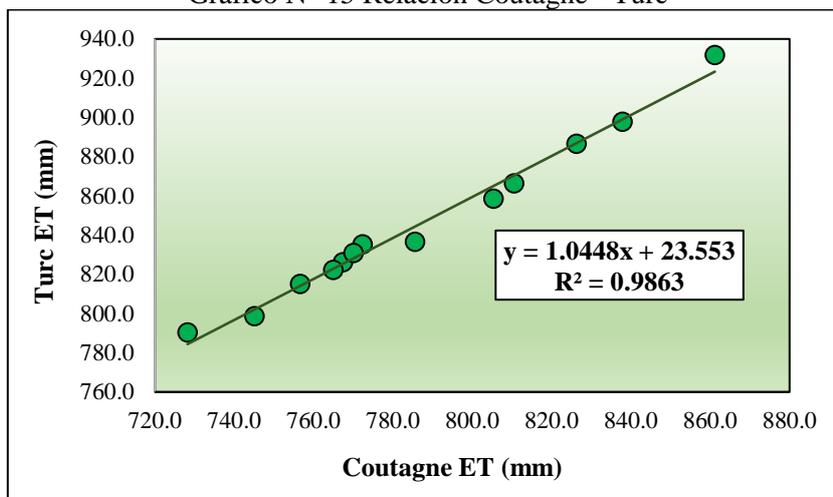
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
E (m)	0,7282	0,7856	0,8053	0,7451	0,8106	0,8262	0,7566	0,7724	0,7674	0,8379	0,8612	0,7649	0,7701
E (mm)	728,2	785,6	805,3	745,1	810,6	826,2	756,6	772,4	767,4	837,9	861,2	764,9	770,1

Fuente: Elaboración propia

Del Cuadro N° 38 se observa que Coutagne nos arroja valores de evapotranspiración en metros (m), pero para efectos de esta investigación, se han convertido a milímetros (mm), multiplicando el resultado inicial por el factor de conversión 1000.

La evapotranspiración calculada por ambos métodos se ajusta a una regresión lineal, con un coeficiente de correlación (R) igual a 0,9 (Ver Gráfico N° 14), demostrando la similitud entre ambos resultados, en ese sentido, se podría determinar el valor de evapotranspiración calculado por Turc, conociendo la evapotranspiración por Coutagne.

Gráfico N° 15 Relación Coutagne - Turc



Fuente: Elaboración propia.

6.3.3. Evapotranspiración por Thornthwaite

Primero se determina el índice térmico mensual para todos los años, teniendo como base al valor de temperatura media mensual generada para la Subcuenca Yuracyacu (Ver Cuadro N° 33). A continuación, se muestra un ejemplo para determinar el índice térmico mensual del mes de enero del año 2010.

Temperatura del mes de enero: 19,0 °C, luego el índice térmico (i), se determina por:

$$i(t) = \left(\frac{19,0}{5}\right)^{1,514} = 7,57$$

Se sigue el mismo procedimiento para todos los meses del periodo (1998 – 2010). Luego se realiza la sumatoria de los índices mensuales (Ver Cuadro N° 39), para calcular el índice anual, que será de utilidad para el cálculo del parámetro “a” y “c”.

Cuadro N° 39 Índice Térmico Mensual - Método Thornthwaite

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1998	7,8	8,0	8,0	8,1	7,7	7,2	7,3	7,7	7,7	8,1	8,2	8,1	94,0
1999	7,7	7,4	7,5	7,3	7,3	7,5	6,6	7,0	7,5	7,6	8,1	7,9	89,3
2000	7,6	7,2	7,3	7,3	7,8	7,4	6,9	7,3	7,6	7,8	8,2	7,7	90,1
2001	7,2	7,0	7,3	7,6	7,7	7,0	7,3	7,2	7,4	8,1	8,1	8,2	90,1
2002	7,8	7,3	7,6	7,8	7,7	7,3	7,1	7,2	7,7	7,9	7,7	7,9	91,2
2003	7,7	7,9	7,7	7,9	7,6	7,6	7,0	7,3	7,6	8,2	8,2	8,0	92,6
2004	8,2	7,6	7,7	8,0	8,1	7,0	7,2	6,9	7,3	8,1	8,2	8,2	92,5
2005	8,2	8,1	8,0	8,1	8,0	7,8	7,2	7,5	7,7	7,9	8,2	7,8	94,6
2006	7,7	7,6	7,5	7,8	7,5	7,6	7,2	7,6	7,8	8,3	8,1	8,0	92,7
2007	7,6	7,7	7,5	7,8	7,8	7,6	7,2	7,5	7,2	7,7	7,8	7,9	91,3
2008	7,5	7,3	7,4	7,7	7,6	7,4	7,3	7,7	7,5	7,8	8,1	8,1	91,6
2009	7,4	7,4	7,6	7,5	7,8	7,4	7,4	7,6	7,7	8,1	8,3	8,0	92,0
2010	7,6	7,8	7,9	8,0	7,9	7,6	7,4	7,5	7,7	8,0	8,1	8,0	93,6

Fuente: Elaboración propia.

Se calcula el parámetro “a” según la ecuación, utilizando el índice térmico anual para cada año. A continuación, se presenta un ejemplo para el cálculo del parámetro “a” del año 2010.

Índice térmico anual (2010): 93,6. Luego se determina el parámetro “a”, según:

$$a = 675 \times 10^{-9} \times (93,6)^3 - 771 \times 10^{-7} \times (93,6)^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times (93,6) + 0,492 = 2,05$$

De esa forma se calcula, para todos los años (Ver Cuadro N° 40).

Cuadro N° 40 Parámetro "a" - Método Thornthwaite

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
a	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fuente: Elaboración propia

El parámetro c (Ver Cuadro N° 41), se calcula según la ecuación, utilizando el índice térmico anual para cada año. Para el año 2010, se tiene lo siguiente:

$$16 \times \left[\frac{10}{93,6} \right]^2 = 0,16$$

Cuadro N° 41 Parámetro "c" - Método Thornwaite

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
C	0,16	0,22	0,21	0,21	0,20	0,18	0,18	0,15	0,18	0,19	0,19	0,18	0,16

Fuente: Elaboración propia

Con los parámetros “a” y “c” calculados se procede a determinar la evapotranspiración de cada mes y la evapotranspiración anual (Ver Cuadro N° 42) tal como se muestra a continuación:

Cálculo de la evapotranspiración mes enero, año 2010:

$$ET_m = 0,16 \times (19,0)^{2,0} = 68,4 \text{ mm}$$

Siendo la evapotranspiración del mes de enero igual a 68,4 mm. Se aplica el mismo cálculo para los demás meses de todos los años del periodo de análisis (Ver Cuadro N° 42).

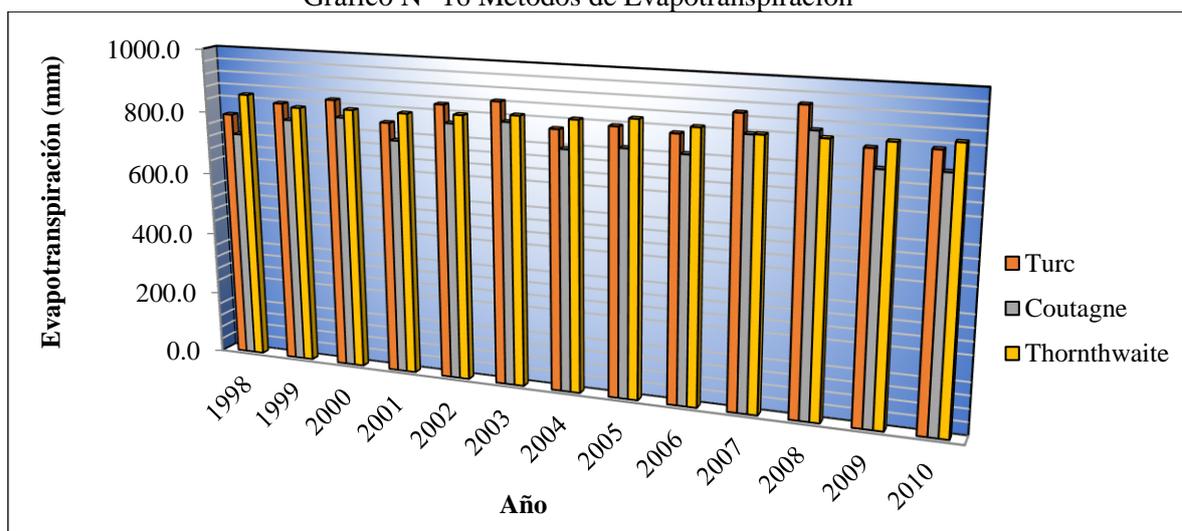
Cuadro N° 42 Evapotranspiración Subcuenca Yuracyacu - Método Thornthwaite

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1998	70,9	73,7	74,1	75,1	70,0	63,4	65,4	69,2	70,0	74,6	76,0	74,6	857,0
1999	71,4	67,9	69,6	67,6	66,7	69,3	59,3	63,3	69,3	71,2	76,3	74,6	826,3
2000	70,2	65,6	66,3	67,2	72,8	68,0	61,9	66,9	70,2	73,1	77,2	71,5	831,0
2001	65,3	63,7	67,1	70,2	71,7	63,6	66,5	65,5	68,1	76,1	76,3	77,1	831,3
2002	72,5	66,7	69,7	72,8	71,1	66,5	64,2	64,9	71,2	73,3	71,2	73,9	838,0
2003	70,6	72,2	70,8	72,9	69,1	68,6	62,5	66,0	68,8	76,0	76,7	73,7	847,9
2004	76,5	69,8	70,4	74,8	75,0	62,2	64,2	61,4	65,7	74,9	76,2	76,3	847,4
2005	76,2	74,4	73,8	74,5	72,8	70,8	63,4	66,9	70,0	71,7	75,6	71,2	861,2
2006	70,0	69,6	68,5	71,6	68,3	69,4	63,8	69,1	71,3	77,2	75,1	74,4	848,3
2007	69,9	71,0	68,7	71,6	72,4	69,8	64,9	68,3	65,3	71,4	72,1	73,6	839,1
2008	68,1	66,4	67,8	71,2	69,8	67,4	66,6	70,6	68,6	72,1	76,4	75,8	840,8
2009	67,3	66,6	69,0	68,1	71,3	66,7	67,3	69,6	70,1	75,7	77,5	74,6	843,8
2010	68,4	71,6	72,9	73,1	72,2	69,3	66,1	67,9	70,2	74,2	75,0	73,5	854,5

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar los cálculos respectivos para cada método empleado (Ver Gráfico N° 15), se aceptó como valor representativo de evapotranspiración (E) de la Subcuenca Yuracyacu, al promedio de los tres métodos utilizados (Ver Cuadro N° 42).

Gráfico N° 16 Métodos de Evapotranspiración



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 43 Evapotranspiración anual representativa

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
E (Turc)	790,4	836,5	858,5	798,6	866,4	886,6	815,0	835,2	826,1	897,7	931,9	822,2	830,9
E (Coutagne)	728,2	785,6	805,3	745,1	810,6	826,2	756,6	772,4	767,4	837,9	861,2	764,9	770,1
E (Thornthwaite)	857,0	826,3	831,0	831,3	838,0	847,9	847,4	861,2	848,3	839,1	840,8	843,8	854,5
Promedio	791,9	816,1	831,6	791,7	838,3	853,6	806,3	822,9	813,9	858,2	877,9	810,3	818,5

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4. Evapotranspiración media de la subcuenca

Para el cálculo de la evapotranspiración media de la subcuenca, se consideró los datos de temperatura media y precipitación media de las estaciones de la Tabla N° 37. Cabe resaltar que los datos representan la media multianual del periodo (1995 – 2005).

Tabla N° 37 Datos considerados de las estaciones

Estación	Altitud	°C	PP
Naranjillo	890	23,5	1498,6
Rioja	880	22,9	1498,5
Chachapoyas	2450	14,8	951

Fuente: Elaboración propia.

Se calculó la evapotranspiración (E) por el método Turc (Ver cuadro N° 43) el cual considera el cálculo del parámetro heliotérmico (F).

Cuadro N° 44 Evapotranspiración de las estaciones - Método Turc

Estación	Altitud	F	E
Naranjillo	890	1536,4	1101,4
Rioja	880	1472,9	1077,3
Chachapoyas	2450	832,1	640,3

Fuente: Elaboración propia.

El método Coutagne considera el cálculo previo del parámetro λ , la evapotranspiración se expresa finalmente en milímetros (Ver Cuadro N° 44).

Cuadro N° 45 Evapotranspiración de las estaciones - Método Coutagne

Estación	Altitud	λ	E(m)	E(mm)
Naranjillo	890	0,2	0,9	949,5
Rioja	880	0,2	0,9	938,0
Chachapoyas	2450	0,3	0,6	636,1

Fuente: Elaboración propia.

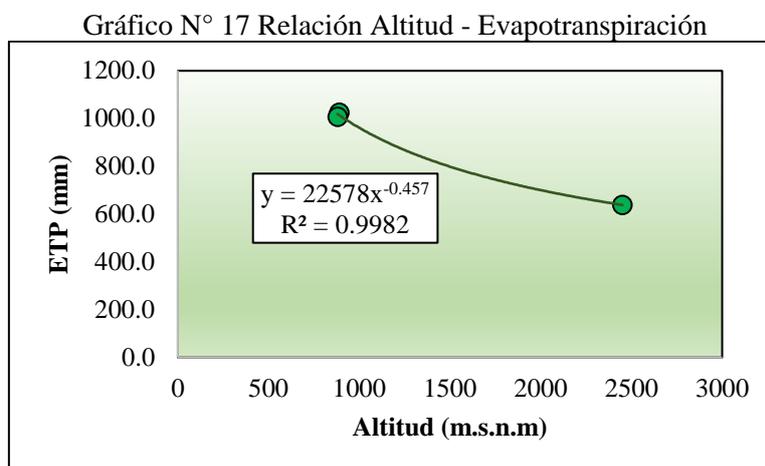
Aceptando como valor representativo el promedio de ambos métodos, se generó una ecuación regional de evapotranspiración, con la finalidad de conocer el valor de evapotranspiración en cualquier punto de la Subcuenca Yuracyacu.

Cuadro N° 46 Evapotranspiración representativa de las estaciones

Estación	Altitud	E prom	E gen	Error
Naranjillo	890	1025,4	1013,5	-1%
Rioja	880	1007,6	1018,7	1%
Chachapoyas	2450	638,2	638,0	0%

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el Gráfico N° 16 la evapotranspiración disminuye conforme la altitud, dicha ecuación regional, es de tipo potencial, y presenta un coeficiente de correlación (R) igual a 0,9. Además dicha ecuación de considera representativa, ya que los valores de evapotranspiración calculados para las estaciones son conservadores, con errores inferiores al 1% (Ver Cuadro N° 45).



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación regional de evapotranspiración para la Subcuenca Yuracyacu es la siguiente:

$$EVTP = 22578 x (H)^{-0,457}$$

Ecuación N° 54 Modelo regional de Evapotranspiración

Donde:

EVTP : Evapotranspiración (mm).

H : Altitud (m.s.n.m.).

Dicha ecuación es de utilidad para determinar la evapotranspiración en cualquier punto de la subcuenca. Se dibujaron las isolíneas de evapotranspiración (Ver Mapa N°18), y se calculó la evapotranspiración media por el método de las áreas parciales.

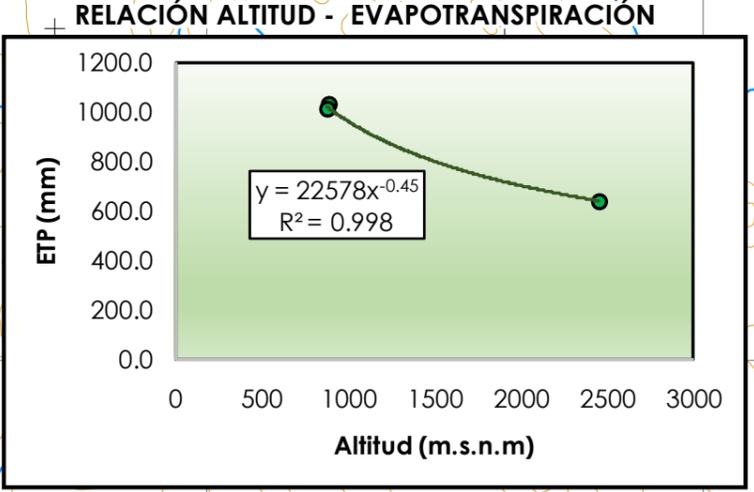
Cuadro N° 47 Evapotranspiración por áreas parciales

ID	Isolínea de Evapotranspiración		Evtp media (mm)	Área parcial (A _i) (Km ²)	A _i x mm
1	1050	1000	1025,0	52,9	54234,3
2	1000	950	975	7,9	7747,3
3	950	900	925	8,1	7488,7
4	900	850	875	10,9	9556,0
5	850	800	825	14,5	11951,7
6	800	750	775	25,5	19798,5
7	750	700	725	33,2	24038,8
8	700	650	675	30,2	20358,5
9	650	600	625	20,5	12812,5
10	600	580	590	17,1	10083,8
Área total (km²)				220,8	178069,9

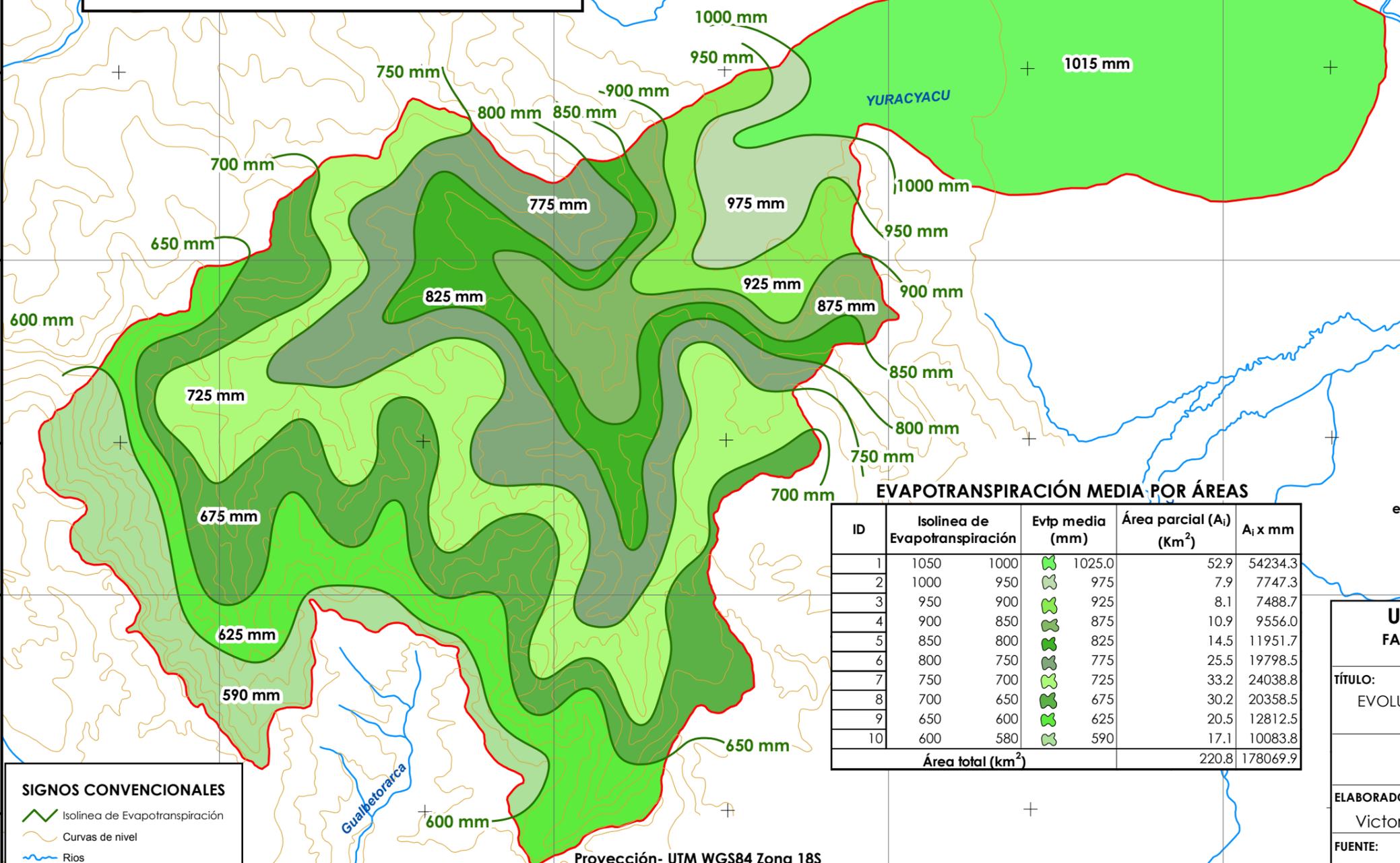
Fuente: Elaboración propia

Tipo de Regresión	Ecuación regional	Coefficiente de Correlación (R)
Potencial	$EVTP = 22578 \times H^{(-0,457)}$	0,9

EVTP: evapotranspiración (mm)
H: altitud (m.s.n.m.)

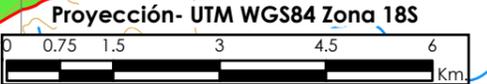


Evp media por áreas	
	590 mm
	625 mm
	675 mm
	725 mm
	775 mm
	825 mm
	875 mm
	925 mm
	975 mm
	1015 mm



ID	Isolinia de Evapotranspiración	Evp media (mm)	Área parcial (A _i) (Km ²)	A _i x mm
1	1050	1000	52.9	54234.3
2	1000	950	7.9	7747.3
3	950	900	8.1	7488.7
4	900	850	10.9	9556.0
5	850	800	14.5	11951.7
6	800	750	25.5	19798.5
7	750	700	33.2	24038.8
8	700	650	30.2	20358.5
9	650	600	20.5	12812.5
10	600	580	17.1	10083.8
Área total (km ²)			220.8	178069.9

SIGNOS CONVENCIONALES	
	Isolinia de Evapotranspiración
	Curvas de nivel
	Ríos
	Subcuenca Yuracyacu



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACION HIDRICA

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN	AÑO: 2018	MAPA: 18

La evapotranspiración media de la Subcuenca Yuracyacu se determinó con el siguiente cálculo, determinándose una evapotranspiración media igual a 806,4 mm.

$$EVTP \text{ media} = \frac{178069,9 \text{ mm} \times \text{km}^2}{220,8 \text{ km}^2} = 806,4 \text{ mm}$$

6.4. Hidrología

6.4.1. Escorrentía

El cálculo de la escorrentía se simplifica, según la ecuación N° 2, por tal, la escorrentía calculada para el periodo de análisis se resume en el siguiente cuadro. Despreciando las variaciones por almacenamiento (V), donde PP es precipitación, EVTP es evapotranspiración y E es escorrentía.

Cuadro N° 48 Balance hídrico Subcuenca Yuracyacu

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
PP(mm)	1028,0	1216,1	1281,0	1088,6	1290,0	1337,4	1107,3	1139,6	1136,0	1410,2	1566,1	1132,9	1138,3
EVTP(mm)	791,9	807,5	824,4	784,5	833,1	851,1	803,7	824,0	811,7	853,4	873,6	806,8	817,9
V (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E (mm)	236,2	408,6	456,6	304,1	456,9	486,3	303,6	315,5	324,3	556,8	692,5	326,1	320,4

Fuente: Elaboración propia.

De forma análoga, y con la finalidad de tener un valor aproximado de escorrentía en la Subcuenca Yuracyacu, se determinaron las escorrentías para cada punto de la estación (Ver Cuadro N° 48).

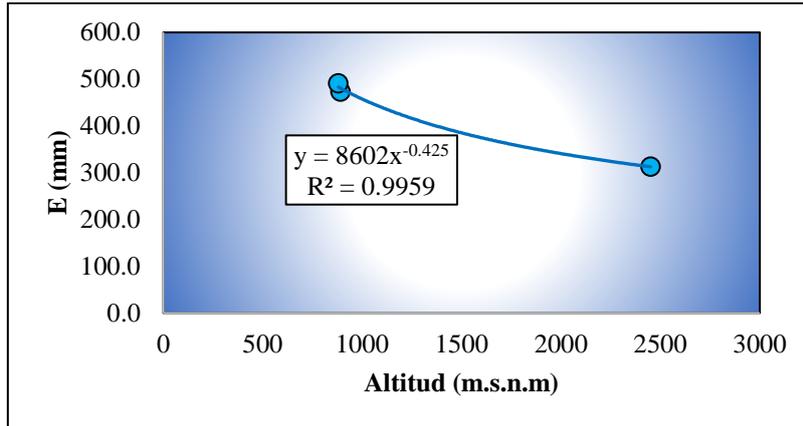
Cuadro N° 49 Escorrentía generada por estación

Altitud	PP	EVTP	E
890	1498,6	1025,4	473,2
880	1498,5	1007,6	490,9
2450	951	638,2	312,8

Fuente: Elaboración propia.

Se estableció una ecuación regional de escorrentía, la cual es de tipo potencial, con un coeficiente de correlación igual a 0,9. Dicha ecuación sirve para determinar en cualquier punto de la subcuenca escorrentía, y determinar la escorrentía media de la Subcuenca Yuracyacu mediante el trazo de isóneas de escorrentía con el apoyo de los Sistemas de Información geográfica mediante el uso de la herramienta spline. Finalmente se calcula la escorrentía media, por el método de áreas parciales (Ver Cuadro N° 49 y Mapa 19).

Gráfico N° 18 Relación Altitud - Escorrentía



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación regional de escorrentía es la siguiente:

$$E = 8602 x (H)^{-0,425}$$

Ecuación N° 55 Modelo regional de Escorrentía

Donde:

E : escorrentía (mm)

H : altitud (m.s.n.m.)

Cuadro N° 50 Escorrentía por áreas parciales

ID	Isolínea de Escorrentía	Escorrentía media (mm)	Área parcial (A _i) (Km ²)	A _i x mm
1	500 475	487,5	52,0	25352,4
2	475 450	462,5	9,5	4399,8
3	450 425	437,5	9,5	4144,0
4	425 400	412,5	13,1	5388,7
5	400 375	387,5	19,7	7649,3
6	375 350	362,5	36,5	13242,1
7	350 325	337,5	33,0	11150,7
8	325 300	312,5	26,9	8401,9
9	300 285	292,5	20,6	6025,5
220,8				69933,6

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la escorrentía media es igual a 381,7 mm, determinándose de la siguiente forma:

$$E = \frac{69933,6}{220,8} = 381,7 \text{ mm}$$

6.4.2. Caudal

La escorrentía anual fue transformada en caudal, ya que se conoce el área de la cuenca y teniendo en cuenta el tiempo (seg.) que transcurre en el periodo de 1 año.

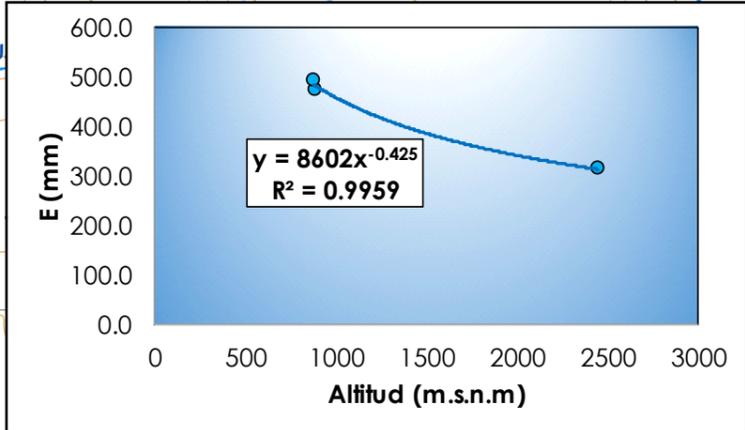
A modo de ejemplo, se presenta el cálculo del caudal para el año 2010:

ECUACIÓN REGIONAL DE LA ESCORRENTÍA

Tipo de Regresión	Ecuación regional	Coefficiente de Correlación (R)
Potencial	$E = 8602 \times (H)^{-0.425}$	0,9

E: escorrentía (mm)
H: altitud (m.s.n.m.)

RELACIÓN ALTITUD - ESCORRENTÍA



ID	Isolinea de Escorrentía	Escorrentía media (mm)	Área parcial (A _i) (Km ²)	A _i x mm
1	500 475	487.5		52.0 25352.4
2	475 450	462.5		9.5 4399.8
3	450 425	437.5		9.5 4144.0
4	425 400	412.5		13.1 5388.7
5	400 375	387.5		19.7 7649.3
6	375 350	362.5		36.5 13242.1
7	350 325	337.5		33.0 11150.7
8	325 300	312.5		26.9 8401.9
9	300 285	292.5		20.6 6025.5
Área total (km²)				220.8 69933.6

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

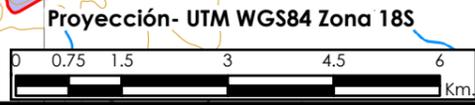
TÍTULO:
 EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA SUBCUENCA YURACYACU Y LA INFLUENCIA EN SU REGULACION HIDRICA

ESCORRENTÍA MEDIA DE LA SUBCUENCA YURACYACU

ELABORADO: Victor Gallo Ramos	ASESOR: Dr. Walter Gómez Lora	ESCALA: 1 : 100 000
FUENTE: Cartas Nacionales 12i - 13i a escala 1 : 100 000 - IGN		AÑO: 2018
		MAPA: 19

SIGNOS CONVENCIONALES

- Isolinea de escorrentía
- Curvas de nivel
- Subcuenca Yuracyacu
- Rios



Considerando un área igual a 220,8 km² y que el año posee 365 días.

$$Q = \frac{320,4 \text{ mm} \times 220,8 \text{ km}^2 \times \frac{10^6 \text{ m}^2}{1 \text{ km}^2} \times \frac{10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ mm}}}{331536000 \text{ s}} = 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se presenta el cálculo de los caudales para los años de análisis (Ver Cuadro N° 50).

Cuadro N° 51 Caudal medio Subcuenca Yuracyacu

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Escorrentía (mm)	236,2	408,6	456,6	304,1	456,9	486,3	303,6	315,5	324,3	556,8	692,5	326,1	320,4
Caudal (m³/s)	1,7	2,9	3,2	2,1	3,2	3,4	2,1	2,2	2,3	3,9	4,8	2,3	2,2

Fuente: Elaboración propia

6.4.3. Rendimiento Hídrico

El rendimiento hídrico de la subcuenca se determinó transformando el caudal a litros/segundo para luego dividir dicho valor entre el área de la cuenca en km². Tal como se observa a continuación.

$$RH = \frac{2200 \text{ l/s}}{220 \text{ km}^2} = 10,2 \frac{\text{l}}{\text{seg}/\text{km}^2}$$

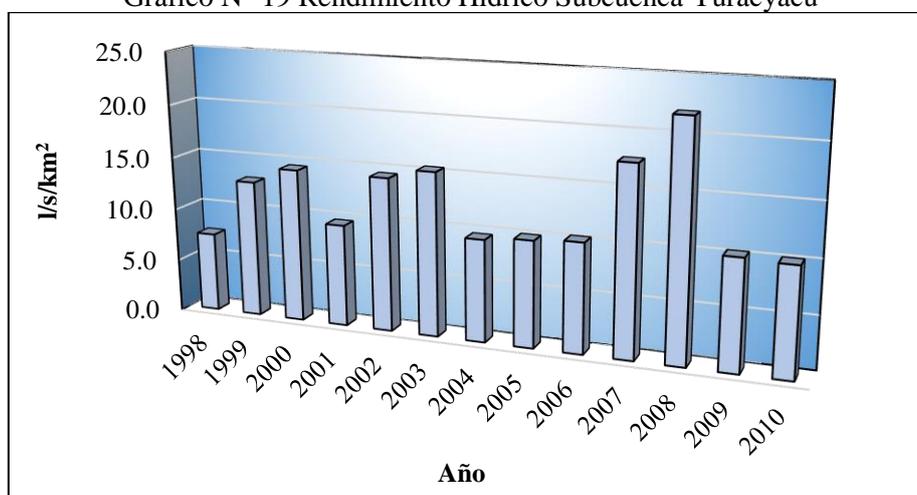
Cuadro N° 52 Rendimiento Hídrico Subcuenca Yuracyacu

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Caudal (m³/s)	1,7	2,9	3,2	2,1	3,2	3,4	2,1	2,2	2,3	3,9	4,8	2,3	2,2
Rendimiento hídrico (l/seg/km²)	7,5	13,0	14,5	9,6	14,5	15,4	9,6	10,0	10,3	17,7	22,0	10,3	10,2

Fuente: Elaboración propia.

Del Gráfico N° 19 y del Cuadro N° 52, se observa que el mayor rendimiento hídrico es de 22 l/seg/km² y el mínimo fue de 7,5 l/s/km².

Gráfico N° 19 Rendimiento Hídrico Subcuenca Yuracyacu



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VII

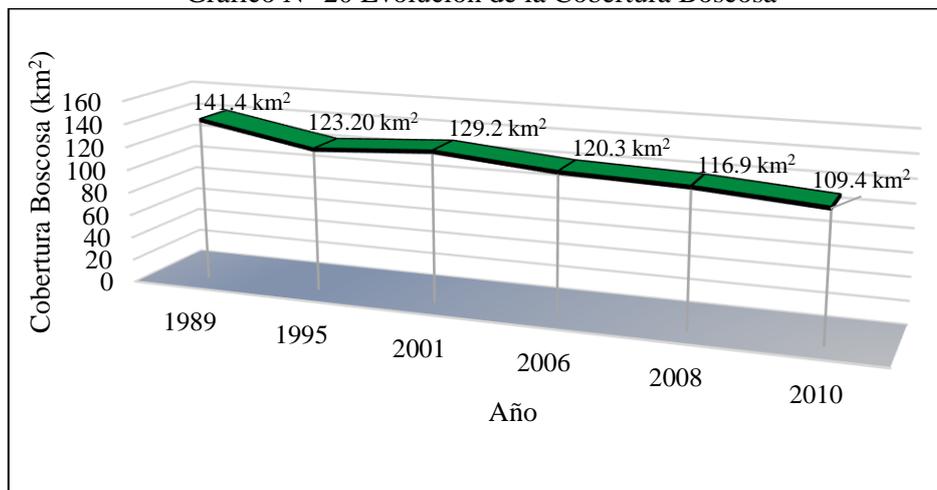
RESULTADOS

7.1. Cobertura Boscosa

El análisis de la cobertura boscosa de la Subcuenca Yuracyacu mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 5 TM indican un marcado retroceso (Ver Gráfico N° 19). En donde se pudieron obtener superficies boscosas en la subcuenca para diferentes años durante un periodo de 22 años (1989 – 2010).

En ese sentido, para el año 1989 se calculó 141,4 km² equivalentes a 14 140 Ha, representando el 64% de la subcuenca; así mismo, para el año 1995, fue de 123,2 km² (12 320 Ha), equivalente al 56% del área total de la subcuenca, en el año 2001 fue 129,2 km² (12 920 Ha), correspondientes al 59% de la subcuenca. En este periodo se evidenció un aumento de 6 km². En el año 2006 se determinó 120,3 km² (12 030 Ha) que es el 54% del área de la subcuenca, y para los años 2008 y 2010 fueron 116,9 km² (11 690 Ha) y 109,4 km² (10 940 Ha), que representó el 53% y 50% del área total de la Subcuenca Yuracyacu.

Gráfico N° 20 Evolución de la Cobertura Boscosa



Fuente: Elaboración propia.

En el periodo 1989 – 1995 se calculó una variación (-18,2 km²) con una tasa de retroceso igual a -3,03 km²/año. Así mismo para el periodo 1995 – 2001 existió un incremento en la superficie de cobertura boscosa de 6 km², en el periodo 2001 – 2006 la variación fue de -8,9 km², calculándose una tasa de retroceso de bosque tropical igual a -1,78 km²/año, para 2006 – 2008 la variación fue de -3,4 km², donde la tasa de retroceso fue de 1,7 km²/año, finalmente para el periodo 2008 – 2010 la variación fue de -7,5 km², siendo la tasa de retroceso de la superficie de bosque igual a -3,75 km²/año.

7.2. Tasa de Deforestación

La tasa de deforestación de la subcuenca Yuracyacu, se determinó en base a las ecuaciones N° 16 y 17, explicadas en la presente investigación. En ese sentido se tienen resultados similares al calcular la tasa de deforestación, por ambas fórmulas.

Para el periodo 1989 – 1995, la tasa de deforestación calculada por la fórmula de la FAO fue de -0,022% anual, y con la fórmula de Puyravaud (2003) fue de -0,023% anual. En el periodo 2001 – 2006, la tasa de deforestación calculada por la fórmula de la FAO fue de -0,0141% anual, y con la fórmula de Puyravaud (2003) fue de -0,0143% anual. Para el periodo 2006 – 2008, la tasa de deforestación calculada por la fórmula de la FAO fue de -0,0142% anual, y con la fórmula de Puyravaud (2003) fue de -0,0143% anual. Finalmente para 2008 – 2010, se determinó una tasa de deforestación igual a -0,032% anual con la fórmula de FAO y -0,033% según la fórmula planteada por Puyravaud.

7.3. Rendimiento Hídrico

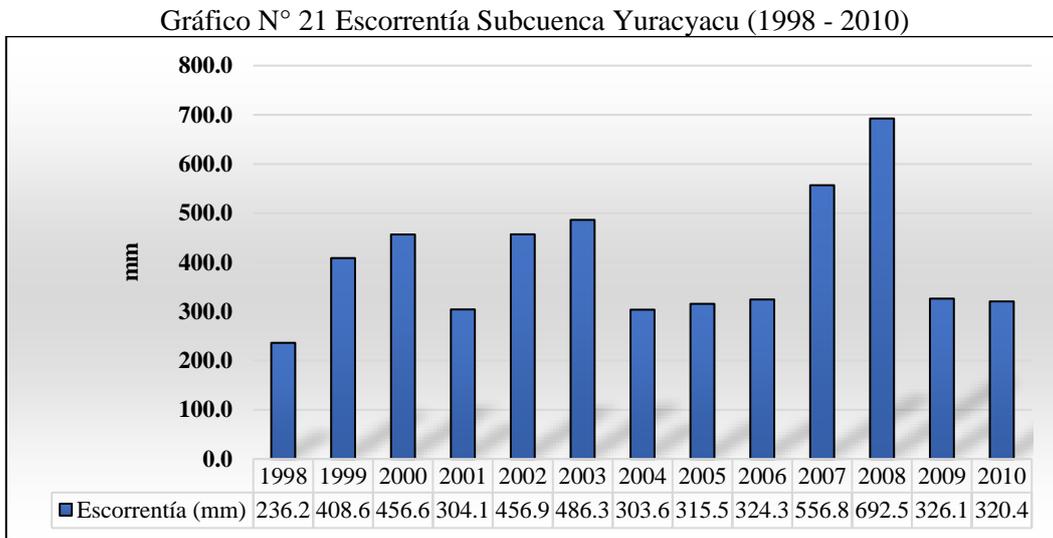
Se realizó el análisis de precipitación – escorrentía, mediante el cálculo del balance hídrico, que determinó la escorrentía la cual fue transformada en caudal con la finalidad de calcular el rendimiento hídrico de la Subcuenca Yuracyacu.

En ese sentido, la precipitación multianual para la subcuenca se estimó mediante el método regional, realizándose así el mapa de isoyetas (Ver Mapa 16), de esta forma obtuvo 1197,3 mm de precipitación media. Así mismo, los datos mes a mes para el periodo de análisis (1995 – 2010) se determinaron mediante el método del factor adimensional utilizando la estación naranjillo (Ver Cuadro N° 28).

La temperatura media de la subcuenca, por el método regional fue de 19,2 °C, dicho resultado se obtuvo de los promedios de los métodos de áreas parciales y rangos de altitud (Ver Cuadro N° 31) así también se realizó el mapa de Isotermas (Ver Mapa 17). Además, las temperaturas mensuales para el periodo de análisis (Ver Cuadro N° 33) se determinaron mediante un análisis entre los datos de las estaciones Naranjillo y Chachapoyas.

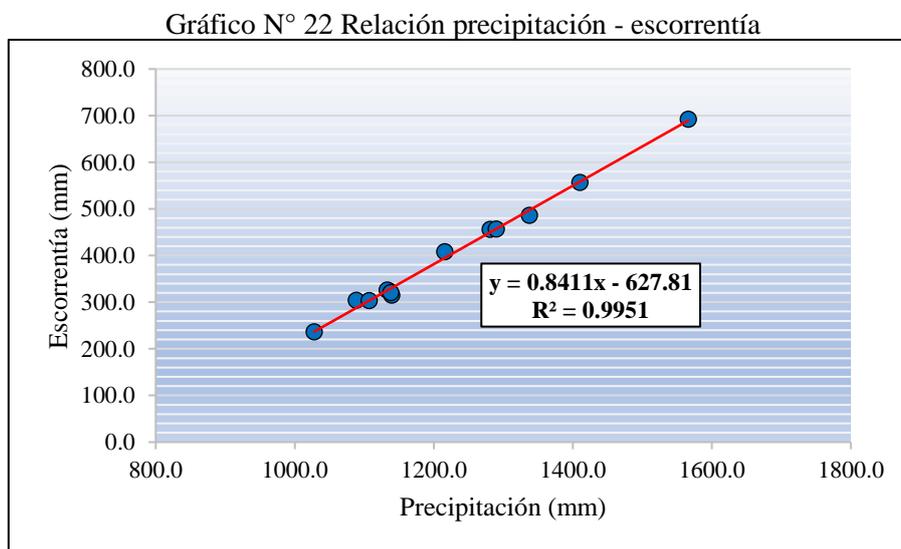
La evapotranspiración mensual de la subcuenca se determinó mediante los métodos de Turc, Coutagne y Thornwaite, considerando el promedio como valor representativo (Ver Cuadro N° 38), luego se realizó el análisis regional (Ver Cuadro N° 45 y Gráfico N° 16) y se realizó el mapa de evapotranspiración (Ver Mapa 18), estimándose 806,4 mm multianuales.

La escorrentía (Ver Gráfico N° 21) se estimó con la fórmula simplificada del balance hídrico, despreciando las variaciones de almacenamiento, para un periodo largo de análisis (1998 – 2010).



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, el Gráfico N° 22 muestra la relación directa entre la precipitación y la escorrentía, ambas variables presentan un tipo de regresión lineal, dicha relación presenta un coeficiente de correlación igual a 0,9 considerado aceptable. Con la ecuación mostrada, se puede determinar escorrentía a partir de la precipitación total anual.



Fuente: Elaboración propia.

La escorrentía expresada en milímetros (mm) se transformó a caudal, y luego se calculó el rendimiento hídrico (Ver Cuadro N° 53). El rendimiento hídrico promedio de la Subcuenca Yuracyacu es de 12,7 l/s/km² siendo el rendimiento máximo de 22 l/s/km² y el rendimiento mínimo igual a 7,5 l/s/km².

El periodo marcado donde se observa la influencia de la cobertura de bosque en el rendimiento hídrico fue definido para 1998 – 2008 (Ver Cuadro N° 53), en la cual se puede observar la relación que existe entre dichas variables.

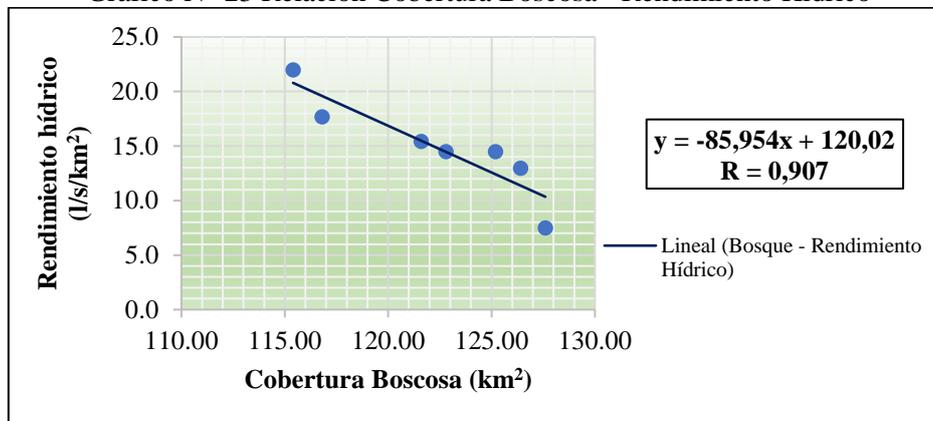
Cuadro N° 53 Cobertura boscosa y Rendimiento Hídrico

Año	Cobertura boscosa (km ²)	Rendimiento Hídrico (l/s/km ²)
1998	127,60	7,5
1999	126,40	13,0
2000	125,20	14,5
2002	122,80	14,5
2003	121,60	15,4
2007	116,80	17,7
2008	115,40	22,0

Fuente: Elaboración propia.

El Gráfico N° 23 muestra la relación existente entre el rendimiento hídrico con la cobertura de boscosa en la subcuenca, tal es así que, el rendimiento puede aumentar mientras la cobertura de bosque disminuye, además se conoce que el caudal también aumenta y así también la escorrentía. Este tipo de relación es lineal, presentando un coeficiente de correlación igual a 0,907.

Gráfico N° 23 Relación Cobertura Boscosa - Rendimiento Hídrico



Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo 2004 – 2008, se observa que el rendimiento máximo se da para el año 2008, siendo este 17,7 l/s/km², estimándose una cobertura boscosa igual a 115,6 km², asimismo, para el año 2004 la cobertura boscosa estimada fue de 120,4 km², siendo el rendimiento medio 9,6 l/s/km², esto evidencia el aumento de agua al disminuir la superficie boscosa en la Subcuenca Yuracyacu. Ver Cuadro N° 54.

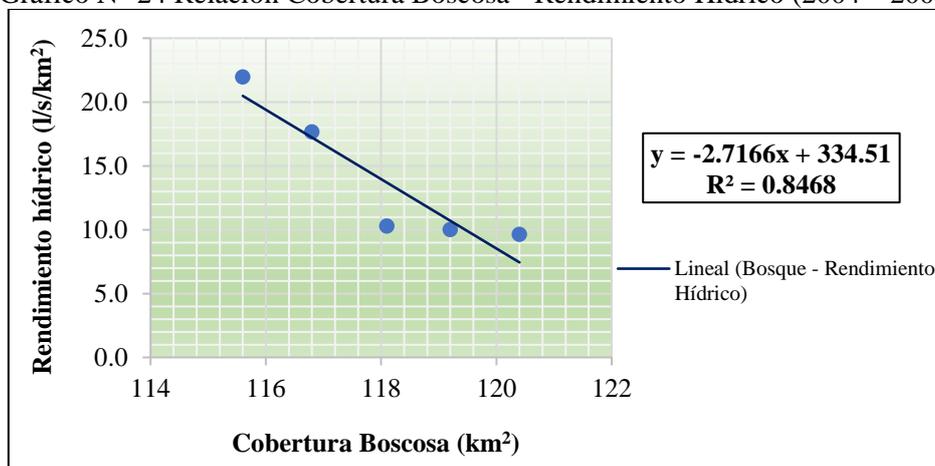
Cuadro N° 54 Cobertura boscosa y Rendimiento Hídrico (2004 – 2008)

Año	Cobertura boscosa (km ²)	Rendimiento Hídrico (l/s/km ²)
2004	120,4	9,6
2005	119,2	10,0
2006	118,1	10,3
2007	116,8	17,7
2008	115,6	22,0

Fuente: Elaboración propia.

La relación mostrada en el Gráfico N° 24, indica que posee un coeficiente de correlación igual a 0,92. Esta relación mostrada es inversa, es decir que el rendimiento hídrico puede aumentar en la Subcuenca Yuracyacu, si disminuye la superficie boscosa.

Gráfico N° 24 Relación Cobertura Boscosa - Rendimiento Hídrico (2004 – 2008)



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VIII

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta investigación tuvo como propósito evaluar la cobertura boscosa mediante técnicas de SIG y Teledetección y su influencia en la regulación hídrica, teniendo como área de estudio a la región hidrográfica del río Yuracyacu, la cual fue diseñada con el método de la divisoria topográfica, utilizando la cartografía del Instituto Geográfico Nacional a escala 1: 100 000 y una imagen satelital Alos Palsar. La evaluación de los cambios ocurridos en la cobertura boscosa en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 1989 - 2010, se determinó en base a imágenes satelitales ópticas Landsat 5 TM.

La evaluación correspondiente nos permitió encontrar 141,6 km² de cobertura boscosa, para el año 1989. En el año 1995 fue de 123,2 km², así mismo en el año 2001 se encontró 129,2 km², en el periodo 2006 y 2008 se calculó que la cobertura de bosque en la subcuenca fue de 120,3 km² y 116,9 km² finalmente en el año 2010 se calculó 109,4 km² de cobertura boscosa. El primer periodo 1989 – 1995 evidencia una variación de 18,2 km² lo que representa una pérdida del 8% de la superficie total de la subcuenca en este tipo de cobertura, así también la variación en el segundo periodo 2001 - 2006 fue de 8,9 km², indicando una pérdida de 4%, para el periodo 2006 – 2008 una pérdida de 3,4 km² y para periodo 2008 – 2010 una pérdida de 7,5 km² equivalente al 3,4% de cobertura boscosa. Adicional a ello para 1989 – 2010, la cobertura boscosa mostró una reducción total de 32 km², con una disminución anual igual a 1,6 km²/año. Un estudio realizado por (Gonzales Inca & Llanos Lopéz, 2015), reportó para la subcuenca Yuracyacu una cobertura boscosa de 137.05 km², y una deforestación de 4,75 km² para una evaluación realizada entre 2000 – 2013, una desventaja que presenta este estudio es que no se menciona que metodología utilizó para la determinación de la cobertura boscosa. En la investigación realizada por (Mendoza Chichipe, Salas López, & Barboza Castillo, 2017) en el distrito de Leymebamba – Chachapoyas, encontró una alta deforestación en la temporada 1989 – 1998 calculando una disminución de bosque anual igual a 2,6 km²/año, en la presente investigación para el periodo de análisis 1989 – 2010, se calculó una disminución igual a 1,52 km²/año en la Subcuenca Yuracyacu – región San Martín, Así mismo, (Laurante Cajacuri, 2011), realizó un estudio en la microcuenca del río Supte – Tingo María, en el cual mediante imágenes Landsat 5 – TM cuantificó una reducción de bosque en razón igual a 0,34 km²/año, equivalentes a 5,2 km² en 15 años, en la subcuenca Yuracyacu, se

calculó una disminución igual a $1,52 \text{ km}^2/\text{año}$ ($152,3 \text{ Ha/año}$), equivalentes a 32 km^2 (3200 Ha) de Cobertura de Bosque tropical en 21 años. Por lo antes mencionado se demuestra, que existe una disminución progresiva de los bosques tropicales en la Amazonía Peruana. El cálculo de la tasa de deforestación mediante la aplicación de las fórmulas descritas en la Ecuación N° 16 y 17 respectivamente, indican que los índices q y r es igual a $-0,012\%$ anual lo cual indica la deforestación en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 1989 – 2010. Al respecto (Puyravaud, 2003, pág. 594), señala que la tasa r siempre es mayor que q , pero para la mayoría de los casos las diferencias son mínimas. Lo cual también se demuestra solo para los periodos 2008 - 2010 en la cual la tasa de deforestación r es $0,001 \%$ mayor y en los periodos (1989 - 1995) y (2001 – 2006), la tasa de deforestación es equivalentes, con mínimas variaciones (Ver Cuadro N° 19). La fiabilidad global de los mapas de cobertura boscosa fue de 86% para las imágenes Landsat TM, este resultado se encuentra dentro del rango aceptable usado en estudios donde se emplea técnicas de teledetección en la interpretación de imágenes de satélite (Osorio, Mas, Guerra, & Maass, 2015, pág. 64).

La imagen de referencia tomada de Google Earth, no correspondía exactamente a la fecha de las imágenes Landsat utilizadas en el análisis, por lo cual es posible que exista cierto grado de subestimación de la fiabilidad de los mapas. Así mismo el coeficiente Kappa (Landis & Koch, 1977, pág. 165) encontrado fue de $0,65$ lo que indica una concordancia considerable.

Al respecto del análisis de Cobertura Boscosa - Rendimiento hídrico, este muestra una relación consistente; en ese sentido se tiene que, para el periodo (1998 – 2008), la línea de regresión entre ambas variables presenta un coeficiente de correlación (R) igual a $0,9$ aquí se determina que el mayor rendimiento fue 221 l/s/km^2 ($73,2\%$ mayor que el rendimiento promedio, cuando la cobertura de bosque fue de $116,9 \text{ km}^2$ (11690 Ha) $17,3\%$ menor en comparación a la cobertura calculada para 1998). Así mismo en el periodo (2004 – 2008) el mayor rendimiento fue de $15,42 \text{ l/s/km}^2$, siendo 22% mayor que el rendimiento hídrico promedio, siendo la cobertura boscosa estimada igual a $121,6 \text{ km}^2$ (121600 Ha). Dichos resultados muestran que a medida que la cobertura boscosa disminuye, el rendimiento presenta una tendencia de incremento lineal. Ver Gráficos N° 23 y 24. Al respecto, (Silva A., 2016) muestra que la cantidad total de agua rendida por la cuenca media del río Pao fue menor a medida que aumentó la superficie de bosque, teniendo para el estado de bosque actual (14% de cobertura) un rendimiento de 299 mm , para el escenario 1 (40% superficie), el rendimiento simulado con el modelo hidrológico

SWAT fue de 286 mm, para 60% de cobertura de bosque, un rendimiento de 276 mm, en el escenario 3 (93% cobertura), calculó 257 mm y para un escenario cubierto al 100% con superficie de bosque un rendimiento hídrico de 246 mm, demostrando así el impacto de la superficie de bosque sobre el rendimiento hídrico de agua en la cuenca. Así mismo, ambas investigaciones presentan una relación inversa entre el rendimiento hídrico de la cuenca y la superficie de bosque. Finalmente se observa que, en ambos estudios, la regulación hídrica es un papel fundamental que cumple la cobertura de bosque en la cuenca, debido a que existen años donde el rendimiento hídrico disminuye, debiéndose quizás al aumento de la evapotranspiración. En (Silva A., 2016) se observa que el incremento de la superficie de bosque, estabilizan los valores de rendimiento de agua (asemejándose los valores mínimos, siendo los máximos rendimientos menores con el aumento de la cobertura), indicando que puede estar explicado principalmente por el incremento de la evapotranspiración en el cálculo del Balance hídrico.

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

- A partir del análisis de la cobertura boscosa de la Subcuenca Yuracyacu mediante SIG y teledetección, se determina que perdió 32 km² (1989 – 2010) que representa el 15% del área de la subcuenca reflejando cambios en su cobertura. En periodo donde se produjo la mayor variación de la cobertura boscosa fue en el 1989 – 1995, en la cual se calculó una pérdida de 18,2 km² de bosque tropical de la subcuenca, para el periodo 2001 – 2006 la variación fue de 8,9 km², para 2006 – 2008 la variación fue de 3,4 km² finalmente para el periodo 2008 – 2010 fue de 7,5 km². Así mismo para todo el periodo de análisis 1989 – 2010 la pérdida total de cobertura de bosque fue de 32 km² (3200 Ha), calculándose una tasa de retroceso igual a -1,523 km²/año (-152,3 Ha/año), evidenciando así el retroceso progresivo del bosque tropical en la subcuenca.
- La tasa de deforestación en la Subcuenca Yuracyacu fue calculada mediante el promedio de la fórmula propuesta por la FAO y la fórmula propuesta por (Puyravaud, 2003), debido a que se demostró la coincidencia de estos resultados. En el periodo 1989 – 1995 la tasa de deforestación fue de 0,228% anual, asimismo para 2001 – 2006, la tasa promedio de deforestación fue de 0,014% anual, en el periodo 2006 – 2008 la tasa de deforestación fue de 0,0139% anual y finalmente para el periodo 2008 – 2010 la tasa de deforestación fue más elevada de -0,0328%.
- Del análisis de cobertura boscosa – rendimiento hídrico, se encontró que existe una importante concordancia para los 2 periodos analizados (Ver Gráficos N°23 y 24), en ese sentido se demuestra que el rendimiento hídrico puede aumentar, con la disminución progresiva de la cobertura boscosa en la Subcuenca Yuracyacu, lo que puede desencadenar problemas en la estación húmeda, tales como inundaciones y erosión; afectando de forma negativa en la regulación hídrica de caudales, el mayor aumento de rendimiento hídrico se presenta para el año 2008, para el cual se calculó una cobertura de bosque igual a 116,9 km² (18% menor en comparación con la cobertura del año 1989), siendo el rendimiento hídrico 22l/s/km² lo que representa 73,5% más del rendimiento hídrico promedio.

9.2. Recomendaciones

- El Perú carece de investigaciones sobre la Hidrología de los bosques, por tal se recomienda realizar investigaciones en cuencas boscosas de la Amazonía Peruana, con la finalidad de evaluar la influencia que tiene dichas áreas en su hidrología (a nivel de balance hídrico, relaciones de escorrentía superficial, rendimiento hídrico y caudales máximos), para lo cual deben considerarse microcuencas o subcuencas, en donde el efecto es más notorio, y de esta forma contribuir en el entendimiento de la importante función hidrológica entre bosques y agua, y así obtener datos entre cuencas comparables.
- Implementar planes para el adecuado manejo de los recursos hídricos y del recurso bosque, en donde se capacite alumnos voluntarios que deseen realizar investigaciones en el área de ingeniería, para contribuir a comprender más la relación bosque – agua en cuencas.
- Evaluar los cambios de la cobertura boscosa en cuencas de la Amazonía Peruana (zona de Madre de Dios, que actualmente se encuentra afectado por la minería ilegal) mediante imágenes de radar, ya que estas pueden discriminar más coberturas, respecto de las imágenes ópticas, y así realizar estudios de mayor detalle.
- Diseñar investigaciones del cálculo de la biomasa de la cobertura de bosque húmedo tropical de la Subcuenca Yuracyacu, y así generar un valor agregado a este recurso.
- Brindar Capacitaciones a los agricultores de los caseríos de Nueva Cajamarca y Yuracyacu, con la finalidad de que realicen uso sostenible del bosque tropical.
- Se deben gestionar convenios entre instituciones, con la finalidad de tener en funcionamiento instrumental hidrometeorológico especializado en zonas adecuadas dentro del bosque tropical de la Amazonía Peruana (Pluviómetros para lluvia, Limnómetro o Limnígrafo para caudal, y sonda de neutrones para evapotranspiración), por ejemplo; a fin de conocer su contribución al régimen de la escorrentía superficial.
- Es factible utilizar modelos hidrológicos (SWAT, por ejemplo) para estimar el rendimiento hídrico en cuencas y su relación con la cobertura de bosque, siempre que dichos modelos se encuentren calibrados correctamente con datos medidos en estaciones hidrometeorológicas, mostrando así el comportamiento físico del área de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México D.F.: Limusa S.A.
2. APODESA. (1987). *Evaluación de los Recursos Hidricos en la cuenca del rio Mayo*. Lima: Instituto Nacional de Desarrollo.
3. Asner, G. P., Knaap, D. E., Balaji, A., & Perez-Acosta, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 3, 033543.
4. Bernal Nieto, S. M., & Prado Uscategui, C. A. (2015). *Analisis de la influencia de la cobertura Vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2000 a partir de aerofotografías y cartografía del Insituto Geográfico Agustín Codazzi*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia - Facultad de Ingeniería.
5. Besteiro, S. I. (2015). *Incidencia de la Cobertura Forestal sobre la dinámica del agua en la Cuenca Alta del arroyo El Pescado, Partido de la Plata*. Académico Española.
6. Bruijnzeel, L. (1997). *Hidrología de las plantaciones forestales en los trópicos*. CSIRO Canberra Australia.
7. Bruijnzeel, L., Scatena, F., & Hamilton, L. (2010). *Tropical Montane Cloud Forest*. Cambridge University Press.
8. Cabrera Torres, F. (2015). *Estudio Multiescalar de cobertura de la tierra mediante imágenes Landsat para la determinación de conflictos de uso en el canton portoviejo, Ecuador*. Valencia : Universidad de Valencia - Facultad de Física.
9. Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez - Chócova, L., Jimenez, S., & Malo, J. (2011). *Remote Sensing Processing*. Valencia: Morgan & Claypool.
10. Carnevale, N. J., Alzugaray, C., & Di Leo, N. (2007). Estudio de la deforestación en la Cuña Boscosa santafesina mediante teledetección espacial. *Revista de Ciencias Forestales – Quebracho N° 14*, 47-56.

11. Carnevale, N. J., Alzugaray, C., & Di Leo, N. (2007). Estudio de la deforestación en la Cuña Boscosa santafesina mediante teledetección espacial. *Revista de Ciencias Forestales – Quebracho N° 14*, 47-56.
12. Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 893 - 903.
13. Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa fe de Bogotá: Mc Graw Hill.
14. Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta S.A.
15. CLASlite Team. (2013). *CLASlite Forest Monitoring Technology: Version 3.1 User Guide*. Washington D.C.: Carnige Institute for Science. Obtenido de <http://claslite.carnigescience.edu>.
16. CNUCC. (2002). *Informe de la Conferencia de las Partes sobre su septimo periodo de sesiones*. Marrakech: Naciones Unidas.
17. Cooperación Técnica Alemana (GTZ). (S/A). *Análisis Socioeconómico de la Cuenca del Altomayo*.
18. De Coss Perez, A. J. (2017). *Impacto de la Pérdida de Cobertura Vegetal en el Balance Hidrico en la microcuenca La Unión*. Chiapas: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
19. Déborah, B. (2014). *Claslite: Tecnología para el manejo de bosques - Guia de usuario versión 3.2 Español*. Stanford, USA: Institución CARNEGIE para la ciencia.
20. Escobedo Torres, R. (2005). *Suelo y Capacidad de Uso Mayor de Tierras*. Gobierno Regional de San Martin.
21. FAO. (2009). *Los Bosques y el Agua*. Italia, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
22. FAO. (2010). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

23. FAO. (2012). *Guía para la aplicación de normas fitosanitarias en el sector forestal*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
24. FAO. (2016). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma.
25. FAO. (2016). *Los Bosques y Cambio Climático en el Perú*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación.
26. Fernandez Copper, I., & Herrero Llorente, E. (2001). *El Satélite Landsat: Analisis Visual de Imágenes obtenidas del Sensor ETM+*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
27. García Martín, A. (2012). *Evaluación del potencial energético de los bosques de Teruel mediante Teledetección y SIG*. Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón.
28. Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Besteiro, S. I., & Rodríguez Vagaría, A. M. (2013). *Elementos Metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. La Plata, Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata.
29. Gasparri, I., Parmuchi, M. G., Manghi, E., Strada, M., & Bono, J. (2004). *Mapa Forestal de la Provincia de Tucuman*. Argentina: Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal.
30. Gomez Lora, J. (2016). *Separatas de Clase: Descripción General de una Cuenca*. Lima: FIGAE - UNFV.
31. Gómez Lora, W. (1987). *1er Curso Nacional de Recursos Hídricos*. Lima.
32. Gonzaga Giraldo, L. (2002). *Memorias: Hidrología Forestal*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
33. Gonzales Inca, C., & Llanos López, R. (2015). *Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Altomayo*. Lima.
34. Gottle, A., & Séne, E.-H. (1997). *Funciones protectoras y ambientales de los bosques*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

35. Gutierrez Paredes, R. (2013). *Monitoreo de la Deforestación en el departamento de Ucayali periodo 2005 - 2009*. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
36. Hadjimitsis, D., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M. G., Retalis, A., . . . Clayton, C. (2010). Atmospheric correction of satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: Impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Science*, 89-95.
37. Hansen , M., Potapov, R., Moore, M., Hancher, S., Turubanova, A., & Tykavina , D. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850 - 853.
38. Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends , Millennium Ecosystem Assessment Series, Volume 1. *Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends*, 47.
39. Hedley, J. D. (2013). Hyperspectral Applications. Por James A. Goodman, Samuel J. Purkis y Stuart R. Phinn (Eds.). *Coral Reef Remote Sensing. A guide for mapping, monitoring and management*, 90.
40. Houghton, R. A. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 597 - 603.
41. INGEMMET. (2010). *Riesgo Geológico en la Región San Martín*. Lima: Depósito Legal N° 2011 - 10854.
42. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2011). *San Martin: Compendio Estadístico*. Moyobamba: Área de Informática San Martín - Moyobamba.
43. IPCC. (2007). *Climate Change 2007 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido: Cambrige University Press.
44. Laínez Guerrero, M. A. (2006). *Experiencias Forestales en el Altomayo*. Moyobamba: GTZ.

45. Landis, R., & Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, Vol. 33, No. 1 , 159-174.
46. Laurante Cajacuri, M. A. (2011). Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María - Perú. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la información Geográfica*, 1-15.
47. Lopez, E. (1991). *Corrección Atmosferica en el Espectro Solar*. Valencia: Universitat de València.
48. Martinez Beltrán, C. (2014). *Observacion multiescala de la cubierta vegetal mediante Teledetección. Aplicación a Castilla - La Mancha*. Valencia: Universidad de Valencia.
49. Mendoza Chichipe, M. E., Salas López, R., & Barboza Castillo, E. (2017). Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú). *Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, Calle*, 67-76.
50. Mendoza Robles, J. R. (2012). *Determinación de Áreas deforestadas por actividades humanas en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata y el Parque Nacional Bahuaja Sonene - Madre de Dios*. Madre de Dios: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
51. Merg, C., Daniel , P., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., . . . Selzer, F. (2011). Mapas Digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen - Sección Agronomía*, 1 - 11.
52. Meunier M. (1996). Influencia de los Bosques. *Unasylava: Revista Internacional sobre bosques y actividades e industrias forestales*.
53. Ministerio del Ambiente. (2011). *El Perú de los bosques*. Lima.
54. Ministerio del Ambiente. (2015). *Cuantificación y Análisis de la deforestación en la amazonía peruana en el Periodo 2010 -2011-2013-2014*. Lima: Dirección General de Ordenamiento Territorial.
55. Ministerio del Ambiente. (2016). *La conservación de bosques en el Perú 2011 - 2016*. Lima: Depósito legal de la Biblioteca Nacional del Perú.

56. Ministerio del Ambiente. (2016). *La Conservación de Bosques en el Perú 2011 - 2016*. Lima: Depósito Legal de la Biblioteca Nacional del Perú.
57. Ministerio del Ambiente. (09 de Agosto de 2017). *Programa Nacional de Conservación de Bosques para la mitigación del Cambio Climático*. Obtenido de Programa Nacional de Conservación de Bosques para la mitigación del Cambio Climático: <http://www.bosques.gob.pe/peru-pais-de-bosques>
58. Monsalve Saenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
59. Montes Galbán, E., Ariel Insaurralde, J., & Edin Cuadra, D. (2017). Evolución y escenarios futuros de la deforestación en el suroeste de la provincia del Chaco, Argentina. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, 121-131.
60. Natural Resources Canada. (S/A). *Fundamentals of Remote Sensing*. Canada Center of remote sensing.
61. Neary, D., Ice, G., & Jackson, C. (2009). *Linkages between forest soils and water quality and quantity*. Forest Ecology and Management.
62. ONERN. (1982). *Inventario y Evaluación Integral de los Recursos Naturales de la cuenca del Alto Mayo*. Lima.
63. ONERN. (1984). *Estudio y Evaluación de Recursos Naturales y Plan de Protección Ambiental*. Lima.
64. Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y Modelación de los procesos de deforestación: Un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín, núm 88, Instituto de Geografía, UNAM, México*, 60-74.
65. Patiño, J., León Pelaez, J., Montes, L. A., & Hernandez, L. C. (2007). Propuesta Metodológica para comparar el efecto de diferentes coberturas vegetales en la regulación de cauales en cuencas hidrográficas. Aplicación en la microcuenca de la quebrada La Murciélago, Antioquía. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 89 - 100.
66. Perez Campomanes, G. (2015). *Manual de Hidrología Aplicada*. Lima.

67. Pizarro T., R., Bentiez G., A., Farías D., C., Jordan D., C., Santivañez Q., F., Sanguesa P., C., . . . Román A., L. (2005). Influencia de las masas boscosas en el régimen hidrico de una cuenca semiárida, Chile. *Bosque*, 77 - 91.
68. Puyravaud, J.-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 593-596.
69. Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Imagen Analysis*. Camberra, Australia: Springer.
70. Romero Diaz, A. (1987). Morfometría de Redes Fluviales: Revisión critica de los parámetros mas utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía Física N° 12*, 47 - 62.
71. Rouse Jr., J. W. (1973). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green wave Efecct) of natural vegetation*. Texas A&M University Remote Sensing Center.
72. SENAMHI. (2009). *Escenarios Climáticos en la cuenca del rio Mayo*. Lima: Depósito Legal de la Biblioteca Nacional de Perú.
73. Silva A., O. (2016). *Evaluación del efecto de la variación de la superficie bajo bosque sobre el rendimiento de agua en una cuenca de lluvia estacional mediante un modelo de simulación*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
74. Smith, J., & Schwartz, J. (2015). *La deforestación en el Perú*. WWF - Perú.
75. Soares - Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., García, R. A., & Ramos, C. A. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 520 - 523.
76. Sobrino, J. (2000). *Teledetección*. Valencia: Universidad de Valencia.
77. Tagestad, J. (2000). *Radiometric standardization of adjacent Landsat Thematic Mapper Image for multi-scene mosaic*. Logan, Utah: Utah State University.
78. Tobón, C. (2009). *Bosques Andinos y el Agua. Serie investigación y sistematización #4*. Quito: Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN.

79. UNESCO. (1982). *Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur*. Montevideo, Uruguay.: Oficina Nacional de Ciencia y Tecnología.
80. Vasquez Villanueva, A. (2000). *Manejo de Cuencas Altoandinas - Tomo I*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
81. Vera, O. O. (2004). Evaluación Hidrológica. *Hidrored: Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*, 16.
82. Vermote, E. F., Tange, D., Deuze, J. L., Herman, M., & Morcette, J. J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 675 - 686.
83. Victorino A. (18 de Marzo de 2012). *Bosques para las personas: Memorias del Año Internacional de los Bosques 2011*. Bogotá, D.C., Colombia.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Obtenido de Los bosques son indispensables para un suministro de agua de calidad: <http://www.fao.org/news/story/es/item/53463/icode/>
84. Villón Vejar, M. (2002). *Hidrología*. Lima, Perú: Editorial Villón.

ANEXOS

- Anexo 1** : Datos de Pluviometría faltantes
- Anexo 2** : Ecuaciones regionales mensuales de precipitación
- Anexo 3** : Datos de temperatura.
- Anexo 4** : Ecuaciones regionales mensuales de temperatura.
- Anexo 5** : Modelos Hidrológicos Regionales de la investigación.
- Anexo 6** : Registro Fotográfico

ANEXO 1

Datos Pluviométricos Faltantes

Los registros de precipitación de la estación Chachapoyas (Ver Tabla N° 2), se obtuvieron de los siguientes estudios técnicos ambientales:

Tabla N° 1. Estudios técnicos ambientales utilizados

Periodo	Estudio Técnico Ambiental
1995 - 2004	Estudio Hidrológico e Hidrogeológico para sustentar el Estudio de Impacto Ambiental – Semidetallado (EIA – SD) del Proyecto de exploración minera Cañón Florida, 2010.
2005 - 2012	Capítulo 4 de la Cuarta Modificatoria del Estudio de Impacto Ambiental semidetallado (EIASd) del Proyecto de exploración Cañón Florida, 2017.

Fuente: Elaboración propia.

La información que se encontró en los estudios mencionados en la Tabla N° 1, fue información procesada y proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Asimismo, los registros en color rojo, fueron completados para fines de dichos estudios y los valores de precipitación se muestran en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Registros Estación Chachapoyas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	194	45,5	197	386,1	88,1	46,2	14,3	5,8	48,7	217,5	142,5	290,4	1676,1
1996	80	179,4	260,5	98,1	28,9	69,3	20,1	31,6	77,2	280,9	84,8	77,9	1288,7
1997	76,9	295,6	113,8	152,5	83,8	69,3	6	64	91,2	34,9	81,8	177	1246,8
1998	88,6	78,1	175,1	149	26,6	6	0,9	27,4	21	99,4	79,3	15,7	767,1
1999	100,3	204,9	35	36,5	84,7	64,3	16,7	23,8	61,1	30,6	41,2	99,3	798,4
2000	38,6	99	90,3	70	72,2	70,8	11,4	14,4	66,4	5,7	35,7	113,8	688,3
2001	62,9	81	151,4	46,2		9,4	20	9,5	62,5	129,3	63,2	47,8	683,2
2002	114,3	175,3	151	75,4	47,3		30,8	7,3	28,6	178,2	74,9	93,9	977
2003	76,9	123,8	107,1	70,6	65,9	13,9	7,8	38,7	43,2	65,7	84,1	84,6	782,3
2004	47,2	64,9	125,1	87,2	40,1	42,4	39,3	16,6	27,8	93,2	149,8	55,4	789
2005	18,1	84,5	101,3	65,9	44,3	7,3	4	19,1	73,6	142,3	44,8	89,7	694,9
2006	136	78,9	269,1	47,4	11,7	15,3	27,2	5,1	31,5	153,4	89,1	82,1	946,8
2007	108,5	52,5	169,6	69,3	42,9	4,8	34,4	36,5	30,5	152,4	90,9	78,6	870,9
2008	48,8	129,1	66,2	40,7	49	30,1	7	21,8	38,7	123,8	96,7	38,8	690,7
2009	130,5	151	105,1	179,8	47,7	16,4	29	20,4	63,7	193,5	98,6	90,2	1125,9
2010													
2011	76,6	76,6	126,9	123,3	67,3	45,1	24	10	18,2	47,7	81,2	58,9	755,8

Fuente: SENAMHI.

Se utilizaron los registros de la estación Jazán del año 2010, con la finalidad de completar la información pluviométrica faltante, mediante el método del factor adimensional.

Tabla N° 3. Registro Estación Jazán

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1998	151,2	84,3	189,3	247,5	60,3	102,4	32,5	46,9	45,7	99,8	73,4	25	1158,3
1999	86	151,5	100	69,7	107,1	102,2	60,4	53,9	166,8	94,9	11,2	76,6	1080,3
2000	69,8	83,9	80,8	140,4	132,9	125	47,5	115,6	177,5	59,3	26,9	143,8	1203,4
2001	13,5	45,1	60,9	164,1	71,7	41	99,3	25,7	81,8	127,9	27	67,6	825,6
2002	33,9	44,9	81,3	186,9	74,9	52,4	91,4	27,1	38,3	149,9	79,4	41,9	902,3
2003	52	75,7	77	87,1	142,7	158,5	46,4	20	38,3	63,1	79,1	147,9	987,8
2004	6,3	67,2	145,3	115,9	101,6	66,4	121,9	43,3	43,6	87,1	36,8	80,9	916,3
2005	27,4	105,2	160,2	204,6	38,1	52,8	27,2	38,8	14,2	160,1	76,1	52,5	957,2
2006	63,2	53,1	105,3	48,4	25,1	88,8	52,6	58,7	97,1	82,2	48,8	61,1	784,4
2007	48,9	29,9	131,6	111,5	104,7	40,8	33,6	22,8	42,2	100,9	170,4	58,6	895,9
2008	56,7	140,3	108,4	34,5	52,9	57,7	95,5	51,6	85,4	147,7	158,1	70,2	1059
2009	137,5	51,9	162,3	92,6	74	85	44,1	93,4	22,6	94,2	30,4	33,2	921,2
2010	3,5	65,7	82	144	100,2	49	48,6	40,5	91,5	43,1	47,2	56,5	771,8
Promedio	57,7	76,8	114,2	126,7	83,6	78,6	61,6	49,1	72,7	100,8	66,5	70,4	958,7

Fuente: SENAMHI.

Los factores adimensionales mensuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 4. Factores adimensionales Jazán

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2001	0,016	0,055	0,074	0,199	0,087	0,050	0,120	0,031	0,099	0,155	0,033	0,082	1
2002	0,038	0,050	0,090	0,207	0,083	0,058	0,101	0,030	0,042	0,166	0,088	0,046	1
2010	0,005	0,085	0,106	0,187	0,130	0,063	0,063	0,052	0,119	0,056	0,061	0,073	1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N° 5, se aprecian los registros completados de la estación Chachapoyas, utilizando el método del factor adimensional.

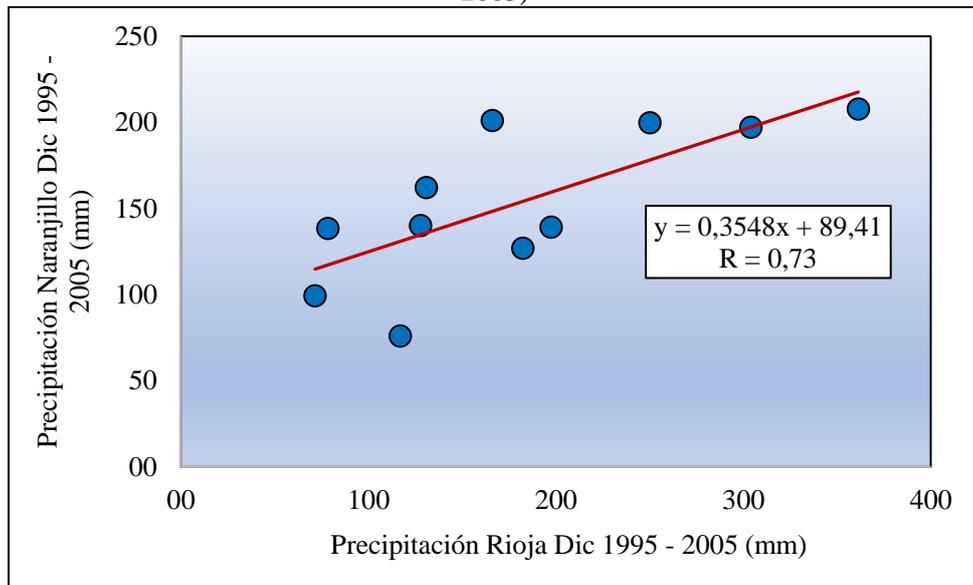
Tabla N° 5. Registro completado Estación Chachapoyas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	194	45,5	197,0	386,1	88,1	46,2	14,3	5,8	48,7	217,5	142,5	290,4	1676,1
1996	80	179,4	260,5	98,1	28,9	69,3	20,1	31,6	77,2	280,9	84,8	77,9	1288,7
1997	76,9	295,6	113,8	152,5	83,8	69,3	6,0	64,0	91,2	34,9	81,8	177,0	1246,8
1998	88,6	78,1	175,1	149,0	26,6	6,0	0,9	27,4	21,0	99,4	79,3	15,7	767,1
1999	100,3	204,9	35,0	36,5	84,7	64,3	16,7	23,8	61,1	30,6	41,2	99,3	798,4
2000	38,6	99,0	90,3	70,0	72,2	70,8	11,4	14,4	66,4	5,7	35,7	113,8	688,3
2001	62,9	81,0	151,4	46,2	94,4	9,4	20,0	9,5	62,5	129,3	63,2	47,8	777,6
2002	114,3	175,3	151,0	75,4	47,3	69,0	30,8	7,3	28,6	178,2	74,9	93,9	1046,0
2003	76,9	123,8	107,1	70,6	65,9	13,9	7,8	38,7	43,2	65,7	84,1	84,6	782,3
2004	47,2	64,9	125,1	87,2	40,1	42,4	39,3	16,6	27,8	93,2	149,8	55,4	789,0
2005	18,1	84,5	101,3	65,9	44,3	7,3	4,0	19,1	73,6	142,3	44,8	89,7	694,9
2006	136	78,9	269,1	47,4	11,7	15,3	27,2	5,1	31,5	153,4	89,1	82,1	946,8
2007	108,5	52,5	169,6	69,3	42,9	4,8	34,4	36,5	30,5	152,4	90,9	78,6	870,9

2008	48,8	129,1	66,2	40,7	49,0	30,1	7,0	21,8	38,7	123,8	96,7	38,8	690,7
2009	130,5	151,0	105,1	179,8	47,7	16,4	29,0	20,4	63,7	193,5	98,6	90,2	1125,9
2010	4,6	86,5	107,9	189,5	131,9	64,5	64,0	53,3	120,4	56,7	62,1	74,3	1015,6
Promedio	82,9	120,6	139,1	110,3	60,0	37,4	20,8	24,7	55,4	122,3	82,5	94,3	950,3

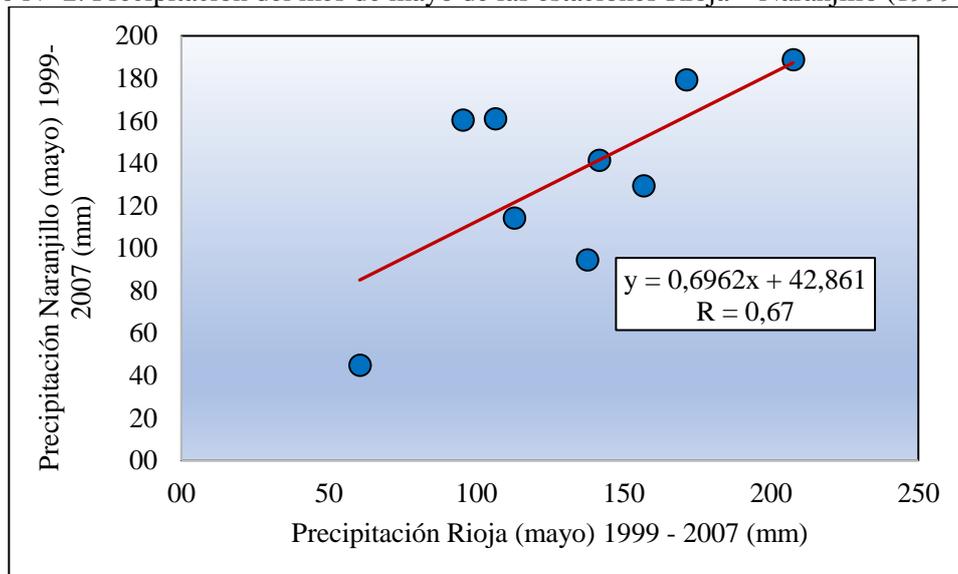
Los registros incompletos de la estación Naranjillo, son para los meses de diciembre y mayo de los años 2001 y 2007 respectivamente. Para completarlos se utilizaron los datos de la estación Rioja, mediante una regresión lineal (Ver Gráfico N° 1 y 2).

Gráfico N° 1. Precipitación del mes de diciembre de las estaciones Rioja – Naranjillo (1995 – 2005)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 2. Precipitación del mes de mayo de las estaciones Rioja – Naranjillo (1999 – 2007)



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N° 6, se observan los registros pluviométricos de la estación Naranjillo para el periodo 1995 – 2010. Los datos completados con las regresiones lineales, se observan en color rojo.

Tabla N° 6 Registro completado Estación Naranjillo

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	82,6	131,8	166,0	258,8	57,2	97,4	33,3	13,5	147,0	69,5	216,3	199,8	1473,2
1996	90,6	195,3	223,1	95,4	69,2	37,2	10,0	120,1	81,4	234,7	124,0	162,2	1443,2
1997	81,2	319,2	109,9	122,1	72,8	59,6	17,3	46,6	140,3	142,1	170,3	76,0	1357,4
1998	123,1	118,7	111,2	219,2	159,1	49,8	13,2	154,9	35,4	184,3	69,1	99,3	1337,3
1999	261,5	155,8	167,1	113,2	188,9	152,3	42,5	74,5	60,9	146,9	78,2	140,1	1581,9
2000	222,1	200,6	158,5	244,1	94,6	135,6	78,0	39,5	158,3	79,1	54,7	201,2	1666,3
2001	112,8	189,6	148,8	137,7	179,4	56,8	83,6	36,8	108,2	168,0	104,9	197,3	1523,8702
2002	191,5	181,1	191,5	182,4	161,0	10,7	132,5	51,5	128,9	198,5	110,0	138,5	1678,1
2003	98,8	169,4	263,8	147,4	114,2	128,3	19,4	52,9	168,3	159,3	210,1	207,8	1739,71
2004	120,6	89,1	168,5	172,6	129,5	73,7	69,2	56,3	56,3	171,2	194,0	139,3	1440,35
2005	77,0	179,5	114,2	215,1	160,4	81,7	51,7	35,1	83,2	98,0	259,5	126,9	1482,36
2006	157,6	268,4	148,5	80,3	44,9	37,0	51,8	65,3	82,2	182,2	162,6	196,9	1477,73
2007	219,9	101,0	190,9	157,1	141,5	32,0	69,0	130,4	151,2	271,2	342,6	126,1	1932,9425
2008	71,5	332,4	214,1	276,2	118,4	146,9	152,9	87,5	119,1	291,3	167,4	59,5	2037,2
2009	117,9	141,2	182,4	240,3	102,1	109,7	49,6	85,3	125,2	94,9	154,6	70,5	1473,7
2010	59,3	179,2	184,3	181,2	148,5	39,3	127,4	49,0	103,6	120,7	136,0	152,2	1480,7
Promedio	130,5	184,5	171,4	177,7	121,4	78,0	62,6	68,7	109,3	163,2	159,6	143,3	1570,4

Fuente: SENAMHI.

En la tabla N° 7, se observan los registros de la estación Rioja, desde 1995 hasta 2007

Tabla N° 7. Registro Estación Rioja 1995 - 2007

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	155,1	83,3	265,1	76,9	78,0	76,2	93,5	67,5	107,5	46,4	117,3	250,2	1417,0
1996	151,3	122,8	153,1	133,4	46,5	21,8	36,0	138,7	95,1	186,8	98,7	130,9	1315,1
1997	123,6	349,5	227,8	98,6	150,7	16,2	5,5	69,9	76,9	64,3	160,6	116,9	1460,5
1998	112,1	136,6	177,3	285,4	98,0	51,9	13,6	44,6	49,8	188,6	71,9	71,5	1301,3
1999	207,3	288,4	144,0	82,4	207,5	50,7	62,3	99,3	52,4	175,3	85,0	127,7	1582,3
2000	149,8	194,7	91,6	131,7	137,7	29,1	86,8	77,4	96,9	33,9	101,0	166,1	1296,7
2001	69,5	176,1	189,3	184,6	171,3	49,9	35,6	42,3	127,4	225,4	157,4	304,0	1732,8
2002	166,8	135,2	146,6	226,1	106,5	25,3	123,5	41,0	73,7	226,4	76,6	78,4	1426,1
2003	141,6	113,4	304,0	127,3	112,9	123,7	33,7	64,1	105,2	209,6	300,4	361,3	1997,2
2004	44,9	87,6	178,0	193,9	156,8	35,3	63,5	83,6	94,7	182,0	174,5	197,4	1492,2
2005	55,5	211,0	148,7	212,6	95,4	47,1	35,1	29,4	71,5	192,5	182,7	182,3	1463,8
2006	94,7	260,1	236,7	83,0	60,5	60,4	59,1	128,6	66,7	104,4	111,1	186,6	1451,9
2007	130,8	82,1	182,6	200,1	141,7	14,5	127,6	127,9	228,0	238,9	240,8	144,0	1859,0
Promedio	123,3	172,4	188,1	156,6	120,3	46,3	59,7	78,0	95,8	159,6	144,5	178,3	1522,8

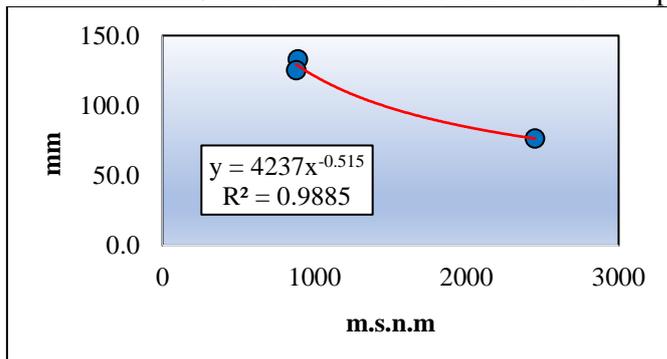
Fuente: SENAMHI.

ANEXO 2

Ecuaciones Regionales Mensuales de la precipitación

A continuación, se presenta el comportamiento de la precipitación promedio mensual, para el periodo analizado, de las 3 estaciones utilizadas en el estudio. A partir de este comportamiento de la precipitación respecto a la altitud, se generan los modelos regionales mensuales, para determinar la precipitación en cualquier punto de la Subcuenca Yuracyacu.

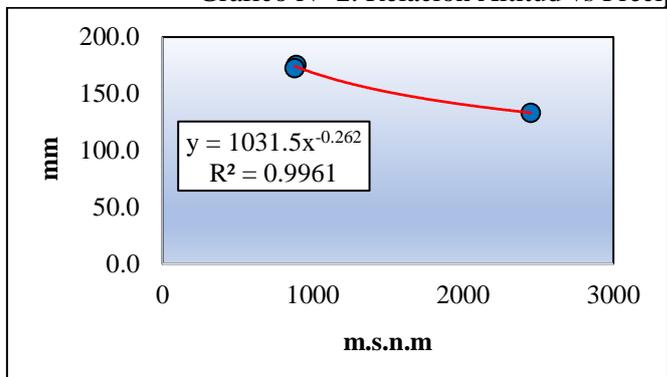
Gráfico N° 1. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Enero



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	Error
Naranjillo	890	132,9	134,4	1%
Rioja	880	125,2	135,2	8%
Chachapoyas	2490	76,3	80,4	5%

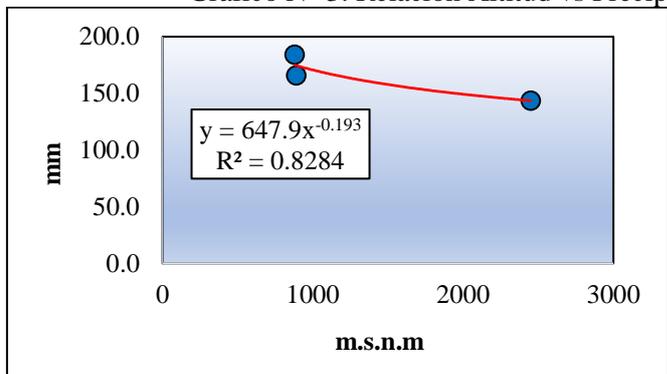
Gráfico N° 2. Relación Altitud vs Precipitación del mes Febrero



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	175,5	174,0	-1%
Rioja	880	172,6	174,5	1%
Chachapoyas	2450	133,2	133,4	0%

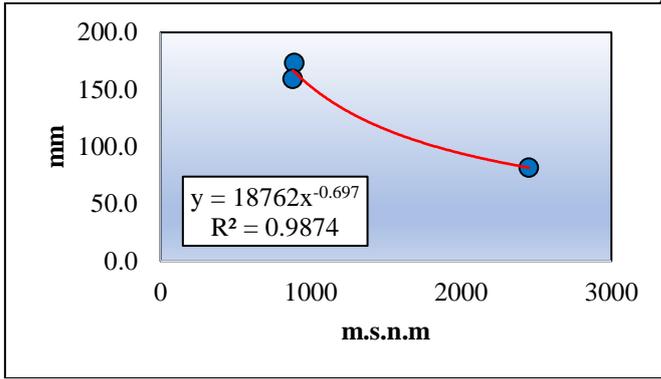
Gráfico N° 3. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Marzo



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	165,7	174,7	5%
Rioja	880	184,1	175,1	-5%
Chachapoyas	2450	143,6	143,7	0%

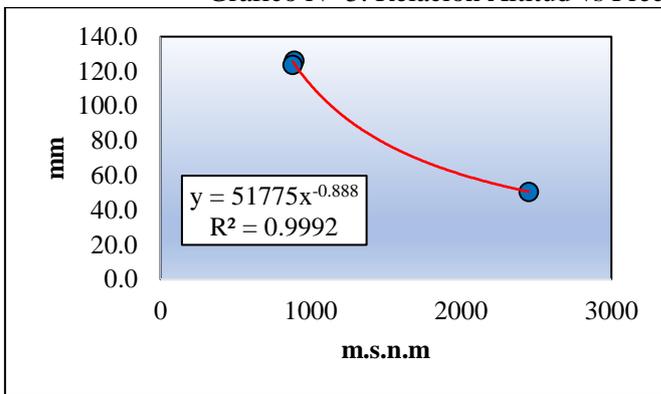
Gráfico N° 4. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Abril



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	173,5	165,0	-5%
Rioja	880	159,4	166,3	4%
Chachapoyas	2450	81,7	81,5	0%

Fuente: Elaboración propia.

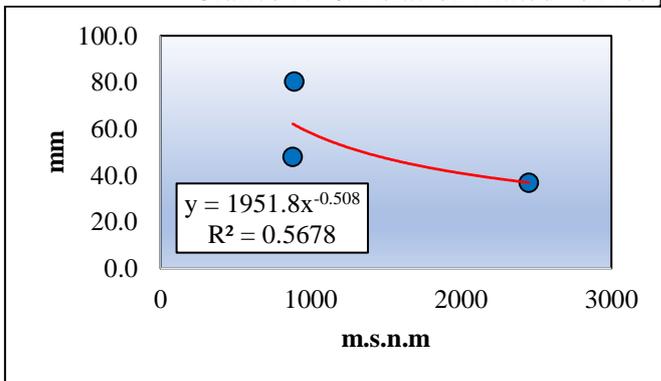
Gráfico N° 5. Relación Altitud vs Precipitación del mes Mayo



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	126,1	124,5	-1%
Rioja	880	123,8	125,7	2%
Chachapoyas	2450	50,6	50,6	0%

Fuente: Elaboración propia.

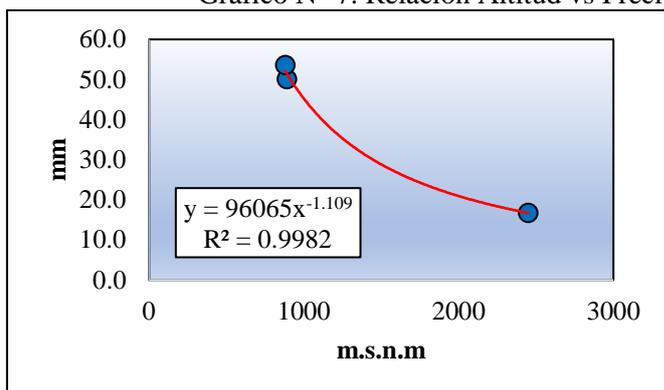
Gráfico N° 6. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Junio



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	80,3	62,0	-23%
Rioja	880	47,9	62,3	30%
Chachapoyas	2450	36,8	37,0	1%

Fuente: Elaboración propia.

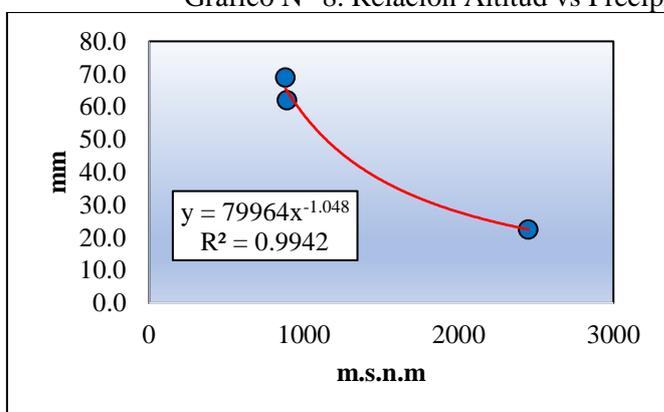
Gráfico N° 7. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Julio



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	50,1	51,5	3%
Rioja	880	53,6	52,1	-3%
Chachapoyas	2450	16,7	16,7	0%

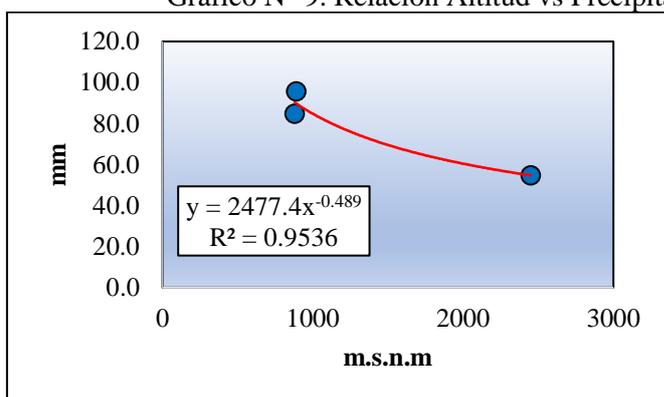
Gráfico N° 8. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Agosto



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	62,0	64,9	5%
Rioja	880	68,9	65,6	-5%
Chachapoyas	2450	22,5	22,4	0%

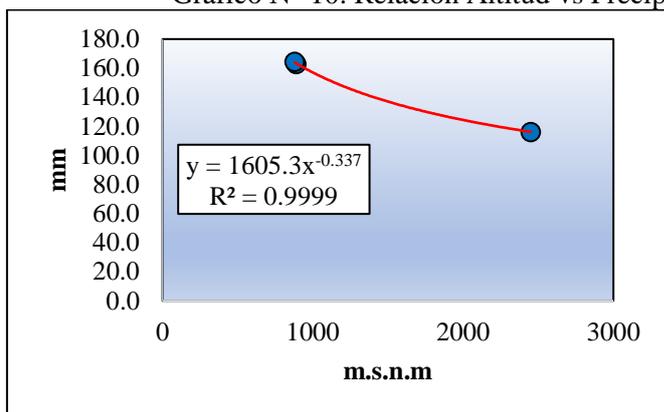
Gráfico N° 9. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Setiembre



Fuente: Elaboración propia.

Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	95,6	89,5	-6%
Rioja	880	84,7	90,0	6%
Chachapoyas	2450	54,7	54,5	0%

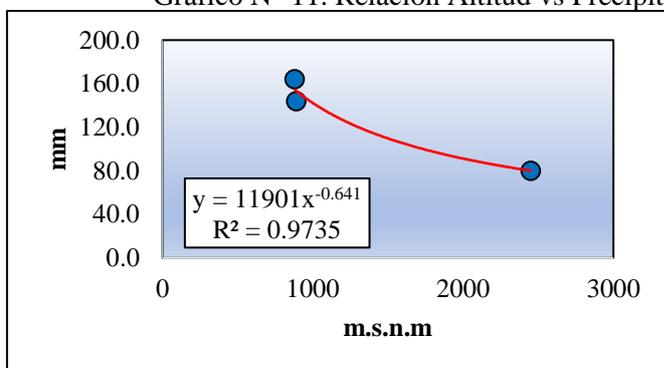
Gráfico N° 10. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Octubre



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	162,9	162,8	0%
Rioja	880	164,3	163,4	-1%
Chachapoyas	2450	116,2	115,7	0%

Fuente: Elaboración propia.

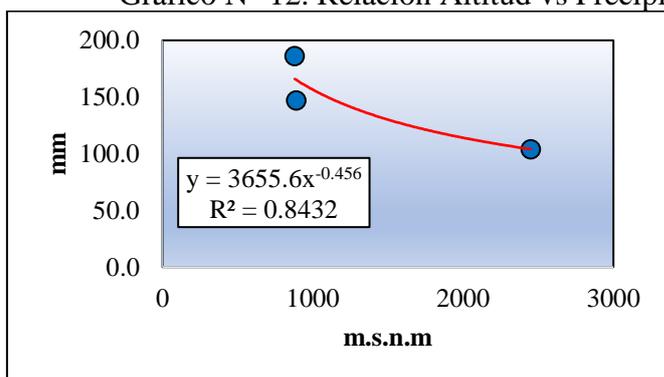
Gráfico N° 11. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Noviembre



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	144,0	153,1	6%
Rioja	880	164,3	154,2	-6%
Chachapoyas	2450	80,2	80,0	0%

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 12. Relación Altitud vs Precipitación del mes de Diciembre



Estación	H	PP	PP gen	error
Naranjillo	890	146,9	165,2	12%
Rioja	880	186,1	166,1	-11%
Chachapoyas	2450	104,1	104,1	0%

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3

Registros de la Temperatura media mensual

Los registros encontrados de la temperatura de la estación Chachapoyas (Ver Tabla N°2), fueron tomados de los siguientes estudios técnicos ambientales:

Tabla N° 1 Estudios utilizados

Periodo	Estudio Técnico Ambiental
1994 - 2004	Estudio Hidrológico e Hidrogeológico para sustentar el Estudio de Impacto Ambiental – Semidetallado (EIA – SD) del Proyecto de exploración minera Cañón Florida, 2010.
2005 - 2012	Capítulo 4 de la Cuarta Modificatoria del Estudio de Impacto Ambiental semidetallado (EIASd) del Proyecto de exploración Cañón Florida, 2017.

Fuente: Elaboración propia

Los datos en color morado fueron completados, en el estudio mencionado, así mismo los datos en color rojo, se completaron, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Por ser el Coeficiente de Variación (CV) un valor muy bajo, el cual varía entre 2% y 3%, se utilizó un promedio entre los registros existentes con la finalidad de completar los datos para el año 2010.
- Se promedió las temperaturas mensuales de los años (2007,2008, 2009), al conjunto de datos llamaremos X₁.
- Estos datos fueron promediados con los valores PROM del registro, y así se obtuvo los datos para el año 2010.

Tabla N° 2 Estación Chachapoyas - Temperatura media mensual

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1994	14,8	14,3	14,7	14,8	14,8	14,1	13,2	13,5	14,5	15,2	15,6	15,2	14,6
1995	15,2	15,1	15,1	15,3	14,9	14,6	13,2	14,9	14,6	15	15,5	15	14,9
1996	14,7	14,6	14,9	14,8	14,8	14,3	13,5	13,7	14,6	14,8	15,5	15,2	14,6
1997	15,4	14,5	15,4	14,9	14,4	14,6	14,1	13,8	15,5	15,7	15,8	15	14,9
1998	15,6	15,8	15,9	16,1	15,6	14,5	14,4	14,7	15	15,8	15,9	15,8	15,4
1999	15	14,2	14,8	14,4	14	14,5	12,9	13,7	14,3	14,7	15,7	15,1	14,4
2000	15	14,2	14,1	14,2	14,9	14,1	13,5	14,1	14,7	14,9	15,8	15	14,5
2001	14,1	14,1	14,4	14,6	14,9	13,6	14,1	14	14,6	15,6	15,7	16	14,6
2002	15,4	15	14,9	15,2	15	14,2	14	14	15,1	15,2	14,9	15,4	14,9
2003	15,4	15,3	14,8	15	14,7	14,4	13,7	14,2	14,7	15,7	15,9	15,5	14,9
2004	16	14,7	14,9	15,4	15,5	13,6	13,8	13,6	14,4	15,6	15,6	15,9	14,9
2005	15,9	15,7	15,4	15,6	15,2	14,9	14	14,6	15,1	15,2	16	15,3	15,2
2006	15	15	14,6	15,1	14,6	14,6	13,8	14,5	15	16,2	15,6	15,6	15,0
2007	14,8	15,1	14,7	15	15,2	14,5	14	14,3	13,9	14,7	15,1	15,3	14,7
2008	14,8	14,4	14,6	14,8	14,8	14,3	14	14,8	14,7	14,9	15,5	15,6	14,8
2009	14,3	14,4	14,7	14,4	15	14,4	14,1	14,5	14,6	15,4	15,7	15,5	14,8
2010	14,8	14,7	14,8	14,9	14,9	14,4	13,9	14,4	14,5	15,2	15,5	15,4	14,8
2011	14,9	14,8	14,8	14,8	14,9	14,5	14	14,5	14,3	15,4	15,7	15,5	14,8

2012	14,6	14,4	14,6	15	14,6	14	14,2	14,4	14,4	15,3	16	15,4	14,7
PROM	15,1	14,8	14,9	15,0	14,9	14,3	13,8	14,2	14,7	15,3	15,6	15,4	14,8
DES	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	
CV	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	

PROM : promedio
DES : desviación estándar
CV : coeficiente de variación.

Fuente: SENAMHI

Los datos de la estación Naranjillo, fueron descargados del siguiente portal para la descarga de datos hidrometeorológicos del SENAMHI¹.

Tabla N° 3 Registros de temperatura Estación Naranjillo

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1998	23,2	23,7	23,7	23,8	23,0	22,2	22,9	23,6	23,6	24,0	24,2	24,0	23,5
1999	23,4	23,2	23,1	22,9	23,0	23,3	22,0	22,4	23,5	23,6	24,0	24,1	23,2
2000	23,1	22,6	23,0	23,1	24,0	23,4	22,3	23,1	23,4	24,0	24,2	23,5	23,3
2001	22,6	22,2	22,9	23,5	23,6	22,7	23,0	22,8	23,0	24,1	24,1	24,0	23,2
2002	23,5	22,3	23,2	23,8	23,5	23,0	22,6	22,8	23,4	23,9	23,6	23,9	23,3
2003	23,2	23,7	23,8	24,2	23,5	23,6	22,6	23,1	23,4	24,3	24,3	23,9	23,6
2004	24,1	23,6	23,6	24,2	24,2	22,6	23,0	22,4	22,8	24,1	24,4	24,1	23,6
2005	24,4	24,1	24,2	24,2	24,2	23,9	22,8	23,2	23,5	23,9	24,1	23,7	23,9
2006	23,4	23,3	23,4	23,7	23,4	23,6	22,9	23,7	23,8	24,1	24,2	24,0	23,6
2007	23,4	23,4	23,2	23,7	23,7	23,7	22,8	23,5	23,0	23,9	23,7	23,9	23,5
2008	22,9	22,9	23,1	23,8	23,4	23,2	23,3	23,6	23,2	23,9	24,5	24,2	23,5
2009	23,3	23,0	23,3	23,4	23,7	23,0	23,5	23,7	23,8	24,4	24,6	24,1	23,6
2010	23,2	24,3	24,5	24,5	24,2	24,0	23,5	23,6	24,0	24,5	24,3	24,0	24,1
2011	24,0	23,5	23,3	23,9	24,2	23,5	22,9	23,9	23,6	24,2	24,2	24,0	23,8
2012	23,2	22,4	23,4	23,2	23,3	22,7	23,0	23,8	23,4	23,7	24,8	24,1	23,4
PROM	23,4	23,2	23,5	23,7	23,7	23,2	22,9	23,3	23,4	24,0	24,2	24,0	23,5
DES	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2	
CV	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	

PROM : promedio
DES : desviación estándar
CV : coeficiente de variación.

Fuente: SENAMHI

Así mismo, los datos de la estación rioja, se muestran en la Tabla N°4, el cual es desde el año 1994 hasta 2004. No se obtuvieron datos hasta el 2010, sin embargo, el periodo se considera representativo, ya que se tienen en total 11 años, y al ser el coeficiente de variación bajo, variando entre 2% y 4%, es posible usar el promedio multianual para el análisis regional. Cabe mencionar que Rioja, no se utilizó para generar información mensual en la subcuenca.

¹ Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>

Tabla N° 4 Registro de temperatura Estación Rioja

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1994	22,3	21,9	22,5	22,5	22,9	21,3	21,5	21,6	22,4	22,5	22,4	22,7	22,2
1995	22,3	22,4	22,5	23,4	22,9	22,4	22,3	22,4	22,2	23,2	22,9	23	22,7
1996	22,5	22,2	22,7	22,3	22,6	22,2	21,5	21,7	22,4	22,9	23,1	22,3	22,4
1997	22,9	21,8	22,6	22,9	22,3	22,5	22,4	22,1	23,4	23,6	23,1	22,8	22,7
1998	23,2	23,9	23,9	23,9	23,2	22,1	22,3	23,4	23,3	23,6	23,8	23,4	23,3
1999	22,4	22,3	22,8	22,5	22,4	22,7	21,7	21,8	22,9	22,9	23,6	23,5	22,6
2000	22,8	22,3	22,5	22,4	23,4	23	21,9	22,4	22,8	22,9	23,5	22,3	22,7
2001	21,9	21,4	22,5	22,6	23	22,4	22,7	22,8	23,2	23,5	23,7	24,1	22,8
2002	23,5	23	23,3	23,6	23,4	22,8	22,4	22,9	23,5	23,9	23,4	23,5	23,3
2003	23,2	23,2	23,2	23,5	23,2	23,2	22,5	22,9	23,4	23,9	24	23,6	23,3
2004	24,1	23,9	23,5	24,1	24	22,6	22,6	23	22,9	24,2	24,4	23,8	23,6
PROM	22,8	22,6	22,9	23,1	23,0	22,5	22,2	22,5	22,9	23,4	23,4	23,2	22,9
DES	0,6	0,8	0,5	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	
CV	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	

PROM : promedio
DES : desviación estándar
CV : coeficiente de variación.

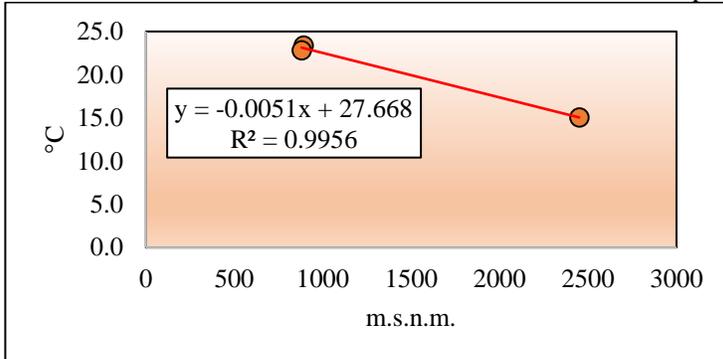
Fuente: SENAMHI

ANEXO 4

Ecuaciones Regionales Mensuales de la temperatura

A continuación, se presenta el comportamiento de la temperatura promedio mensual, para el periodo analizado, de las 3 estaciones utilizadas en la investigación. A partir del comportamiento de la temperatura respecto a la altitud, se generan los modelos regionales mensuales, para determinar la temperatura en cualquier punto de la Subcuenca Yuracyacu.

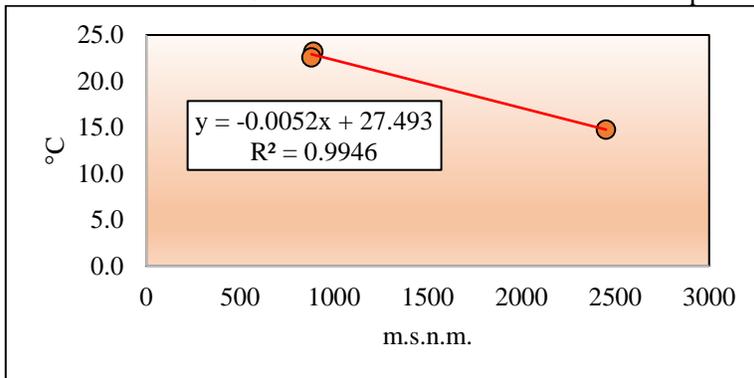
Gráfico N° 1 Relación Altitud vs Temperatura Mes Enero



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.4	23.1	-1%
Rioja	880	22.8	23.2	2%
Chachapoyas	2450	15.1	15.2	1%

Fuente: Elaboración propia

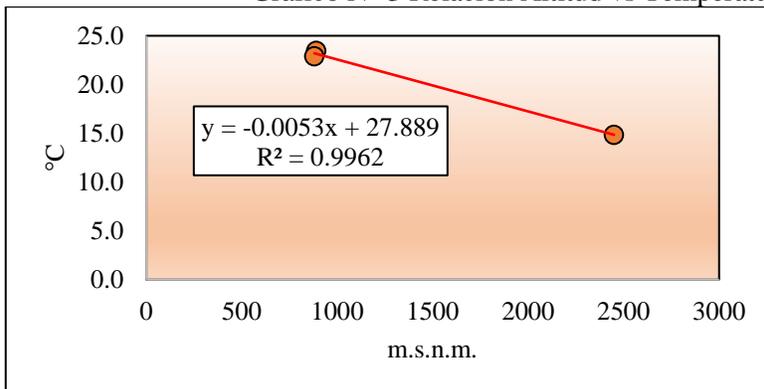
Gráfico N° 2 Relación Altitud vs Temperatura Mes Febrero



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.2	22.9	-2%
Rioja	880	22.6	22.9	2%
Chachapoyas	2450	14.8	14.8	0%

Fuente: Elaboración propia

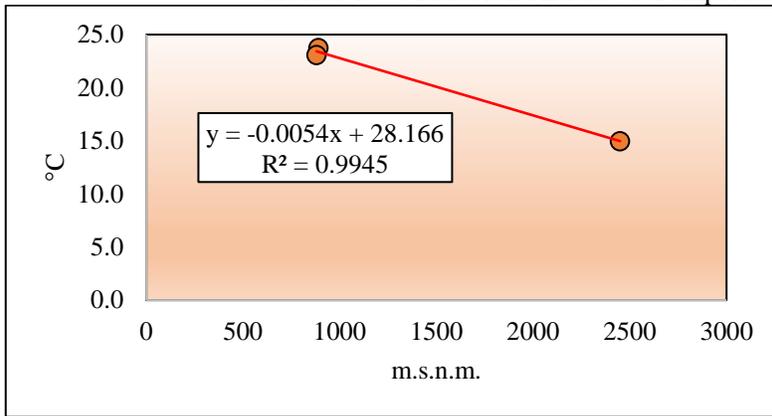
Gráfico N° 3 Relación Altitud vs Temperatura Mes Marzo



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.5	23.2	-1%
Rioja	880	22.9	23.2	1%
Chachapoyas	2450	14.9	14.9	0%

Fuente: Elaboración propia

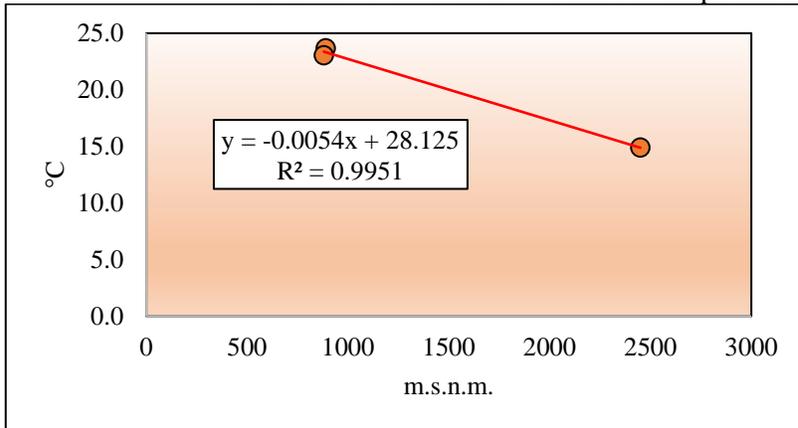
Gráfico N° 4 Relación Altitud vs Temperatura Mes Abril



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.7	23.4	-2%
Rioja	880	23.1	23.4	2%
Chachapoyas	2450	15.0	14.9	0%

Fuente: Elaboración propia

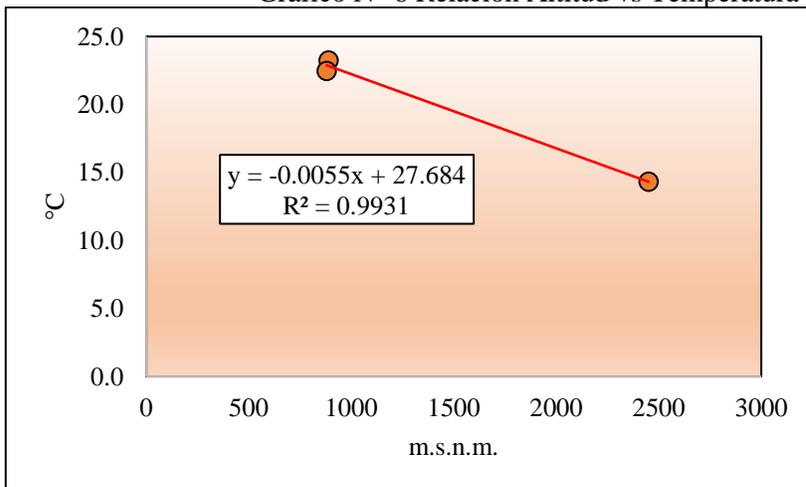
Gráfico N° 5 Relación Altitud vs Temperatura Mes Mayo



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.7	23.3	-1%
Rioja	880	23.0	23.4	2%
Chachapoyas	2450	14.9	14.9	0%

Fuente: Elaboración propia

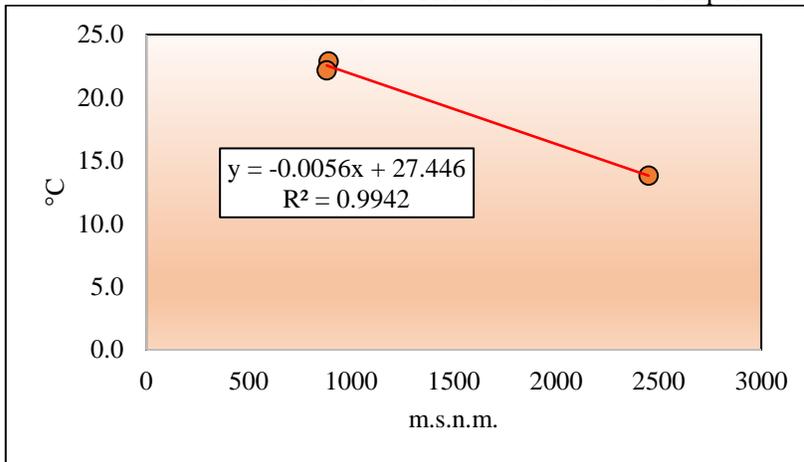
Gráfico N° 6 Relación Altitud vs Temperatura Mes Junio



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.2	22.8	-2%
Rioja	880	22.5	22.8	2%
Chachapoyas	2450	14.3	14.2	-1%

Fuente: Elaboración propia

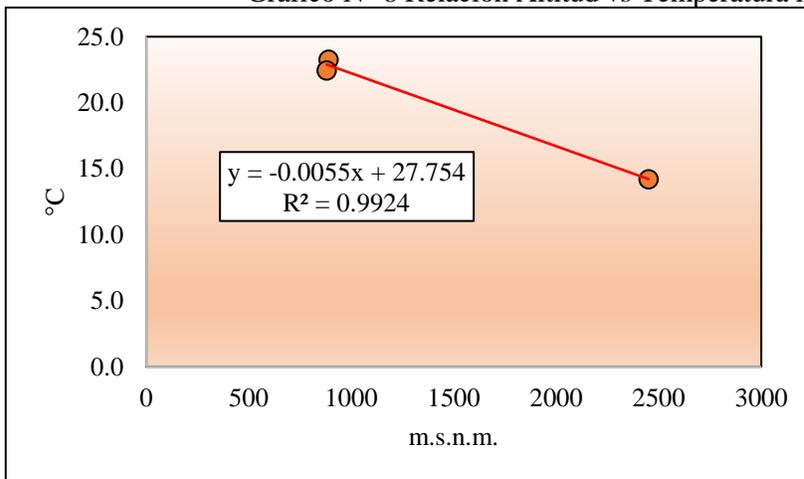
Gráfico N° 7 Relación Altitud vs Temperatura Mes Julio



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	22.9	22.5	-2%
Rioja	880	22.2	22.5	2%
Chachapoyas	2450	13.8	13.7	-1%

Fuente: Elaboración propia

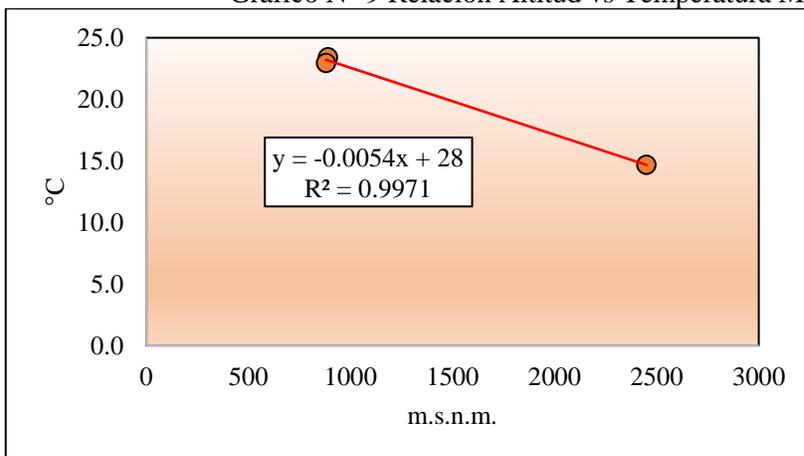
Gráfico N° 8 Relación Altitud vs Temperatura Mes Agosto



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.3	22.9	-2%
Rioja	880	22.5	22.9	2%
Chachapoyas	2450	14.2	14.3	0%

Fuente: Elaboración propia

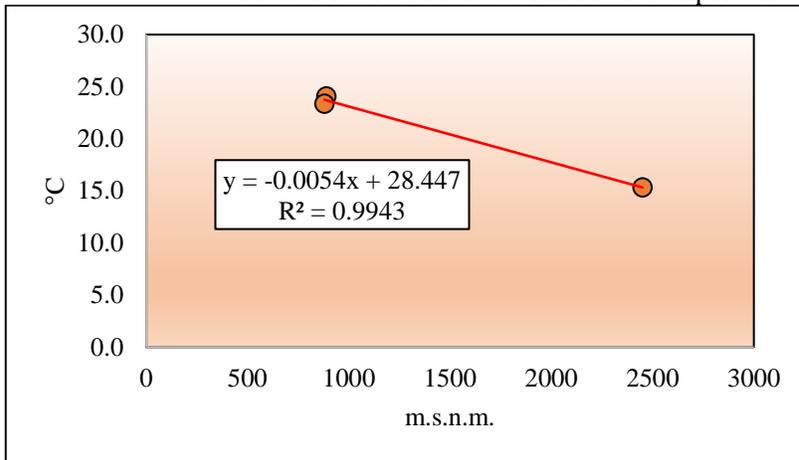
Gráfico N° 9 Relación Altitud vs Temperatura Mes Setiembre



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	23.4	23.2	-1%
Rioja	880	22.9	23.2	1%
Chachapoyas	2450	14.7	14.8	1%

Fuente: Elaboración propia

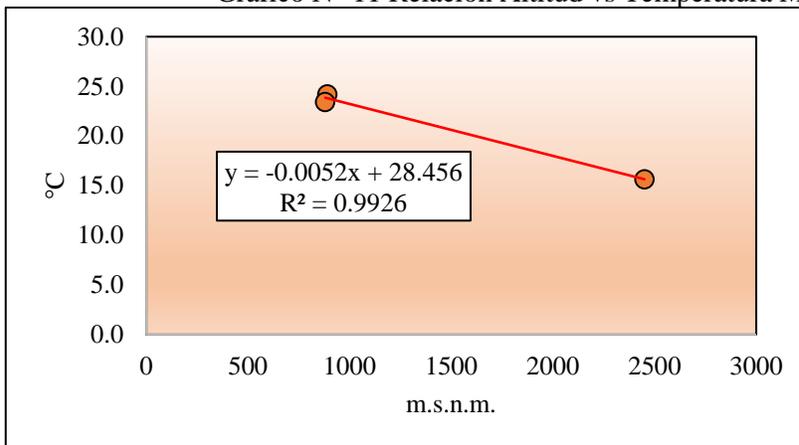
Gráfico N° 10 Relación Altitud vs Temperatura Mes Octubre



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	24.0	23.6	-2%
Rioja	880	23.4	23.7	1%
Chachapoyas	2450	15.3	15.2	-1%

Fuente: Elaboración propia

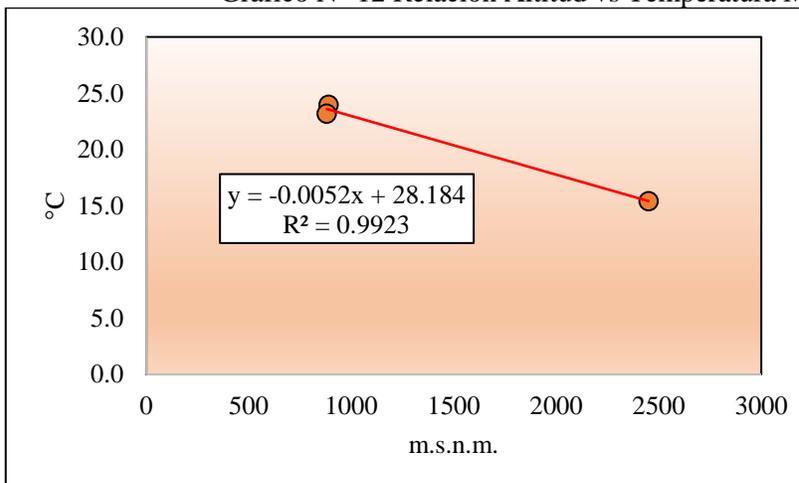
Gráfico N° 11 Relación Altitud vs Temperatura Mes Noviembre



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	24.2	23.8	-2%
Rioja	880	23.4	23.9	2%
Chachapoyas	2450	15.6	15.7	0%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 12 Relación Altitud vs Temperatura Mes Diciembre



Estación	m.s.n.m.	°C	°C gen	error
Naranjillo	890	24.0	23.6	-2%
Rioja	880	23.2	23.6	2%
Chachapoyas	2450	15.4	15.4	0%

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5

Modelos Hidrológicos Regionales de la investigación.

En el siguiente cuadro se presentan las ecuaciones que se determinaron en la investigación con la finalidad de determinar la precipitación, temperatura, evapotranspiración, y la escorrentía. Dichas ecuaciones pueden ser aplicadas en la subcuenca Yuracyacu, para otros estudios, sin embargo puede ajustarse con datos medidos en campo.

Tabla N° 1 Ecuaciones de las variables hidrológicas analizadas en la investigación

Tipo de regresión	Fórmula	Coefficiente Correlación (R)	Componentes de la Ecuación	Unidades	Variable Hidrológica analizada
Potencial	$PP = 31016 x (H)^{-0,447}$	0,9	PP: precipitación H: altitud	milímetros (mm) m.s.n.m.(m)	Precipitación
Lineal	$T = 27,947 - 0,0054 x (H)$	0,9	T: temperatura H: altitud	grados Celsius (°C) m.s.n.m.(m)	Temperatura
Potencial	$EVTP = 22578 x (H)^{-0,457}$	0,9	EVTP: evapotranspiración H: altitud	milímetros (mm) m.s.n.m.(m)	Evapotranspiración
Lineal	$E = 0,8411 x (PP) - 627,81$	0,9	PP: precipitación E: escorrentía	milímetros (mm) milímetros (mm)	Precipitación y Escorrentía
Potencial	$E = 8602 x (H)^{-0,425}$	0,9	E: escorrentía H: altitud	milímetros (mm) m.s.n.m.(m)	Escorrentía

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6

Registro Fotográfico

Se realizó el trabajo de campo en el mes de agosto del 2018 con la finalidad de levantar información del estado actual del bosque tropical en la Subcuenca Yuracyacu, así como realizar las consultas a las autoridades pertinentes de la Autoridad Local del Agua (ALA) del Altomayo, Junta de Usuarios Alto Mayo (JUCAM), y la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca.

El reconocimiento de la Subcuenca se llevó a cabo por la margen izquierda del río Yuracyacu, en el bosque de protección Alto mayo en el sector Alto Florida. La identificación de las especies que se mencionan, así como las zonas intervenidas por agricultores y deforestadas por tala y quema se realizó gracias al apoyo de los ingenieros Jalmer Lorenzo Huaman (Jefe de la División de Medio Ambiente) y Andi Montegro Alvarado (Jefe del área de recursos naturales, educación y calidad ambiental) de la Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca.

Esto fue posible gracias a la reunión previa con el Ing. Carlos Enrique Pretel Paredes (Gerente de Desarrollo Económico, Agropecuario y Medio Ambiente) del distrito de Nueva Cajamarca.



FOTOGRAFÍA 1: Se observa la formación del bosque tropical de la Subcuenca y la trocha que conduce hacia dicha cobertura. La toma se realizó en el cruce del jirón Piura y Bolognesi, ubicados en el distrito Nueva Cajamarca en las coordenadas 224357E, 9342747N y a una altitud de 867 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 2: Vista del río Yuracyacu en su recorrido aguas abajo hacia río Mayo. Las fotografías fueron tomadas en el Puente Yuracyacu, el cual cuenta con 80 m de longitud y un ancho de 12 m, en las coordenadas 224354E, 9343152N y a una altitud igual a 864 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 3: Ingreso al caserío de la Florida, en el distrito de Nueva Cajamarca, 241090E, 9342103N y a una altitud de 921 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 4: Ingreso al Predio Estatal del Sector Alto Florida y al Bosque de Protección Altomayo Sector La Florida, ubicado en las coordenadas 240138E, 9340389N a una altitud de 998 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 5: La especie Forestal de nombre común cedro, se identifico en el Bosque de Protección Altomayo Sector Florida, en las coordenadas 239653E , 9340047N a una altitud de 1043 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 6: Muestra la Iberna o Pastizal para ganado Vacuno, identificado a la margen izquierda del río Yuracyacu en las coordenadas 239336E y 9339984N a una altitud de 1071 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 7: Se identificó una filtración de agua que escurría hacia la parte baja de la subcuenca, debido a las precipitaciones producto de la alta evapotranspiración del bosque en las coordenadas 239132E 9340042N a una altitud de 1068 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 8: Especie de nombre común “Pashaco”, asociada a cultivos de café. Esta especie produce nódulos que sintetizan Nitrógeno. Se identificó en las coordenadas 239098E, 9339958N a una altitud igual a 1070 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 9: Se identificó a la especie de nombre común “moena”, la cual pertenece a la Fam. Laureaceae. Su madera es de alto valor comercial, muy similar al cedro. Las coordenadas correspondientes a la fotografía son 238839E, 9339839N a una altitud igual a 1121 m.s.n.m.



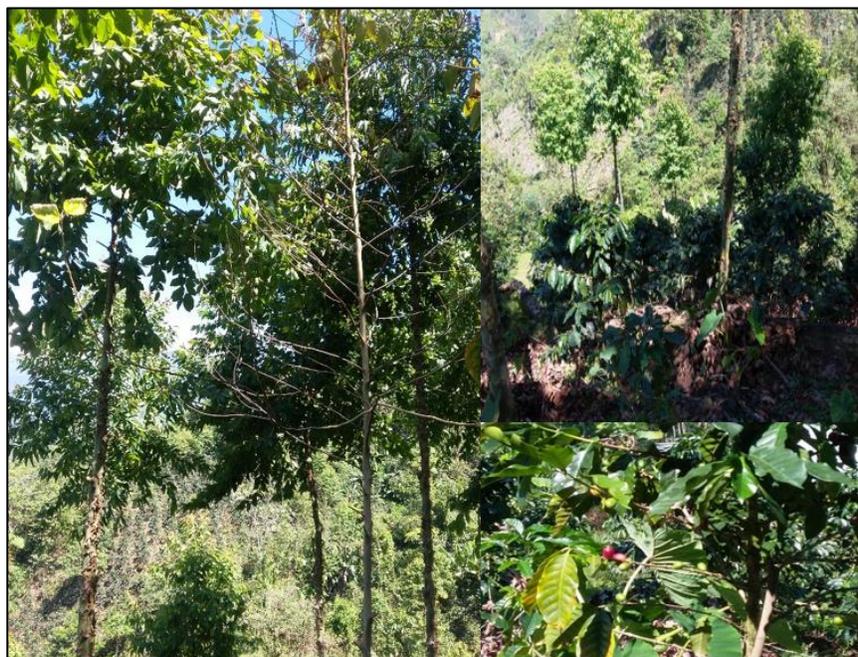
FOTOGRAFÍA 10: Deforestación de bosque secundario, según la fotografía se habría originado por la tala de los árboles. Una especie que se identificó tiene el nombre común de “cedro huasca”. Sus coordenadas son 238667E, 9339928N a una altitud igual a 1103 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 11: En las coordenadas 238660E, 9339927N a una altitud igual a 1108 m.s.n.m. se identificó a la especie común “shaina” que se utiliza para cercos en zonas agrícolas.



FOTOGRAFÍA 12: En las coordenadas 238207E, 9339721N a una altitud de 1207 m.s.n.m. se identificó deforestación de bosque primario por tala de la especie de nombre común “moena”.



FOTOGRAFÍA 13: Se identificó a la especie *eucalyptus torelliana*, la cual fue introducida en esta zona con la finalidad de siembra para el cultivo de café. Además se utiliza en la construcción civil. Las coordenadas son 237497E, 9339515N a una altitud igual a 1313 m.s.n.m.



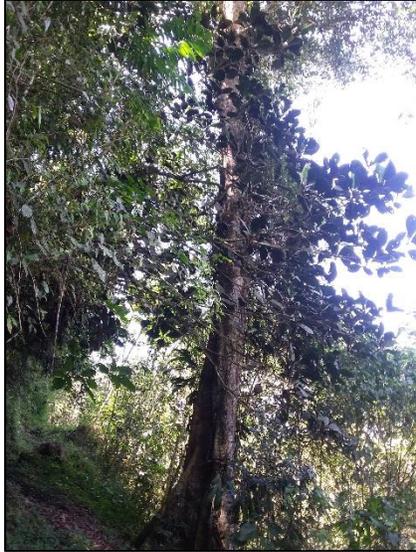
FOTOGRAFÍA 14: En el recorrido se identificó asociaciones de musgos y líquenes tapizando especies arbóreas, piedras y algunos tallos que de forma natural formaban colectores naturales de agua en las coordenadas 237898E, 9339421N a una altitud 1265 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 15: Se observa deslizamiento de suelo y rocas, debido a la deforestación e intensas precipitaciones, en las coordenadas 236707E, 9340306 y a una altitud igual a 1320 m.s.n.m.



FOTOGRAFÍA 16: En las coordenadas 237437E, 9339596N y a una altitud de 1330 m.s.n.m. se identificó una fuente de agua, el agua proviene de las partes altas de la cuenca debido a la precipitación y evapotranspiración de los árboles.



FOTOGRAFÍA 17: En las coordenadas 236769E, 9340178N a una altitud igual a 1321 m.s.n.m. se identificó a la especie de nombre común “guaba”, la cual se encontraba aproximadamente a 8 metros de fuente de agua identificada en la fotografía 16.



FOTOGRAFÍA 18: El sector Alto Florida del Bosque de protección Alto mayo y en la parte inferior el río Yuracyacu, se observan algunas zonas deforestadas y lugares de quema de bosque para terrenos con fines agrícolas, la fotografía corresponde a las coordenadas 234954E, 9340988N y a una altitud de 1363 m.s.n.m. Se puede descender hacia la parte baja del río para tener tomas más precisas, tal como se muestra en la siguiente fotografía.



FOTOGRAFÍA 19: Dichas zonas corresponden a las coordenadas anteriores, en la cual se observa zonas ya degradadas por la tala y quema de bosque tropical en el sector Alto Florida de la Subcuenca Yuracyacu.



FOTOGRAFÍA 20: Se observa el Bosque de protección Altomayo sector Alto Florida, el cual a la fecha presenta zonas deforestadas para agricultura (siembra de cultivos de café), además el río Yuracyacu, en la parte inferior de la fotografía. Las coordenadas son 236182E, 9340611N a una altitud de 1383 m.s.n.m.