

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA A PARTIR DEL
REGISTRO DE IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA

BORRADOR DE TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

RONALD WARNER YUPANQUI PERALTA

ASESOR:

ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - PERÚ

2016

OBTENCIÓN DEL NÚMERO DE CURVA A PARTIR DEL REGISTRO DE
IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA

RONALD WARNER YUPANQUI PERALTA

Presentado a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de
Ingeniería de Minas, Geología y Civil, de la UNSCH -en cumplimiento
parcial de los requerimientos para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

2016

Autor : Ronald Warner Yupanqui Peralta
Recomendado : M.Sc. Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez
Asesor de Tesis
Aceptado por : M.Sc. Ing. Carlos Prado Prado
Decano de la FIMGC

© 2015; Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), todos los derechos reservados. El autor de la investigación autoriza a la UNSCH - Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil (FIMGC), la reproducción de la tesis en su totalidad o en partes.

Dedico esta tesis a todos aquellos que participaron de forma directa e indirecta y me apoyaron moral y económicamente de forma incondicional.

Agradecimientos

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme y cumplir con el desarrollo de esta tesis para lograr el objetivo trazado de un futuro mejor y ser orgullo para ellos y de mis padres. Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes.

A la *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA* por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Quiero extender un sincero agradecimiento a mi asesor al Ing. Edmundo Canchari Gutierrez, por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplio conocimiento sobre lo estudiado en esta tesis. Su colaboración fue de gran ayuda. Le agradezco también por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Índice general	IV
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
Resumen	XI
Introducción	1
Capítulo I: Generalidades	3
1.1. Motivación para el desarrollo del tema de tesis	3
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.2.1. Antecedentes	4
1.2.2. Descripción de la realidad problemática	6
1.2.3. Formulación del problema	7
1.2.3.1. Problema Central	7
1.2.3.2. Problema Específicos	7
1.2.4. Objetivos	7
1.2.4.1. Objetivo General	7
1.2.4.2. Objetivos Específicos	8

1.2.5.	Variables e indicadores	8
1.2.6.	Justificación e importancia	8
1.2.7.	Metodología y Plan de trabajo	9
Capítulo II: Marco teórico		12
2.1.	Sistemas de información geográfica	12
2.1.1.	Aplicaciones de libre distribución	13
2.1.2.	Modelos digitales de terreno (MDT)	15
2.1.3.	Representación de archivos vectoriales	17
2.1.4.	Representación de archivos raster	17
2.1.5.	Valores Básicos que configuran el MDT	18
2.2.	Proyecto LANDSAT	19
2.2.1.	La constelación LANDSAT	20
2.2.2.	LANDSAT v8	20
2.2.3.	Objetivos del programa LANDSAT 8	22
2.3.	Índice de vegetación de diferencia normalizada	23
2.3.1.	¿Qué es un NDVI?	24
2.3.2.	Relación del NDVI y uso del suelo	25
2.4.	Método del CSC para abstracciones	27
2.4.1.	Abstracciones de las precipitaciones	28
2.4.2.	Número de curva	29
2.4.3.	Grupo hidrológico del suelo	30
Capítulo III: Desarrollo del trabajo de la tesis		32
3.1.	Materiales y equipos	32
3.2.	Descripción del área de estudio	33
3.3.	Población y muestra	33
3.3.1.	Punto de aforo	35
3.3.2.	Modelo digital del terreno	35
3.3.3.	Delimitación de la cuenca hidrográfica	37

3.3.4.	Propiedades morfométricas	39
3.3.4.1.	Propiedades de superficie	40
3.3.4.2.	Propiedades de la red hídrica	41
3.3.4.3.	Parámetros generados	41
3.3.5.	Análisis morfométrico de la cuenca con QGIS	42
3.3.5.1.	Localización y conjunto de mapas	42
3.3.5.2.	Importar ráster a la base de datos	44
3.3.5.3.	La cuenca delimitada	45
3.4.	Recolección de datos	46
3.4.1.	Proyecto LANDSAT	46
3.4.2.	Proceso de recolección de datos	49
3.5.	Análisis de datos	52
3.6.	Obtención del número de curva	53
3.6.1.	SAGA Gis	53
3.6.2.	QGIS	54
3.6.3.	Proyecto LANDSAT v8	54
3.6.3.1.	Instrumentos en LANDSAT v8	54
3.6.3.2.	Número de escenas por día	56
3.6.3.3.	Productos del nivel 1	57
3.6.3.4.	Distribuciones de las bandas en OLI y TIRS	57
3.6.3.5.	Convención de nomenclatura	58
3.6.4.	Proceso de obtención del índice de vegetación	59
3.6.5.	Determinación del NC	66
Capítulo IV: Análisis y discusión del resultado obtenido		68
4.1.	Resultados	68
4.2.	Análisis y discusión del resultado obtenido	70
4.2.1.	Evaluación de la variación del índice de vegetación	71
4.2.2.	Relación de los índices de vegetación y el uso de suelo	72
4.2.3.	Relación del uso del suelo y el número de curva	73

4.2.4. Constrastación de los resultados con otras metodologías	73
4.2.5. Implicancias de los resultados	74
Conclusiones y recomendaciones	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	76
5.3. Trabajos futuros	77
Referencia Bibliográfica	78
Anexos	83
Anexo A. Planos de la cuenca Huatatas	84

Índice de tablas

3.1. Propiedades de superficie de la cuenca	40
3.2. Propiedades relacionadas a la altitud de la cuenca	41
3.3. Propiedades relacionadas a la red hídrica	41
3.4. Tiempo de concentración	41
3.5. Relación de la intensidad del NDVI y el uso de suelo	66
3.6. Superficies obtenidas para cada nivel de NDVI	67
4.7. Variación del índice de vegetación en la zona de estudio	71
4.8. Usos de suelo y número de curva	73
4.9. Comparación del número de curva	73

Índice de figuras

1.1. Variables e indicadores identificados para el desarrollo de la tesis	8
2.2. Aplicación MapWindowGis	14
2.3. Programa Qgis	15
2.4. Esquema de una malla irregular de datos	16
2.5. Representación numérica y en escala de grises de una porción de un Modelo Digital del Terreno	17
2.6. Representación vectorial -contorno de una cuenca hidrográfica, por un polígono	18
2.7. Proyectos LANDSAT	20
2.8. Página principal del proyecto LANDSAT 8	21
2.9. Características técnicas LANDSAT v8	23
2.10. Grupo de bandas junto a su longitud de onda y la zona del espectro que abarcan	25
2.11. Clasificación NDVI	26
2.12. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2s$)	30
3.13. Ubicación de la cuenca en estudio	34
3.14. Punto de aforo para la delimitación de la cuenca hidrográfica (sistema de coordenadas UTM, Zona 18L, DATUM WGS 84)	35
3.15. Ventana principal del proyecto earthexplorer	36
3.16. Selección de bases de datos de modelos de elevación digital	37
3.17. Archivos requeridos para la cuenca en estudio	38

3.18. Cuenca Huatatas	39
3.19. Aplicación QGIS	40
3.20. Conexión QGIS y GRASS	43
3.21. Crear nueva fuente de datos	44
3.22. Cargar archivo principal a la base de datos	45
3.23. Sub cuencas generadas	46
3.24. Sub cuencas en la cuenca de interés	47
3.25. Descargar imágenes LANDSAT desde el proyecto Libra	48
3.26. Ubicación espacial de la zona de interés	49
3.27. Fotografías LANDSAT disponibles	50
3.28. Imagen seleccionada desde LANDSAT	51
3.29. Extensión de la superficie de la imagen seleccionada desde LANDSAT	52
3.30. Página principal proyecto LANDSAT	55
3.31. Especificaciones del producto LDCM a nivel 1	56
3.32. Distribuciones de las bandas en OLI y TIRS	57
3.33. Archivos OLI y TIRS para la zona en estudio	58
3.34. Convención de nomenclatura en productos de archivos comprimidos . .	60
3.35. Superficie de interés delimitada	61
3.36. Relación de las bandas 4 y 5 de LANDSAT v8 con la región de interés .	62
3.37. Archivos LANDSAT v8, bandas 4 y 5 delimitadas a la superficie en estudio	63
3.38. Ventana Vegetation Index (Slope Based)	64
3.39. Índice de vegetación en la superficie de interés	65
3.40. Índice de vegetación de una celda específica	65
4.41. Uso del suelo de la cuenca en estudio, para los niveles del NDVI desde -1 hasta 0.2	69
4.42. Uso del suelo de la cuenca en estudio, para los niveles del NDVI desde mayores a 0.2 hasta 0.4	70

Resumen

El desarrollo de la tesis tiene por finalidad obtener el número de curva en cuencas hidrográficas a partir de fotografías obtenidas mediante percepción remota, relacionando los índices de vegetación con los usos del suelo, tomando como herramientas aplicaciones de libre distribución y gratuitas, programas para la gestión de sistemas de información geográfica; con tal finalidad se utilizó las fotografías obtenidas por el proyecto LANDSAT v8, obteniendo el índice de vegetación a partir de las bandas 4 (visible rojo) y la banda 5 (infrarrojo de onda corta), los índices de vegetación indican en rango de valores los usos del suelo de una determinada región, disponiendo como resolución el tamaño de las celdas de los archivos raster, el proceso se desarrolló principalmente desde la aplicación Qgis Lyon 2.12-1 (distribución de código libre y gratuita), la aplicación se desarrolla en el proyecto de inversión pública, con registro número 181224, denominado *Construcción de Puente Carrozable de Interconexión Muyurina, Distrito de Tambillo - Huamanga - Ayacucho*, contrastando los resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis y lo establecido en el Expediente Técnico de dicho proyecto.

Palabras clave: NDVI, número de curva, índice de vegetación

Introducción

En una cuenca hidrográfica solo una parte de la precipitación total se convierte directamente en esorrentía, una gran parte de la precipitación se pierde por la capacidad de infiltración del suelo, se pierde por la evaporación del agua desde el suelo, la transpiración de las plantas, la retención de la precipitación por los bosques, los charcos, etc; en conjunto, la suma total de las precipitaciones retenidas reciben el nombre de *abstracciones*. Cuando se trabajan con superficies grandes como de las cuencas hidrográficas, evaluar por separado cada componente de las abstracciones es muy tedioso o imposible, razón por la cual existen modelos empíricos de uso generalizado para estimar el total de las abstracciones de una tormenta. El modelo más difundido para obtener las abstracciones es del *Soil Conservation Service (SCS)* del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (1960) un procedimiento muy simple para calcular las abstracciones, basado en consideraciones teóricas simples como resultado de más de 1000 cuencas experimentales tomadas en la década de los 50, el método fue adoptado inmediatamente por la comunidad internacional y se convirtió en un estándar para obtener las abstracciones en las cuencas hidrográficas; dada la importancia de este modelo es necesario determinar los usos de suelo y tipos de suelo de toda la cuenca hidrográfica, asignándole un número adimensional denominado *Número de Curva* (CN -Curve Number) dependiendo del uso y tipo de suelo de las cuencas hidrográficas, siendo un parámetro muy sensible y determinante para la obtención de la precipitación efectiva. Antes de la implementación de los sistemas de información geográfica la obtención del número de curva se realizaba por calibración (a prueba y error), disponiendo necesariamente de

los registros directos de las tormentas y su respectiva crecida o hidrograma en el punto de aforo correspondiente, siendo imposible su obtención sin contar con estos registros; con la disposición de fotografías satelitales de todo el mundo, los principios básicos de teledetección y los sistemas de información geográfica se dispone de una nueva alternativa para poder estimar el Número de Curva en cuencas hidrográficas sin importar su extensión, evitando de esta manera en muchos casos la inexistencia del registro de tormentas y su respectivo hidrograma en el punto de aforo. En la presente investigación se obtiene el número de curva a partir del registro de fotografías del Proyecto LANDSAT v8, mediante la identificación de los índices de vegetación y el tratamiento mediante sistemas de información geográfica (QGIS 2.12-1) y la contrastación de estos resultados con los determinados en estudios a Nivel de Expedientes Técnicos en proyectos locales.

El desarrollo de la tesis se encuentra dividido en correspondencia particular a cada etapa de la investigación: generalidades, fundamentación teórica, materiales y métodos, análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo I: Generalidades

En este capítulo se presenta las generalidades de la tesis: el planteamiento del problema, los objetivos e hipótesis, justificación para el desarrollo de la tesis y la metodología y plan de trabajo.

1.1. Motivación para el desarrollo del tema de tesis

Actualmente en el territorio nacional se vienen efectuando proyectos en distintos niveles sobre el aprovechamientos de los recursos hídricos o la protección contra sus crecidas, enmarcado en este medio, los expedientes técnicos de muchos proyectos no estiman adecuadamente el parámetro específico del número de curva, muchas veces asumen un valor referencial basado en su conocimiento de la zona o experiencia en trabajos previos. En la presente tesis se desarrollará los procedimientos para la obtención del número de curva en cuencas hidrográficas relacionándolos con los índices de vegetación, mediante la aplicación de sistemas de información geográfica.

1.2. Planteamiento del Problema

En el proceso de la determinación de las abstracciones de la precipitación (infiltración, evaporación, transpiración, retenciones en los charcos y bosques, etc.) que se produce en una cuenca, el modelo empírico creado por EL Servicio de Conservación de Recursos

Naturas (Natural Resources Conservation Service, NRCS, antiguo SCS) con la finalidad de medir este fenómeno natural, utiliza el término número de curva (curve number, CN) que expresa la relación existente entre la lluvia caída sobre una cuenca y la escorrentía recogida a la salida de la misma; este parámetro no es adecuadamente estimado en los proyectos de aprovechamiento hídrico que se formulan en nuestro medio, atribuyéndolo valores sin justificación alguna.

1.2.1. Antecedentes

Información disponible sobre la utilización de los índices de vegetación relacionando con los usos de suelo para la obtención del número de curva existe en amplitud mayor:

- El artículo titulado *Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina*, autor *Fernanda J. Gaspari y otros* -publicado el año 2007, concluyen que el procesamiento de imágenes con uso del Sistema de Información Geográfico (SIG) permitió determinar valores de NC de forma eficiente y a costos relativamente bajos. La obtención del mapa de zonificación del número de curva generaría la caracterización hidrológica y ambiental de la cuenca, conformando la interpretación de fenómenos y su distribución espacial. A su vez, si se pretendiese el ordenamiento sustentable de la cuenca, permitiría rápidamente actualizar sus valores según los cambios de usos de suelos que se produzcan en procura de ese objetivo.
- Otro artículo titulado *Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de Pampa Ondulada bajo labranza convencional y siembra directa*, escrito por *Oscar J. Santanatoghia* en el año 2008 y publicado en la revista *Ciencia del Suelo*, realiza un estudio integral del número de curva relacionando específicamente los usos de suelo y tipos de suelo, cuyo El objetivo del presente trabajo fue estudiar la aplicabilidad del método de Número de Curva (CN) del USDA para una micro-

cuenca agrícola de 300 ha de Pampa Ondulada, bajo labranza convencional (LC) durante el período 1994-1998 y posteriormente bajo siembra directa (SD) durante el período 1999-2004 a partir del análisis de lluvias y escurrimientos medidos in situ. El uso de la tierra consistió predominantemente en cultivos anuales, siendo la soja el cultivo más frecuente. De las 583 lluvias analizadas, tan solo el 11 % provocó escurrimientos registrables.

- El artículo titulado *Estimación del Valor del Número de Curva (CN) a Través de Imágenes Satelitales Landsat5-tm*, publicado por el Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNNE, el artículo establece que en la estimación del CN, a través de imágenes satelitales Landsat5-Tm, es importante destacar que, con relación a la estimación a partir de fotografías aéreas, las ventajas radican en el menor tiempo de trabajo, la actualización del material cada 16 días, el menor costo del mismo (cuya diferencia se amplía con el incremento de la superficie de estudio) y el menor número de personas que integran el equipo.
- El artículo titulado *Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica*, investigación publicada por la Universidad Politécnica de Valencia -Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA, cuyos autores *Montserrat Ferrer y otros*, efectúan el estudio que propone una metodología para la obtención de una manera automática del número de curva, parámetro hidrológico que utiliza el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU para el cálculo de la esorrentía. La metodología propuesta está basada en la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten trabajar con datos de muy diversa índole que se den en una misma localización geográfica. La generación de mapas a escala regional del número de curva se realiza mediante la aplicación de tablas de reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información de las que depende. La metodología propuesta se ha aplicado a la cuenca hidrográfica del Guadiana, que tiene una superficie aproximada de 60.000km^2 .

Y otros estudios en todo el mundo se esfuerzan en obtener una metodología adecuada para la obtención del número de curva a partir de fotografías satelitales, en la presente investigación se aplicarán los procedimientos actuales basado en los sistemas de información geográfica y fotografías satelitales para la clasificación de los índices de vegetación y la obtención del número de curva, aplicado a una cuenca de la región.

1.2.2. Descripción de la realidad problemática

En la hidrología superficial, específicamente en la determinación de la precipitación efectiva de una determinada tormenta es necesaria estimar las pérdidas de la precipitación total ocurridas en la cuenca hidrográfica, uno de los modelos para estimar esta pérdida, el modelo empírico creado por EL Servicio de Conservación de Recursos Naturas (Natural Resources Conservation Service, NRCS), relaciona la pérdida de la precipitación con las abstracciones existentes en la cuenca hidrográfica, estas abstracciones miden la pérdida total de la precipitación por todos los medios en la cuenca: infiltración, evaporación, transpiración, retenciones, etc. La misma que se encuentra relacionada con una determinada clasificación de tipo de suelo hidrológico y un uso de suelo al cual se le asigna un número de curva (n), que varía entre cero y cien, un número de curva $n = 100$ representa un suelo totalmente impermeable donde toda la precipitación se convierte en escorrentía, mientras que un $n = 0$ representa un suelo cuya abstracción es total, no existe escorrentía.

El inconveniente surge en obtener las superficies destinadas para cada tipo de uso de suelo en la cuenca hidrográfica delimitada, siendo esta siempre una superficie extensa efectuar un estudio adecuado y la identificación de la superficie de la cuenca asociada a cada tipo de uso de suelo requiere muchísimo tiempo, por esta razón, los estudios a nivel de expediente técnicos efectuados por las instituciones estatales, como los Gobiernos Regionales, Municipalidades; estiman a conveniencia del especialista estos parámetros, basado solamente en su experiencia empírica.

1.2.3. Formulación del problema

El problema se basa en la incertidumbre existente en la obtención del número de curva en los proyectos de aprovechamiento hídrico o en la formulación de proyectos para la protección contra la crecida u ocurrencia de eventos extremos.

1.2.3.1. Problema Central

¿De qué manera obtener el número de curva en cuencas hidrográficas a partir de registros de imágenes obtenidos mediante percepción remota?

1.2.3.2. Problema Específicos

1. ¿ Es posible utilizar una aplicación de libre distribución, con capacidades para el tratamiento de sistemas de información geográfica y obtener el número de curva?
2. ¿ Cómo obtener el registro de imágenes de LANDSAT v7 (LAND = Tierra y SAT = satélite)?
3. ¿ Es posible relacionar los índices de vegetación con los usos de suelo en una cuenca hidrográfica?

1.2.4. Objetivos

1.2.4.1. Objetivo General

Determinar el número de curva en cuencas hidrográficas a partir de registros obtenidos mediante percepción remota.

1.2.4.2. Objetivos Específicos

1. Utilizar una aplicación de libre distribución para el tratamiento de sistemas de información geográfica, para la obtención del número de curva.
2. Obtener el registro de imágenes de LANDSAT v7 (LAND = Tierra y SAT = satélite)
3. Asignar los usos de suelo relacionando con los índices de vegetación para una determinada cuenca hidrográfica.

1.2.5. Variables e indicadores

Las variables e indicadores identificadas para el desarrollo de la tesis se muestra en la figura 1.1.

VARIABLES	Directas	Directas	INDICADORES
	Usos del suelo	Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)	
	Indirectas	Indirectas	
	Número de curva	Valor asignado para cada tipo de suelo hidrológico y de uso de suelo	
	Intervinientes	Intervinientes	
	a) La cuenca hidrográfica	a) delimitación de la cuenca: superficie, perímetro, ubicación de la cuenca	
b) Variables climatológicas	b) Precipitación, temperatura, humedad, horas de sol, velocidad del viento		

Figura 1.1: Variables e indicadores identificados para el desarrollo de la tesis

1.2.6. Justificación e importancia

La justifica el desarrollo de la investigación por las siguientes razones: Desde el punto de vista técnico, la investigación se justifica porque implementa una metodología para la

obtención del número de curva en cuencas hidrográficas, obtenido a partir de fotografías satelitales y su tratamiento mediante sistemas de información geográfica y aplicaciones de libre distribución. Dispone de una relevancia social, porque en el Perú en los últimos años se impulsa el aprovechamiento de los recursos hídricos, mediante la construcción de proyectos mayores de irrigación, consumo de agua potable, caminos, puentes, etc. proyectos donde son fundamentales la obtención adecuada del número de curva para la determinación de caudales máximos en proyectos específicos; con la obtención de número de curva que represente adecuadamente la cuenca hidrográfica las obras civiles concerniente a las estructuras hidráulicas se encontrarán adecuadamente diseñados y los presupuestos destinados para estos fines se encontrarán plenamente aprovechados.

Por qué se efectúa la investigación: porque es necesaria, existe la necesidad de encontrar un procedimiento para la adecuada estimación del número de curva en cuencas hidrográficas, y así evitar las suposiciones basadas en experiencias propias de cada especialista en la hidrología.

Para qué se realiza la investigación: la finalidad del desarrollo de la tesis es la obtención del número de curva ponderado para una cuenca hidrográfica, basada en la relación existente entre los índices de vegetación de diferencia normalizada y los usos de suelo.

Beneficios que se derivan: estimación de un parámetro importante en el proceso de la transformación de la lluvia en escorrentía, el número de curva, mediante el uso de fotografías satelitales obtenidas por el proyecto LANDSAT v8 y el uso de programas para el análisis de sistemas de información geográfica de libre distribución, código abierto y multi-plataforma.

1.2.7. Metodología y Plan de trabajo

La tesis, teniendo en cuenta el enfoque de investigación, se encuentra clasificada dentro del enfoque cuantitativo. En el plan de trabajo se tiene el siguiente procedimiento: se

inicia con la documentación de la fundamentación teórica de los temas requeridos para el desarrollo de la tesis, seguidamente se desarrolla la tesis (correspondiente a los materiales y métodos), como aplicación para el tratamiento de los sistemas de información geográfica se utilizará el *QGIS 2.10*, que es una aplicación de libre distribución con disposición de sus complementos para requerimientos específicos como son la obtención de los índices de vegetación; el registro de imágenes se obtienen desde el proyecto LANDSAT v8 y mediante los procedimientos adecuados se obtendrán como resultados los números de curva, estos resultados serán contratados con los obtenidos en proyectos específicos.

Población: las unidades hidrográficas del Perú.

Unidad muestral: la sub cuenca asociada tomando como punto de aforo el puente inter-conexión Muyurina - Ayacucho, río Huatatas.

Unidad de análisis: el uso de suelo de la cuenca específica establecida.

Tipo de investigación: corresponde a un enfoque de investigación cuantitativo.

Nivel de investigación: el alcance de la investigación queda establecida como descriptiva, es descriptiva, porque caracteriza las variables identificadas en la investigación: los usos de suelo, índices de vegetación de diferencia normalizada y los números de curva.

Periodo de análisis: los registros necesarios corresponde al año 2015.

Fuentes de información: los modelos digitales del terreno se obtienen desde la base de datos del proyecto *earthexplorer* y las fotografías satelitales desde el proyecto LANDSAT v8, como fuente principal se toma este último, desde su página principal <http://landsat.usgs.gov/>

Instrumentos utilizados: en este caso, los datos requeridos, principalmente las fotografías satelitales y los modelos digitales del terreno, se obtienen para su uso

inmediato.

Procesamiento de datos: se procesan a nivel de sistemas de información geográfica, utilizando aplicaciones de libre distribución, como son: QGis Lyon 2.12.1, GRASS GIS 6.4.3 y SAGA GIS 2.1.2.

Capítulo II: Marco teórico

En el presente capítulo se establece la fundamentación teórica requerida para el desarrollo de la tesis, se encuentra dividido en secciones concerniente a los sistemas de información geográfica, el proyecto LANDSAT, los índices de vegetación y por último el número de curva.

2.1. Sistemas de información geográfica

Existen diferentes definiciones [11, 12, 46] para determinar los sistemas de información geográfica:

- Desde la página principal¹ de ESRI - España: Un sistema de información geográfica es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información.
- Un sistema informático [42] para la gestión de datos espaciales.
- Un sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema [39] de información que está diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas.
- Otra definición tomada desde LANGLERUBEN² Un Sistema de Información

¹La página desde donde se transcribe la definición es <http://www.esri.es/es/formacion/formacion-esri-espana/que-es-un-sig/>

²Se tomó desde la siguiente dirección <https://langleruben.wordpress.com>

Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés, Geographic Information System) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión.

Se entiende³ por *Sistema de Información* la conjunción de información con herramientas informáticas, es decir, con programas informáticos o software. Si el objeto concreto de un sistema de información (información y software) es la obtención de datos relacionados con el espacio físico, entonces estaremos hablando de un Sistema de Información Geográfica o SIG (GIS en su acrónimo inglés, Geographic Information Systems).

Así pues, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas⁴ facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones.

2.1.1. Aplicaciones de libre distribución

Algunos programas de libre distribución [6, 7] para la gestión de los sistemas de información geográfica son los siguientes:

³Esta sección ha sido tomado desde <http://sig.cea.es/SIG>

⁴Definido en los textos [48, 1, 2, 3, 4]

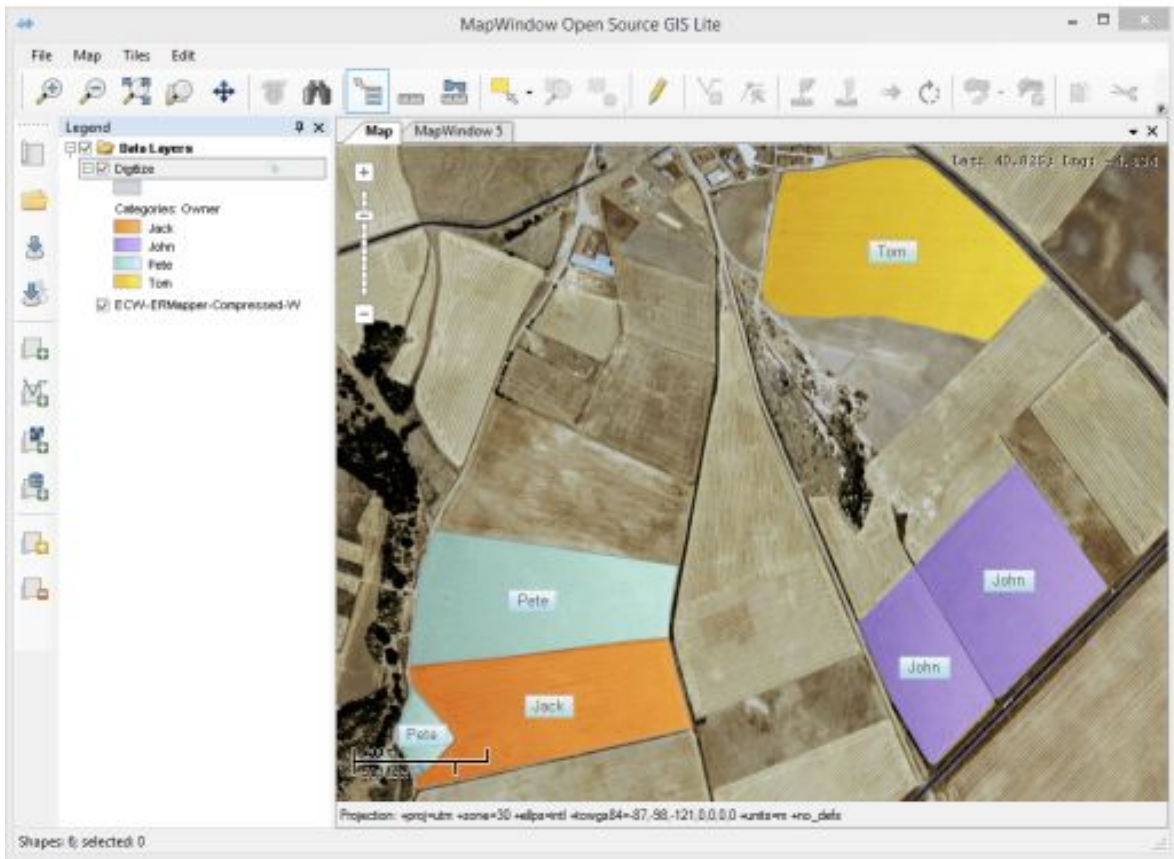


Figura 2.2: Aplicación MapWindowGis

- Qgis, sistema de información geográfica⁵ libre y de código abierto.
- GvSig, es un proyecto⁶ de desarrollo de software para Sistemas de Información Geográfica basado en software libre, La mayor red de profesionales en geomática libre. Un nuevo modelo de desarrollo basado en el conocimiento compartido, la solidaridad y la cooperación.
- GRASS (acrónimo inglés de Geographic Resources Analysis Support System) es un software SIG (Sistema de Información Geográfica) bajo licencia GPL (software libre). Puede soportar información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesado digital de imágenes.
- SAGA (acrónimo inglés de System for Automated Geoscientific Analyses o Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos en español) es un software híbrido

⁵Página oficial <http://www.qgis.org/en/site/>

⁶Página oficial <http://www.gvsig.com/es>

de información geográfica (véase Sistemas de Información Geográfica).

- MapWindowGis, El proyecto MapWindow incluye un sistema de información geográfica libre y de código abierto.

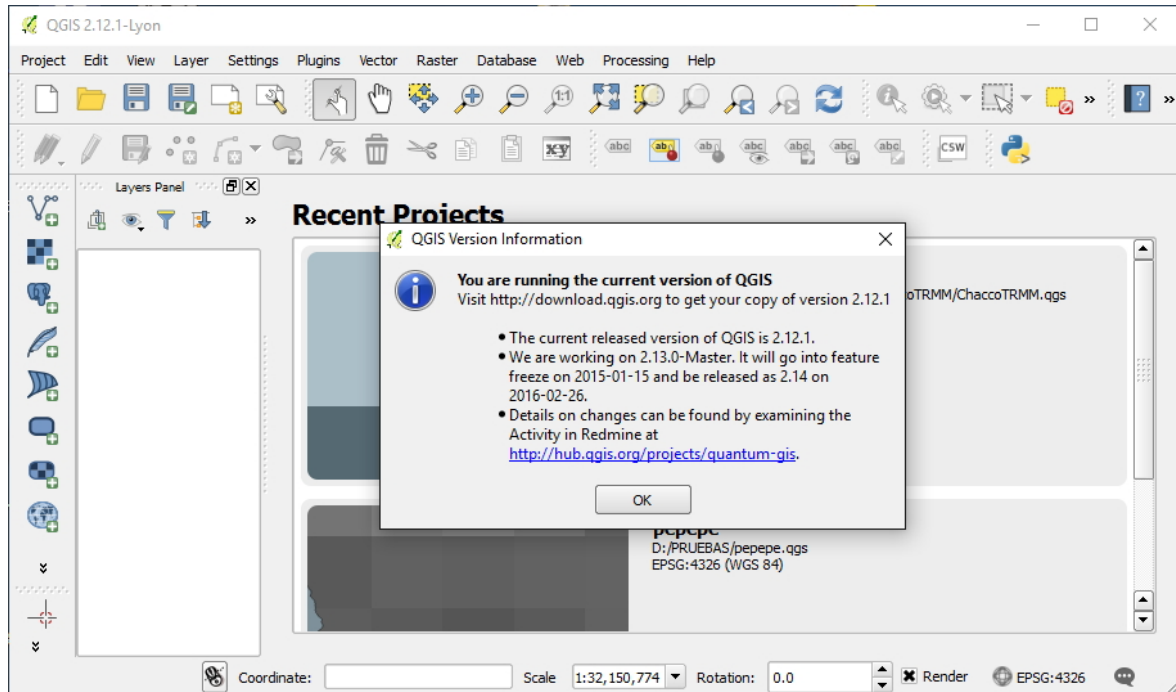


Figura 2.3: Programa Qgis

2.1.2. Modelos digitales de terreno (MDT)

Un Modelo Digital del Terreno⁷ (MDT) es la representación simplificada, en un formato accesible a los ordenadores, de la topografía del terreno. Para ello se considera que las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se refieren a los ejes de un espacio octogonal plano (X e Y), y la tercera mide la altura (Z). Los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), Modelos del Terreno (MDT) y los Modelos de Superficie (MDS) son productos finales de alta precisión que pueden ser útiles en estudios de diferentes ámbitos; tales como ingeniería civil, medio ambiente, cartografía, telecomunicaciones, forestales, etc.

Los tipos⁸ de Modelos Digitales del Terreno, pueden desde esta perspectiva definirse

⁷Referencias [8, 9, 10, 13, 14]

⁸Tomado desde la referencia [40, 15, 16, 17, 18]

los siguientes enfoques o concepciones de los datos según su modo de almacenamiento, los cuales, como se dijo, no sólo son aplicables para el caso de recoger elevaciones - este es el caso del MDT, sino cualquier otra variable espacial que pueda dar lugar a la elaboración de algún tipo de cartografía:

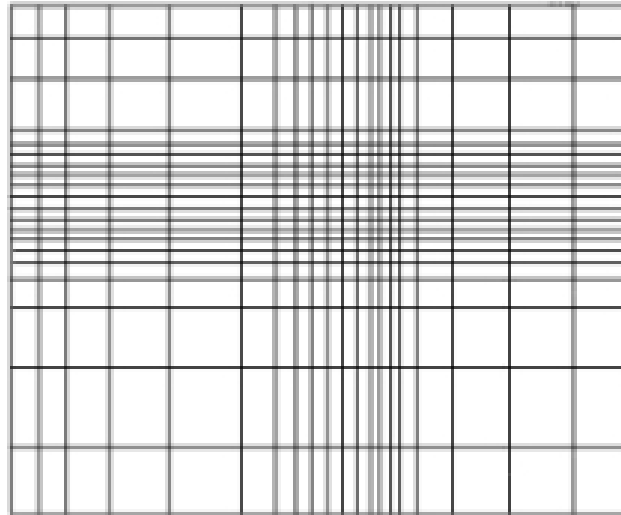


Figura 2.4: Esquema de una malla irregular de datos

Enfoque Vectorial: El enfoque vectorial se basa [16, 19, 20] en el almacenamiento de los datos mediante entidades independientes, cada una de las cuales posee unas características propias que lo definen, y siendo su conjunto el que conforma la estructura espacial de las propiedades asociadas en el área tratada. Las entidades consideradas son por norma general de tipo geométrico, en particular puntos, rectas y polígonos en el caso bidimensional habitual. La estructura vectorial permite una gran flexibilidad en el manejo de la información, en cuanto que ésta puede tener distintas formas y características con menores limitaciones que en el caso raster que se verá a continuación, lo que la hace ideal para almacenar información temática, como la empleada frecuentemente en aplicaciones SIG.

Enfoque Raster: La filosofía de almacenamiento raster [16, 21, 22, 23] guarda la información de modo regular en unidades predefinidas. En este caso la superficie queda dividida en elementos regulares a cada uno de los cuales se le asocia un valor correspondiente a la variable estudiada en dicho elemento. En el caso mas

frecuente, éstos suelen ser generalmente celdas [37, 34] de tipo cuadrado, lo que permite asimilar la estructura con elementos cuadrados a una matriz ordinaria sobre la cual efectuar los cálculos pertinentes. Este hecho da lugar a un análisis más sencillo y potente de las variaciones de las propiedades en el espacio, a la par que más intuitivo y simple

2153.00	2077.00	2008.00	1959.00	1920.00	1871.00	1836.00	1818.00
2125.00	2030.00	1983.00	1920.00	1890.00	1858.00	1825.00	1800.00
2128.00	2032.00	1985.00	1913.00	1885.00	1859.00	1817.00	1799.00
2135.00	2067.00	2001.00	1938.00	1898.00	1870.00	1843.00	1840.00

Figura 2.5: Representación numérica y en escala de grises de una porción de un Modelo Digital del Terreno

2.1.3. Representación de archivos vectoriales

Los tipos de representación vectorial más frecuentes⁹ para el tratamiento de la información son (mediante sistemas de información geográfica):

- Representación vectorial [44, 42] mediante contornos (curvas de nivel)
- Representación vectorial [40, 39] mediante redes de triángulos irregulares (TIN).
La representación vectorial mediante redes de triángulos irregulares (Triangulated Irregular Network en inglés, TIN abreviadamente), representa una alternativa moderna y notablemente eficiente para el almacenamiento de datos de elevaciones.

2.1.4. Representación de archivos raster

Son las siguientes:

⁹Tomado de las referencias [24, 25, 26, 27, 28, 29]

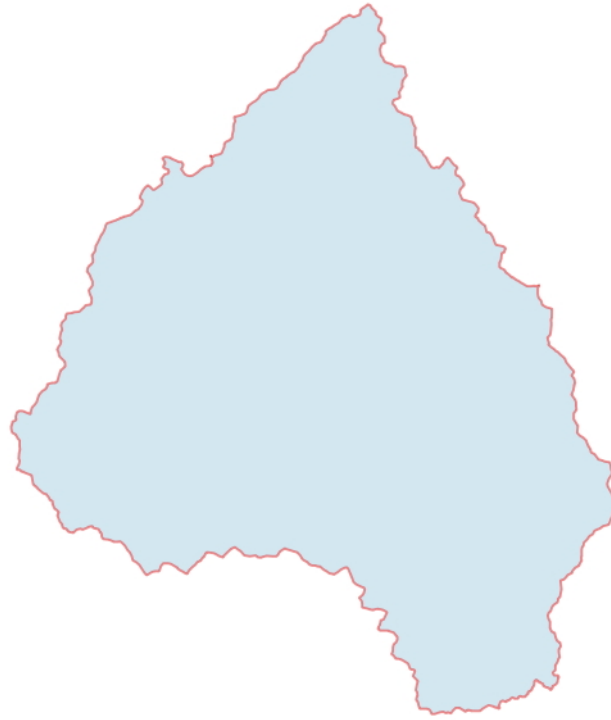


Figura 2.6: Representación vectorial -contorno de una cuenca hidrográfica, por un polígono

- Representación raster [34, 40] mediante celdas de resolución variable, archivos que se caracterizan por determinar las dimensiones de cada celda por distintas resoluciones (distintos tamaños), mostrada en la figura 2.4.
- Representación Raster [52, 51] mediante celdas de resolución constante, es lo más habitual, la resolución de cada celda es de la misma dimensión para toda la base de datos correspondiente, mostrada en la figura 2.5.

2.1.5. Valores Básicos que configuran el MDT

Son cinco los elementos principales [16, 30] que resultan necesarios para una definición completa de la entidad anterior, a saber:

1. Una referenciación espacial de las celdas de acuerdo con algún sistema habitual de coordenadas.
2. Una definición de la orientación de la zona estudiada, de cara a conocer la varia-

ción de dichas coordenadas a lo largo de las diversas celdas de la malla.

3. Una dimensión dada de las celdas.
4. Una matriz con los valores de altitud correspondientes a las celdas.
5. Un valor arbitrario para las celdas cuya información se desconoce.

2.2. Proyecto LANDSAT

La constelación de satélites LANDSAT¹⁰ (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

¹⁰Esta sección está transcrita desde <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>

2.2.1. La constelación LANDSAT

Actualmente sólo se encuentran activos el LANDSAT 5 y 7, que son administrados por la NASA (National Space and Space Administration), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), la figura 2.7 muestra la evolución de la renovación del proyecto LANDSAT en el tiempo.

	SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	FIN DE OPERACIÓN
Satélites activos LANDSAT-5 LANDSAT-7	ERTS1	23/julio/1972	05/enero/1978
	LANDSAT 2	22/enero/1975	27/julio/1983
	LANDSAT 3	05/marzo/1978	07/septiembre/1993
	LANDSAT 4	16/junio/1982	1983
	LANDSAT 5	01/marzo/1984	EN OPERACIÓN
	LANDSAT 6	03/octubre/1993	03/octubre/1993
	LANDSAT 7	1998	EN OPERACIÓN

Figura 2.7: Proyectos LANDSAT

2.2.2. LANDSAT v8

En la actualidad el programa¹¹ se encuentra en su octava versión denominada: *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multispectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores. Tras el lanzamiento, el satélite LDCM será rebautizado como *Landsat 8*. Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos:

¹¹Esta sección fue tomado desde la referencia [46]

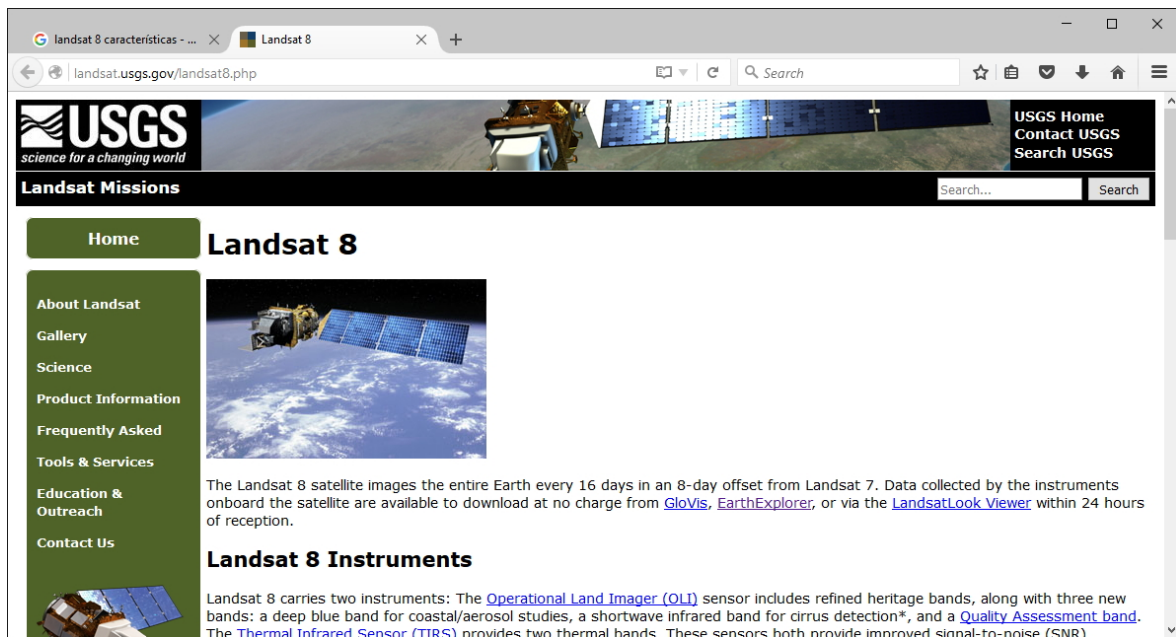


Figura 2.8: Página principal del proyecto LANDSAT 8

- El observatorio; el cual consta de una plataforma con capacidad [12] de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace - Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md. Además, el LDCM seguirá la misma secuencia de trayectoria (también conocida como paths o rutas de acceso) como sus antecesores Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7. Esto permitirá que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas. El satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres.

- El segundo segmento es el sistema [11] terrestre, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y

todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos.

La plataforma LDCM, fue construida [48] por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva suficiente combustible para 10 años de operaciones. La nave orbitará de norte a al sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 a.m., hora local, con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra (USGS. 2013).

las características generales del satélite LANDSAT-8, lanzado al espacio en agosto de 2012, por sus 11 bandas y amplias posibilidades de combinación lo que permitirá un mayor aprovechamiento. Se incluyen de manera general sus características técnicas, mostrada en la figura 2.9.

2.2.3. Objetivos del programa LANDSAT 8

El nuevo programa de la plataforma LDCM tiene fundamentalmente tres objetivos:

- Recopilar y archivar datos bandas multiespectrales y térmicas de cada superficie de la tierra, cada temporada de cada año en una resolución que puede distinguir un área del tamaño de un campo de béisbol.
- Asegurar de que los datos de LDCM sean consistentes con los datos de las misiones Landsat anteriores, en términos de la geometría de adquisición, calibración, características de cobertura, espectral y espacial características, calidad del producto, la producción y la disponibilidad de los datos para permitir estudios de cobertura de la tierra y uso de la tierra cambian en periodos multitemporales.
- Distribuir productos de datos LDCM estándar sobre una base no discriminatoria y sin costo a los usuarios.

Atributo	Descripción
Tipo de Producto	Imagen L1T (Precision, Terrain Corrected) - ortorrectificada
Formato de Imagen	Archivo GeoTIFF Metadato en formato texto
Espaciamiento de pixel	15 m Pancromático 30 m Multiespectral
Tamaño de Producto	185 x 185 km
Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP)
Datum Horizontal	WGS84
Proyección Cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)
Bandas Espectrales	11 bandas: Aerosol costero (Coastal Aerosol) 430 – 450 nm Azul (Blue) 450 – 510 nm Verde (Green) 530 – 590 nm Rojo (Red) 640 – 670 nm Infrarrojo cercano (NIR) 850 – 880 nm SWIR 1 (SWIR 1) 1570 – 1650 nm SWIR 2 (SWIR 2) 2110 – 2290 nm Pancromático (Pan) 500 – 680 nm Cirrus (Cirrus) 1360 – 1380 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 1 10600 – 11190 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 2 11500 – 12510 nm
Resolución Radiométrica	12 bits

Figura 2.9: Características técnicas LANDSAT v8

2.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada

El Índice de vegetación [35, 43, 41] de diferencia normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Los índices de vegetación¹² son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc. Se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales. De entre todos, el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el índice de vegetación más utilizado.

2.3.1. ¿Qué es un NDVI?

El Índice de Vegetación [54] de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Para el cálculo de los índices de vegetación es necesaria la información que se encuentra en las bandas roja e infrarroja de ese espectro electromagnético.

El cálculo del NDVI se hace mediante la ecuación 2.1.

$$NDVI = \frac{NIR - VIR}{NIR + VIR} \quad (2.1)$$

Donde: NIR es la reflectancia de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y VIR es la reflectancia de la banda 3 (visible – rojo) (coincide con la clasificación de las bandas del proyecto LANDSAT V7). Landsat 7 es el séptimo de un grupo de satélites lanzados por Estados Unidos en el programa LandSat el 15 de abril de 1999. Su objetivo principal es actualizar la base de datos de imágenes de todo el planeta Tierra sin nubes. En

¹²Tomado desde <http://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-ggis>

la figura 2.10 se muestra el grupo de bandas junto a su longitud de onda y la zona del espectro que abarcan.

Banda	Longitud de onda	Zona del espectro
1	0,45-0,52 μm	luz visible, azul
2	0,52-0,60 μm	luz visible, verde
3	0,63-0,69 μm	luz visible, roja
4	0,76-0,90 μm	<i>infrarrojo cercano</i>
5	1,55-1,75 μm	<i>infrarrojo medio</i>
6	10,4 -12,5 μm	<i>infrarrojo térmico</i>
7	2,08 -2,35 μm	<i>infrarrojo medio</i>

Figura 2.10: Grupo de bandas junto a su longitud de onda y la zona del espectro que abarcan

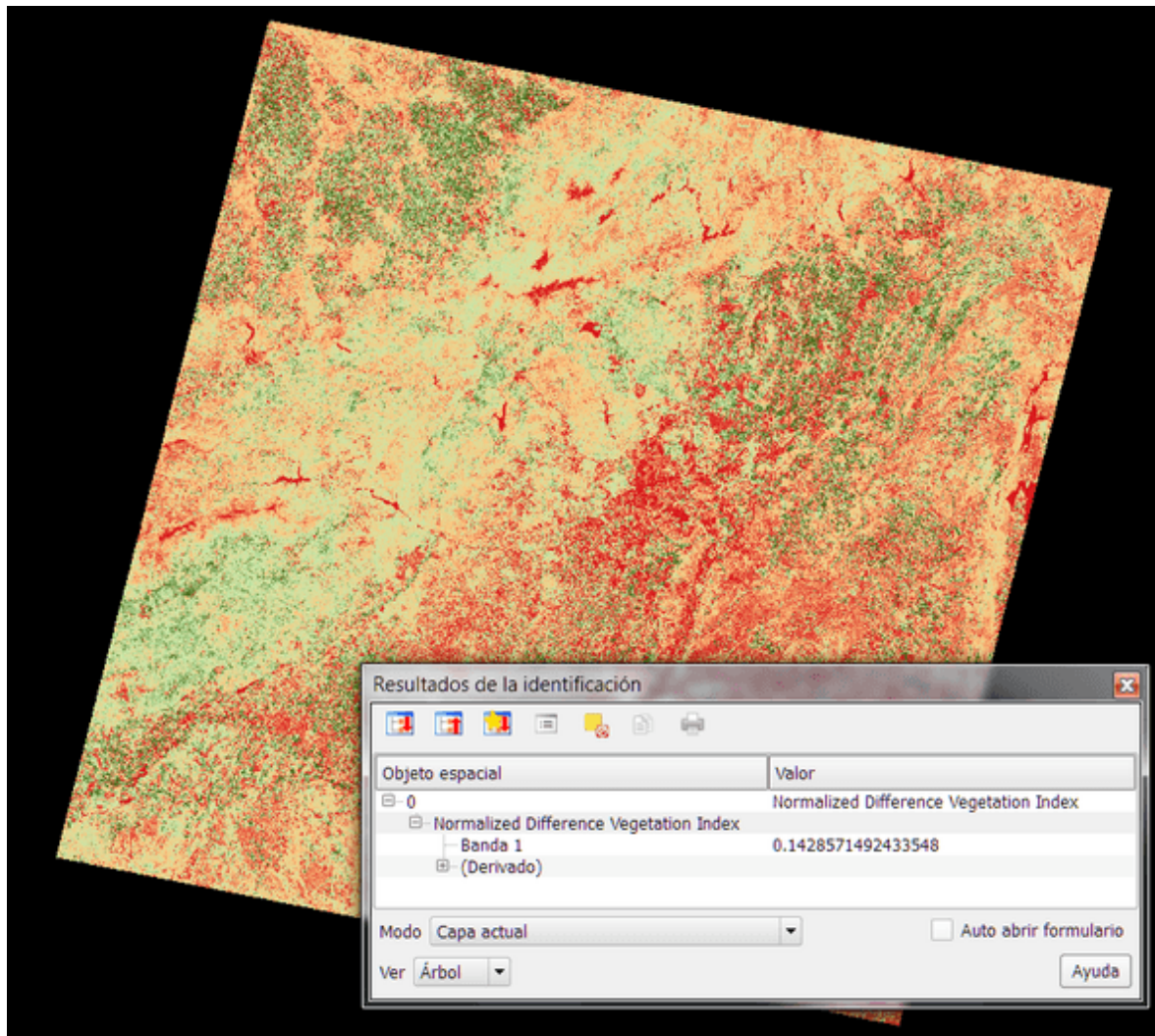
2.3.2. Relación del NDVI y uso del suelo

Cuando un árbol es vigoroso, refleja mucha radiación¹³ solar en el infrarrojo cercano y poca en el rojo, y en consecuencia, se obtiene un NDVI elevado. En cambio, cuando un árbol está enfermo, pasa lo contrario. Por ejemplo, si un árbol vigoroso refleja un 50 % en el infrarrojo cercano y un 8 % en el rojo, el NDVI será 0.72, siguiendo la relación establecida. En cambio, si un árbol enfermo refleja un 40 % en el infrarrojo cercano y un 20 % en el rojo, el NDVI será 0.33. Por tanto, teniendo en cuenta que el NDVI siempre resulta en un número entre -1 y 1, debido a la forma en que se calcula, se establece que un $NDVI < 0$ se corresponde con cubiertas artificiales o zonas de agua,

¹³Tomado desde <http://www.icc.cat/esl/Home-ICC/Mapas-escolares-y-divulgacion/Preguntas-frecuentes/Que-es-NDVI>

un NDVI entre 0 y 0.3 se corresponde con suelo sin cubierta, y un NDVI elevado se corresponde con zonas de vegetación. Por tanto, se establece la relación siguiente entre el NDVI y el uso del suelo:

Figura 2.11: Clasificación NDVI



Fuente: <http://mappinggis.com/>

- Las zonas más oscuras ($NDVI < 0$), correspondientes a agua o cubiertas artificiales, de color rojo.
- Las zonas oscuras ($0 < NDVI < 0.2$), correspondientes a suelo desnudo o vegetación muerta, de color naranja.
- Las zonas ni oscuras ni claras ($0.2 < NDVI < 0.4$), correspondientes a vegetación dispersa o poco vigorosa, de color amarillo.

- Las zonas claras ($0.4 < NDVI < 0.6$), correspondientes a vegetación abundante y vigorosa, de color verde claro, y
- Las zonas más claras ($NDVI > 0.6$), correspondientes a vegetación muy densa y vigorosa, de color verde oscuro.

El NDVI es una variable que permite observar la presencia de vegetación y evaluar el estado de desarrollo de la misma mediante la observación con sensores remotos de la intensidad de radiación reflejada o emitida por esta misma en ciertas bandas del espectro electromagnético. La forma de estimar matemáticamente el NDVI se encuentra en la ecuación 1. Este índice puede tomar valores que van desde -1 a 1, siendo los cercanos a 1. Los que nos muestran una vegetación vigorosa, los < 0.1 baja densidad de vegetación y los menores a 0 la ausencia de masa vegetal.

2.4. Método del CSC para abstracciones

El Soil Conservation Service (SCS) desarrolló [31, 30] en la década de los setenta (1970) un método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. Se observaron curvas al representarse en gráficos la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (P_e). Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva CN , tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y de agua $CN = 100$; para superficies naturales $CN < 100$ y para superficie sin escurrimiento $CN = 0$.

Los números de curva se aplican [33] para condiciones antecedentes de humedad normales (Condición II); para condiciones secas (Condición I) o condiciones húmedas (Condición III), se calculan los números de curva equivalentes. Los valores de CN fueron tabulados con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra.

2.4.1. Abstracciones de las precipitaciones

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa Pe es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca Fa es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación Ia (abstracción inicial antes del encharcamiento) para lo cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - Ia$.

La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia} \quad (2.2)$$

Del principio de continuidad:

$$P = Pe + Ia + Fa \quad (2.3)$$

Combinando las ecuaciones anteriores y resolviendo para Pe se encuentra:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (2.4)$$

La cual es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método SCS

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica.

$$Ia = 0.2S \quad (2.5)$$

Con base en esto:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2.6)$$

El uso de esta metodología exige la determinación del valor respectivo del CN (número adimensional de curva o curva numero), correspondiente al área específica en estudio, valor que debe ser obtenido mediante procesos de calibración.

2.4.2. Número de curva

La calibración del parámetro CN se realiza con información de campo, de algunos eventos en el que se disponga de datos de precipitación y caudales resultantes; luego se desarrolla el modelo hasta ajustar el hidrograma calculado con el observado en el campo. Es un proceso de prueba error en donde se ajusta el parámetro (CN) hasta obtener coincidencias entre ambos hidrogramas (hidrograma registrado y obtenidos).

El número de curva y S (retención potencial máxima) se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2.7)$$

Donde S está expresado en pulgadas. Los números de curvas se aplican para condiciones para condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II). Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA	GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Área abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos Industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Figura 2.12: Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2s$)

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (2.8)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (2.9)$$

2.4.3. Grupo hidrológico del suelo

Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos: Grupo A:

Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados. Grupo B: Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa. Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla. Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Los valores de CN para varios tipos de uso de la tierra en estos tipos de suelos se muestran en la Tabla 2.12. Para una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto.

Capítulo III: Desarrollo del trabajo de la tesis

En el presente capítulo se desarrolla lo correspondiente a los materiales y métodos de la tesis, inicia con la descripción del proyecto de inversión pública materia de aplicación de la tesis, la caracterización morfométrica de la cuenca y la obtención del número de curva tomando como fuente las fotografías obtenidas mediante el proyecto LANDSAT, en sus versiones de v7 y v8.

3.1. Materiales y equipos

Para el desarrollo de la tesis es necesario el uso de los materiales y equipos siguientes:

Materiales: se requiere el modelo digital de elevaciones para cuenca de interés, la misma que se obtiene del proyecto *earthexplorer* y las fotografías satelitales asociadas a la zona en estudio, obtenidas desde el proyecto LANDSAT v8.

Equipos: la tesis trata exclusivamente de la manipulación de datos a nivel de sistemas de información geográfica, por tanto se realiza el uso de equipos de cómputo actuales y programas de SIG.

3.2. Descripción del área de estudio

El proyecto de inversión pública, con registro número 181224, denominado *Construcción de Puente Carrozable de Interconexión Muyurina, Distrito de Tambillo - Huamanga - Ayacucho*, es un proyecto que se encuentra construido y en servicio, cuyo Expediente Técnico se utilizará como fuente para la contrastación de los resultados obtenidos en la presente tesis y los consignados del expediente técnico.

El proyecto¹⁴ se ubica sobre el Río Huatatas, sirve de acceso a la localidad de Muyurina y de este lugar se realiza la interconexión hacia distintas localidades de los distritos de Tambillo, Acosvinchos y Quinoa de la provincia de Huamanga y las localidades de la provincia de La Mar, ambos del departamento de Ayacucho.

El puente Muyurina tiene la siguiente ubicación política:

- Localidad: Muyurina
- Distrito: Tambillo
- Provincia: Huamanga
- Región: Ayacucho

Geográficamente el proyecto se encuentra ubicado: 8550011.00m -sur y 587127.00m -este, zona 18L, DATUM WGS84, en el sistema de referencia proyectado UTM.

3.3. Población y muestra

Se determina como población las unidades hidrográficas del Perú, la muestra se corresponde a una sub cuenca asociada al río Huatatas. La cuenca hidrográfica asociada al punto de fundación del puente interconexión Muyurina - Ayacucho se delimitará

¹⁴Esta sección está tomado desde el Expediente Técnico del proyecto

Figura 3.13: Ubicación de la cuenca en estudio



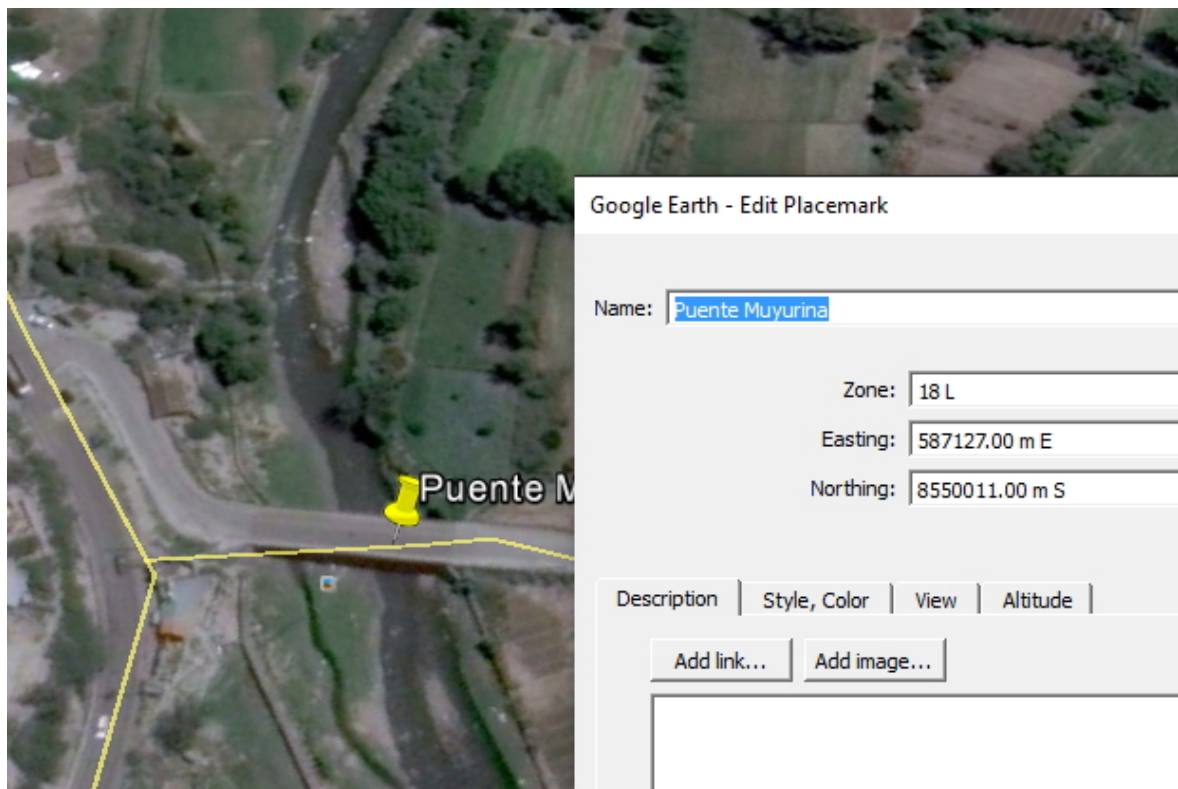
Fuente: Elaboración propia

tomando como base los sistemas de información geográfica.

3.3.1. Punto de aforo

El punto de drenaje de la cuenca se considera la zona de fundación - construcción del puente de interconexión Muyurina - Ayacucho, las coordenadas quedan establecidas en la figura 3.14, considerando el sistema de coordenadas especificado.

Figura 3.14: Punto de aforo para la delimitación de la cuenca hidrográfica (sistema de coordenadas UTM, Zona 18L, DATUM WGS 84)



Fuente: Adaptado desde Google Earth Pro

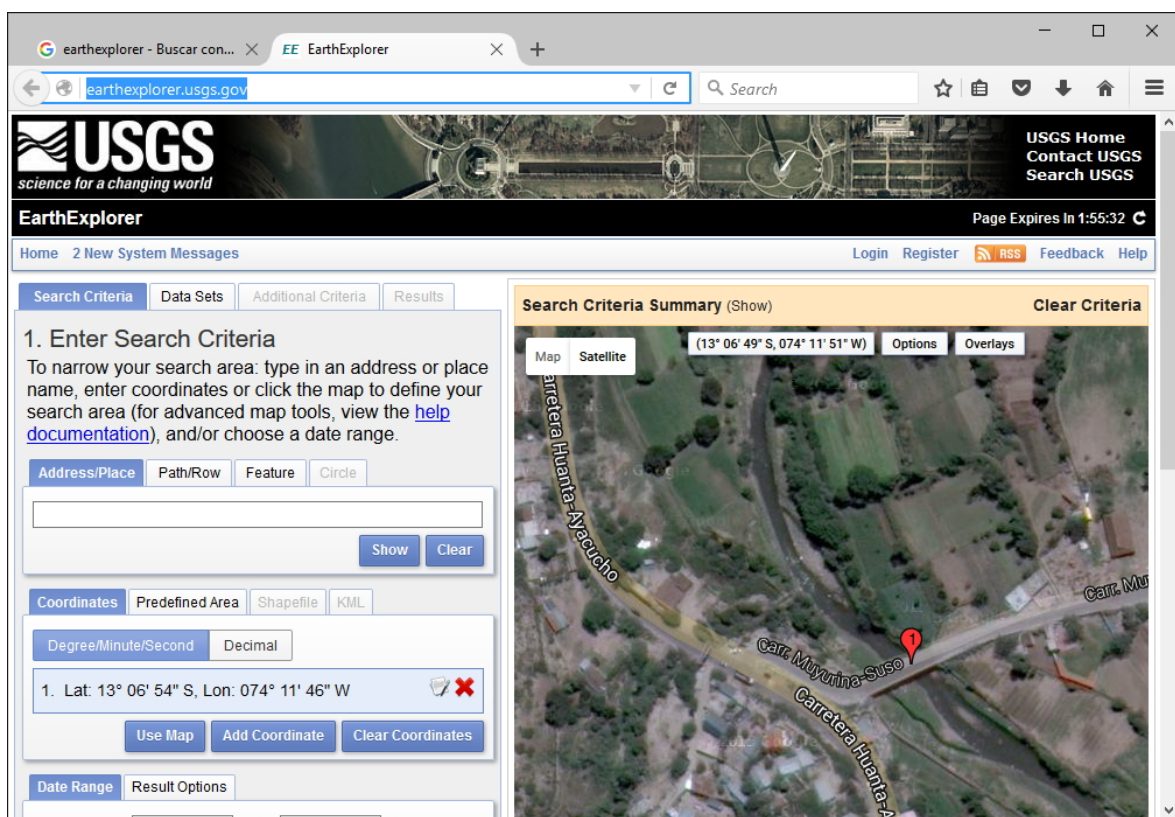
3.3.2. Modelo digital del terreno

Siendo un Modelo Digital de Terreno (MDT) una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, el tipo de Modelo Digital del Terreno (MDT) más conocido es el Modelo Digital de Elevaciones

(MDE), que es un caso particular, donde la variable representada es la cota del terreno tomado como referencia un sistema de coordenadas concreto.

El modelo digital del terreno (de elevaciones) se obtendrá desde la base de datos del proyecto *earthexplorer*¹⁵ - que dispone de una interfaz sencilla para la obtención de datos de esta naturaleza, la figura 3.15 muestra la ventana principal del proyecto, desde el cual es posible definir el punto de drenaje de la cuenca y de igual manera, permite definir una estimación de la cuenca de interés.

Figura 3.15: Ventana principal del proyecto earthexplorer



Fuente: Adaptado desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>

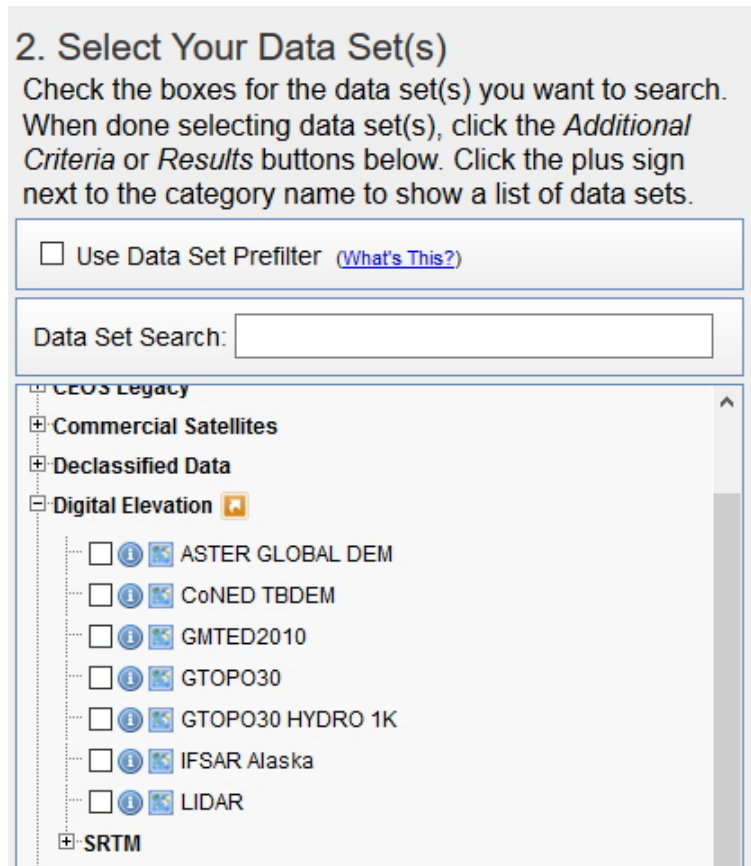
Para la obtención del modelo digital del terreno desde el proyecto *earthexplorer* es necesario:

- Establecer un criterio de búsqueda, lo que se realizó con la identificación del punto de drenaje de la cuenca, que coincide con la zona donde se construyó el puente interconexión Muyurina - Ayacucho.

¹⁵Página principal <http://earthexplorer.usgs.gov/>

- Seleccionar la fuente de datos, el proyecto *earthexplorer* contiene la fuente de datos de muchos proyectos, tratándose de encontrar datos de modelos digitales de terreno - se opta por seleccionar *aquellos proyectos que trabajan en base a elevaciones digitales*, se optará para obtener un archivo tipo raster con una resolución espacial de 30m, la figura 3.16 muestra la opción seleccionada.

Figura 3.16: Selección de bases de datos de modelos de elevación digital



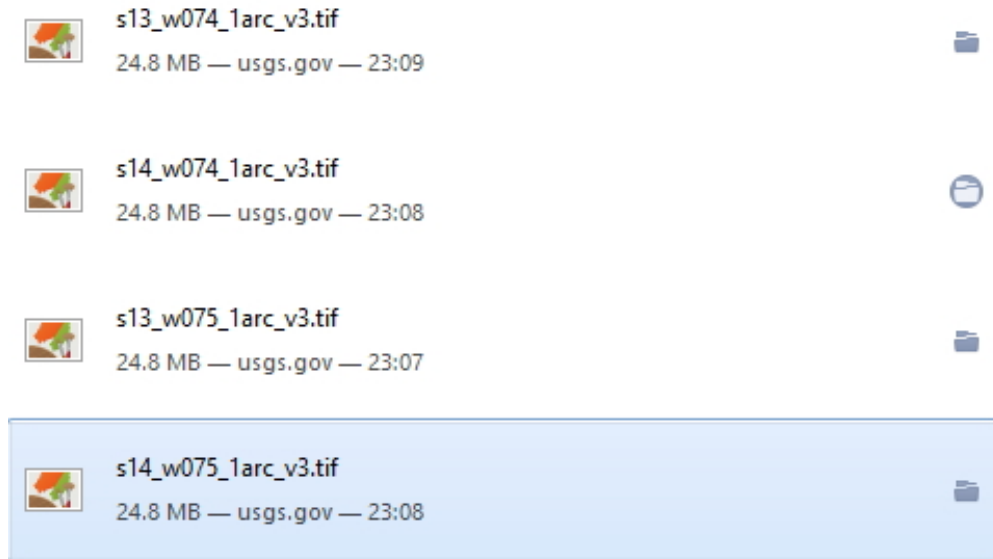
Fuente: Adaptado desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>

3.3.3. Delimitación de la cuenca hidrográfica

Se obtienen los modelos digitales del terreno en formato *GeoTIFF*, figura 3.17, estos archivos son fuente para la obtención de la cuenca requerida mediante procedimientos y tratamientos de la información de acuerdo a los sistemas de información geográfica, los archivos disponen de una resolución espacial de un arcosegundo, equivalente a aproximadamente de celdas de 30m de lado, expresado en archivos tipo raster. Para la

delimitación de la cuenca, es necesario determinar el punto de drenaje de la misma. El procedimiento de la determinación de la cuenca se efectúa mediante la aplicación del programa de libre distribución *QGIS*.

Figura 3.17: Archivos requeridos para la cuenca en estudio

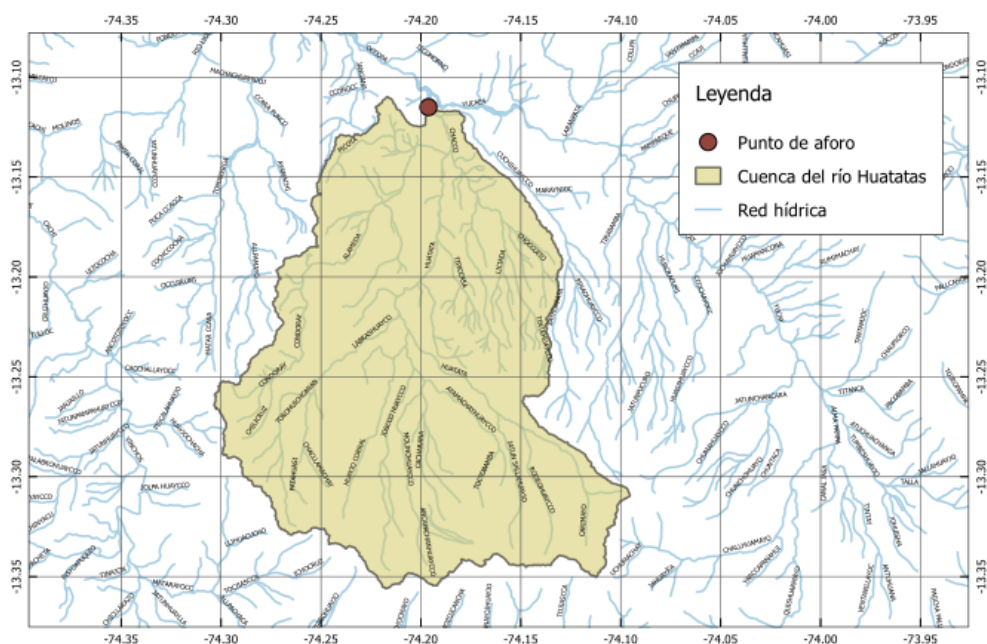


Fuente: elaboración propia

QGIS¹⁶ es la mejor herramienta SIG en la comunidad de software libre y abierto. QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License . QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos, actualmente se encuentra en la versión QGIS 2.12 – 1 -Lyon. Cuyas características de QGIS proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas imprimibles.

¹⁶Descripción tomada desde la página oficial <http://www.qgis.org/en/site/>

Figura 3.18: Cuenca Huatatas



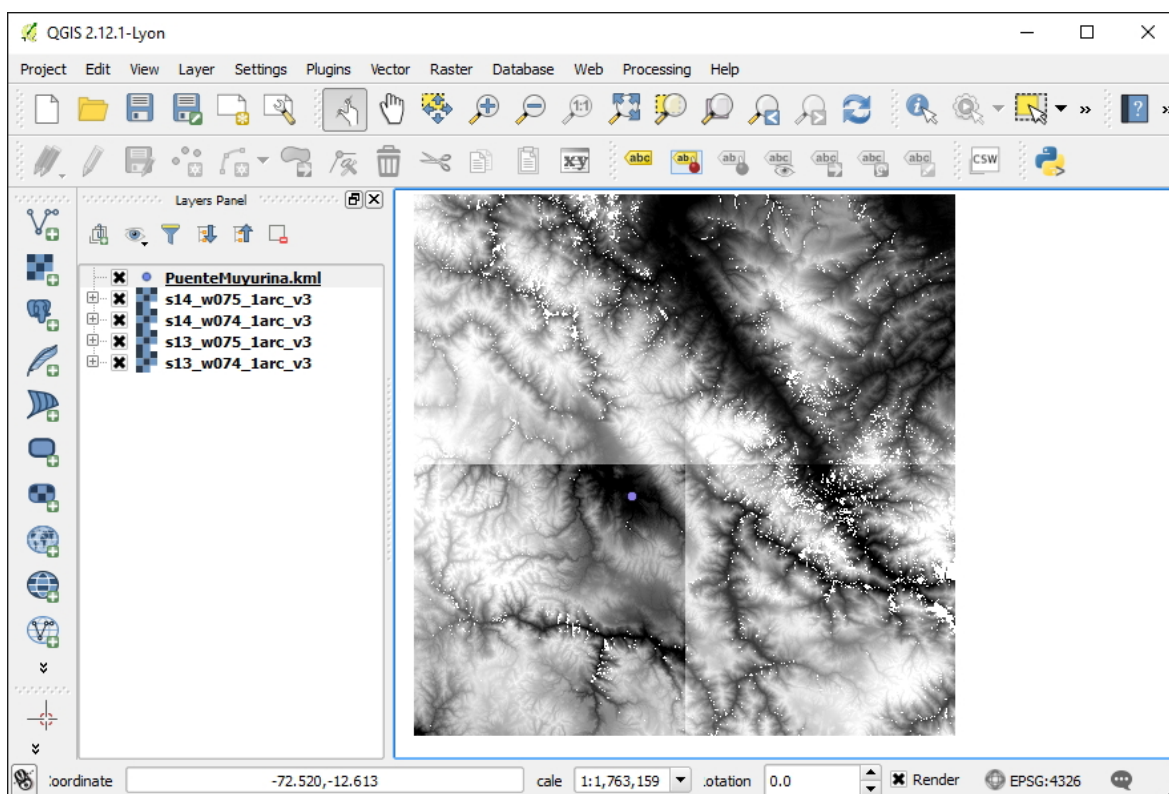
Fuente: elaboración propia

3.3.4. Propiedades morfométricas

Las características físicas de una cuenca son elementos que tienen una gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma. Dichas características físicas se clasifican en dos tipos según su impacto en el drenaje: las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área y el tipo de suelo de la cuenca, y las que condicionan la velocidad de respuesta como el orden de corriente, la pendiente, la sección transversal, y otras características de la red hídrica y la cuenca hidrográfica.

Existe una estrecha correspondencia entre el régimen hidrológico y dichos elementos por lo cual el conocimiento de éstos reviste gran utilidad práctica, ya que al establecer relaciones y comparaciones de generalización de ellos con datos hidrológicos conocidos, pueden determinarse indirectamente valores hidrológicos en secciones de interés práctico donde falten datos o donde por razones de índole fisiográfica o económica no sea factible la instalación de estaciones hidrométricas.

Figura 3.19: Aplicación QGIS



Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

3.3.4.1. Propiedades de superficie

Las propiedades relacionadas a la superficie de la cuenca se muestra en la tabla 3.1 y las propiedades representativas de altitud se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.1: Propiedades de superficie de la cuenca

Descripción	Unidad	Valor
Área	km ²	410.45
Perímetro	km	94.51
Coefficiente de compacidad (Gravelius)		1.34
Ancho medio	km	11.72
Radio de circularidad		0.57
Factor de forma		0.34
Pendiente promedio de la cuenca	%	17.83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Propiedades relacionadas a la altitud de la cuenca

Descripción	Unidad	Valor
X centroide	m	587247.64
Y centroide	m	8536583.67
Z centroide	msnm	3842.56
Cota máxima	msnm	4394
Cota mínima	msnm	2500
Altitud media	msnm	3842.56
Altitud más frecuente	msnm	4075
Altitud de frecuencia media	msnm	3528.61

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.2. Propiedades de la red hídrica

Las propiedades relacionadas a la red hídrica de la cuenca se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Propiedades relacionadas a la red hídrica

Descripción	Unidad	Valor
Longitud del curso principal	km	34.91
Orden de la red hídrica	und	5
Longitud de la red hídrica	km	531.79
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.82
Pendiente del cauce principal	<i>m/km</i>	51.56

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.3. Parámetros generados

Las propiedades mostradas en la tabla 3.4 son obtenidos en base a las propiedades de superficie y las propiedades de la red hídrica.

Tabla 3.4: Tiempo de concentración

Descripción	Unidad	Valor
Tiemp[o de concentración	horas	3.2

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Análisis morfométrico de la cuenca con QGIS

En esta sección se presenta una alternativa para delimitar una cuenca hidrológica utilizando distribuciones libres, con la potencia de análisis que tiene el software GRASS mediante la facilidad que proporciona *QGIS v2.12-1*.

Se trabaja en conjunto con el programa GRASS v6.4.3 y QGIS v2.12-1, el sistema QGIS es el entorno desde donde se tendrá acceso a GRASS, ambas aplicaciones de libre distribución y de código abierto, para el cual se procedió de la siguiente manera.

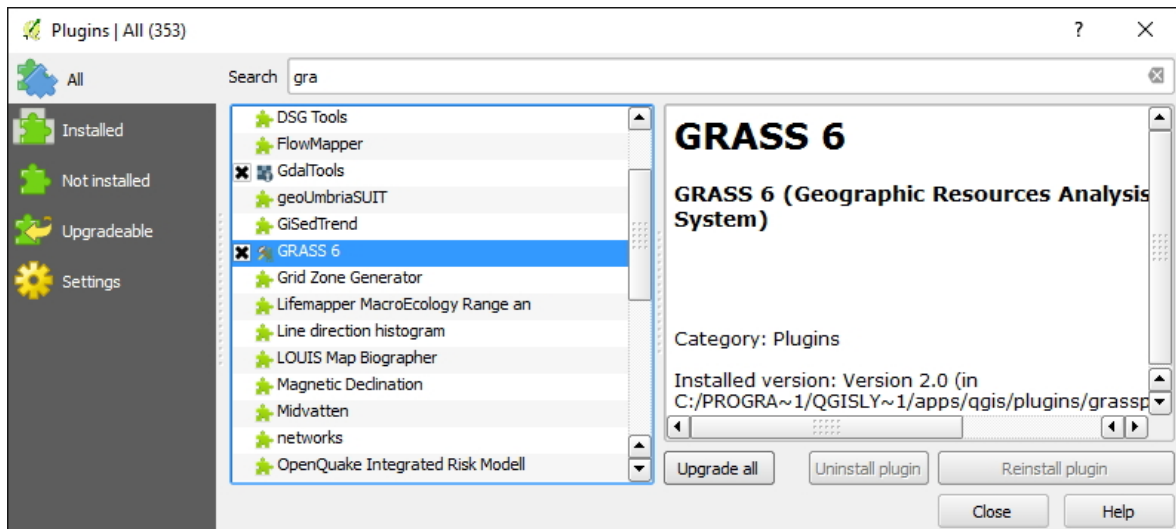
3.3.5.1. Localización y conjunto de mapas

Es necesario crear una localización y conjunto de mapas. Para manipular la información y trabajar con las aplicaciones establecidas es necesario crear una base de datos donde se tendrá el conjunto de capas deseadas. Una base de datos de GRASS está determinado por un directorio en el que se identifican los locations (localizaciones) y mapsets (conjuntos de mapas). Es posible implementar todas las bases de datos que se deseen.

Se creará la base de datos con el *plugin de QGIS-GRASS* el cual permite usar los módulos de GRASS desde el interfaz de QGIS. Con la finalidad activar el plugin desde QGIS, desde el menú Complementos, administrar complementos, en donde se tiene que activar el que lleva por nombre GRASS, como queda establecido en la figura 3.20.

Luego de activar el complemento es posible seguir con la creación de la base de datos. Pero antes es necesario añadir al programa QGIS el archivo tipo ráster que contiene a la cuenca, definir el archivo ráster y cargar desde la ubicación seleccionada. Una vez cargado, para crear la base de datos, se procede: desde el menú Complementos, GRASS, Nuevo directorio de mapas y se tiene acceso a la ventana *Nueva base de datos*, desde donde se selecciona una carpeta para la base de datos. Se elige el directorio para crear la base de datos, lo que queda determinado como muestra la figura 3.21, seguidamente

Figura 3.20: Conexión QGIS y GRASS



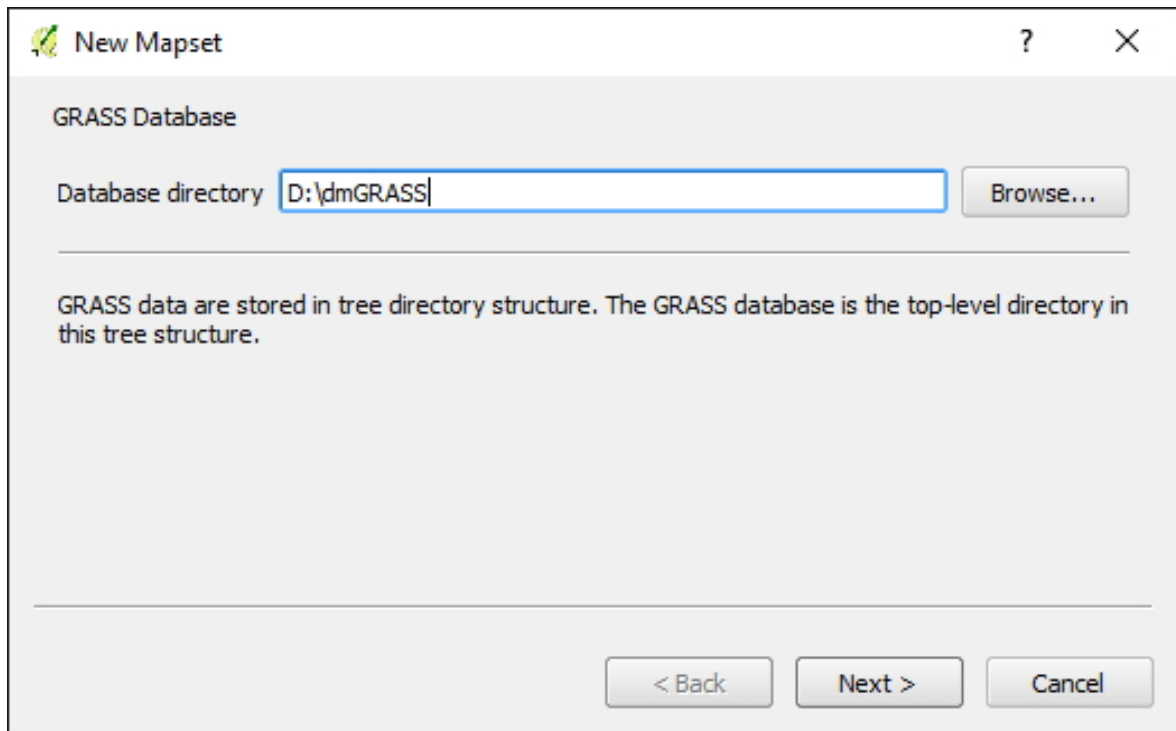
Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

se crea una nueva location (localización), con esta finalidad es necesario establecer el nombre deseado, en este caso se le dio el nombre de la ubicación de la cuenca. Se define el sistema de coordenadas de referencia, pueden ser coordenadas geográficas o elegir un sistema de proyección, en la imagen se muestra que el seleccionado es el sistema de proyección UTM con elipsoide y DATUM WGS84 y Zona 18S, seguidamente se elige la región predeterminada para trabajar, en este caso se eligió el territorio nacional, desde la lista desplegable.

Finalmente se muestra la ventana donde se pide el nombre del mapset o conjunto de mapas (layers) del usuario, se establece el nombre en correspondencia a la cuenca analizada y luego es necesario confirmar los datos consignados. Al aceptar se establece automáticamente la nueva localización y conjunto de datos por defecto para QGIS y GRASS.

Es muy importante crear esta base de datos, las aplicaciones utilizadas lo determinan de esta manera. Mediante el entorno de QGIS el proceso de creación resulta ameno, porque contiene pasos consecutivos y el entorno de trabajo es intuitivo.

Figura 3.21: Crear nueva fuente de datos



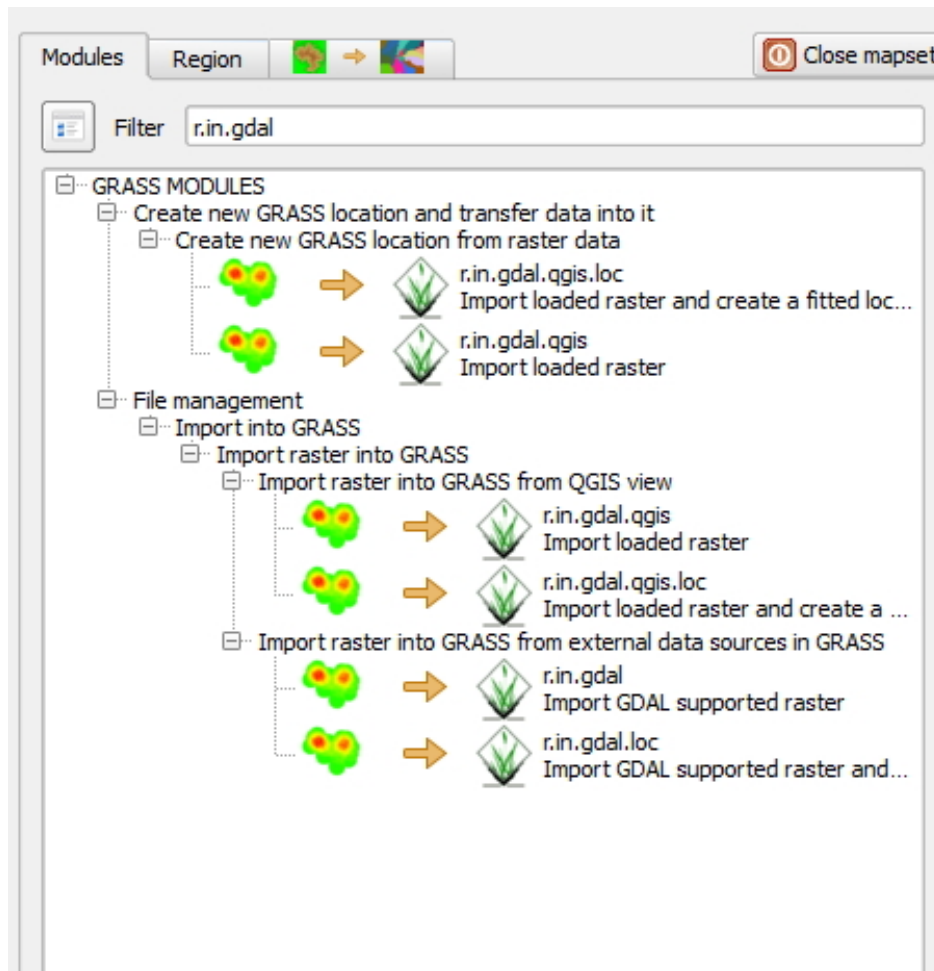
Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

3.3.5.2. Importar ráster a la base de datos

Luego de haber creado la base de datos, ésta se encuentra vacía y será necesario importar el archivo ráster que contiene la cuenca, sobre el cual se realizará todos los trabajos necesarios. Para importar esta capa o *layer* a la base de datos se utiliza la opción: desde el menú Complementos, GRASS, Abrir herramientas de GRASS y en esta ventana invocar el módulo *r.in.gdal*, como se muestra en la figura 3.22.

En la ventana mostrada en la figura 3.22, es necesario identificar el archivo raster a ser importado a la base de datos creada, del módulo que aparece seleccionar el ráster a importar y establecer un nombre de salida. Para procesar lo requerido, aceptar en la ventana y al terminar el proceso es necesario pulsar la opción *Ver salida* con la finalidad de agregar la capa al entorno de QGIS automáticamente. La capa importada se agrega al mapset de la base de datos por defecto, que es la última creada.

Figura 3.22: Cargar archivo principal a la base de datos

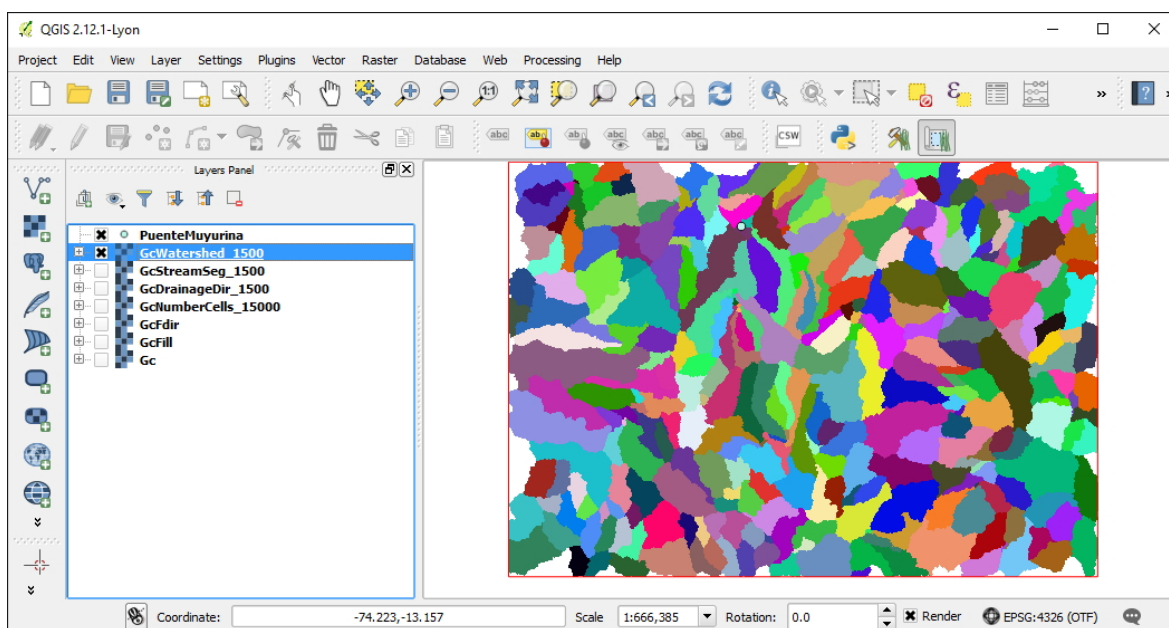


Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

3.3.5.3. La cuenca delimitada

El análisis morfométrico de la cuenca en estudio se realiza por completo desde QGIS, tomando como complemento la aplicación GRASS, donde se dispone de la herramientas necesarias, algoritmos implementados en órdenes específicos para cada propósito con fines de análisis de cuencas hidrográficas, la figura 3.23 muestra el ambiente de trabajo, las subcuencas en la cuenca de interés queda establecido como se muestra en la figura 3.24. Luego, en procedimientos posteriores se obtiene las propiedades de forma (superficie, perímetro, etc.) de cuenca hidrográfica y las propiedades de la red hídrica.

Figura 3.23: Sub cuencas generadas



Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

3.4. Recolección de datos

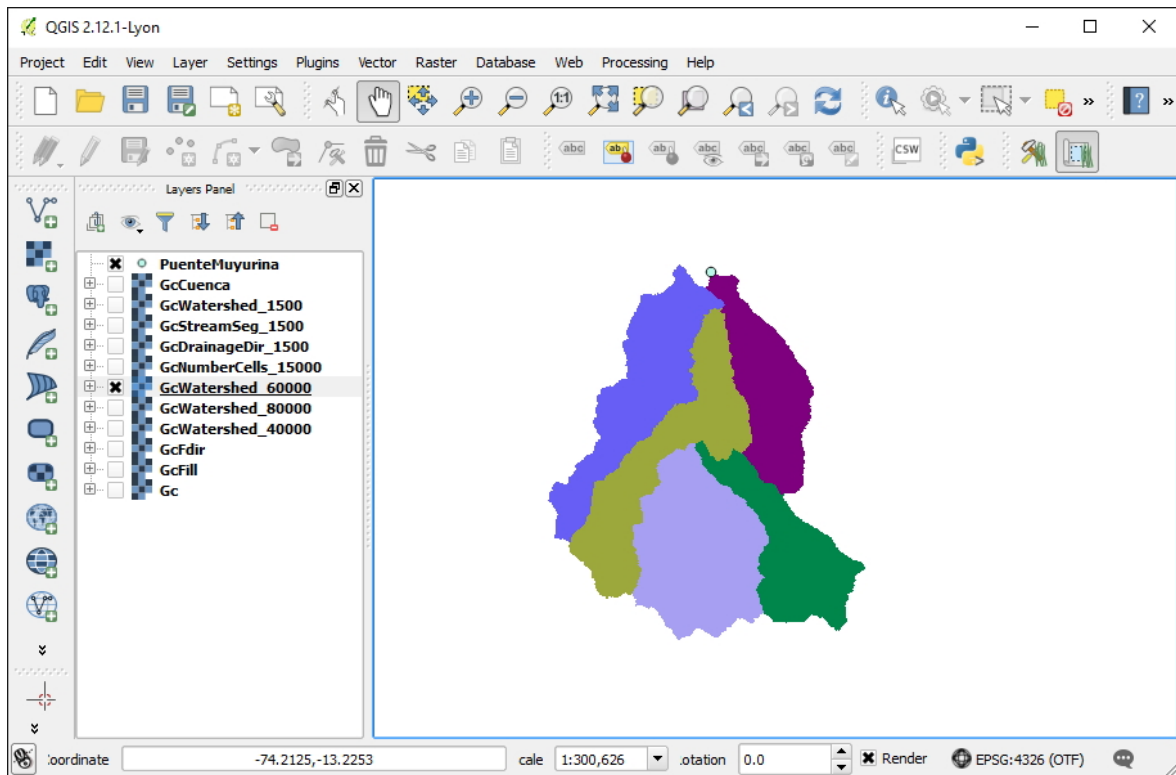
La recolección de los datos consiste en la obtención del modelo digital de elevaciones y la fotografías satelitales.

3.4.1. Proyecto LANDSAT

Para obtener las imágenes LANDSAT existe varias alternativas, en la presente tesis se utiliza proyectos que distribuyen las imágenes LANDSAT de forma gratuita, todos los distribuidores se encuentran para su acceso a nivel mundial y libre mediante páginas específicas en internet, entre los aplicaciones gratuitas, tenemos:

- El proyecto *Global Land Cover Facility* (GLCF), implementado por la Universidad de Maryland de Estados Unidos de Norteamérica, cuya dirección es <http://glcf.umd.edu/>, desde donde es posible descargar las imágenes LANDSAT de forma gratuita y para todo propósito.

Figura 3.24: Sub cuencas en la cuenca de interés

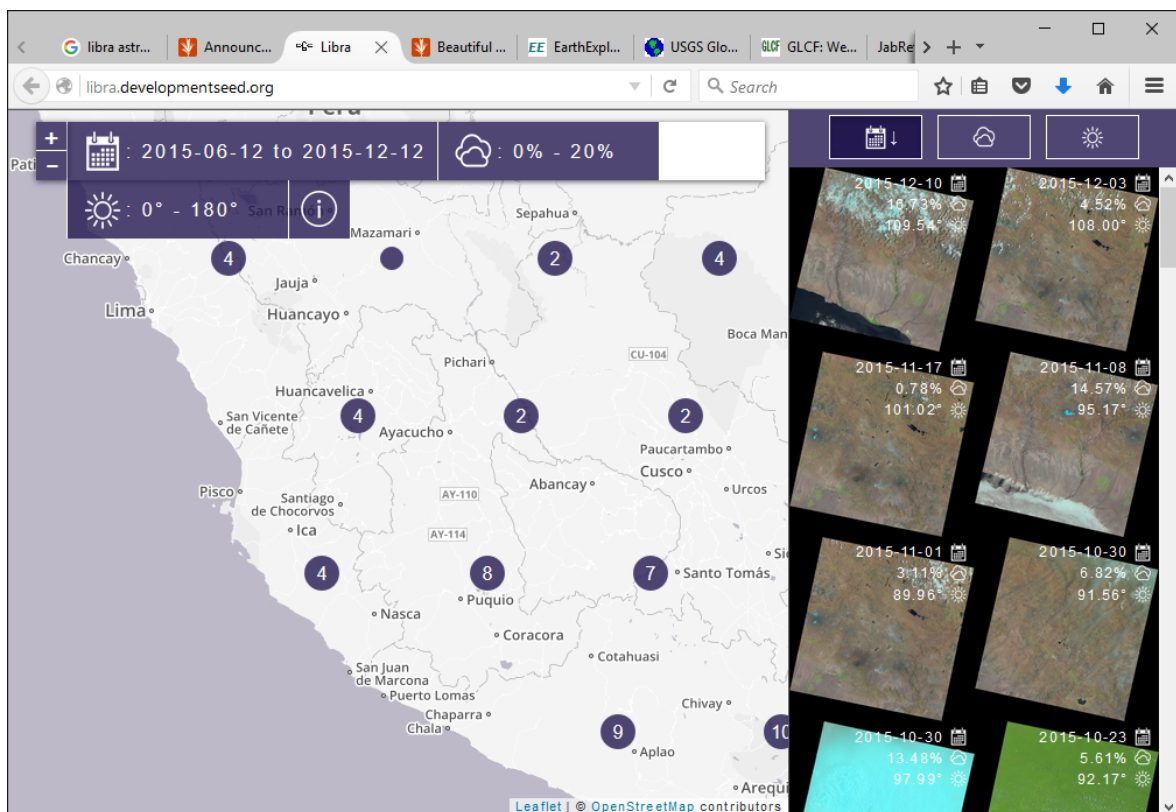


Fuente: Adaptado de la aplicación QGIS

- Otro proyecto similar que se encarga de la distribución de las imágenes LANDSAT en todo el mundo es el proyecto *Global Visualization Viewer (GLOVIS)*, cuya dirección general es <http://glovis.usgs.gov/>, es un proyecto implementado por el Servicio de Geológico de Estados Unidos de Norteamérica - *United States Geological Survey (USGS)*.
- El proyecto *Earth Explorer*, implementado por el Servicio de Geológico de Estados Unidos de Norteamérica - *United States Geological Survey (USGS)*, cuya dirección principal es <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Una opción interesante es utilizar el proyecto *Libra* para la descarga de imágenes de LANDSAT, cuya página principal es <http://libra.developmentseed.org/>, el proyecto *Libra* es un navegador de imágenes creado por *Astro Digital* -proyecto de código abierto, que permite descargar todo el rango de bandas del proyecto LANDSAT v8, de una manera intuitiva, dado que muestra en mapas los

límites de cada país y las imágenes disponibles por zonas y clasificado por fechas. y así, en la actualidad existe varias alternativas de libre distribución y gratuitas para poder obtener las fotografías desde el proyecto LANDSAT v8, la figura 3.25 muestra la ventana principal del proyecto *Libra*. Desde cualquier plataforma descrita anteriormente se obtiene las fotografías satelitales necesarias, todos requieren una ubicación espacial y generalmente los datos requeridos lo reciben mediante especificación de las coordenadas y descarga el cuadrante que contiene a dicho punto, de igual manera requiere una especificación temporal, dado que la base de datos contiene fotografías de un mismo lugar pero en distintas temporadas.

Figura 3.25: Descargar imágenes LANDSAT desde el proyecto Libra



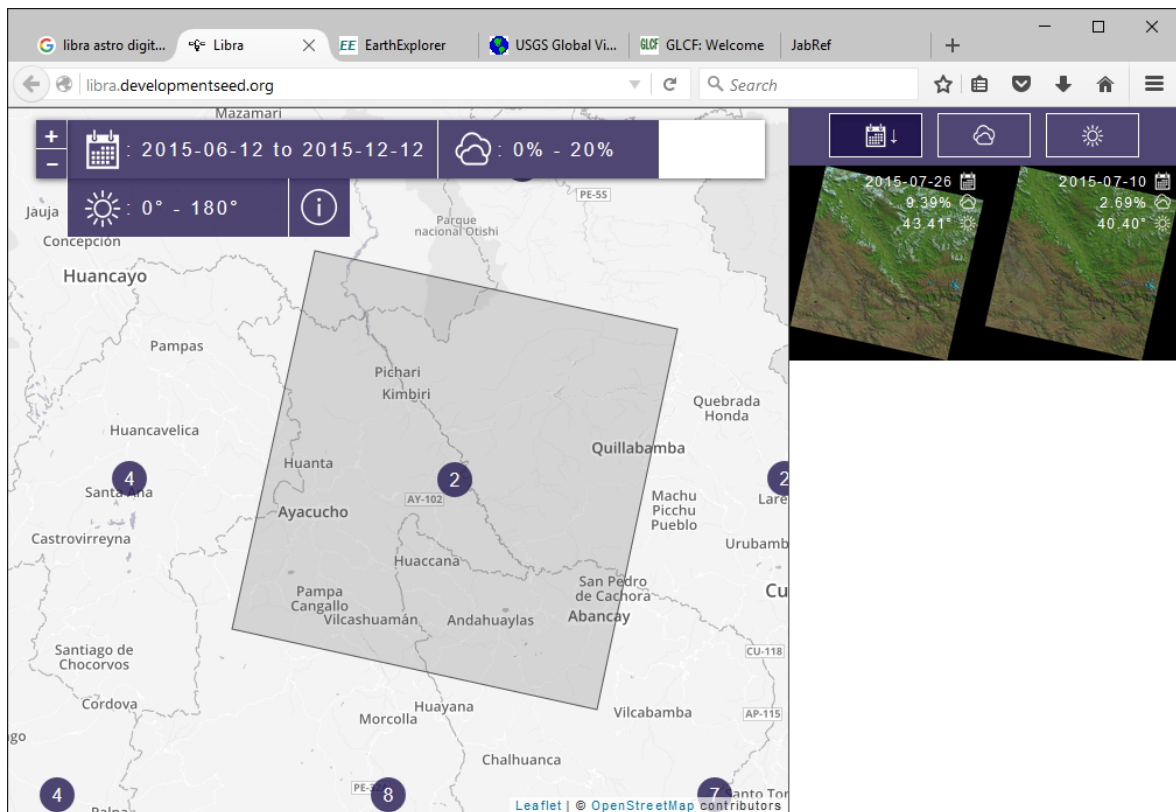
Fuente: Adaptado <http://libra.developmentseed.org/>

3.4.2. Proceso de recolección de datos

Para obtener los registros de fotografías requeridas en el desarrollo de la tesis se opta por la plataforma *Libra*, porque dispone de una interfaz muy elaborada que hace del procedimiento de la descarga de imágenes LANDSAT sea intuitivo, el procedimiento que se siguió es el siguiente:

- Acceder a la página principal del proyecto *Libra*, cuya dirección es <http://libra.developmentseed.org/>, al acceder a esta página se muestra el mapa del mundo entero -en el plano.
- Con el cursor, mediante eventos de arrastrar y soltar y los eventos de acercar y alejar las imágenes se amplía la zona de interés, en este caso la Región Ayacucho, donde se encuentra la cuenca de estudio, como se muestra en la figura 3.26, desde éste gráfico se observa la zona seleccionada y las fotografías existentes.

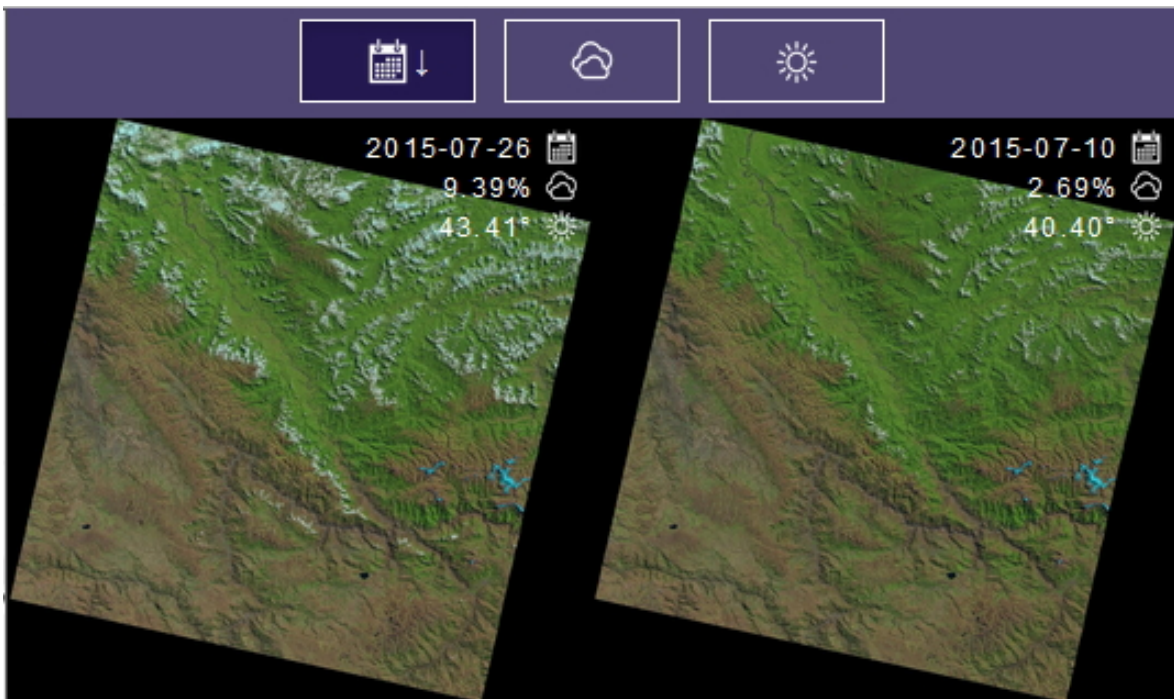
Figura 3.26: Ubicación espacial de la zona de interés



Fuente: Adaptado desde <http://libra.developmentseed.org/>

- En las especificaciones de búsqueda, para ser más rigurosos se cuenta con la posibilidad de establecer el porcentaje de nubosidad (cloud coverage) máxima, porque se busca fotografías donde no exista la interferencia de nubes que alteren los usos de suelo en las fotografías y existe la posibilidad de igual manera, para especificar el rango de las fechas en las cuales limitará la búsqueda de las fotografías en su base de datos.
- La aplicación es dinámica, mientras se selecciona las alternativas de búsqueda requeridas, los registros filtrados se muestran dinámicamente, figura 3.27, donde para las condiciones establecidas la base de datos contiene dos fotografías, en las mismas se especifica las fechas para las cuales corresponden las fotografías, el porcentaje de nubosidad; se dispone de dos registros para el área seleccionada, para las fechas de 26 de julio de 2015 y 10 de julio de 2015, de estos registros disponibles se selecciona el que dispone de menor porcentaje de nubosidad, 2.69 % correspondiente al 10 de julio de 2015.

Figura 3.27: Fotografías LANDSAT disponibles

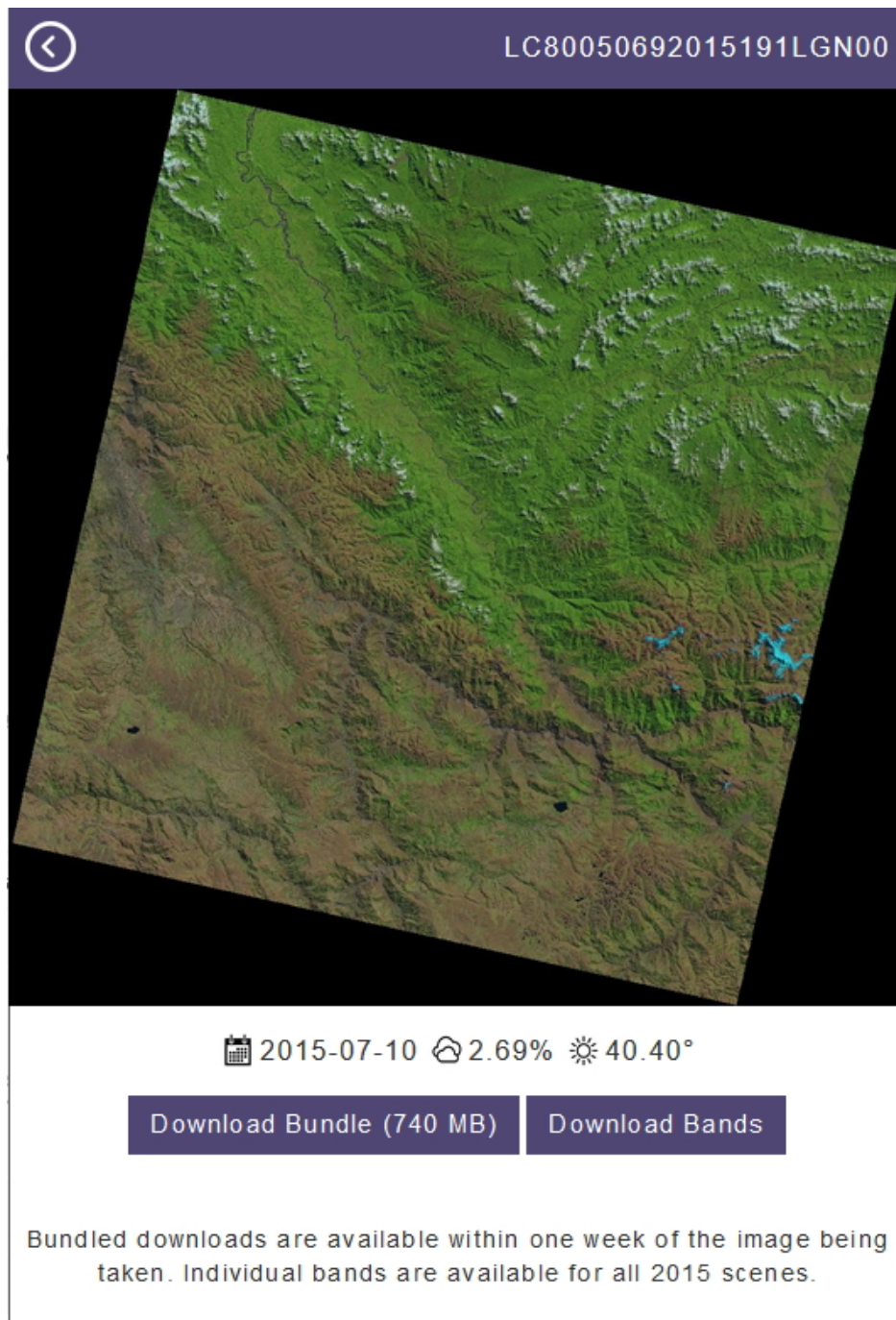


Fuente: Adaptado desde <http://libra.developmentseed.org/>

La figura 3.28 muestra las especificaciones de la imagen seleccionada, el porcentaje de

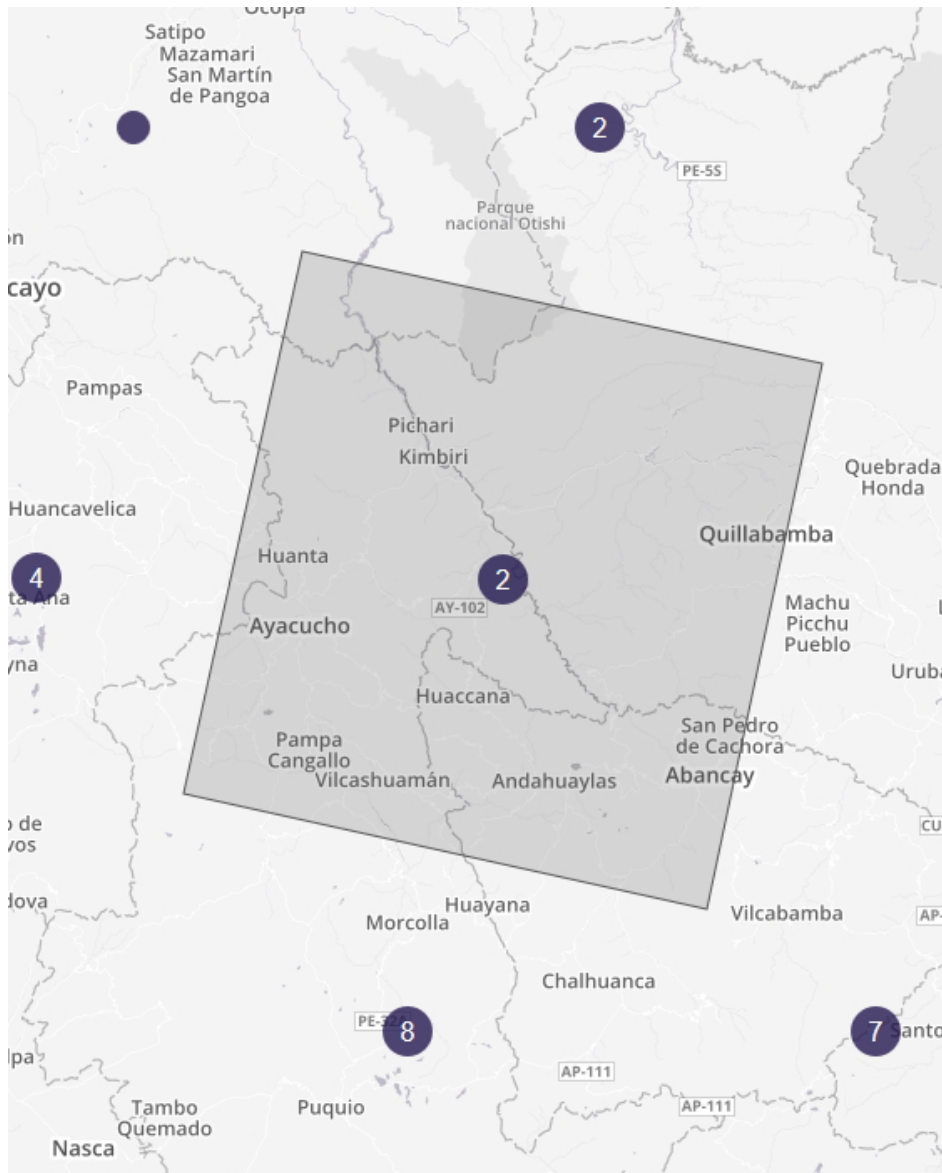
nubosidad, la fecha para el cual representa la fotografía, la cantidad de memoria requerida y las especificaciones de las bandas espectrales del que se encuentra compuesto la imagen LANDSAT seleccionada; mientras la figura 3.29 muestra la extensión abarcada por la imagen LANDSAT en relación al territorio nacional, la misma que abarca parte de la región Ayacucho, donde queda establecida la zona de estudio.

Figura 3.28: Imagen seleccionada desde LANDSAT



Fuente: Adaptado desde <http://libra.developmentseed.org/>

Figura 3.29: Extensión de la superficie de la imagen seleccionada desde LANDSAT



Fuente: Adaptado desde <http://libra.developmentseed.org/>

A partir de esta imagen, figura 3.29 se obtendrá el número de curva relacionado los índices de vegetación con los usos del suelo, con esta finalidad será necesario la aplicación de programas para el tratamiento de sistemas de información geográfica.

3.5. Análisis de datos

En este caso los datos obtenidos presentan las siguientes características:

- El modelo digital de elevaciones obtenido se encuentra establecido en el sistema de orientación general WGS84 (World Geodetic System 1984), representado en un archivo tipo raster cuya resolución es de arcosegundo, conteniendo celdas aproximadamente de 30m de lado, queda verificado que la ubicación corresponde a la zona en estudio y la resolución es adecuada para el trabajo y delimitación de la cuenca hidrográfica, debido a la amplitud de la superficie.
- Las fotografías satelitales se seleccionan teniendo en cuenta el menor porcentaje de nubosidad disponible, de igual manera se encuentra establecido en el sistema de orientación general WGS84, se encuentra representado en un archivo raster cuya resolución es de un arcosegundo, las bandas disponibles a utilizar B4 y B5.

3.6. Obtención del número de curva

Los procedimientos para obtener el número de curva de la cuenca en estudio se obtendrá en base a las aplicaciones siguientes: SAGA GIS v2.1.2 y QGIS 2.12.1, a partir de las imágenes disponibles obtenidas por los proyectos LANDSAT 7 y LANDSAT 8.

3.6.1. SAGA Gis

Para la obtención del número de curva a partir de las imágenes obtenidas desde el proyecto LANDSAT, se utilizará la aplicación SAGA GIS¹⁷ (acrónimo inglés de System for Automated Geoscientific Analyses of Geographic Information system) es un software híbrido de información geográfica, SAGA es una plataforma eficaz y fácil para la puesta en práctica de métodos geocientíficos mediante su interfaz de programación (API), de igual manera estos métodos son accesibles de una manera fácil mediante su interfaz gráfica de usuario (GUI). Ambas propiedades API Y GUI hacen de SAGA un verdadero potencial como un sistema cada vez mayor y rápido de métodos geocientíficos y el

¹⁷Dirección del proyecto SAGA GIS <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

tratamiento de sistemas de información geográfica. Además de ser una aplicación de libre distribución y de código abierto, es posible -gracias a su API, utilizarlo desde otras aplicaciones de sistemas de información geográfica.

3.6.2. QGIS

QGis¹⁸ (Quantum GIS) es una aplicación para el tratamiento de sistemas de información geográfica, se caracteriza por ser de libre distribución -gratuito, multiplataforma y de código abierto. Las librerías implementada en SAGA GIS, en el desarrollo de la tesis, son utilizadas desde el programa QGIS.

3.6.3. Proyecto LANDSAT v8

Se trabaja con los archivos disponibles de los proyectos¹⁹ LANDSAT v7 y LANDSAT v8, cuya base gráfica se obtiene desde distintas fuentes de bases de datos que distribuyen esta información de forma libre y gratuita, en este caso -para el desarrollo de la tesis, a la información así obtenida se le da un uso académico, en el ámbito de la investigación y desarrollo de la tesis a nivel de pregrado. Toda la información referente en esta sección se obtiene desde la siguiente dirección <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>, página principal del proyecto LANDSAT, figura 3.30.

3.6.3.1. Instrumentos en LANDSAT v8

Los dos instrumentos a bordo del LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*), son:

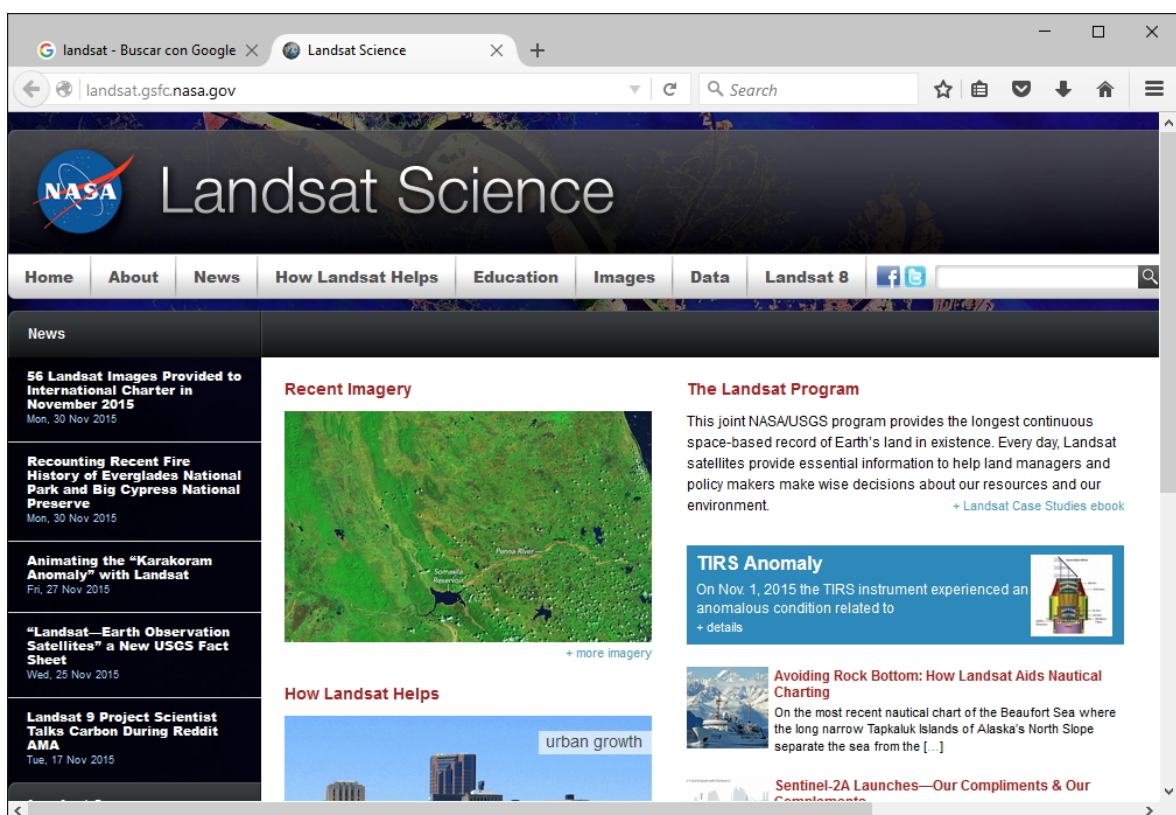
- Operational Land Imager (OLI)

- sensor térmico infrarrojo (TIRS)

¹⁸Dirección general del proyecto QGIS <http://www.qgis.org/en/site/>

¹⁹Página principal del proyecto LANDSAT <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Figura 3.30: Página principal proyecto LANDSAT



Fuente: Tomado desde <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Ambos, OLI y TIRS miden la superficie terrestre en el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, e infrarrojo térmico con una resolución moderada entre 49 y 328 pies (15 y 100 metros), dependiendo de la longitud de onda espectral. La distribución de la energía observada en estas longitudes de onda revela información sobre la reflexión y emisión de superficies.

Figura 3.31: Especificaciones del producto LDCM a nivel 1

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	<ul style="list-style-type: none"> • Formato de datos GeoTIFF • Remuestreo por convolución cúbica (CC) • Norte arriba (MAP) de orientación • Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida) • Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 • 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI • 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS • Los valores de píxel en 16 bits
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Fuente: Adaptado desde <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

3.6.3.2. Número de escenas por día

El *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) está diseñado para entregar cerca de 400 escenas por día (150 escenas más que su antecesor el Landsat 7) estas imágenes son cargadas en el servidor de datos del USGS, aumentando de esta manera la probabilidad de capturar y entregar escenas gratis de la cobertura terrestre.

3.6.3.3. Productos del nivel 1

Actualmente el programa LANDSAT se encuentra en su octava versión, denominada *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM), la misma que mejora, amplía y avanza en el registro de imágenes multispectrales, con la misma calidad que los proyectos antecesores. El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS), estos productos clasificados en el nivel uno se encuentran especificadas en la figura 3.31.

Figura 3.32: Distribuciones de las bandas en OLI y TIRS

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

Fuente: Adaptado desde <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

3.6.3.4. Distribuciones de las bandas en OLI y TIRS

Las imágenes LANDSAT v8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul- profundo) es necesaria en estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es necesaria y útil para la detección de nubosidad tipo cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución. El tamaño aproximado de cada escena es de 170 km de

norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste. Las distribuciones de las bandas en OLI y TIRS se muestran en la figura 3.32.

Figura 3.33: Archivos OLI y TIRS para la zona en estudio

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo
..			File folder
LC80050692015191LGN00_B1.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B2.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B3.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B4.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B5.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B6.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B7.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B8.TIF	477,557,998	477,557,998	TIF File
LC80050692015191LGN00_B9.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B10.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_B11.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File
LC80050692015191LGN00_BQA.TIF	119,436,378	119,436,378	TIF File

Fuente: Obtenidos desde <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

La figura 3.33 muestra los archivos en las diferentes bandas OLI y TIRS registradas por el proyecto LANDSAT v9, las bandas requeridas son utilizadas para la obtención de los índices de vegetación de la zona en estudio, especificado con una resolución espacial de 30 metros.

3.6.3.5. Convención de nomenclatura

Los nombres de los archivos mostrado en la figura 3.33 se encuentran codificados en correspondencia a lo descrito en la tabla 3.34, así los archivos obtenidos para el desarrollo de la tesis, figura 3.33, representa lo siguiente:

1. Todos los archivos mostrados en la figura 3.33, cuyo nombre inicia con L mayúscula representa que es un producto del proyecto LANDSAT.
2. El parámetro siguiente C, expresa que la imagen es producto de la combinación de los sensores TIRS y OLI.

3. A continuación, e número 8 indica el número de misión del proyecto LANDSAT, es este caso la misión número ocho.
4. Seguidamente el parámetro 005 indica la localización en la órbita satelital en referencia global al Path del producto: system-2 (WRS-2).
5. El parámetro 069 indica la localización de en órbita satelital en referencia global al row (fila) del producto: system-2 (WRS-2).
6. Los cuatro números siguientes en cada archivos mostrado en la figura 3.33, hace referencia al año de la adquisición de la imagen -en este caso todos archivos corresponden al año de 2015.
7. El parámetro 191 indica el día de la adquisición de la imagen, indica el número de días contado a partir del primer día del año, es este caso se corresponde con la imagen adquirida el 10 de julio de 2015.
8. LGN indica la identificación de la estación terrena.
9. 00, corresponde a la versión del archivo.
10. Desde el B1 hasta el B11 hace referencia a cada una de las bandas descritas en la figura 3.32.
11. Culmina con la extensión del archivo *.TIFF*, equivale a extensión de archivos GeoTIFF (es el acrónimo de Geographical Tagged Image File Format - GeoTIFF).

3.6.4. Proceso de obtención del índice de vegetación

El índice de la vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) se obtiene²⁰ a partir de las imágenes obtenidas desde el proyecto LANDSAT v8, desde las bandas espectrales mostradas en la figura 3.33. Para la determinación de este parámetro se

²⁰Una guía del procedimientos se encuentra en la referencia [54]

Figura 3.34: Convención de nomenclatura en productos de archivos comprimidos

Identificador	Descripción
L	Nombre de misión: Landsat
s	Tipo de Sensor: O = OLI, T = TIRS, C = Combinado TIRS y OLI Indica con que sensor se tomaron los datos para este producto
8	Numero de misión Landsat
ppp	Localización de la órbita satelital en referencia global al path del producto: System-2 (WRS-2)
rrr	Localización de la órbita satelital en referencia global al row del producto: System-2 (WRS-2)
YYYY	Año de adquisición de la imagen
DDD	Día del año de adquisición
GGG	ID de la estación terrena
VV	Versión
.FT	Tipo de archivo, donde FT es igual es igual a: (Archivo comprimido)
.ext	Extensión del archivo, donde .TIF equivale a archivos de extensión GeoTIFF, y .txt a extensión de texto.

Fuente: Obtenidos desde <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

requieren las bandas correspondientes a la luz visible roja y el infrarrojo cercano, que en correspondencia a los archivos obtenidos mediante LANDSAT v8, son los correspondientes a las siguientes bandas:

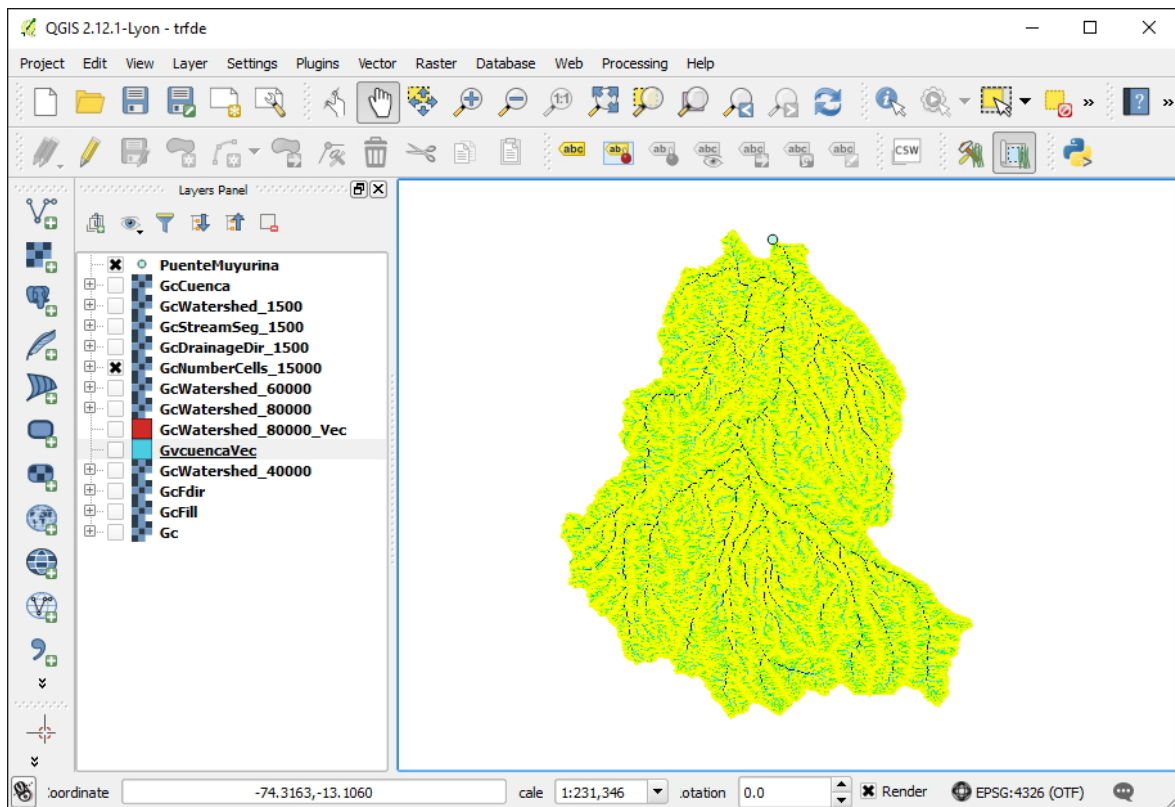
- El archivo LC80050692015191LGN00_B4.TIF, que corresponde a la banda cuatro y se encuentra asociado a la luz visible roja.
- El archivo LC80050692015191LGN00_B5.TIF, que corresponde a la banda cinco y se encuentra asociado al infrarrojo cercano.

Identificado las bandas sobre las cuales se trabajará, el algoritmo integrado debe efectuar la siguiente operación a partir de estos archivos, el cálculo del NDVI se hace mediante la ecuación 2.1, la misma que se transcribe seguidamente.

$$NDVI = \frac{NIR - VIR}{NIR + VIR} \quad (3.10)$$

Donde: NIR es la reflectancia de las bandas 5 (infrarrojo cercano) y VIR es la reflectancia de la banda 4 (visible – rojo) (coincide con la clasificación de las bandas del proyecto LANDSAT v8). Con la finalidad de trabajar sólo en la superficie de interés será necesario restringir (cortar) los archivos requeridos particularizando a la zona en estudio.

Figura 3.35: Superficie de interés delimitada

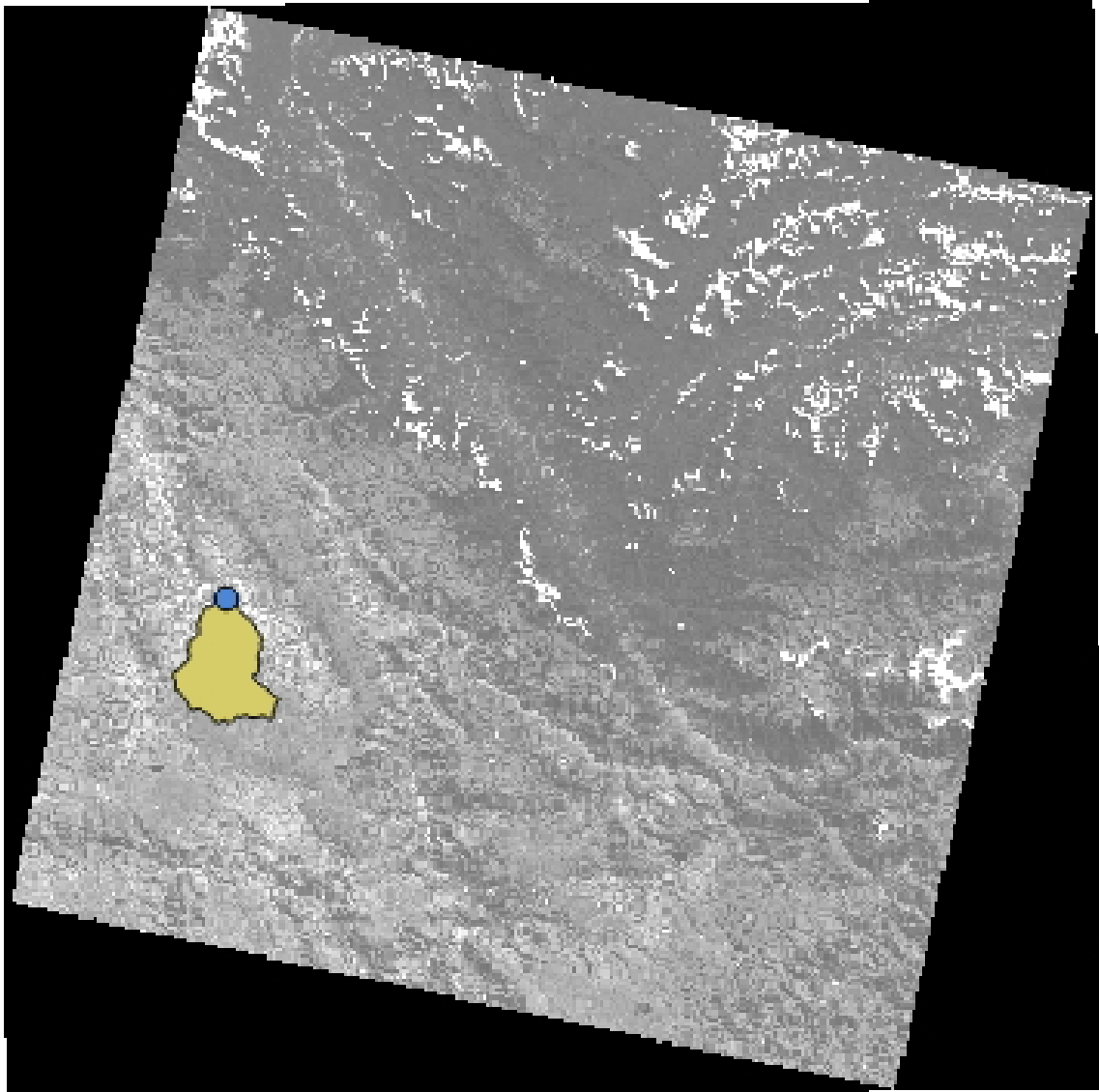


Fuente: Elaboración propia

Por esta razón primero se delimitó la superficie, la cuenca correspondiente cuyo punto de drenaje es la ubicación del puente interconexión Muyurina - Ayacucho, cuya superficie delimitada se muestra en la figura 3.35. Todas las operaciones concernientes para la obtención del índice de vegetación quedará restringida a esta área, la figura 3.36 muestra la relación existente entre la superficie analizada y las bandas obtenidas desde el proyecto LANDSAT v8, específicamente se muestra la relación en superficie entre el área de estudio y la banda número cuatro, rojo visible. La superficie de interés es mucho menor al área considerado por LANDSAT v8, la misma será restringida (cortado) en correspondencia a la superficie en estudio, para una mayor aproximación se

deberá tener en cuenta la resolución de las celdas de los archivos manipulados (tanto del archivo DEM -modelo digital de elevaciones y los archivos del proyecto LANDSAT v8, de las bandas cuatro y cinco).

Figura 3.36: Relación de las bandas 4 y 5 de LANDSAT v8 con la región de interés



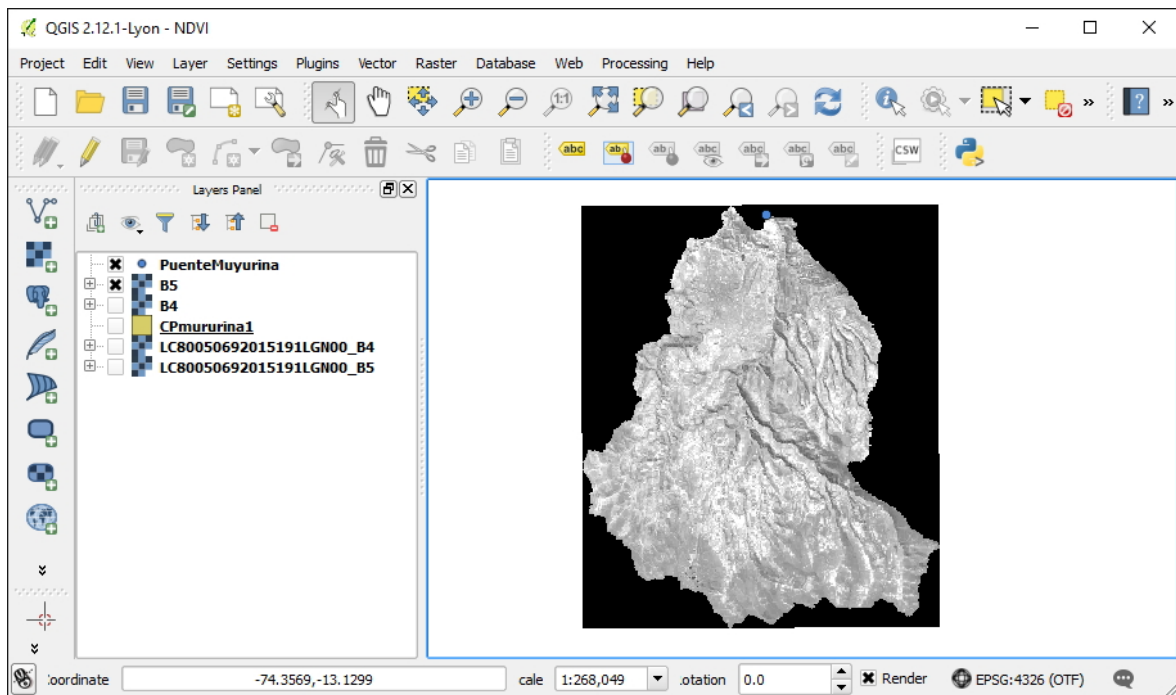
Fuente: Elaboración propia

Los archivos requeridos para la obtención de los índices de vegetación del proyecto LANDSAT v8, específicamente las bandas 4 y 5 fueron delimitados, la figura 3.37, teniendo en cuenta la superficie en estudio:

- El archivo B5 corresponde a la superficie delimitada del archivo correspondiente a la banda número 5, obtenidos desde el proyecto LANDSAT v8.

- El archivo B4 corresponde a la superficie delimitada del archivo correspondiente a la banda número 4, obtenidos desde el proyecto LANDSAT v8.
- Se cuenta de igual manera con un archivo vectorial que delimita la superficie de la cuenca de interés.

Figura 3.37: Archivos LANDSAT v8, bandas 4 y 5 delimitadas a la superficie en estudio



Fuente: Elaboración propia

Debido a la versatilidad de las aplicaciones utilizadas (Qgis Lyon v2.12-1) trabajar con varios sistemas de ubicación no es ningún inconveniente, dado que la aplicación dispone de la capacidad de transformar los distintos sistemas de coordenadas al vuelo, mostrando los archivos en uno general.

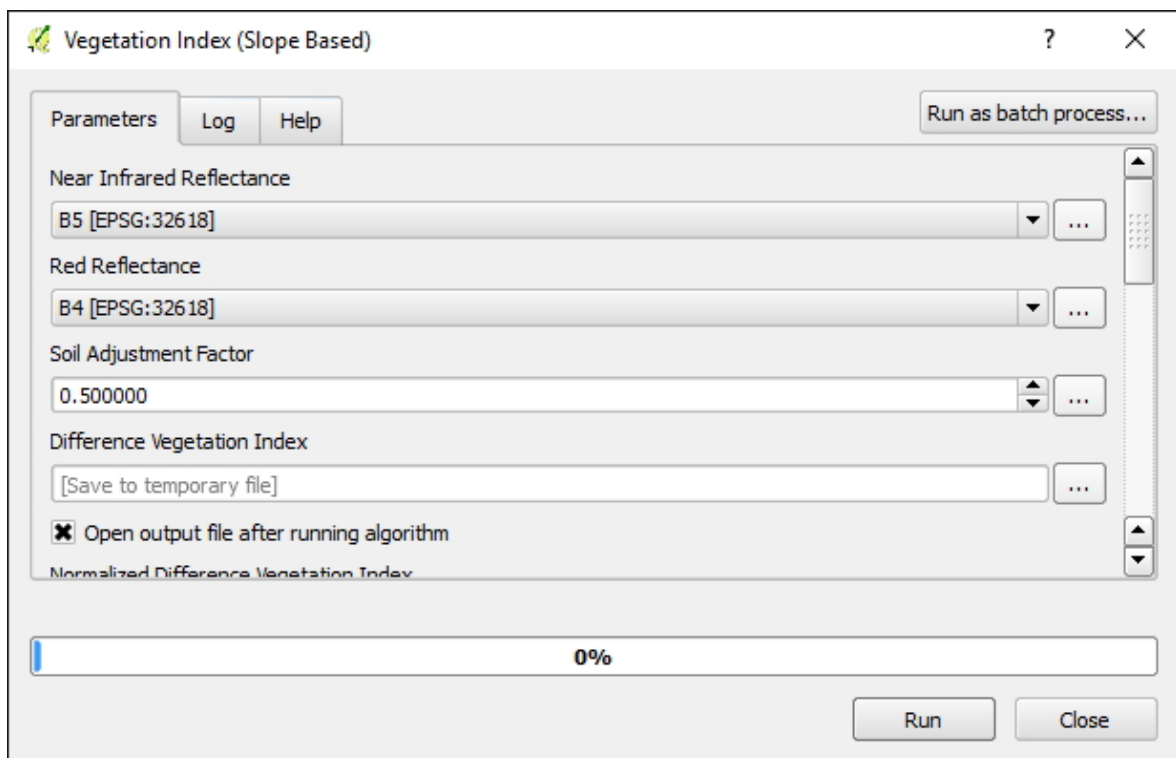
Para la determinación del índice de vegetación se utilizará el sistema SAGA GIS, desde QGIS, dentro de los muchos algoritmos que incluye la aplicación, incluye para el cálculo de índices de vegetación, el algoritmo denominado *Vegetation Index (Slope Based)*, cuya ventana de la aplicación se muestra en la figura 3.38, donde es necesario especificar lo siguiente:

- Near Infrared reflectance: en este caso corresponde con el archivo delimitado a la

región de interés B5.

- Red Reflectance: en este caso corresponde con el archivo delimitado a la región de interés B4.
- Especificar los archivos requeridos de salida, específicamente en el campo *Normalized Difference Vegetation Index*, en este caso se le dio un nombre de ndvi, cuyo tipo de archivo asignado por defecto es *.sdatt*, luego de haber generado el NDVI se le exporta a un archivo del tipo GeoTIFF.

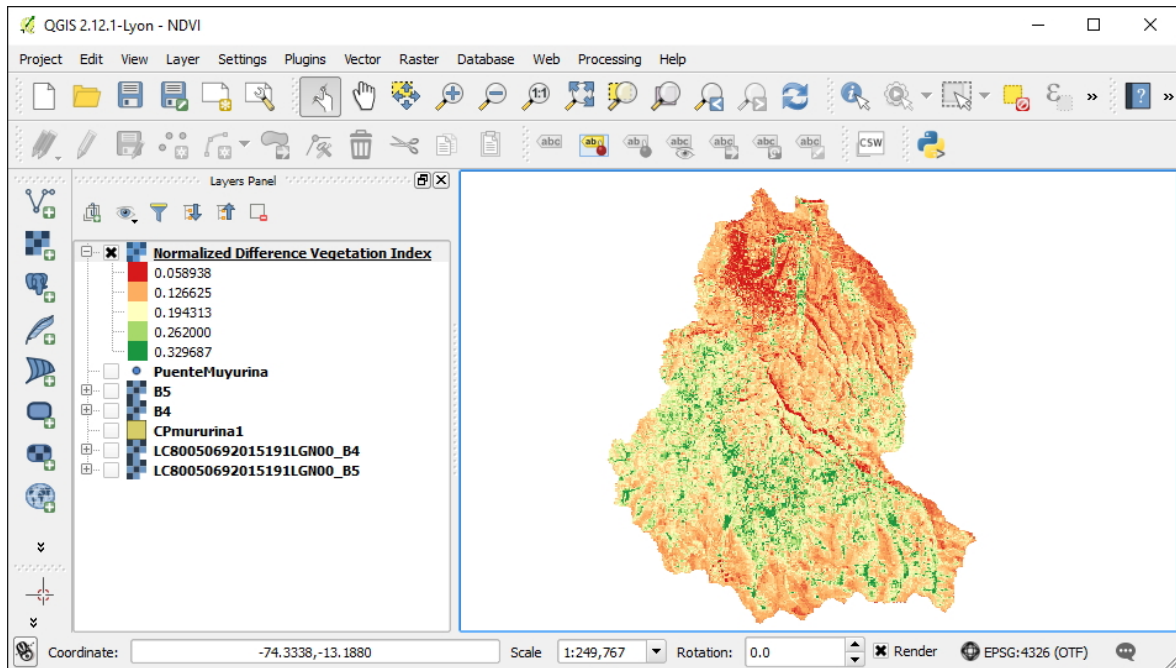
Figura 3.38: Ventana Vegetation Index (Slope Based)



Fuente: Adaptado desde Qgis

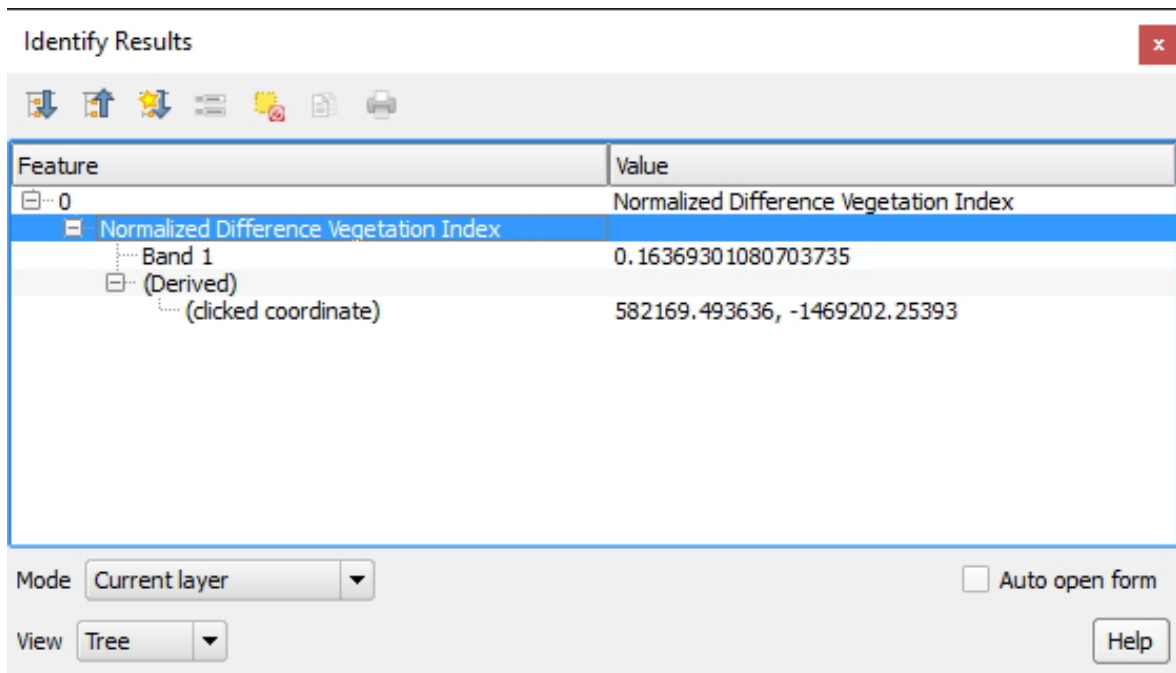
desde la ventana *Vegetation Index (based system)*, mostrada en la figura 3.38, luego de haber especificado los campos necesarios se obtiene los índices de vegetación para la zona delimitada, la figura 3.39 muestra el índice de vegetación para la cuenca en estudio, mientras la figura 3.40 muestra la información asociada a una celda, el índice de vegetación para una celda específica del archivo tipo raster, cuyas coordenadas quedan indicadas en el mismo gráfico.

Figura 3.39: Índice de vegetación en la superficie de interés



Fuente: Adaptado desde Qgis

Figura 3.40: Índice de vegetación de una celda específica



Fuente: Adaptado desde Qgis

3.6.5. Determinación del NC

Luego de haber determinado los índices de vegetación mostrada en la figura 3.39 para la cuenca en estudio, solamente queda relacionar cada intensidad del NDVI (para cada celda del archivo raster) con un determinado uso de suelo y ésta queda relacionada con un determinado número de curva. El número de curva queda directamente establecido por la intensidad del NDVI, mediante la definición establecida en la sección 2.3.2 de la página 25.

En este caso, el proceso queda limitado a obtener la superficie total para cada intervalo del NDVI asociado a un determinado número de curva en cada caso, esto se logra mediante consultas al archivo base y gestión mediante sistemas de información geográfica.

Tabla 3.5: Relación de la intensidad del NDVI y el uso de suelo

NDVI	Atributo
desde -1 hasta 0	agua o cubiertas artificiales
desde 0 hasta 0.2	suelo desnudo o vegetación muerta
desde 0.2 hasta 0.4	vegetación dispersa o poco vigorosa
desde 0.4 hasta 0.6	vegetación Abundante y vigorosa
desde 0.6 hasta 1	vegetación muy densa y vigorosa

Fuente: tomado desde [15]

La tabla 3.5 muestra la relación existente entre los niveles del NDVI y el uso del suelo, las superficies obtenidas para cada nivel del NDVI se encuentra establecida en la tabla 3.6 y su asignación respectiva con el número de curva correspondiente. Se consideró que las corrientes de agua o ríos, lagunas, embalses, etc. Que se encuentran en la zona de estudio no genera abstracción, por esta razón se le asigna un número de curva máximo, en los otros casos, cuando se tiene la clasificación de superficies conteniendo suelo desnudo o vegetación muerta, vegetación dispersa o poco vigorosa, vegetación abundante y vigorosa y zonas con vegetación muy densa y vigorosa, se le asigna el correspondiente número de curva; para el caso donde los niveles de índice de vegetación elevados, en la zona de estudio no se encontraron superficies relacionadas a este tipo

de coberturas. El número de curva final ponderado es equivalente a 77.6, obtenidos en base a procedimientos exclusivamente de sistemas de información geográfica.

Tabla 3.6: Superficies obtenidas para cada nivel de NDVI

NDVI	Superficie (Km2)	CN
desde -1 hasta 0	18.55234	100
desde 0 hasta 0.2	102.6125	82
desde 0.2 hasta 0.4	279.106	75
desde 0.4 hasta 0.6	10.17916	65
desde 0.6 hasta 1	0	0

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV: Análisis y discusión del resultado obtenido

En el presente capítulo se analiza los resultados obtenidos, se contrasta el número de curva con los estipulados en el Expediente Técnico materia de aplicación de la presente tesis y se presenta las diferencias encontradas.

4.1. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.6, estos resultados se obtienen relacionando el nivel del índice de vegetación con los usos del suelo, determinados en una cuenca hidrográfica. El número de curva ponderado así obtenido es 77.6 y es producto de la ponderación considerando cinco tipos de clasificación del uso del suelo en condiciones normales.

Superficies obtenidas para cada nivel de NDVI

NDVI	Superficie (Km2)	CN
desde -1 hasta 0	18.55234	100
desde 0 hasta 0.2	102.6125	82
desde 0.2 hasta 0.4	279.106	75
desde 0.4 hasta 0.6	10.17916	65
desde 0.6 hasta 1	0	0

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 4.41 y 4.42 representan las superficies clasificadas para cada tipo de uso de

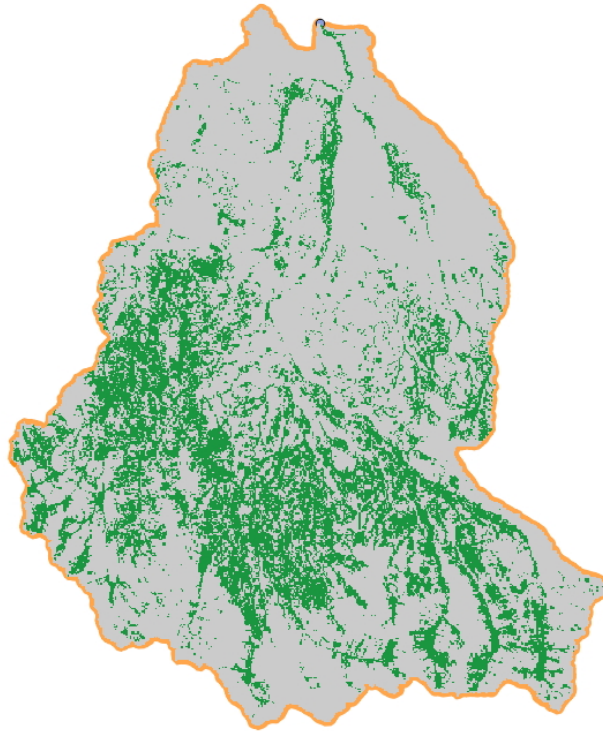


(a) Agua o cubiertas artificiales



(b) Suelo desnudo o vegetacion muerta

Figura 4.41: Uso del suelo de la cuenca en estudio, para los niveles del NDVI desde -1 hasta 0.2



(a) Vegetacion dispersa o poco vigorosa

Figura 4.42: Uso del suelo de la cuenca en estudio, para los niveles del NDVI desde mayores a 0.2 hasta 0.4

suelo teniendo en cuenta el índice de vegetación relacionado a los siguientes tipos de cobertura: agua o cubiertas artificiales, suelo desnudo o vegetación muerta, vegetación dispersa o poco vigorosa, vegetación Abundante y vigorosa y vegetación muy densa y vigorosa.

4.2. Análisis y discusión del resultado obtenido

La modalidad de la obtención del número de curva de una cuenca hidrográfica desarrollado en la tesis, sigue procedimientos actuales, haciendo uso del avance de la tecnología y las herramientas que con el tiempo se vuelven usuales y se extienden a la gran mayoría de los interesados, se requirió del uso de los sistemas de información geográfica, fotografías satelitales obtenidas desde el proyecto LANDSAT v8, en suma, se presenta adecuada alternativa para estimar el número de curva en cuencas hidrográficas.

4.2.1. Evaluación de la variación del índice de vegetación

Un aspecto importante a tener en cuenta para el desarrollo y obtención del número de curva relacionado con los índices de vegetación son las escalas espacial y temporal de las fotografías aéreas disponibles, es recomendable trabajar con una misma resolución en todos los archivos raster utilizados, los modelos digitales del terreno y las fotografías aéreas; otro aspecto a tener en cuenta es la calidad de las fotografías satelitales disponibles, se deben elegir aquellas que cuentan con un menor porcentaje de nubosidad sobre su superficie, esto con la finalidad de siempre disponer de la cobertura del suelo con la finalidad de relacionar el índice de vegetación con los números de curva, basado en la intensidad del NDVI.

Tabla 4.7: Variación del índice de vegetación en la zona de estudio

NDVI	Superficie (km ²)
desde -1 hasta 0	18.55234
desde 0 hasta 0.2	102.6125
desde 0.2 hasta 0.4	279.106
desde 0.4 hasta 0.6	10.17916
desde 0.6 hasta 1	0

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.1 muestra la variación de los índices de vegetación de diferencia normalizada disponibles para la cuenca en estudio, la misma que para cada intervalo de variación representa:

- Para NDVI entre -1 y 0: se encuentran directamente relacionados con superficies de agua (lagunas, ojos de agua, ríos, embalses) y superficies artificiales, donde toda la precipitación se convierte en escorrentía directa (precipitación efectiva), para la cuenca en estudio se obtiene una superficie de $18.55km^2$.
- Para NDVI entre 0 y 0.2: corresponde a suelo desnudo o vegetación muerta, donde solamente existe pérdidas de la precipitación por causa de la infiltración, evaporación del agua desde el suelo y retenciones en los charcos, la superficie

obtenida con estas características es de $102.6km^2$.

- Para NDVI entre 0.2 y 0.4: correspondiente a una vegetación dispersa o poco vigorosa, en este caso las pérdidas de la precipitación se deben a la infiltración, la evapotranspiración y la retención de la precipitación en los charcos, la superficie obtenida es de $279.1km^2$.
- Para NDVI entre 0.4 y 0.6: Asociada a una vegetación abundante y vigorosa, en la cuenca analizada se obtiene una superficie de $10.2km^2$.
- Para NDVI entre 0.6 y 1.0: se encuentra asociado a una vegetación densa y vigorosa, para la cuenca en estudio no se encuentra niveles del índice de vegetación con estas características, debido a la zona geográfica ubicada la cuenca en estudio.

4.2.2. Relación de los índices de vegetación y el uso de suelo

Cada intervalo de los índices de vegetación de diferencia normalizada se encuentra relacionada con un tipo de uso de suelo, tabla 3.5, de la página 66, la misma se muestra seguidamente.

Relación de la intensidad del NDVI y el uso de suelo

NDVI	Atributo
desde -1 hasta 0	agua o cubiertas artificiales
desde 0 hasta 0.2	suelo desnudo o vegetación muerta
desde 0.2 hasta 0.4	vegetación dispersa o poco vigorosa
desde 0.4 hasta 0.6	vegetación Abundante y vigorosa
desde 0.6 hasta 1	vegetación muy densa y vigorosa

Fuente: tomado desde [15]

Es posible considerar más intervalos relacionando los usos de suelo y los índices de vegetación de diferencia normalizada, varios estudios referidos al tema recomiendan la distribución considerada en la presente tesis.

4.2.3. Relación del uso del suelo y el número de curva

Obtenido las superficies para cada intervalo considerado del índice de vegetación de diferencia normalizada y asociada a los usos de suelo, los números de curva para cada grupo de uso de suelo se obtiene desde la tabla 2.12, que se encuentra en la página 30; la tabla 4.8 muestra los números de curva asociados para los usos de suelo clasificados en la cuenca hidrográfica, tomando en cuenta el tipo de suelo hidrológico.

Tabla 4.8: Usos de suelo y número de curva

Atributo	CN
agua o cubiertas artificiales	100
suelo desnudo o vegetación muerta	82
vegetación dispersa o poco vigorosa	75
vegetación Abundante y vigorosa	65
vegetación muy densa y vigorosa	45

4.2.4. Constrastación de los resultados con otras metodologías

Efectuando una contrastación con los resultados de interés del proyecto de inversión pública, con registro número 181224, denominado *Construcción de Puente Carrozable de Interconexión Muyurina, Distrito de Tambillo - Huamanga - Ayacucho*, se nota que el número de curva que asumen con la finalidad de obtener los caudales de máxima avenida lo efectúa sin justificación alguna, implementar el procedimiento desarrollado en la presente tesis permite obtener este parámetro de una forma detallada, clasificando las superficies en consideración de los índices de vegetación y de esta manera efectuar trabajos basado en fuentes de datos confiables.

Tabla 4.9: Comparación del número de curva

Descripción	CN
CN estipulado en el Expediente Técnico	55
CN obtenido en el desarrollo de la tesis	77.6

Fuente:elaboración propia

Desde la tabla 4.9 se observan los valores obtenidos del número de curva en el desarrollo de la tesis y lo que queda establecido en el expediente Técnico, materia de contratación de la tesis, lo más preocupante es que el grupo del trabajo que elaboró el proyecto, no brinda justificación alguna sobre la determinación de un número de curva de 55, como queda establecido en la tabla 4.9.

- Un número de curva menor (CN=55, del Expediente Técnico) indica la existencia de abstracciones mayores en la cuenca en estudio, y como consecuencia se obtendrá menor precipitación efectiva y por lo tanto menor caudal de máxima avenida.
- De acuerdo al número de curva obtenido en el desarrollo de la tesis (CN=77.6), indica una abstracción menor en comparación a lo establecido por el Expediente Técnico, por tanto se tendrá una mayor precipitación efectiva y mayor caudal de máxima avenida.

4.2.5. Implicancias de los resultados

El número de curva obtenido está basado en la identificación del uso de suelo para cada celda del archivo raster, disponiendo de celdas de 30m de lado la clasificación de los usos de suelo se realiza a gran detalle, estableciéndose como un procedimiento adecuado para la clasificación de los usos de suelo en cuencas hidrográficas. Todas las aplicaciones utilizadas en el desarrollo del trabajo son gratuitas y de libre distribución, iniciando de los archivos base como lo son los modelos digitales del terreno, las fotografías satelitales y aplicaciones utilizadas con fines de desarrollar y tratar en un ambiente de sistemas de información geográfica, la aplicación de libre aplicación y gratuita, QGIS, fue determinante para lograr los objetivos planteados para el desarrollo de la tesis.

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presenta las conclusiones, recomendaciones, trabajos futuros y limitaciones de las tesis desarrollada.

5.1. Conclusiones

- Se determinó el número de curva en una cuenca hidrográfica local a partir de registros obtenidos mediante percepción remota. El número de curva ponderado para la cuenca en estudio es de 77.6, la cuenca hidrográfica analizada es la cuenca del río Huatatas, cuyo punto de aforo corresponde al puente interconexión Muyurina - Ayacucho; el proceso de análisis y los resultados se logró determinar en base a aplicaciones de libre distribución y fotografías satelitales distribuidas gratuitamente.
- El índice de vegetación en general varía desde -1 hasta 1 , para la cuenca analizada y debido tipo de cobertura de usos de suelo existentes varía desde -0.214 hasta 0.4002 , que corresponde a usos del suelo del tipo: agua o cubiertas artificiales -en un porcentaje ascendente a 4.32% de la superficie de la cuenca, suelo desnudo o vegetación muerta (25% de la superficie total de la cuenca), vegetación dispersa o poco vigorosa (68% de la superficie total de la cuenca) y vegetación Abundante y vigorosa (2% de la superficie total de la cuenca).
- Todo el proceso de análisis y obtención de los índices de vegetación y el número

de curva en el desarrollo de la tesis se realizó desde el programa de sistemas de información geográfica de libre distribución y gratuita QGis Lyon v2.12-1, interactuando con las aplicaciones gratuitas y de libre distribución de igual manera, GRASS GIS 6.4.3 y SAGA GIS 2.1.2.

- La base gráfica de fotografías satelitales utilizadas para obtener el número de curva de la cuenca en estudio son las obtenidas del proyecto LANDSAT v8, que se encuentran distribuidas de forma libre y gratuita para todos los estudios en general. Se tuvo especial cuidado en seleccionar las fotografías con menor porcentaje de nubosidad disponible, se trabajó con una imagen con 2.69% de porcentaje de nubosidad.
- Los índices de vegetación se encuentran directamente relacionados con la cobertura o usos de suelo, en el desarrollo de la tesis y la cuenca analizada se relacionó el rango e los índices de vegetación con cinco tipos de usos del suelo: agua o cubiertas artificiales, suelo desnudo o vegetación muerta, vegetación dispersa o poco vigorosa, vegetación Abundante y vigorosa, vegetación muy densa y vigorosa

5.2. Recomendaciones

Se debe trabajar siempre con fotografías satelitales que dispongan menor porcentaje de nubosidad en relación al área presentada, porque estos elementos inciden directamente en las superficies que se les asignará los índices de vegetación por regiones, dado que se tiene el riesgo de confundir las regiones con nubosidad a superficies impermeables.

Se recomienda el uso de los programas de libre distribución y gratuitos, dado que se encuentran en constante evolución y mantenimiento, en el desarrollo de la tesis fue suficiente el uso de Qgis 2.12-1, interactuando con las aplicaciones gratuitas y de libre distribución de igual manera, GRASS GIS 6.4.3 y SAGA GIS 2.1.2.

5.3. Trabajos futuros

Dado que el proceso de la obtención del número de curva a partir de imágenes obtenidas mediante percepción remota y la aplicación de los sistemas de información geográfica es repetitivo, es conveniente la automatización de estos procedimientos, el mismo deberá efectuarse en base a lenguajes de programación soportados por QGIS 2.12-1, a la fecha se realizan muchos proyectos referentes a la hidráulica y la hidrología, por tanto su uso será inmediato.

Referencia Bibliográfica

- [1] Gert Aron, David F Lakatos y Arthur C Miller. “Infiltration formula based on SCS curve number”. En: *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103.4 (1977), págs. 419-427.
- [2] Stan Aronoff. “Geographic information systems: a management perspective”. En: (1989).
- [3] Keith Beven. “Changing ideas in hydrology the case of physically-based models”. En: *Journal of hydrology* 105.1 (1989), págs. 157-172.
- [4] Timothy R Bondelid, Richard H McCuen y Thomas J Jackson. *Sensitivity of SCS Models to Curve Number Variation*1. 1982.
- [5] Graeme F Bonham-Carter. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Vol. 13. Elsevier, 2014.
- [6] James V Bonta. “Determination of watershed curve number using derived distributions”. En: *Journal of irrigation and drainage engineering* 123.1 (1997), págs. 28-36.
- [7] Joaquín Bosque. “Sistema de Información geográfica”. En: *Ediciones Rialp. SA. I Edición. Madrid* (1992).
- [8] Miklós Bosznay. “Generalization of SCS curve number method”. En: *Journal of irrigation and drainage engineering* 115.1 (1989), págs. 139-144.
- [9] WC Boughton. “A review of the USDA SCS curve number method”. En: *Soil Research* 27.3 (1989), págs. 511-523.

- [10] Leendert Adriaan Bruijnzeel y Swami Prem Sampurno. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Faculty of Earth Sciences, Free University Amsterdam,, The Netherlands, 1990.
- [11] Pats Chavez, Stuart C Sides y Jeffrey A Anderson. “Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data- Landsat TM and SPOT panchromatic”. En: *Photogrammetric Engineering and remote sensing* 57.3 (1991), págs. 295-303.
- [12] Jing M Chen y Josef Cihlar. “Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images”. En: *Remote sensing of Environment* 55.2 (1996), págs. 153-162.
- [13] GEOG4340 Q Cheng. “Geographic Information System”. En: (1995).
- [14] Ven Te Chow. “Handbook of applied hydrology”. En: (1964).
- [15] Russell G Congalton. “Remote sensing and geographic information system data integration: error sources and”. En: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57.6 (1991), págs. 677-687.
- [16] Víctor Olaya Ferrero. *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno - Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*. 2004.
- [17] Derek C Ford y Paul W Williams. *Karst geomorphology and hydrology*. Vol. 601. Unwin Hyman London, 1989.
- [18] Stewart Fotheringham y Peter Rogerson. *Spatial analysis and GIS*. CRC Press, 2013.
- [19] David C Garen y Daniel S Moore. *CURVE NUMBER HYDROLOGY IN WATER QUALITY MODELING: USES, ABUSES, AND FUTURE DIRECTIONS1*. 2005.
- [20] Montserrat Gómez Delgado y José I Barredo Cano. “Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio: en la ordenación del territorio”. En: *Ra-Ma, Madrid* (2006).
- [21] Michael F Goodchild. “Geographic information system”. En: *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, 2009, págs. 1231-1236.

- [22] Nancy D Gordon, Brian L Finlayson y Thomas A McMahon. *Stream hydrology: an introduction for ecologists*. John Wiley y Sons, 2004.
- [23] Richard H Hawkins y col. “Curve number hydrology: State of the practice”. En: ASCE. 2008.
- [24] Allen T Hjelmfelt Jr. “Investigation of curve number procedure”. En: *Journal of Hydraulic Engineering* 117.6 (1991), págs. 725-737.
- [25] Allen T Hjelmfelt. “Empirical investigation of curve number technique”. En: *Journal of the Hydraulics Division* 106.9 (1980), págs. 1471-1476.
- [26] William E Huxhold y Allan G Levinsohn. “Managing geographic information system projects”. En: (1995).
- [27] Susan K Jenson y Julia O Domingue. “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis”. En: *Photogrammetric engineering and remote sensing* 54.11 (1988), págs. 1593-1600.
- [28] Kevin W King, JG Arnold y RL Bingner. “Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT”. En: *Transactions of the ASAE* 42.4 (1999), págs. 919-925.
- [29] Johan Maurice Gis ele Lammens. “A computational model of color perception and color naming”. Tesis doct. Citeseer, 1994.
- [30] Ray K Linsley Jr, Max A Kohler y Joseph LH Paulhus. “Hydrology for engineers”. En: (1975).
- [31] Ray K Linsley, Max Adam Kohler y Joseph LH Paulhus. *Applied hydrology*. McGraw-Hill New York, 1949.
- [32] David J Maguire, Michael Batty y Michael F Goodchild. *GIS, spatial analysis, and modeling*. Esri Press, 2005.
- [33] David R Maidment y col. *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill Inc., 1992.
- [34] Jacek Malczewski. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons, 1999.

- [35] Claude Michel, Vazken Andréassian y Charles Perrin. “Soil conservation service curve number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?” En: *Water Resources Research* 41.2 (2005).
- [36] Surendra Kumar Mishra y Vijay P Singh. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Vol. 42. Springer Science & Business Media, 2003.
- [37] F Javier Moldes Teo. “Tecnología de los sistemas de información geográfica”. En: *Madri: Ra-ma* (1995).
- [38] DM Moore, BG Lees y SM Davey. “A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information system”. En: *Environmental Management* 15.1 (1991), págs. 59-71.
- [39] María Teresa Camacho Olmedo. “Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS”. En: *Cuadernos Geográficos* 39 (2006), págs. 231-233.
- [40] Hirofumi Onishi. *Geographic information system*. US Patent 6,389,356. Mayo de 2002.
- [41] Victor M Ponce y Richard H Hawkins. “Runoff curve number: Has it reached maturity?” En: *Journal of hydrologic engineering* 1.1 (1996), págs. 11-19.
- [42] FJ Fernández Rodríguez, R Menéndez Duarte y J Marquínez. “Aplicación de un Sistema de Información Geográfica en la cartografía temática y clasificación geomorfológica de los sistemas fluviales en Asturias”. En: *La Revista de la Sociedad Geológica de España* 10.1-2 (1997), págs. 117-130.
- [43] Elliot M Schneiderman y col. “Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model”. En: *Hydrological Processes* 21.25 (2007), págs. 3420-3430.
- [44] Joaquín Bosque Sendra. “Sistema de Información Geográfica”. En: *Estudios Geográficos* 55.214 (1994), pág. 201.
- [45] Vijay P Singh y col. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 1995.

- [46] Conghe Song y col. “Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?” En: *Remote sensing of Environment* 75.2 (2001), págs. 230-244.
- [47] David K Todd y Larry W Mays. *Groundwater hydrology edition*. Wiley, New Jersey, 2005.
- [48] James E Vogelmann y col. “Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the conterminous United States from Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources”. En: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67.6 (2001).
- [49] Jimmy R Williams y William V LaSeur. “Water yield model using SCS curve numbers”. En: *Journal of the Hydraulics Division* 102.9 (1976), págs. 1241-1253.
- [50] Donald E Woodward y col. “Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio”. En: *Conference Proceeding Paper, World Water and Environmental Resources Congress*. 2003.
- [51] Michael F Worboys y Matt Duckham. *GIS: a computing perspective*. CRC press, 2004.
- [52] Chaowei Yang y col. *Geographic information system*. US Patent 7,725,529. Mayo de 2010.
- [53] Vujica Yevjevich y col. *Probability and statistics in hydrology*. Water resources publications Fort Collins, CO, 1972.
- [54] Xiaoyong Zhan y Min-Lang Huang. “ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps”. En: *Environmental Modelling & Software* 19.10 (2004), págs. 875-879.

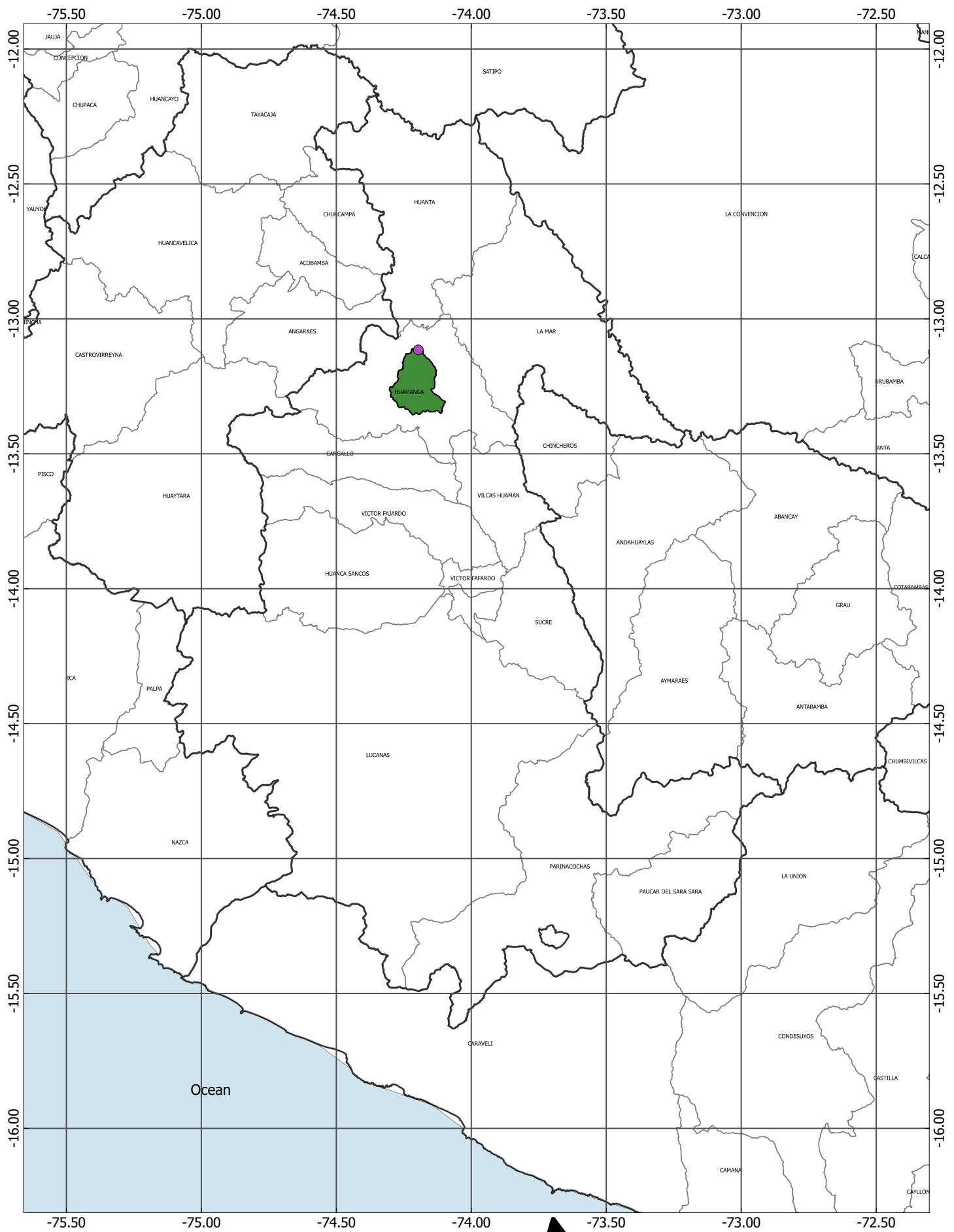
Anexos

Anexo A

Planos de la cuenca Huatatas

Los planos que se incluyen en relación a la cuenca del Río Chacco, son los siguientes:

- Plano de Ubicación de la cuenca Huatatas.
- Plano de Localización.
- Plano de la red hídrica.
- Plano de la variación altitudinal de cuenca.
- Plano de índice de vegetación de diferencia normalizada.



PLANO DE UBICACIÓN CUENCA CHACCO

25 0 25 50 75 100 km



86
SISTEMA DE REFERENCIA: WGS84

Legend

- Punto de aforo
- Cuenca del río Chacco
- Límite Departamental
- Límite Provincial
- Ocean

-73.95

-74.10

-74.25

-13.20

-13.35

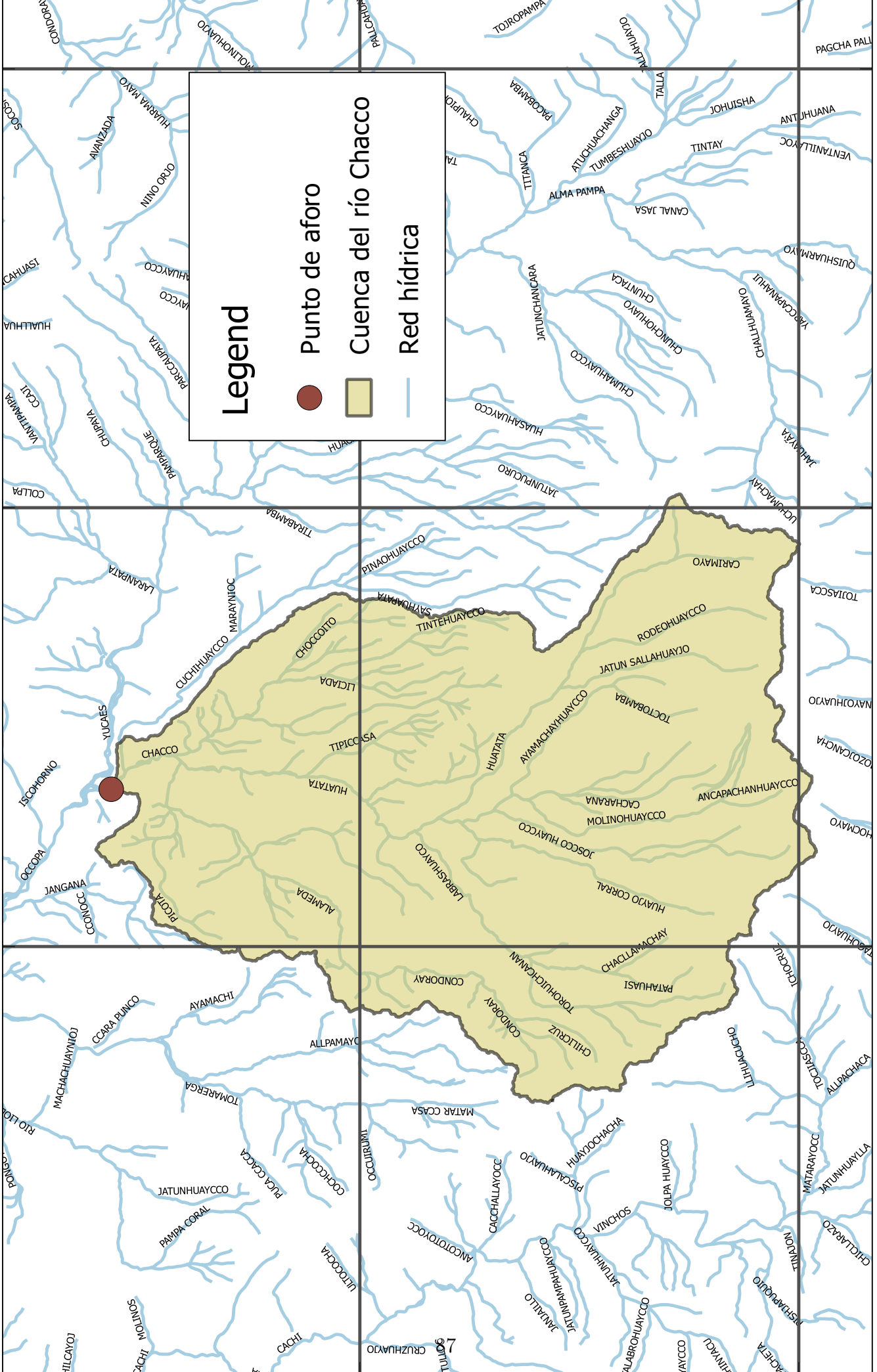
-73.95

-74.10

-74.25

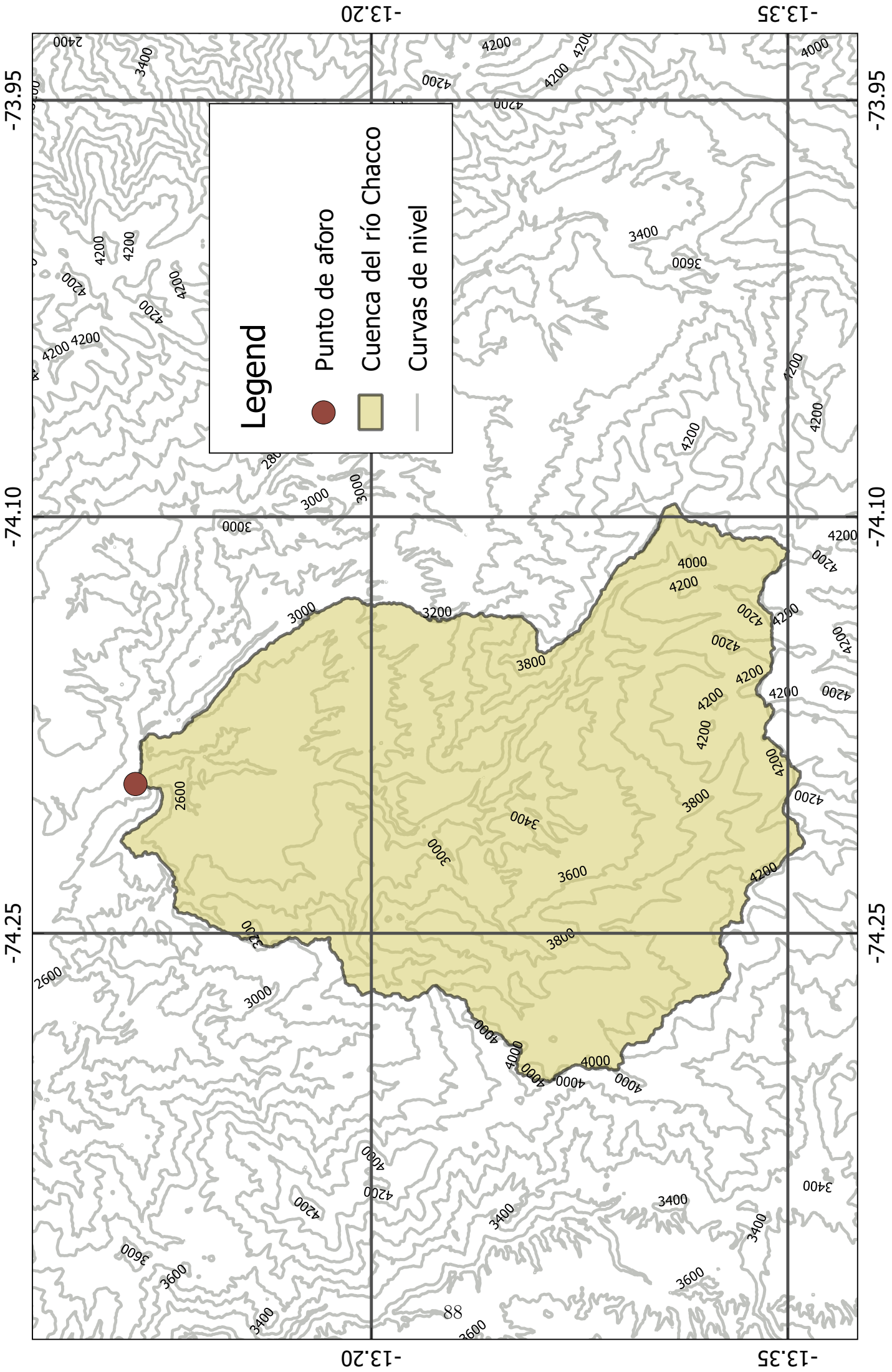
-13.20

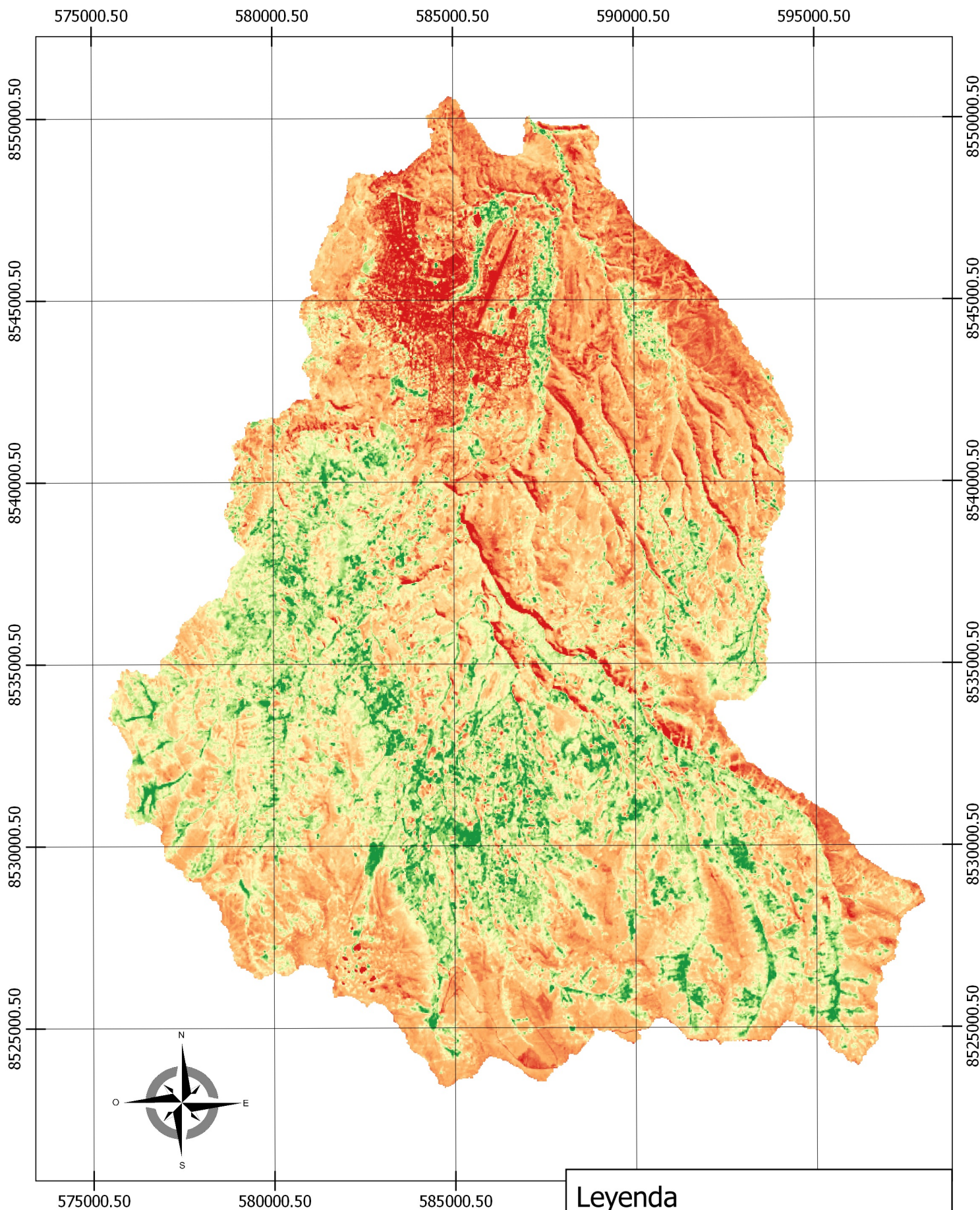
-13.35



Legend

- Punto de aforo
- Cuenca del río Chacco
- Red hídrica





CUENCA DEL RIO HUATATAS

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

WGS 84 / UTM Zone 18S

Leyenda

Normalized Difference Vegetation Index

- 0.058938
- 0.126625
- 0.194313
- 0.262000
- 0.329687