

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



OBTENCIÓN DE LA VARIACIÓN HIDROLÓGICA EN
CUENCAS POR EL CAMBIO DE USO DEL SUELO

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

JULIO CÉSAR CRUZ HEREDIA

ASESOR:

ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - PERÚ

15 DE AGOSTO DE 2017

OBTENCIÓN DE LA VARIACIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS POR EL
CAMBIO DE USO DEL SUELO

JULIO CESAR CRUZ HEREDIA

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

INGENIERO CIVIL

2017

Autor : Julio Cesar Cruz Heredia
Recomendado : M.Sc. Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez
Asesor de Tesis
Aceptado por : M.Sc. Ing. Carlos Prado Prado
Decano de la FIMGC

© 2017; 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.

A Dios por guiar y bendecir mi camino. A mi madre Gregoria Heredia Barboza, por apoyarme de manera incondicional en mi formación académica; Gracias madre por apostar siempre en la educación. A mi padre que en paz descanse. A mi esposa e Hijo por darme el aliento para seguir adelante.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, alma mater, del cual me siento complacido de haber pertenecido y egresado de sus aulas.

A los docentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil, por la contribución durante mi formación académica profesional.

Agradecer al Ingeniero Edmundo Canchari Gutiérrez, por compartir información con todos aquellos que están interesados en la investigación. Sus conocimientos son dignos de admiración.

En general a todos aquellos que no describo pero que si aportaron con sus palabras y consejos para seguir progresando.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

Ayacucho, 15 de agosto de 2017

Julio Cesar Cruz Heredia

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. Antecedentes	3
1.3. Planteamiento del Problema	6
1.3.1. Problema General	6
1.3.2. Problema Específicos	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivo Específico	7
1.5. Hipótesis	8
1.5.1. Hipótesis General	8

1.5.2. Hipótesis Específico	8
1.6. Variables e indicadores	9
1.7. Justificación	9
1.8. Metodología y Plan de trabajo	10
Capítulo II: Marco teórico	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Antecedentes a nivel internacional	12
2.1.2. Antecedentes a nivel nacional	14
2.2. Sistemas de información geográfica	14
2.2.1. Qué es un SIG	14
2.2.2. Sistemas de referencia	16
2.2.2.1. Coordenadas geográficas	16
2.2.2.2. Proyecciones cartográficas	18
2.2.3. Tipos de archivos	19
2.2.3.1. Archivos vectorial	20
2.2.3.2. Archivos ráster	20
2.3. Satélites de teledetección de recursos naturales	20
2.3.1. LANDSAT	21
2.3.2. SPOT	22
2.3.3. ENVISAT	23
2.3.4. IRS	23
2.3.5. TERRA	25
2.3.6. EO-1	26
2.3.7. Programa COPERNICUS	27
2.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada	28
Capítulo III: Estudio de caso	30
3.1. Descripción general de la cuenca	30
3.1.1. El sistema Chiara	31

3.1.2.	Puntos de aforo	34
3.1.3.	Ubicación	34
3.1.3.1.	Ubicación política	34
3.1.3.2.	Ubicación geográfica	35
3.1.3.3.	Unidad hidrográfica	35
3.1.3.4.	Autoridad administrativa del agua	36
3.1.4.	Geomorfología	38
3.1.4.1.	Propiedades morfométricas	38
3.1.4.2.	Geología	38
3.2.	Análisis y tratamiento de la información hidro meteorológica e hidrométrica	46
3.2.1.	Estaciones climatológicas	46
3.2.2.	Análisis de registros anuales	49
3.3.	Precipitación diaria máximo anual	52
3.4.	Cambio de uso del suelo en la cuenca de interés	52
3.4.1.	Archivos LANSAT	53
3.4.2.	Obtención del NDVI	53
3.4.3.	Superficie para cada uso de suelo	56
3.4.4.	Caudales de máxima avenida	59
Capítulo IV: Resultados obtenidos y su análisis		60
4.1.	Resultados de la investigación	60
4.2.	Usos de suelo y el NDVI	62
4.2.1.	Nomenclatura de las bandas	62
4.2.2.	Correcciones requeridas	62
4.2.3.	Índice de vegetación de diferencia normalizada	65
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones		66
5.1.	Conclusiones	66
5.2.	Recomendaciones	67

Bibliografía	68
Anexos	70
Anexo A. Caudales de máxima avenida	71
Anexo B. Clasificación de uso del suelo	91
Anexo C. Estimación de caudales de máximas avenidas por el método racional	94

Índice de tablas

3.1. Puntos de captación	34
3.2. Límite geográfico	35
3.3. Propiedades morfométricas Cuenca Molino Huayqo	39
3.4. Propiedades morfométricas Cuenca Qosqo Huayqo	41
3.5. Propiedades morfométricas Cuenca Mutuy Huayqo	42
3.6. Propiedades morfométricas Cuenca Lambras Huayqo	44
3.7. Lista de estaciones meteorológicas	48
3.8. Test de Hermert de la precipitación anual, Estación Allpachaca	51
3.9. Precipitación máxima diaria, estación Huamanga	52
3.10. Relación del NDVI y el uso de suelo	56
3.11. Superficies para cada uso de suelo obtenida del programa envi 5.3	58
3.12. Número de curva para distintos periodos obtenida del programa envi 5.3	59
4.13. Bandas LANDSAT 4 y 5	62
4.14. bandas LANDSAT 7	63
4.15. Bandas LANDSAT 8	63
5.16. Número de curva para distintos periodos y caudal de máxima avenida	66
C.1. Coeficiente de escorrentía para cada tipo de suelo	97

Índice de figuras

1.1. Variables e indicadores	9
2.2. Sistema de información geográfica	15
2.3. Representación de la información	16
2.4. Esquema de los elementos del sistema de coordenadas geográficas	17
2.5. Zonas UTM	19
2.6. Dimensión de los datos geográficos	19
2.7. Representación en formato ráster y vectorial del mundo real	20
2.8. Fechas de lanzamiento de los satélites LANDSAT	21
2.9. Satélites LANDSAT	22
2.10. Satélites SPOT 5	23
2.11. Satélites ENVISAT	24
2.12. Satélites IRS P6	24
2.13. Satélites TERRA	26
2.14. Satélites EO-01	27
2.15. Página oficial del proyecto ESA	28
3.16. Punto de captación quebrada Molino Huayqo	32
3.17. Estructuras hidráulicas existentes	32
3.18. Captación sobre la quebrada Mutuy huayqo	33
3.19. Estado actual de los canales existentes	33
3.20. Ubicación general de las cuencas	35
3.21. Cuencas asociadas a las captaciones existentes	36
3.22. Unidad hidrográfica correspondiente a la cuenca en estudio	37

3.23. Autoridad administrativa del agua correspondiente a la cuenca en estudio	37
3.24. Cuenca Molino Huayqo	40
3.25. Cuenca Qosqo Huayqo	40
3.26. Cuenca Mutuy Huayqo	43
3.27. Cuenca Lambras Huayqo	43
3.28. Estaciones climatológicas	47
3.29. Archivos proyecto LANDSAT 8 para la zona en estudio	53
3.30. Archivos proyecto LANDSAT 7 para la zona en estudio	54
3.31. Archivos proyecto LANDSAT 5 para la zona en estudio	54
3.32. Relación del archivo LANDSAT 8 y la cuenca Lambras Huayqo	55
3.33. Región de interés, archivos LANDSAT y la cuenca Lambras Huayqo	56
3.34. Estadística de la clasificación NDVI, cantidad de celdas	57
3.35. Estadística de la clasificación NDVI, cantidad de celdas indicando el uso de suelo	58
4.36. Determinación de las superficies en porcentaje, para cada tipo de uso de suelo	61
4.37. Hidrograma de máxima avenida, cuenca Lambras Huayqo	61
4.38. Firma espectral característico de la cuenca analizada	64
4.39. Firma espectral característico	64
4.40. Firma espectral de una sección de la cuenca analizada	65
B.1. Clasificación del NDVI en intervalos para uso de suelo	92
B.2. NDVI para la cuenca Lambras Huayqo	93

Resumen

La finalidad del desarrollo de la tesis es determinar la variación hidrológica, a nivel de los caudales de máxima avenida, como consecuencia del cambio de uso del suelo en las cuencas hidrográficas en general, particularmente se analiza en tres etapas para una cuenca ubicada en la región Ayacucho. Se hace uso de los registros distribuidos por el proyecto LANDSAT en sus tres versiones, LANDSAT 5, 7 y 8, desde cuyas bandas correspondientes se obtiene el NDVI, luego de la corrección radio-métrica y atmosférica, los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se encuentran directamente relacionados con los usos del suelo y éstas con los números de curva, es el proceso de identificación de los usos de suelo en fechas específicas y su obtención de los caudales de máxima avenida.

Palabras clave: LANDSAT, usos de suelo, NDVI, caudales de máxima avenida, hidrología.

Introducción

El trabajo trata sobre la respuesta de la variación hidrológica en cuencas hidrográficas como consecuencia del cambio de uso de suelo (el uso del suelo es el uso que los seres humanos hacen de la superficie terrestre), el cambio de uso de suelo es frecuente, adaptado a las necesidades y requerimientos del hombre, con fines de elevar o mejorar sus condiciones de vida; en esta búsqueda, los usos de suelo cambian con mucha frecuencia, es así, que regiones enteras se transforman en ciudades, otras en zonas de cultivo, caminos, lugares de esparcimiento, etc. Modificando inmediatamente el comportamiento hidrológico de la cuenca asociada a las zonas que cambiaron su estado o medio ambiente natural.

Actualmente, los proyectos de aprovechamiento hídrico, para el diseño específico de las estructuras hidráulicas: puentes, captaciones, presas, etc. No consideran el cambio de uso de suelo de las cuencas, por tanto, se encuentran en incertidumbre y riesgo del colapso de estas estructuras hidráulicas por el cambio de la respuesta hídrica de las cuencas hidrográficas.

En la presente investigación se evalúa la variación de los caudales de máxima avenida en una cuenca local como consecuencia del cambio de uso del suelo, se realiza el análisis en la cuenca Lambras Huayqo, para obtener la variación del uso de suelo se toma a partir de los registros del proyecto LANDSAT, que se encuentra vigente desde los inicios de 1970, de cuyas bandas se obtendrán los índices de vegetación de diferencia normalizada asociado a cada uso de suelo, lo cual mediante modelos de transformación

de precipitación en escorrentía se obtendrán los hidrogramas o respuesta hídrica de las cuencas, en este caso se obtendrán los hidrograma de máxima avenida para usos de suelo correspondientes a los años de vigencia del proyecto LANDSAT, se culmina con la presentación de la respuesta hídrica asociada al cambio de uso de suelo.

En el desarrollo de la tesis será necesario una documentación adecuada de los fundamentos teóricos de los sistemas de información geográfica, aplicaciones para el tratamiento de los sistemas de información geográfica (Qgis, GRASS GIS, Saga GIS), se requiere de igual manera el estudio completo del proyecto LANDSAT, dado que será la fuente para la obtención del cambio de uso de suelo de la cuenca es estudio para distintas épocas, en los años de 1970 y en la actualidad, finalmente será necesario los modelos de transformación de la precipitación en escorrentía para obtener los hidrogramas esperados.

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

Surge a causa de los modelos de transformación de la precipitación en escorrentía, específicamente aquellas que determinan los caudales de máxima avenida, ninguna considera el cambio de uso de suelo constante en las cuencas; se determina el uso de suelo para distintas etapas y su correspondiente respuesta hídrica a nivel de los caudales de máxima avenida.

1.2. Antecedentes

Los trabajos basados sobre la transformación de la precipitación en escorrentía, en la actualidad, existen muchos; de igual forma existe gran cantidad de artículos, libros, investigaciones realizadas sobre la clasificación de los usos de suelo a partir de los registros disponibles del proyecto LANDSAT v8. Otros trabajos, de igual forma, asocian los índices de vegetación de diferencia normalizada con usos de suelo específicos.

Los trabajos existentes que tratan sobre temas concernientes a la presente investigación son:

- El artículo titulado *Índice de vegetación, aplicación del NDVI*, publicado por la Revista *TELE DETECCIÓN Avances y Aplicaciones*, VIII Congreso Nacional de Tele detección Albacete, España, 1999. pp. 217-219, cuyo autor - E.G. Manrique; cuyo resumen: El trabajo aplica el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) del TM a diversos espacios del Sur y Sureste de Andalucía. Reducido el límite de los valores negativos y positivos a -1 y $+1$ se puede señalar, sobre la imagen las zonas de igual índice de vegetación. Se comparan las diferencias existentes entre los índices obtenidos del SPOT y los del TM sobre el mismo espacio.
- Otro artículo titulado *Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica*, publicada por la Universidad Politécnica de Valencia, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA, cuyos autores: Montserrat Ferrer y otros, en cuyo artículo concluyen: Una de las metodologías más extendidas y experimentadas para la cuantificación de la escorrentía es el modelo empírico del número de curva, CN, del Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU. El parámetro hidrológico de referencia, CN, es función de diversas variables relacionadas con las características físicas de la cuenca. La relación entre dichas variables es tabular, lo que facilita su aplicación espacial mediante los SIG. Una ventaja que presenta la metodología propuesta es que la actualización de los mapas del número de curva es mucho más rápida y económica, puesto que supone únicamente cambiar los datos de algún mapa de variables (normalmente el de usos del suelo) y generar de nuevo el mapa de CN. Una vez la información forma parte del SIG utilizado, la generación del mapa del número de curva es un proceso rápido, y comparativamente menos pesado y más preciso que la superposición manual de las distintas capas de información, especialmente si se tiene en cuenta que cada vez se podrá adquirir más fácilmente información en formato

digital.

- El artículo, *Estimación del número de curva en la cuenca del río Arrefices - Provincia de Buenos Aires*, publicado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Instituto de Clima y Agua de Argentina, concluye: La herramienta ArcRunoff para el cálculo del CN fue implementada satisfactoriamente en la cuenca del Río Arrecifes. Los mapas de zonificación del CN, permitieron realizar un análisis espacial de los principales procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca bajo diferentes tipos de suelo y usos.
- El artículo titulado, *Relación precipitación escurrentía y numero de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo, cuenca modal del sistema serrano de la Ventana, Argenetina*, publicada en la Revista FCA UNCuyo. Tomo XXXIX. N°1. Año 2007. 21-28, concluyen: 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.

Tomando como trabajos previos las citadas con anterioridad, específicamente en el proceso de la obtención del número de curva de toda la cuenca relacionada directamente a las abstracciones de la misma, se efectuará la aplicación a una cuenca hidrográfica local.

1.3. Planteamiento del Problema

La necesidad de conocer las variaciones de la respuesta hídrica en las cuencas, causados directamente por el cambio de uso de suelo, se debe principalmente a su incidencia en todas las estructuras hidráulicas. Muchas estructuras hidráulicas para su diseño consideran los caudales de máxima avenida, obtenidas para condiciones particulares y actual de la cuenca, estos hidrogramas son muy sensibles al cambio principalmente de uso de suelo de la cuenca, varía considerablemente en relación al cambio del uso de la superficie terrestre.

1.3.1. Problema General

¿Cuánto varía la Respuesta Hidrológica en Cuencas Hidrográficas a causa del Cambio de Uso del Suelo?

1.3.2. Problema Específicos

- ¿Cómo determinar la variación del uso del suelo en una cuenca hidrográfica para distintas épocas a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8?.
- ¿De qué manera se relaciona los registros del proyecto LANDSAT v8 con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)?.
- ¿Cómo obtener los números de curva en una cuenca hidrográfica a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada?.
- ¿Cuál es la influencia del índice de vegetación de diferencia normalizada para la determinación de la abstracción total de la cuenca?.
- ¿Existe la disponibilidad de aplicaciones de libre distribución para el tratamiento de sistemas de información geográfica y la obtención de los índices de vegetación

de diferencia normalizada a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8?.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Obtener la variación hidrológica en cuencas como consecuencia del cambio de uso del suelo.

1.4.2. Objetivo Específico

- Determinar la variación del uso del suelo en una cuenca hidrográfica para distintas épocas a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8.
- Obtener la relación existente entre los registros del proyecto LANDSAT v8 con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
- Obtener los números de curva en una cuenca hidrográfica a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Precisar la influencia el índice de vegetación de diferencia normalizada para la determinación de la abstracción total de la cuenca.
- Utilizar aplicaciones de libre distribución para el tratamiento de sistemas de información geográfica y la obtención de los índices de vegetación de diferencia normalizada a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El cambio de uso de suelo genera alteración en la respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas.

1.5.2. Hipótesis Específico

- La variación del uso del suelo en una cuenca hidrográfica, para distintas épocas, se obtiene a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8.
- Las bandas 4 y 5 del proyecto LANDSAT v8 se relacionan con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
- Cada nivel del índice de vegetación de diferencia normalizada, dispone con su equivalencia representado en números de curva.
- El índice de vegetación de diferencia normalizada, influye directamente (determina) para la obtención de la abstracción (pérdidas de la precipitación por infiltración, evaporación, transpiración, retenciones, etc.) total de la cuenca.
- Las aplicaciones de libre distribución Qgis, GRASS GIS, SAGA GIS se encuentran suficientemente implementadas, para el tratamiento de sistemas de información geográfica y la obtención de los índices de vegetación de diferencia normalizada a partir de los registros del proyecto LANDSAT v8.

1.6. Variables e indicadores

Las variables e indicadores identificadas para el desarrollo de la tesis quedan establecidas en la figura 1.1.

Variables	Indicadores
Directas (independientes)	Directas
a) La cuenca hidrográfica	Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)
b) Usos del suelo	
Indirectas (dependientes)	Indirectas
Respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica	Hidrograma de máximas avenidas
Intervinientes	Intervinientes
a) Propiedades morfométricas de la cuenca hidrográfica	a) delimitación de la cuenca: superficie, perímetro, ubicación de la cuenca, ect.
b) Variables climatológicas	b) Precipitación, temperatura, humedad, horas de sol, velocidad del viento

Figura 1.1: Variables e indicadores

1.7. Justificación

El trabajo se justifica y es importante por las siguientes razones:

Relevancia social: Es importante para la sociedad en su conjunto, porque contribuye en la determinación de los caudales de máxima avenida en una determinada cuenca hidrográfica, asociado estos eventos extremos al cambio de uso de suelo que sufren las cuencas hidrográficas.

Implicaciones prácticas: Con aplicación directa en el diseño de estructuras hidráulicas, hasta la actualidad, en el diseño de las estructuras hidráulicas, solamente se consideran los caudales de máxima avenida obtenidos para una condición actual de la cuenca, sin considerar el cambio de uso de suelo y por tanto la variación de su respuesta hídrica.

Utilidad metodológica: La consideración de la variación del uso del suelo en las respuesta hidrológica en las cuencas y su incidencia directa en el diseño de estructuras hidráulicas, debe ser evaluado durante el periodo de vida útil para el que se diseña la estructura hidráulica, de esta manera se garantizará el correcto funcionamiento de las estructuras hidráulicas.

1.8. Metodología y Plan de trabajo

La investigación propuesta, teniendo en cuenta sus particularidades, se clasifica:

- Desarrolla un enfoque cuantitativo, porque la investigación es secuencial y probatorio. Para cada periodo se obtiene la variación de uso de suelo de la cuenca y la respuesta hídrica de la misma.
- El nivel o alcance de investigación queda definido por la naturaleza de la investigación, en este caso corresponde a un alcance *correlacional*, porque relaciona variables, el cambio de uso del suelo con la variación de los caudales de máxima avenida (respuesta hidrológica).

En el plan de trabajo, cuenta con el siguiente procedimiento:

- Inicia con la documentación de la fundamentación teórica de los temas requeridos para el desarrollo de la tesis, específicamente: los sistemas de información geográfica, el proyecto LANDSAT v8, transformación de la precipitación en esorrentía, obtención de los hidrogramas de máxima avenida.
- Desarrollo de la tesis correspondiente al capítulo de materiales y métodos, la delimitación de la zona de estudio mediante la aplicación de sistemas de información geográfica y la determinación de los parámetros morfométricos necesarios, determinación de los usos del suelo y su relación con los índices de vegetación de diferencia normalizada, obtención de las abstracciones y caudales o hidrogramas

de máxima avenida.

- Análisis de los resultados obtenidos, para distintas épocas o periodos de usos de suelo en la cuenca hidrográfica de aplicación.

Capítulo II: Marco teórico

En el presente capítulo se considera la fundamentación teórica de los modelos requeridos para el desarrollo de la tesis, entre ellos: los sistemas de información geográfica, la teledetección, modelos para la determinación de los caudales de máxima avenida.

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

En todos los países se utilizaron las imágenes LANDSAT con la finalidad de evaluar la evolución del uso del suelo en cuencas hidrográficas:

El artículo titulado *Índice de vegetación, aplicación del NDVI*, publicado por la Revista *TELE DETECCIÓN Avances y Aplicaciones*, VIII Congreso Nacional de Tele detección Albacete, España, 1999. pp. 217-219, cuyo autor - E.G. Manrique; cuyo resumen: El trabajo aplica el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) del TM a diversos espacios del Sur y Sureste de Andalucía. Reducido el límite de los valores negativos y positivos a -1 y $+1$ se puede señalar, sobre la imagen las zonas de igual índice de vegetación. Se comparan las diferencias [8] existentes entre los índices obtenidos del SPOT y los del TM sobre el mismo espacio.

Otro artículo titulado *Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica*, publicada por la Universidad Politécnica de Valencia en 1995,

Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA, cuyos autores: Montserrat Ferrer y otros, en cuyo artículo concluyen: Una de las metodologías más extendidas y experimentadas para la santificación de la escorrentía es el modelo empírico del número de curva, CN, del Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU. El parámetro hidrológico de referencia, CN, es función de diversas variables relacionadas con las características físicas de la cuenca. La relación entre dichas variables es tabular, lo que facilita su aplicación espacial mediante los SIG. Una ventaja que presenta la metodología propuesta es que la actualización de los mapas del número de curva es mucho más rápida y económica, puesto que supone únicamente cambiar los datos de algún mapa de variables (normalmente el de usos del suelo) y generar de nuevo el mapa de CN. Una vez la información forma parte del SIG utilizado, la generación del mapa del número de curva es un proceso rápido, y comparativamente menos pesado y más preciso que la superposición manual de las distintas capas de información, especialmente [4] si se tiene en cuenta que cada vez se podrá adquirir más fácilmente información en formato digital.

El artículo, *Estimación del número de curva en la cuenca del río Arrefices - Provincia de Buenos Aires*, publicado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Instituto de Clima y Agua de Argentina, concluye: La herramienta ArcRunoff para el cálculo del CN fue implementada satisfactoriamente en la cuenca del Río Arrecifes. Los mapas de zonificación del CN, permitieron realizar un análisis espacial de los principales [3] procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca bajo diferentes tipos de suelo y usos.

El artículo titulado, *Relación precipitación escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo, cuenca modal del sistema serrano de la Ventana, Argentina*, publicada en la Revista FCA UNCuyo. Tomo XXXIX. N°1. Año 2007. 21-28, concluyen: 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 [5] según los cambios de usos de suelos que se produzcan en procura de ese objetivo.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

A nivel nacional se encuentran los siguientes artículos:

El artículo titulado *Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura - Perú*, cuyos autores Percy Zorogastúa Cruz, Roberto Quiroz Guerra y Jaime Garatuza Payán, publicado el año 2011 por el Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú, en este artículo se realizó el estudio del bosque seco localizado en la región Piura, Perú con el objetivo de evaluar el cambio de la cobertura y el uso de la tierra. Se utilizó el procesamiento digital de imágenes del satélite LANDSAT 5 registradas entre 1999 y el 2001, a través de una clasificación supervisada, usando el algoritmo de máxima verosimilitud. Los resultados se compararon [2] con el mapa de bosques secos elaborado por INRENA con interpretación visual de imágenes LANDSAT 5 registradas entre 1986 y 1994.

2.2. Sistemas de información geográfica

2.2.1. Qué es un SIG

Diversas definiciones de los sistemas de información geográfica en textos especializados, se transcribe tal cual (a la letra) las definiciones vertidas en la bibliografía al que se tuvo acceso.

- Un Sistema de Información Geográfica¹ (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.
- El Instituto Geográfico Nacional², define a los sistemas de información geográfico como: conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra.
- Este concepto tomado desde la página oficial³ de la empresa ESRI, 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: mapas interactivos, modelos de geoprocésamiento, datos geográficos, modelos de datos, etc.



Figura 2.2: Sistema de información geográfica (Fuente:<http://www.laciudadviva.org>)

Desde donde se establece que los sistemas de información geográfica trata con datos georeferenciados, requiere de equipos y programas específicos, de igual forma de personal capacitado, lo que queda establecido en la figura 2.2.

¹Este párrafo fue tomado desde <https://langleruben.wordpress.com>

²Instituto geográfico Nacional <https://www.ign.gob.pe>

³Página oficial ESRI España <http://www.esri.es/>

La información requerida queda organizado en diferentes capas o niveles cuya característica fundamental es la relación unívoca con un punto sobre la superficie terrestre, figura 2.3, a la información así organizada [11] se le denomina geo-referenciación.

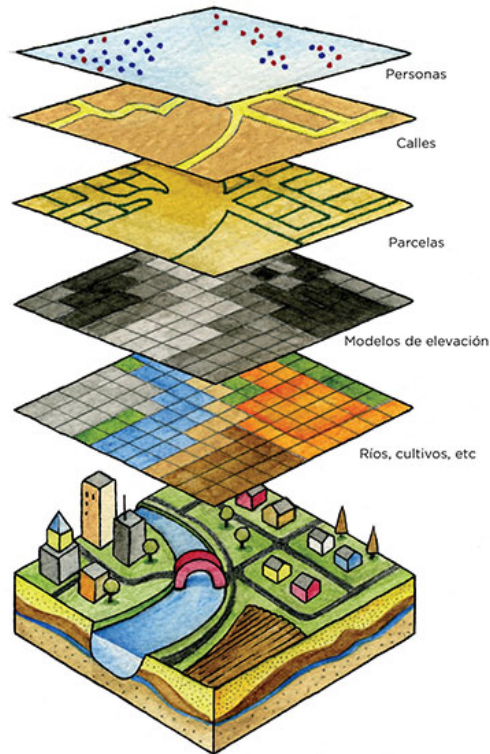


Figura 2.3: Representación de la información (Fuente:<http://www.lexgeo.com/>)

2.2.2. Sistemas de referencia

Existen muchos sistemas de coordenadas para representar la ubicación sobre la superficie terrestre, entre ellas tenemos las coordenadas geográficas y los sistemas de referencia proyectados.

2.2.2.1. Coordenadas geográficas

Según la referencia [9], el sistema de coordenadas geográficas es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares:

- Latitud (ϕ) es el ángulo entre la línea que une el centro de la esfera con un punto de su superficie y el plano ecuatorial, como se muestra en la figura 2.4.
- Longitud (λ), la longitud es el ángulo formado entre dos de los planos que contienen a la línea de los Polos. El primero es un plano arbitrario que se toma como referencia y el segundo es el que, además de contener a la línea de los polos, contiene al punto en cuestión, como se muestra en la figura 2.4.

Un método para describir [9] la posición de una ubicación geográfica en la superficie de la Tierra consiste en utilizar mediciones esféricas de latitud y longitud. Estas son mediciones de los ángulos (en grados) desde el centro de la Tierra hasta un punto en su superficie. Este tipo de sistema de referencia de coordenadas generalmente se denomina sistema de coordenadas geográficas.

La longitud [10] mide ángulos en una dirección este-oeste. Las mediciones de longitud comúnmente se basan en el meridiano de Greenwich, que es una línea imaginaria que realiza un recorrido desde el Polo Norte, a través de Greenwich, Inglaterra, hasta el Polo Sur. Este ángulo es de longitud 0. El oeste del meridiano de Greenwich por lo general se registra como longitud negativa y el este, como longitud positiva.

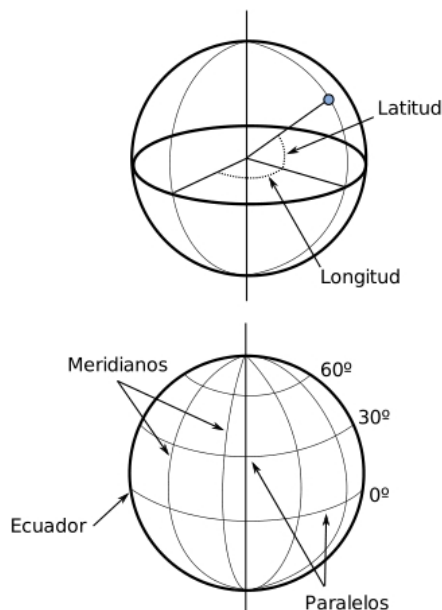


Figura 2.4: Esquema de los elementos del sistema de coordenadas geográficas (Fuente: referencia [9] y [10])

2.2.2.2. Proyecciones cartográficas

La proyección cartográfica es el método que representa la superficie de la tierra sobre un plano. Las proyecciones cartográficas son esenciales para la confección de mapas. Supone un sistema estructurado que traslada la red de meridianos y paralelos desde una superficie curva como la de la esfera a una superficie plana. No existe un método perfecto de proyección, de hecho, todos ellos de una manera u otra distorsionan la realidad. El uso de una u otra proyección depende del tipo y finalidad de cada mapa.

Entre los tipos de proyecciones tenemos: cónicas, cilíndricas, planas o azimutales, etc. De los muchos sistemas de proyecciones que existen actualmente, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección universal transversa de Mercator, la cual da lugar al sistema de coordenadas UTM, cuyas características son (estas características se toman desde la referencia [9]):

- Esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. Aunque en la actualidad se emplea un único elipsoide (WGS-84), originalmente este no era único para todas las zonas.
- Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos.
- La cuadrícula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de 6° de longitud. El huso 1 se sitúa entre los 180° y 174° Oeste, y la numeración avanza hacia el Este.
- En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van desde los 80° Sur hasta los 84° Norte. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

- Una zona UTM se localiza, por tanto, con un número y una letra, y es en función de la zona como posteriormente se dan las coordenadas que localizan un punto. Estas coordenadas se expresan en metros y expresan la distancia entre el punto y el origen de la zona UTM en concreto.

La figura 2.5 muestra las propiedades y convenios para el sistema UTM.

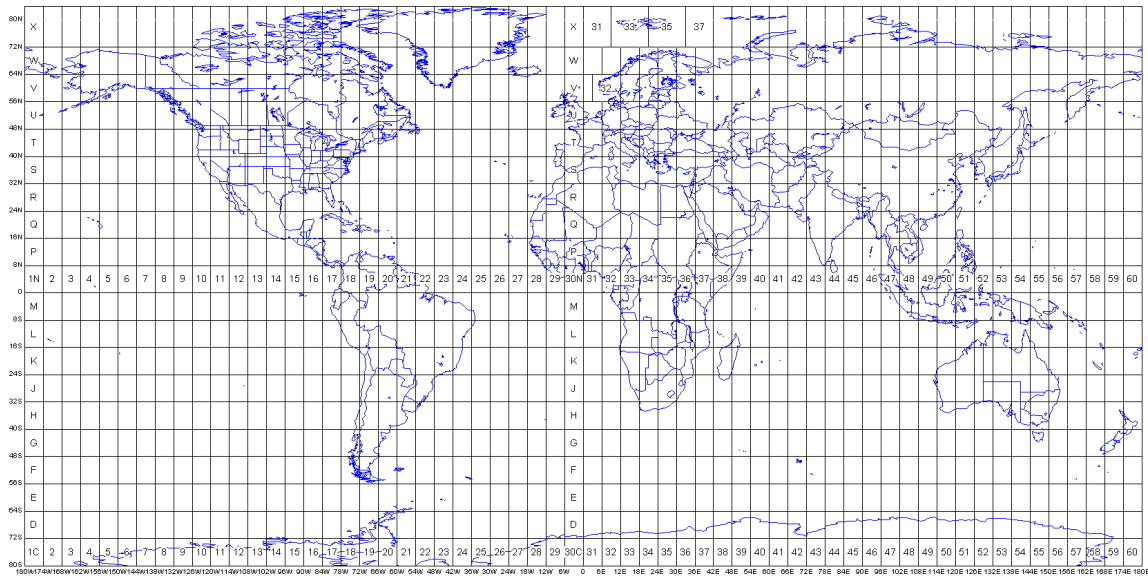


Figura 2.5: Zonas UTM (Fuente: gráfico tomado desde <https://es.wikipedia.org>)

2.2.3. Tipos de archivos

La información geo-referenciado representado en los sistemas de información geográfica, figura 2.6, se encuentra organizado en dos grandes grupos: archivos tipo vectorial y archivos ráster.



Figura 2.6: Dimensión de los datos geográficos (Fuente: referencia [1])

2.2.3.1. Archivos vectorial

Específicamente para representar puntos, líneas y polígonos. De esta forma los caminos serán representados por líneas, elementos específicos por puntos y superficies tales como las cuencas hidrográficas por polígonos, de la forma como queda establecido en la figura 2.7.

2.2.3.2. Archivos ráster

En el modelo ráster, la zona de estudio se divide de forma sistemática en una serie de unidades mínimas (denominadas habitualmente celdas), y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe. Figura 2.7.

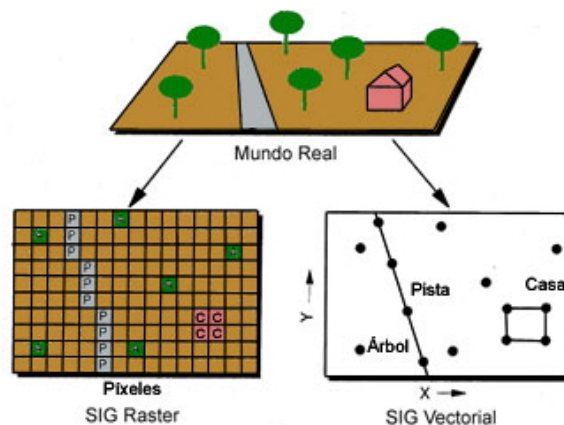


Figura 2.7: Representación en formato ráster y vectorial del mundo real (Fuente: referencia [6])

2.3. Satélites de teledetección de recursos naturales

Son satélites⁴ de órbita polar diseñados para la observación del medio ambiente de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales. El primero y más conocido de ellos es el programa LANDSAT, otros muchos han venido después.

⁴Esta sección se encuentra tomado desde <http://concurso.cnice.mec.es/>

La teledetección [11] es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra.

2.3.1. LANDSAT

LANDSAT es un término compuesto por 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. El programa LANDSAT se inició en 1972 con el lanzamiento del LANDSAT-1. En 1999 se lanzó el más reciente Landsat-7. Landsat-5 fue lanzado en 1984, y es el satélite de teledetección que más tiempo lleva en órbita operativo.

Los satélites LANDSAT disponen de dos sensores, MSS (Multispectral scanner) y TM (Thematic mapper). El sensor TM tiene mayor resolución radiométrica (8 bits) que el MSS (6 bits).

El satélite LANDSAT-7 incorpora el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) que añade a las bandas ya disponibles en el TM, un canal pancromático con resolución espacial de 15 metros. Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, y sobrevuela la misma zona cada 16 días.



Figura 2.8: Fechas de lanzamiento de los satélites LANDSAT (Fuente: <https://landsat.usgs.gov/>)

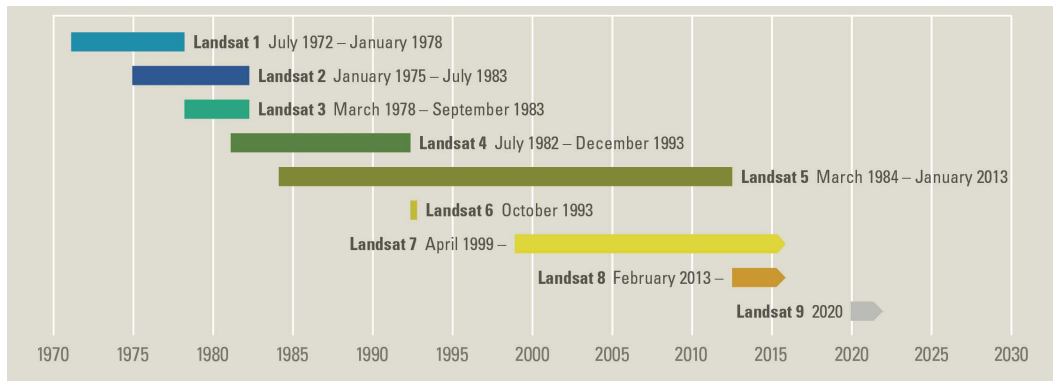


Figura 2.9: Satélites LANDSAT (Fuente: <https://landsat.usgs.gov/>)

2.3.2. SPOT

El proyecto SPOT (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre) es una iniciativa francesa en colaboración con Bélgica y Suecia. El primer lanzamiento fue en 1986 y hasta la fecha se han puesto en órbita 5 satélites. El más reciente Spot-5 se puso en órbita el 4 de mayo del 2002. Los satélites se sitúan en órbita heliosíncrona casi polar cruzando el Ecuador a las 10:30 am y con una frecuencia de paso de 26 días. Los satélites 1, 2 y 3 estaban dotados del sensor HRV (High Resolution Visible) que proporcionaba imágenes en las zonas visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Su principal ventaja respecto a Landsat es su mayor resolución espacial. Las imágenes de los SPOT 1, 2 y 3 son de 60 Km de ancho y con una resolución de 10-20 *metros/pixel*.

En el satélite SPOT-4 se modificaron los sensores, introduciéndose el HRVIR que añade a los canales del HRV una banda infrarroja. Se incorporó también el sensor VEGETATION orientado al seguimiento diario de la cobertura vegetal a escala regional o planetaria (la anchura de imagen es de 2250 Km y la resolución espacial de 1 Km).

SPOT-5 mejora notablemente la resolución espacial de las imágenes (1 píxel = 5m) además, incorpora capacidades estereoscópicas y una nueva versión del sensor VEGETATION, que mejora el estudio dinámico de la cobertura vegetal.

El sistema SPOT dispone de 17 estaciones de recepción terrestre en los 5 continentes.



Figura 2.10: Satélites SPOT5 (Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es/>)

2.3.3. ENVISAT

El ENVISAT, de la Agencia Espacial Europea, es actualmente el satélite medioambiental más avanzado del mundo. ENVISAT detecta miles de parámetros, entre los que destacan:

- Presencia de gases en la atmósfera.
- Concentración de fitoplancton en los mares.
- Corrientes submarinas o incendios en zonas muy alejadas.

ENVISAT ayudará a prevenir terremotos y erupciones volcánicas. Unos 10.000 científicos del mundo entero trabajan a partir de las observaciones de ENVISAT para entender mejor los factores que afectan al medio ambiente de nuestro planeta.

2.3.4. IRS

El proyecto IRS (Indian Remote Sensing Satellite), programa de teledetección de la India. El primer satélite de la familia el IRS-1C fue lanzado el 28 de Diciembre de 1995 por un cohete ruso. Comenzó a funcionar en Diciembre de 1996.

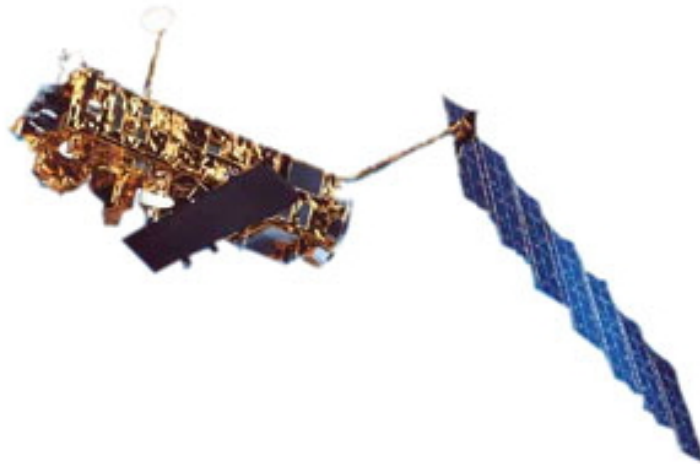


Figura 2.11: Satélites ENVISAT (Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es/>)

Tienen una órbita heliosíncrona, de 907 km de altitud y frecuencia de paso de 24 días. Disponen de los sensores LISS (4 bandas espectrales) y WiFS (Wide Field Sensor) especializado en estudios de vegetación.

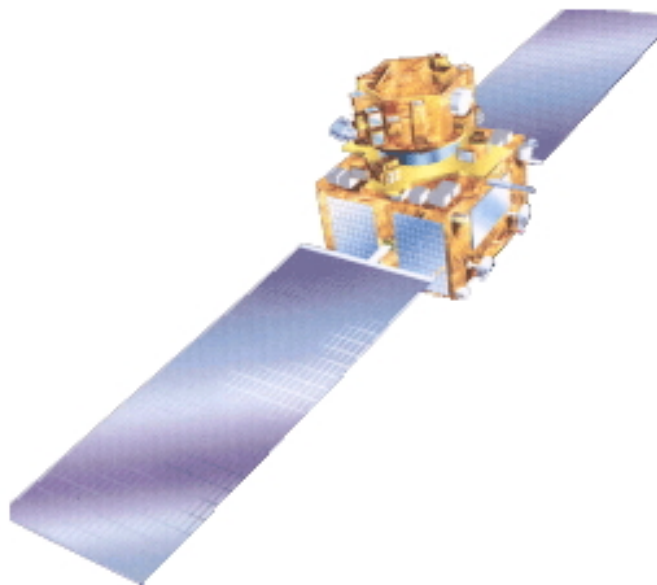


Figura 2.12: Satélites IRS P6 (Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es/>)

2.3.5. TERRA

El satélite Terra fué puesto en órbita por la NASA el 18 de diciembre de 1999, NASA. Es el primero del programa Earth Observing System (EOS). Terra forma parte de un proyecto multinacional y multidisciplinario con la participación de las agencias espaciales de EEUU, Canadá y Japón. El objetivo científico de la misión de Terra es el de efectuar el primer chequeo completo de la salud del planeta Tierra. En particular, la misión está diseñada para estudiar el funcionamiento de los ciclos del carbono y de la energía.

TERRA dispone de cuatro captadores que miden aspectos específicos de nuestro planeta:

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) FOTOSENSOR desarrollado conjuntamente por la NASA y el Ministerio de Industria Japonés. Se utiliza para obtener mapas detallados de la temperatura, reflectancia y elevación de la superficie terrestre.
- CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) Instrumento para medir el balance global de radiación de la Tierra. Aporta también datos sobre las propiedades de las nubes y su papel en los flujos de radiación desde la superficie terrestre hasta las zonas altas de la atmósfera.
- MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer) Este instrumento explora la superficie terrestre con nueve cámaras, cada una de ellas apuntando a un ángulo de observación diferentes. Las imágenes que toman son en cuatro bandas: azul, verde, rojo, e infrarrojo próximo. Este modelo de captación permite al MISR distinguir los diferentes tipos de nubes, los aerosoles y las cubiertas de la superficie terrestre.
- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) MODIS escanea cada punto del planeta cada 1-2 días en 36 bandas espectrales. Gracias a esta amplia

capacidad de captación, este sensor percibe más datos de los signos vitales de la Tierra que los otros sensores del satélite Terra. Entre otros aspectos, MODIS mide cada día el porcentaje de la superficie de la Tierra cubierta por nubes. Combinando las lecturas de MODIS con los datos de MISR y CERES, es posible establecer el impacto de nubes y aerosoles en el balance energético de la Tierra. Permite, entre otros aspectos, detectar las emisiones de los incendios.

- MOPITT (Measurement of Pollution in the Troposphere) Instrumento diseñado para captar datos de la baja atmósfera y observar su interacción con la biosfera marina y terrestre. Con los datos que aporte MOPITT se quiere estudiar la distribución, el transporte y las fuentes de monóxido de carbono y de metano en la Troposfera.

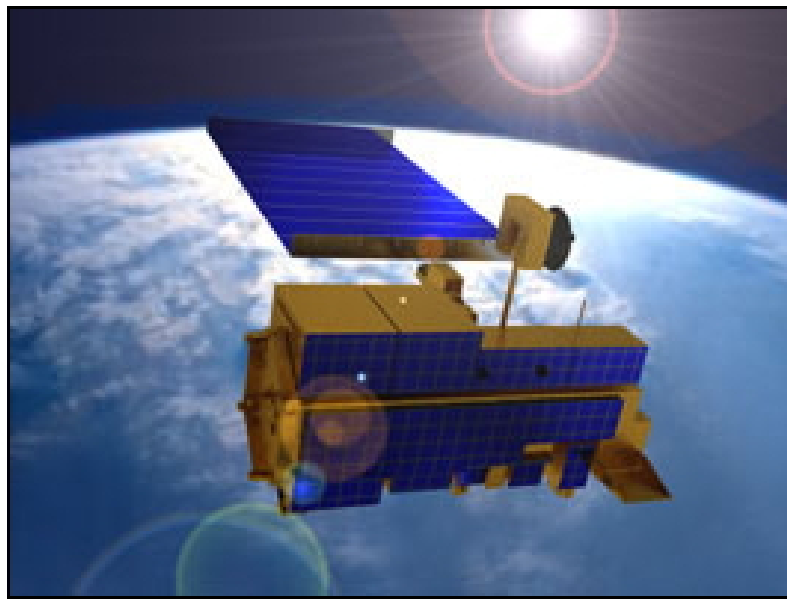


Figura 2.13: Satélites TERRA (Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es/>)

2.3.6. EO-1

Primer satélite del programa de observación terrestre para el nuevo Milenio de la NASA. Lanzado el 21 de Noviembre del año 2000. Este nuevo programa es el continuador de las misiones Landsat.

El satélite EO-1 dispone de tres sensores de teledetección:

- ALI (Advanced Land Imager) Captador de Imágenes Terrestres.
- Hyperion (Imaging Spectrometer) Es el primer sensor hiperespectral desde satélite. Dispone de 220 bandas que cubren de 0.4 – 2.5 μm con 30 metros de resolución. Cada escena cubre 7.5 X 100 Km. capta los colores de las imágenes de la superficie de la Tierra sin dejar áreas descubiertas, tiene la habilidad de discriminar imágenes por ejemplo; diferencia entre pinos y cedros.
- LEISA/AC (Linear Imaging Spectrometer Array/Atmospheric Corrector) es un conjunto de tecnologías que captura imágenes hiperespectrales. Como las imágenes transmitidas por satélites son distorsionadas por los gases en la atmósfera, el AC restaura las imágenes a su forma original.

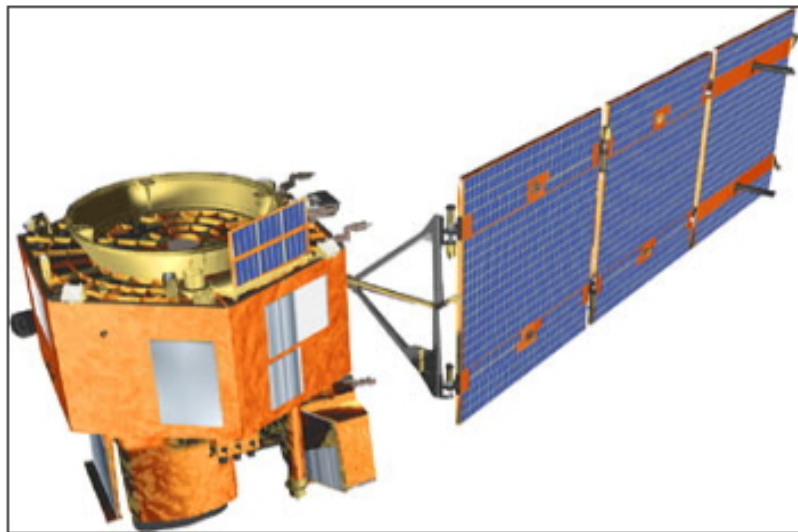


Figura 2.14: Satélites EO-01 (Fuente: <http://concurso.cnice.mec.es/>)

2.3.7. Programa COPERNICUS

Es un programa de la Agencia Espacial Europea (ESA - European Spatial Agency), SENTINEL es un proyecto multi-satélite que será llevado a cabo en la próxima década. Está siendo desarrollado por la ESA en el marco del programa Global Monitoring

for Environment and Security (GMES). Las misiones Sentinel incluyen satélites de radar y satélites de imágenes super-espectrales para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica de la Tierra. La figura 2.15 muestra la página oficial de la Agencia Espacial Europea.



Figura 2.15: Página oficial del proyecto ESA (Fuente: <https://sentinel.esa.int/>)

2.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, es un acrónimo de su nombre original en idioma inglés, Normalized Difference Vegetation Index). Los índices de vegetación⁵ 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, et. 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.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad,

⁵Esta sección está tomado desde <https://mappinggis.com/>

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 siguiente fórmula mostrada en la ecuación C.2.

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

Es decir, mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y 3 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia.

Capítulo III: Estudio de caso

El desarrollo de la tesis contiene: descripción general de la zona de estudio, obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca, determinación del registro de las precipitaciones diarias máxima anual, obtención de los usos de suelo en relación (Normalized Difference Vegetation Index) y finalmente los caudales de máxima avenida para distintos periodos.

3.1. Descripción general de la cuenca

La institución *Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Ayacucho S.A* (SEDA AYACUCHO) tiene por misión *Brindar servicios de agua potable y alcantarillado de calidad a la población, contribuyendo a la preservación del ambiente, además Ser una empresa líder en servicio de agua potable y alcantarillado, con capacidad técnica y operativa.* Dentro del marco de sus Objetivos y en estricto cumplimiento de éste, efectúa el estudio técnico con fines de aprovechamiento hídrico superficial, para uso poblacional desde las cuencas hidrográficas del distrito de Chiara, el proyecto “Consultoría para la Elaboración y Aprobación de Estudio de Aprovechamiento de Recursos Hídricos para la Obtención de la Licencia de Uso de Agua Superficial para Épocas de Superávit Hídrico de las Fuentes de Chiara” - cuya finalidad es determinar los caudales disponibles y aprovechables para uso específicamente poblacional, en beneficio de la ciudad de Ayacucho.

Las fuentes de aprovechamiento para el recurso hídrico superficial se encuentran establecidas en las quebradas de:

- Quebrada Molino Huayqo.
- Quebrada Qosqo Huayqo.
- Quebrada Mutuy Huayqo.
- Quebrada Lambras Huayqo.

Cuya captación del caudal de todas las quebradas son conducidas por un mismo canal que varía en las dimensiones de su sección transversal, iniciando con una sección menor en la quebrada Molino Huayqo y desde la captación de la quebrada Lambras Huayqo, se dispone de un canal de sección transversal mayor, suficiente para conducir el caudal captado de las cuatro quebradas.

La determinación de las cuencas asociadas a cada punto de captación, sus propiedades morfométricas y la red hídrica se obtienen en base a los sistemas de Información Geográfica, el tratamiento de la información climatológica disponible se efectúa desde los registros obtenidos por el “Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología” del Perú (SENAMHI), cuyo registro ha sido evaluado mediante las pruebas de consistencia y homogeneidad. Para la obtención de los caudales medios mensuales se efectuó mediante el modelo hidrológico Lutz Scholz, cuyos resultados son calibrados teniendo en cuenta la capacidad de transporte de caudal de las secciones transversales del lecho del río en las captaciones consideradas.

3.1.1. El sistema Chiara

El sistema Chiara, cuenta con un canal de aproximadamente $21km$ de longitud y 04 captaciones en igual número de cuencas tributarias, actualmente su operación y mantenimiento se encuentra a cargo del “Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de

Ayacucho S.A” (SEDA Ayacucho), es parte de un sistema de abastecimiento de agua a la ciudad de Ayacucho, construida con anterioridad al Proyecto Especial Río Cachi, que servirá como alternativa de solución a la falta de agua para consumo poblacional de la ciudad de ayacucho. El sistema Chiara actualmente se encuentra en proceso de mantenimiento, tanto a nivel del sistema de canales, las estructuras de captación, desarenadores y la formulación a nivel de hidrología con la finalidad de determinar la disponibilidad hídrica existente.



Figura 3.16: Punto de captación quebrada Molino Huayqo



Figura 3.17: Estructuras hidráulicas existentes



Figura 3.18: Captación sobre la quebrada Mutuy huayqo



Figura 3.19: Estado actual de los canales existentes

Las figuras 3.16 al 3.19 muestra el estado actual del sistema Chiara existente.

3.1.2. Puntos de aforo

Los puntos de aforo, correspondiente a las captaciones de las quebradas que conforman el sistema Chiara queda establecido en la tabla 3.1

Tabla 3.1: Puntos de captación

Cuenca	x(m)	y(m)	z(msnm)
Molino Huayqo	585655	8530739	3493.313
Qosqo Huayqo	584791	8530902	3490.456
Mutuy Huayqo	584038	8531821	3488.436
Lambras Huayqo	581463	8535459	3365.906

Sistema de coordenadas proyectado UTM, DATUM: WGS84, huso 18, zona L

3.1.3. Ubicación

Se considerará su ubicación política, geográfica y lo relacionado a la autoridad administrativa del agua y las unidades hidrográficas establecido por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

3.1.3.1. Ubicación política

Políticamente la zona de estudio se encuentra en:

- Región: Ayacucho.
- Provincia: Huamanga.
- Distrito: Chiara.

La figura 3.20 muestra la ubicación política de la de la zona de interés.

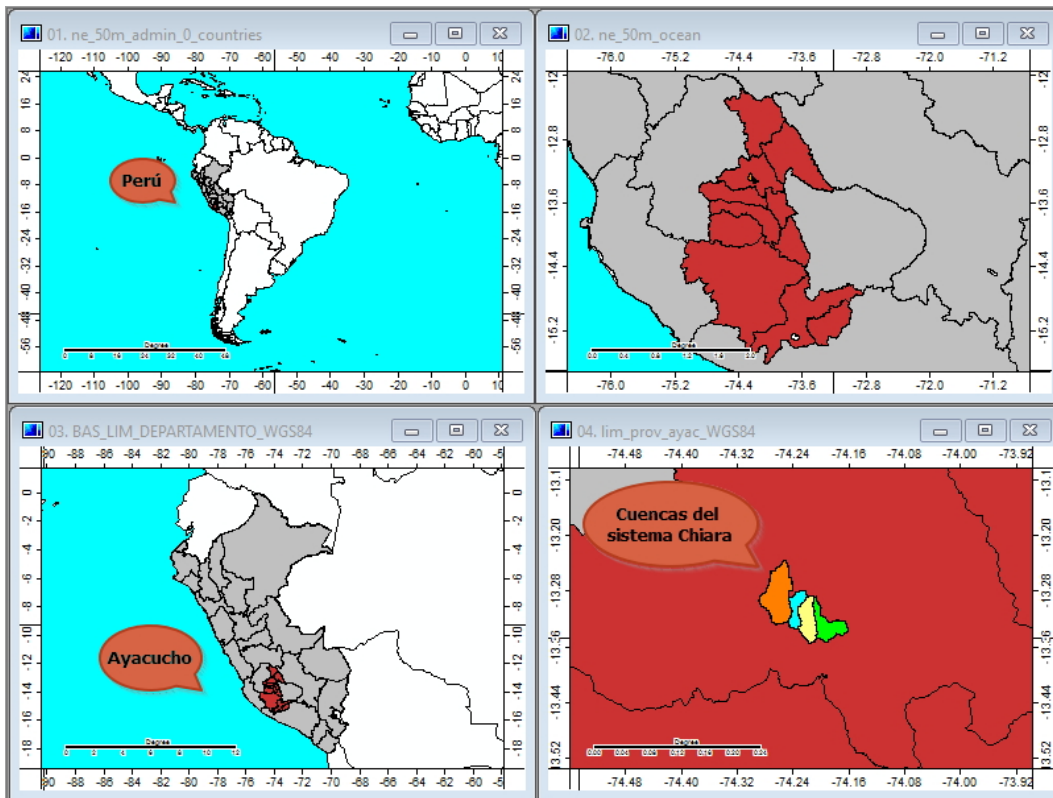


Figura 3.20: Ubicación general de las cuencas

3.1.3.2. Ubicación geográfica

Geográficamente las cuencas y fuentes de captación disponen como límite las mostradas en la tabla 3.2, espacialmente el ámbito de las cuencas se muestra en la figura 3.21.

Tabla 3.2: Límite geográfico

	x(m)	y(m)
Mínimo	576900	8523330
Máximo	590760	8536620

Sistema de coordenadas proyectado UTM, DATUM: WGS84, huso 18, zona L

3.1.3.3. Unidad hidrográfica

De la división del territorio nacional por la Autoridad Nacional del Agua en Unidades hidrográficas, la zona de interés, el Sistema Chiara se encuentra en la:

- Vertiente: Atlántico.

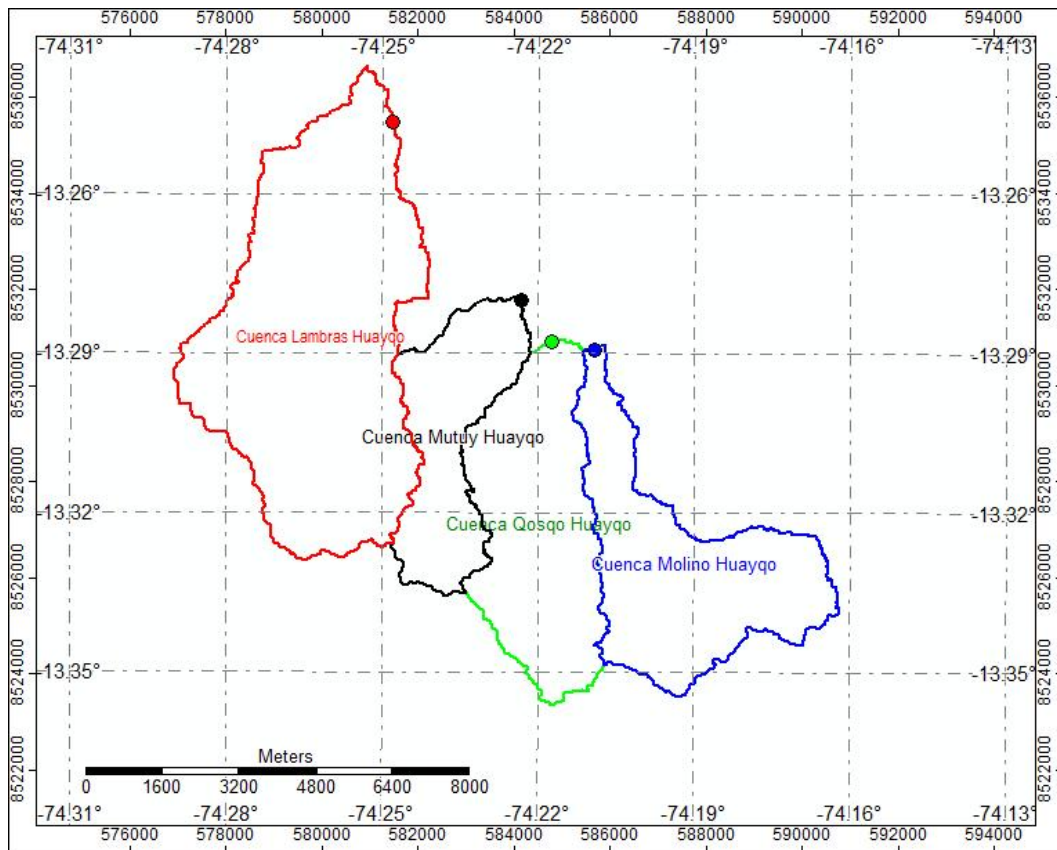


Figura 3.21: Cuencas asociadas a las captaciones existentes

- Región hidrográfica: Amazonas.
- Unidad Hidrográfica: Mantaro.

3.1.3.4. Autoridad administrativa del agua

De la división del territorio nacional por la Autoridad Nacional del Agua teniendo en cuenta su administración, demarcación y delimitación de las Autoridades Administrativas del Agua, la zona de interés la zona de interés corresponde a la:

- Autoridad Administrativa del Agua: Mantaro
- Autoridad Local del Agua: Ayacucho.

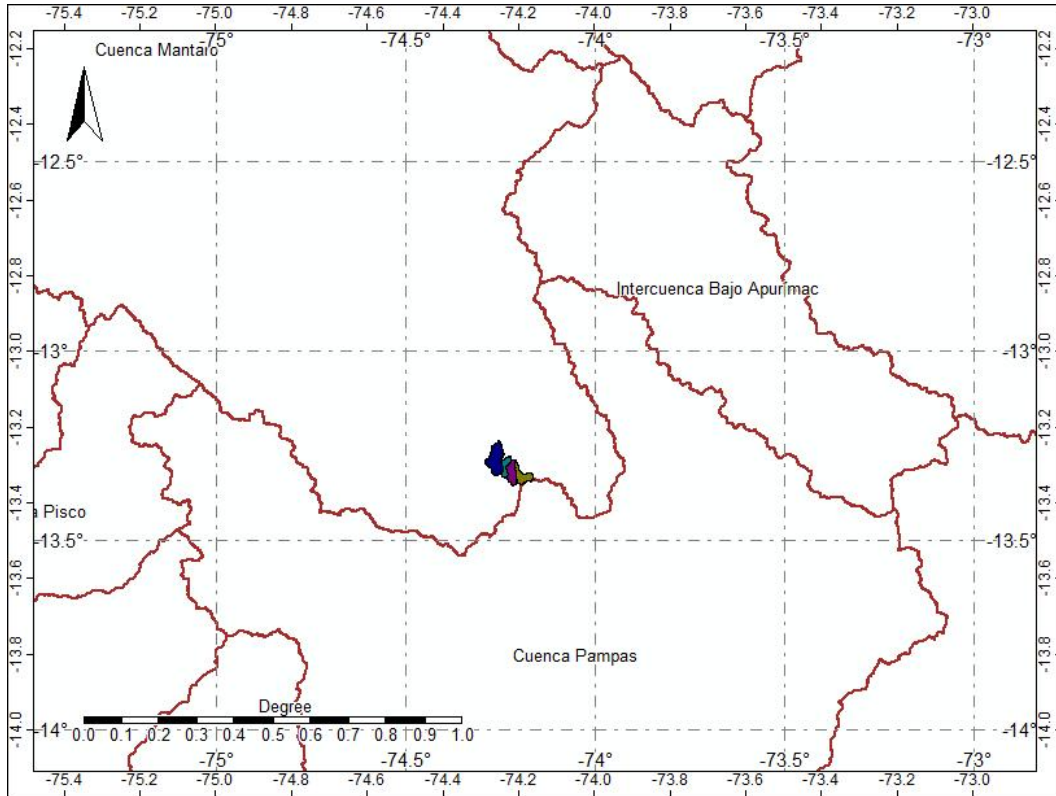


Figura 3.22: Unidad hidrográfica correspondiente a la cuenca en estudio

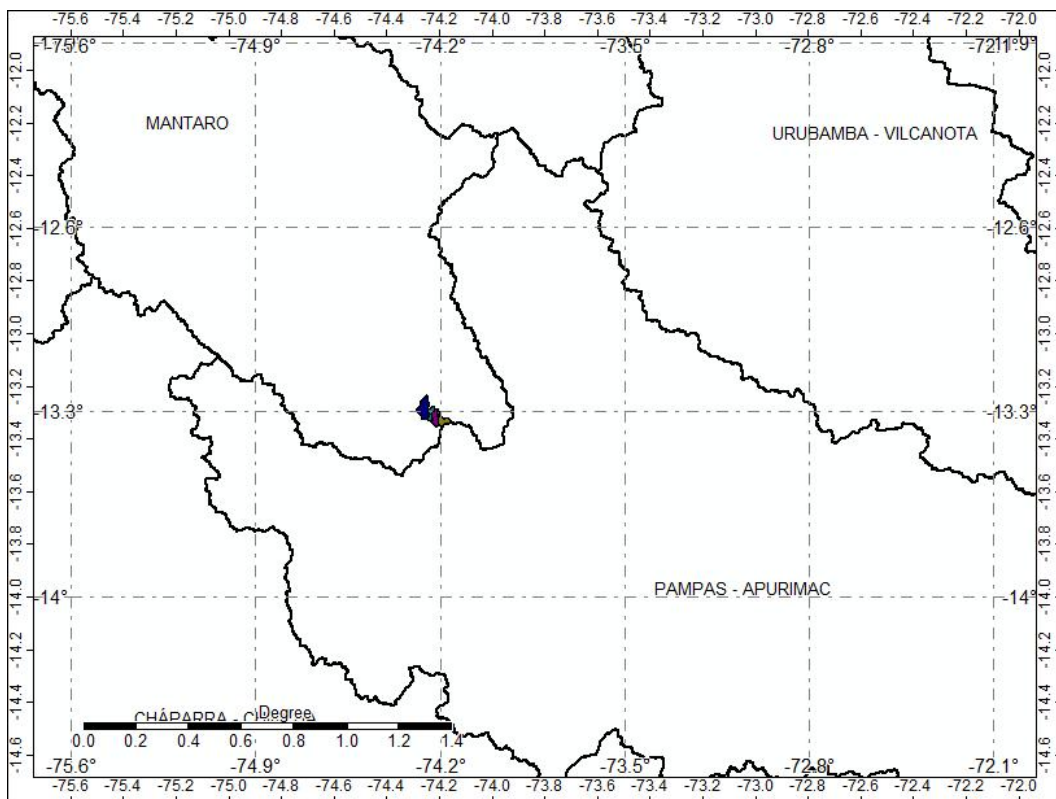


Figura 3.23: Autoridad administrativa del agua correspondiente a la cuenca en estudio

3.1.4. Geomorfología

3.1.4.1. Propiedades morfométricas

La delimitación de la superficie aportante de caudal para cada uno de los puntos de captación se realizó con la aplicación de sistemas de información geográfica, en base a archivos tipo raster con 30 metros de resolución, las aplicaciones utilizadas son de libre distribución, entre ellas: GRASS GIS, SAGA GIS, QGIS.

Las propiedades morfométricas, la cuenca, la red hídrica principal y red hídrica secundaria, así como el punto de aforo para todas las quebradas quedan determinadas, según:

- La figura 3.24 muestra la cuenca Molino Huayqo en una distribución espacial, mientras que la tabla 3.3 muestra las propiedades morfométricas asociadas a esta cuenca.
- La tabla 3.4 muestra las propiedades morfométricas para la cuenca Qosqo huayqo, la Figura muestra 3.25 la distribución espacial, tomando como sistema de referencia geográfico WGS84 y a la vez el sistema proyectado UTM, DATUM WGS84, Huso 18, Zona L.
- Las propiedades morfométricas y su distribución espacial de la cuenca Mutuy Huayqo se encuentran en la tabla 3.5 y en la figura 3.26, respectivamente.
- La tabla 3.6 y la figura 3.27 representan a la cuenca de la quebrada Lambras Huayqo.

3.1.4.2. Geología

Esta sección se tomó íntegramente desde el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMET), Geología del cuadrángulo de Ayacucho 27-ñ - [Boletín A 61].

Tabla 3.3: Propiedades morfométricas Cuenca Molino Huayqo

Descripción	Unidad	Magnitud
Centroide de la cuenca (Este)		587505.00
Centroide de la cuenca (Norte)		8526285.00
Límite de la cuenca (Norte - oeste)		('585210\r', '8530830\r')
Límite de la cuenca (Sur - Este)		('590760\r', '8523510\r')
Área	km2	16.13
Perímetro	km	27.16
Altura máxima	msnm	4271.00
Altura mínima	msnm	3493.00
Diferencia de altura	msnm	778.00
Altura media	msnm	3995.91
Pendiente promedio de la cuenca		14.02
Longitud del vector de dirección	km	4.81
Orientación Prevalente	grados	1.17
Coefficiente de compacidad		5.99
Relación de circularidad		0.27
Diámetro topológico		3.00
Relación de elongación		0.59
Factor de forma		2.09
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934)	hr	1.24
Longitud del curso principal	km	7.74
Pendiente promedio del curso principal	Porcentaje	8.20
Mean hillslope length [m]	m	43.37
Magnitudo		2.00
Orden de la red hídrica (Strahler)		2
Número de corrientes		4
Longitud total de la red hídrica	km	11.233
Frecuencia de flujo de primer orden		0.123982856
Densidad de drenaje	km/km2	0.696349712
Relación de bifurcación (Horton)		3
Relación de longitud (Horton)		3.745
Relación de área (Horton)		4.5362
Relación de pendiente (Horton)		1.6918

(Parámetros morfométricos, generados a partir del programa Arcmap y Qgis)

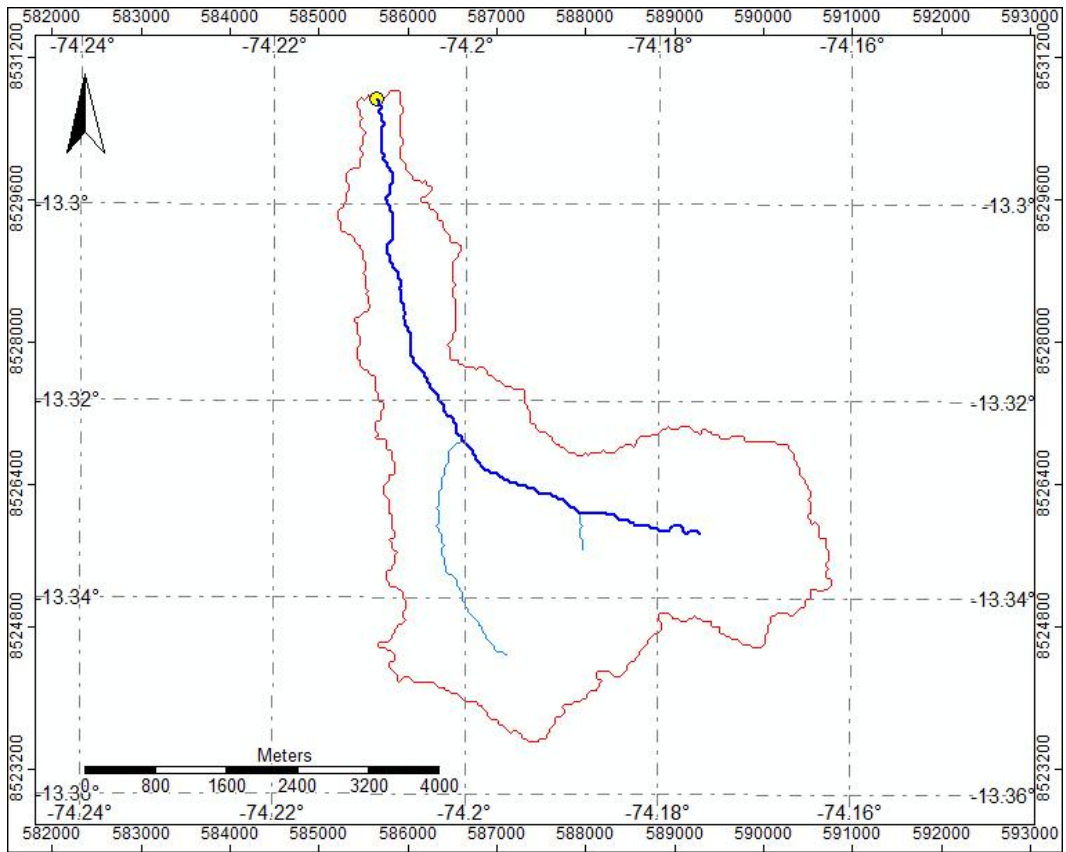


Figura 3.24: Cuenca Molino Huayqo

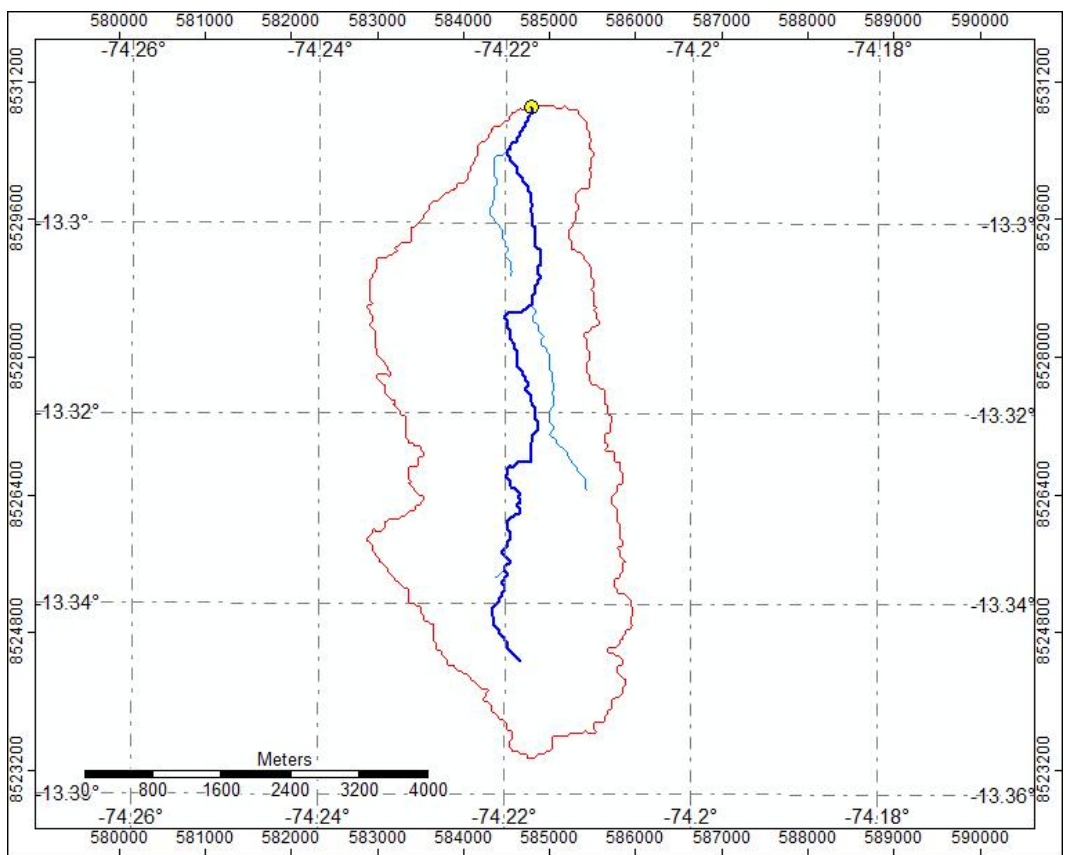


Figura 3.25: Cuenca Qosqo Huayqo

Tabla 3.4: Propiedades morfométricas Cuenca Qosqo Huayqo

Descripción	Unidad	Magnitud
Centroide de la cuenca (Este)		584505.00
Centroide de la cuenca (Norte)		8527095.00
Límite de la cuenca (Norte - oeste)		('582870\r', '8530920\r')
Límite de la cuenca (Sur - Este)		('585960\r', '8523330\r')
Área	km2	15.55
Perímetro	km	22.56
Altura máxima	msnm	4303.00
Altura mínima	msnm	3491.00
Diferencia de altura	msnm	812.00
Altura media	msnm	3962.96
Pendiente promedio de la cuenca		13.63
Longitud del vector de dirección	km	3.82
Orientación Prevalente	grados	1.50
Coefficiente de compacidad		5.07
Relación de circularidad		0.38
Diámetro topológico		6.00
Relación de elongación		0.54
Factor de forma		1.90
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934)	hr	1.23
Longitud del curso principal	km	8.17
Pendiente promedio del curso principal	Porcentaje	8.39
Mean hillslope length [m]	m	50.27
Magnitudo		3.00
Orden de la red hídrica (Strahler)		2
Número de corrientes		5
Longitud total de la red hídrica	km	12.7561
Frecuencia de flujo de primer orden		0.192972427
Densidad de drenaje	km/km2	0.820525191
Relación de bifurcación (Horton)		4
Relación de longitud (Horton)		4.6747
Relación de área (Horton)		6.4642
Relación de pendiente (Horton)		1.3639

(Parámetros morfométricos, generados a partir del programa Arcmap y Qgis)

Tabla 3.5: Propiedades morfométricas Cuenca Mutuy Huayqo

Descripción	Unidad	Magnitud
Centroide de la cuenca (Este)		582705.00
Centroide de la cuenca (Norte)		8528925.00
Límite de la cuenca (Norte - oeste)		('581400\r', '8531820\r')
Límite de la cuenca (Sur - Este)		('584340\r', '8525610\r')
Área	km2	9.78
Perímetro	km	20.35
Altura máxima	msnm	4300.00
Altura mínima	msnm	3486.00
Diferencia de altura	msnm	814.00
Altura media	msnm	3976.39
Pendiente promedio de la cuenca		12.29
Longitud del vector de dirección	km	3.18
Orientación Prevalente	grados	1.11
Coefficiente de compacidad		5.77
Relación de circularidad		0.30
Diámetro topológico		4.00
Relación de elongación		0.52
Factor de forma		1.44
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934)	hr	0.99
Longitud del curso principal	km	6.78
Pendiente promedio del curso principal	Porcentaje	10.07
Mean hillslope length [m]	m	29.85
Magnitudo		3.00
Orden de la red hídrica (Strahler)		2
Número de corrientes		5
Longitud total de la red hídrica	km	8.3766
Frecuencia de flujo de primer orden		0.30666498
Densidad de drenaje	km/km2	0.856269957
Relación de bifurcación (Horton)		4
Relación de longitud (Horton)		10.3483
Relación de área (Horton)		9.1982
Relación de pendiente (Horton)		0.6328

(Parámetros morfométricos, generados a partir del programa Arcmap y Qgis)

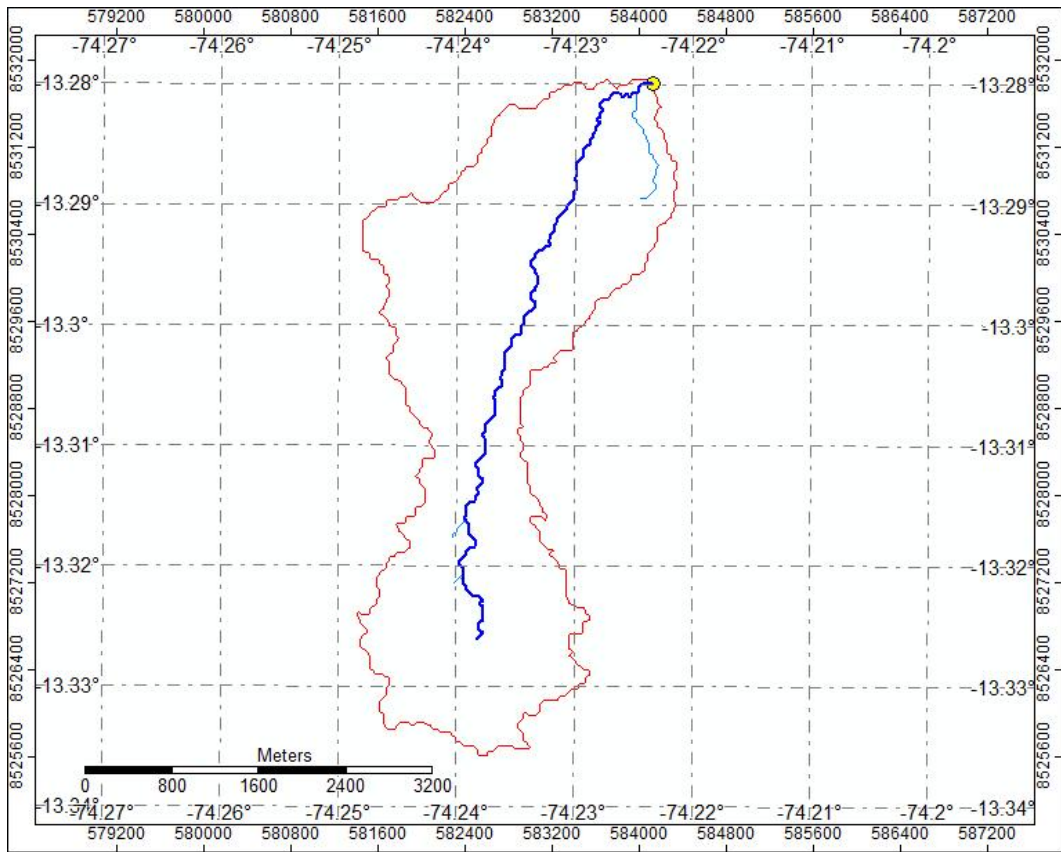


Figura 3.26: Cuenca Mutuy Huayqo

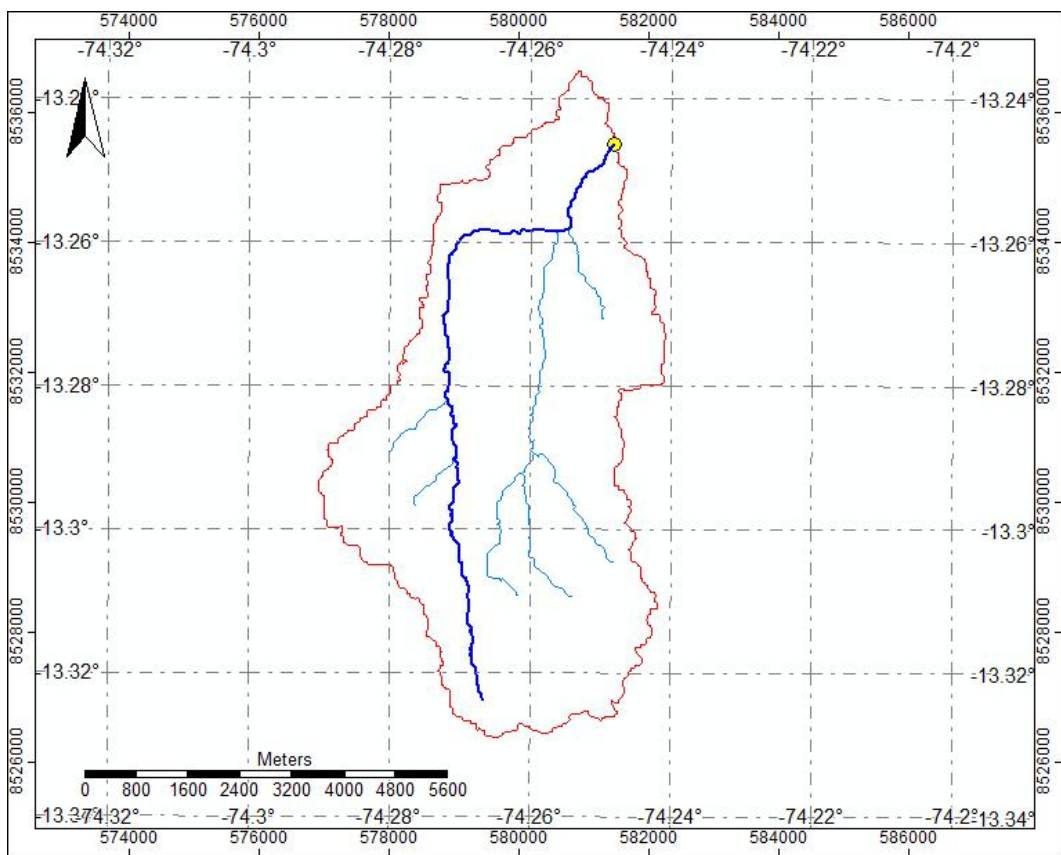


Figura 3.27: Cuenca Lambras Huayqo

Tabla 3.6: Propiedades morfométricas Cuenca Lambras Huayqo

Descripción	Unidad	Magnitud
Centroide de la cuenca (Este)		579945.00
Centroide de la cuenca (Norte)		8531055.00
Límite de la cuenca (Norte - oeste)		('576900\r', '8536620\r')
Límite de la cuenca (Sur - Este)		('582240\r', '8526360\r')
Área	km2	32.40
Perímetro	km	31.97
Altura máxima	msnm	4234.00
Altura mínima	msnm	3386.00
Diferencia de altura	msnm	848.00
Altura media	msnm	3896.36
Pendiente promedio de la cuenca		11.68
Longitud del vector de dirección	km	4.69
Orientación Prevalente	grados	1.25
Coefficiente de compacidad		4.98
Relación de circularidad		0.40
Diámetro topológico		5.00
Relación de elongación		0.55
Factor de forma		2.76
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934)	hr	1.73
Longitud del curso principal	km	11.75
Pendiente promedio del curso principal	Porcentaje	6.28
Mean hillslope length [m]	m	49.99
Magnitudo		7.00
Orden de la red hídrica (Strahler)		3
Número de corrientes		11
Longitud total de la red hídrica	km	27.6383
Frecuencia de flujo de primer orden		0.216069639
Densidad de drenaje	km/km2	0.85311393
Relación de bifurcación (Horton)		2.8284
Relación de longitud (Horton)		0.9804
Relación de área (Horton)		3.7063
Relación de pendiente (Horton)		1.067

(Parámetros morfométricos, generados a partir del programa Arcmap y Qgis)

El cuadrángulo de Ayacucho, políticamente, comprende a las provincias de Huamanga y La Mar, en el Departamento de Ayacucho, y de Angaraes, en el Departamento de Huancavelica. La mayor parte del área cubre la “Cuenca Interandina de Ayacucho”, flanqueada en sus bordes por los macizos de Razuhilca (Cordillera Oriental) y de Vinchos, pasando este último a la zona alta de la Cordillera Occidental. El drenaje principal está constituido por el río Cachi, integrante de la cuenca del río Mantaro, el que forma parte de la vertiente del Atlántico. La columna estratigráfica, de abajo hacia arriba, está constituida por el Grupo Mitu del Pérmico superior, seguido por el Grupo Pucará del Triásico-Jurásico, unidades desarrolladas exclusivamente en el ángulo Suroccidental del cuadrángulo. Las intrusiones más antiguas están representadas por los Granitos del Complejo de Querobamba de edad probablemente Pre-Mitu. Después de un prolongado hiato en el Mesozoico, las rocas Terciarias ocupan la cuenca sedimentaria continental originada por la subsidencia a lo largo de un “graben” y que se conoce como: “Cuenca de Ayacucho”, la misma que adquiere su mayor desarrollo probablemente en el Terciario Inferior a través de varias etapas subsecuentes de subsidencia con un movimiento que se prolonga hasta la actualidad. De la erosión del Grupo Mitu y del Complejo Granítico de Querobamba resulta la deposición de las Capas Rojas de la Formación Socos del Eoceno, superpuestas por los volcánicos Ticllas y después por los volcánicos Sallalli / Larampuquio del Mioceno Inferior (>> 18 m.a.), los que también sobreyacen a intrusivos terciarios. Siguen las secuencias volcánico-sedimentarias de la Formación Huanta del Mioceno medio (>> 10 - 12 m.a.), terminando con el ascenso de los volcánicos Molinoyoc (>> 9 m.a.). Esta cuenca controla la deposición de la potente secuencia piroclástica-sedimentaria denominada Formación Ayacucho del Mioceno Superior (>> 7 m.a.), y el ascenso repetitivo de magmas, tales como los volcánicos Molinoyoc, las lavas de la Formación Ayacucho y los centros volcánicos en el Sur, como Tutayac Orcco (>> 5 m.a.), Lucho Jahuana Pampa y Yanamachay y, finalmente, los volcánicos Huari (>> 3.8 m.a.) en el Mio-Plioceno. Las formaciones más jóvenes están constituidas por tobas pliocénicas (>> 2.4 m.a.) provenientes del centro volcánico llamado Nevado Portuguesa en el Suroeste del cuadrángulo (tobas Atunsulla).

Los depósitos cuaternarios consisten de acumulaciones fluvio-glaciares, aluviales y coluviales. Tectónicamente se reconocen varios pulsos discretos de compresión alternando con fases de tranquilidad tectónica (o descompresión). La Fase Tardihercínica afecta al Complejo Granítico Querobamba y se evidencia por el fracturamiento que presenta (y Mitu?). La Fase “Peruana” de la tectónica andina afecta a las calizas Pucará con plegamientos de dirección NO-SE. La “Fase Inca”, se manifiesta con el plegamiento de las Capas Rojas en la Formación Socos. La “Fase Quechua” con sus tres subfases afecta a la secuencia a partir de los Volcánicos Ticllas y Sallalli; asimismo, afecta a las secuencias volcánico-clásticas de las Formaciones Huanta y Ayacucho con pliegues y fallamiento parcial en bloques. Los ejes de los pliegues están orientados en sentido E-O, N-S y NO-SE. Los pulsos magmáticos parecen acompañar a las subfases tectónicas Quechua I a III. En el aspecto económico no se han ubicado yacimientos metálicos, sin embargo hay huellas de mineralizaciones relacionadas sobretodo a los intrusivos (Cu, Pb, Zn, Ag, Au). Entre los depósitos no-metálicos destacan las tobas dacíticas puzolánicas y sillares en Pacaycasa, bentonita y yeso en Socos, diatomita en Tambillo - Tantarnillo - Maya - Quicapata, y arcillas en la Quinua.

3.2. Análisis y tratamiento de la información hidro meteorológica e hidrométrica

3.2.1. Estaciones climatológicas

La figura 3.28 muestra las estaciones climatológicas disponibles cercanas a la zona de interés, éstas estaciones climatológicas son monitoreadas por el Servicio Nacional de Meteorología e hidrología (SENAMHI).

Se selecciona la estación Allpachaca por encontrarse cerca de las cuencas de interés, además de disponer las mismas condiciones climáticas a la zona de estudio, dado que

no existe mayor variación en altura. La tabla 3.8 muestra la ubicación de las estaciones climatológicas existentes en la cuenca Mantaro, las coordenadas se encuentran establecidas en el sistema geográfico, específicamente en el sistema de referencia WGS84.

Los registros de las variables climáticas, en este caso las precipitaciones acumuladas mensuales y el registro de las temperaturas se obtienen desde las entidades nacionales, entre ellas:

- Autoridad Nacional del agua (ANA), <http://www.ana.gob.pe/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), <http://www.senamhi.gob.pe/> y del portal de Perú Clima que forma parte de SENAMHI <http://www.peruclima.pe/>

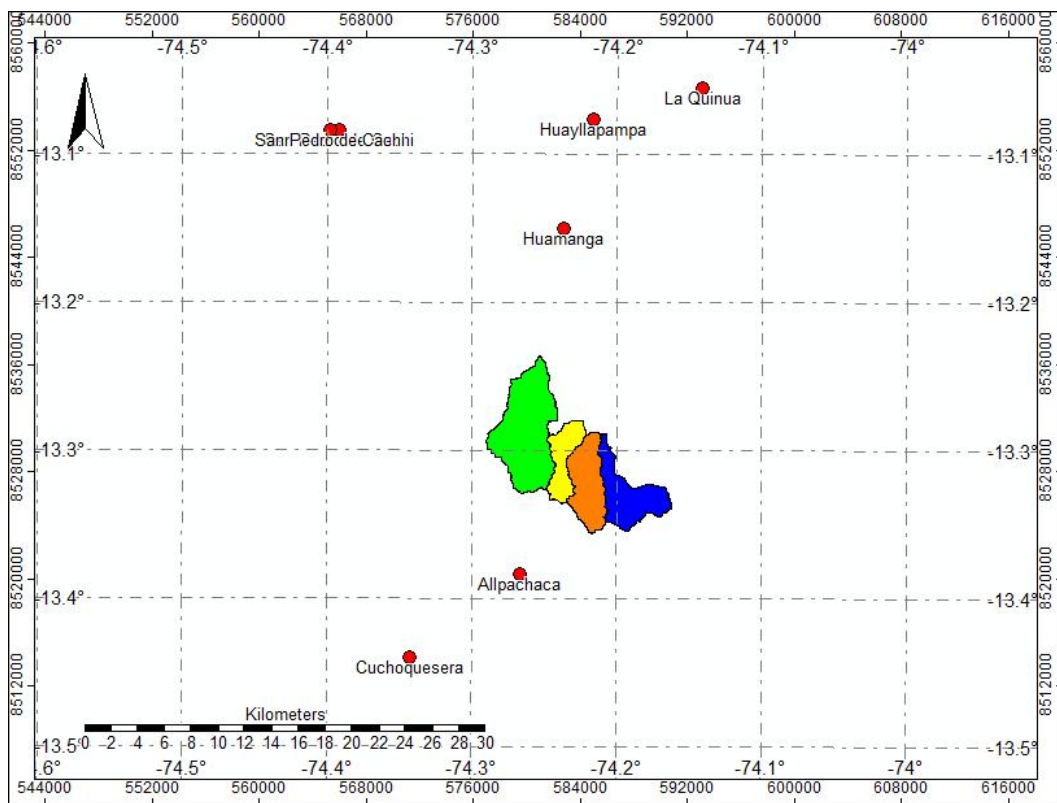


Figura 3.28: Estaciones climatológicas

Tabla 3.7: Lista de estaciones meteorológicas

Estación	Serie	Longitud	Latitud	Altura
Cuchoquesera		-74.34260945	-13.44017735	3750
Allpachaca	000662	-74.26666667	-13.38333333	3600
Huamanga	000661	-74.23694444	-13.15	2761
Huayllapampa	000664	-74.21666667	-13.07638889	2518
La Quinua	000663	-74.14138889	-13.05527778	3260
Huanta	000660	-74.23916667	-12.94583333	2521
Lircay	000657	-74.71777778	-12.98166667	3150
San Pedro de Cachi	006205	-74.39194444	-13.08361111	3188
San Pedro de Cachi	156205	-74.3985	-13.08361111	3188
Acobamba	000659	-74.56777778	-12.8375	3236
Huancavelica	000649	-75.01222222	-12.78055556	3676
Cobriza	230916	-74.38333333	-12.56666667	1880
Telepaccha	156120	-75.3	-12.75	4400
Acobambilla	156118	-75.31666667	-12.66666667	3795
Manta	156125	-75.2	-12.61666667	3750
Huancalpi	156126	-75.24194444	-12.58	3800
Hacienda Tocaz	000656	-74.61327778	-12.49952778	2950
Paucarbamba	000658	-74.60519444	-12.45198611	3000
Colcabamba	006620	-74.6775	-12.40638889	2780
San Lorenzo	000655	-74.76910278	-12.30533333	2600
Pampas	000508	-74.88852778	-12.3	3260
Acostambo	000625	-75.03561944	-12.34233333	3650
Pilchaca	000648	-75.08333333	-12.35	3570
Salcabamba	006200	-74.81666667	-12.15	2900
Matibamba	156201	-74.81666667	-12.08333333	2200
Viques	000608	-75.21745556	-12.16272222	3186
San Juan de Jarpa	000594	-75.43194444	-12.12388889	3726
San Juan de Jarpa	156116	-75.43041667	-12.05810833	3726
Cusibamba	000574	-75.47438889	-12.05	3605
Huayao	000635	-75.32277778	-12.03833333	3308
Santa Ana	000477	-75.22083333	-12.00416667	3295
Shullcas	155480	-75.16666667	-12	3510
Ingenio	155231	-75.25583333	-11.87944444	3450
San Pedro de Chuclo	155228	-75.49972222	-11.75755556	3380
Jauja	000530	-75.47444444	-11.78361111	3322
Pomacocha	000994	-76.11666667	-11.71666667	4270
Pachachaca	000996	-76.03333333	-11.61666667	3990
Yauli	155235	-76.08333333	-11.66666667	4141

Sistema de referencia geográfico, WGS84.(Fuente: <http://www.senamhi.gob.pe/>)

3.2.2. Análisis de registros anuales

Consiste en el análisis de la homogeneidad o consistencia de la serie de tiempo utilizada, en este caso de las variables climáticas requeridas. Una serie de datos es llamada homogénea si es una muestra de una única población, si los datos evaluados son no homogéneos se deben realizar correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean válidas estimaciones de los parámetros poblacionales.

En los análisis climatológicos se utiliza el término de homogeneidad de la serie y en los análisis hidrológicos se emplea el término de consistencia de la serie, ambos términos son sinónimos pues indican un cambio en la cantidad de lluvia medida por una estación. La homogeneidad se analiza comúnmente a través de técnicas estadísticas, y en cambio, la consistencia por lo general se detecta con la técnica de la curva masa doble.

Para los datos de series de tiempo, las pruebas de homogeneidad establecen la correspondencia entre la muestra y una única población, es decir, que las propiedades estadísticas de la muestra (promedio, varianza, desviación estándar, et.) guarden correspondencia con las propiedades de la población; la prueba es necesaria y fundamental debido que los datos (la muestra) es obtenida en un periodo determinado y su existencia es en todo el tiempo.

Entre los tipos de pruebas estadísticas de homogeneidad se tiene:

- Prueba estadística de Helmert
- Prueba estadística de las secuencias
- Prueba estadística de la t de student
- Prueba estadística de Cramer
- Prueba estadística de Wald - Wolfowitz

- Técnicas de la curva masa doble

El registro de las precipitaciones a nivel anual de la *Estación Allpachaca* queda establecida en la tercera columna de la Tabla 3.8, el análisis de la homogeneidad de ésta serie se realiza mediante la *Prueba Estadística de Helmer*, la misma que consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio; si el evento es mayor que el promedio le corresponde un signo + y si dicho evento es menor que la media se le asigna el signo -; luego, si una desviación de un determinado signo es seguido por el mismo signo se crea una secuencia S , en cambio, si una desviación con un determinado signo es seguido por una desviación de signo contrario se registra un cambio C , cada año, excepto el primero, generarán una secuencia o un cambio. Si la serie es homogénea el número de secuencias S y el número de cambios C deben ser iguales, cuya diferencia será nula (cero), esto no suele suceder con frecuencia y se considera dentro de los límites de un error probable y depende, como debe ser, del tamaño del registro (n) y está dado por:

$$-\sqrt{n-1} \leq S - C \leq \sqrt{n-1} \quad (3.2)$$

El procedimiento es el siguiente: se obtiene el promedio de la serie analizada, en este caso el promedio es $738.9mm$, el promedio es comparado con cada uno de los eventos asignando el signo - o + dependiendo si el evento es mayor o menor al promedio, respectivamente; se cuenta el número de secuencias y cambios para evaluar la homogeneidad de la serie de acuerdo a la Ecuación 3.2.

La evaluación de la homogeneidad mediante el *Test de Helmer* se muestra en la Tabla 3.8 y cuyas precipitaciones registradas por la *Estación Allpachaca* es homogénea, dado que: $-5.2 \leq 3 \leq 5.2$

Tabla 3.8: Test de Hermert de la precipitación anual, Estación Allpachaca

Nro	Año	Precipitación anual (mm)	Test de Helmert
1	1966	773.6	+
2	1967	682.3	- C
3	1968	576.8	- S
4	1969	668.0	- S
5	1970	897.6	+ C
6	1971	668.8	- C
7	1972	815.9	+ C
8	1973	844.8	+ S
9	1974	746.5	+ S
10	1975	681.0	- C
11	1976	946.1	+ C
12	1977	717.2	- C
13	1978	544.1	- S
14	1979	724.7	- S
15	1980	736.9	- S
16	1981	809.1	+ C
17	1982	666.1	- C
18	1998	595.7	- S
19	1999	744.3	+ C
20	2000	888.0	+ S
21	2001	706.2	- C
22	2002	915.0	+ C
23	2003	742.0	+ S
24	2004	738.5	- C
25	2005	647.0	- S
26	2006	772.0	+ C
27	2007	708.0	- C
28	2008	733.9	- S

Precipitación anual, Estación Allpachaca(Fuente: <http://www.peruclima.pe/>)

3.3. Precipitación diaria máximo anual

Se selecciona el registro de la estación Huamanga, los registros de las precipitaciones máxima en 24 horas -precipitación acumulada diaria se muestra en la tabla 3.9, a partir de estas precipitaciones se determinarán el hidrograma de máximas avenidas.

Tabla 3.9: Precipitación máxima diaria, estación Huamanga

AÑO	P(mm)	AÑO	P(mm)	AÑO	P(mm)
1962	20	1979	16	1996	29
1963	40.4	1980	18.2	1997	23.2
1964	19.8	1981	19.9	1998	27.3
1965	25.8	1982	44.5	1999	24.8
1966	37.7	1983	24.4	2000	35.2
1967	22.9	1984	48	2001	39
1968	38.1	1985	25.8	2002	23.6
1969	38	1986	30	2003	30
1970	29	1987	24.2	2004	49.8
1971	46.6	1988	23	2005	30.2
1972	20.2	1989	26	2006	27.9
1973	32	1990	30.5	2007	34
1974	26	1991	19.5	2008	31.5
1975	23	1992	19.6	2009	29.6
1976	30.5	1993	40.5	2010	24.5
1977	26	1994	22	2011	46.7
1978	23.2	1995	42	2012	24.7

Referencia: Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, titulado: Modelización Precipitación Escorrentía en Cuencas Urbanas - Caso de Estudio: Distrito de Carmen Alto, autor: Enrique Sánchez Palomino

3.4. Cambio de uso del suelo en la cuenca de interés

El uso del suelo⁶ comprende las acciones, actividades e intervenciones que realizan las personas sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla.

Para determinar la evolución de uso del suelo de la cuenca en estudio se realizará

⁶Tomado desde: FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999

en base a la información disponible del proyecto LANDSAT, específicamente de los proyectos LANDSAT 5 y LANDSAT 8, con esta finalidad se dispone del programa ENVI 5.03 para el tratamiento y la manipulación de archivos de teledetección.

3.4.1. Archivos LANSAT

Para la determinación de los usos de suelo y la evolución de ésta en el tiempo se utilizará la base de datos disponible por el Proyecto LANDSAT, cronológicamente en el tiempo de las versiones 5, 7 y 8, los usos de suelo se relacionan Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), las figuras 3.29 al 3.31 muestran todas las bandas disponibles para el usuario de cada una de las versiones consideradas del proyecto.

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo
..			Local Disk
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
LC80050692015191LGN00_MTL.txt	7,872	7,872	Text Document

Figura 3.29: Archivos proyecto LANDSAT 8 para la zona en estudio

3.4.2. Obtención del NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) se obtiene desde la aplicación ENVI 5.03, programa computacional para el tratamiento de sistemas de información geográfica y la teledetección.

Desde la aplicación ENVI 5.03, se muestra la relación de la superficie disponible desde

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo
..			Local Disk
LE70050692002355COA00_B1.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B2.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B3.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B4.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B5.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B6_VCID_1.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B6_VCID_2.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B7.TIF	55,546,798	?	TIF File
LE70050692002355COA00_B8.TIF	222,043,638	?	TIF File
LE70050692002355COA00_MTL.txt	6,559	?	Text Document
README.GTF	8,706	?	GTF File

Figura 3.30: Archivos proyecto LANDSAT 7 para la zona en estudio

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo
..			Local Disk
LT50050692006214CUB00_B1.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B2.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B3.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B4.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B5.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B6.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_B7.TIF	55,213,078	?	TIF File
LT50050692006214CUB00_GCP.txt	7,675	?	Text Document
LT50050692006214CUB00_MTL.txt	5,416	?	Text Document
LT50050692006214CUB00_VER.jpg	405,322	?	JPG File
LT50050692006214CUB00_VER.txt	57,088	?	Text Document
README.GTF	8,706	?	GTF File

Figura 3.31: Archivos proyecto LANDSAT 5 para la zona en estudio

el proyecto LANDSAT y la cuenca Lambras Huayqo, los que muestran las figuras 3.32 y 3.33 desde donde se obtendrá los índices de vegetación de diferencia normalizada.

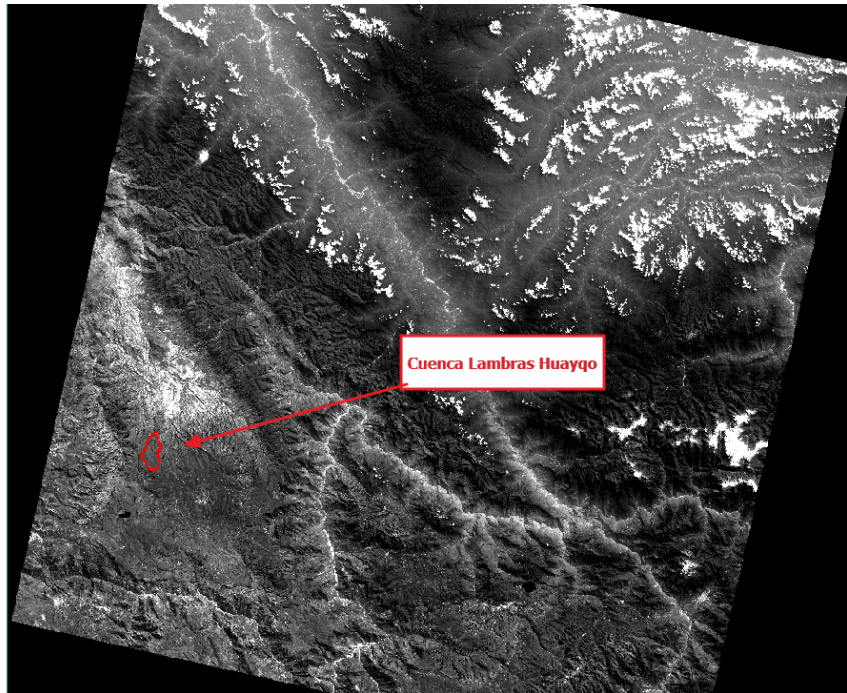


Figura 3.32: Relación del archivo LANDSAT 8 y la cuenca Lambras Huayqo

El proceso seguido para la obtención del NDVI desde ENVI 5.03 es la siguiente:

1. Se cargó el archivo MTL *LC80050692015191LGN00_MTL.txt* a la aplicación ENVI 5.03
2. Reproyección de los archivos, dado que por defecto se encuentra referencia al hemisferio norte.
3. Efectuar la calibración radiométrica.
4. Efectuar la corrección atmosférica.
5. Obtener el NDVI seleccionando las bandas adecuadas, esto dependerá de los archivos LANDSAT 5, LANDSAT 7, LANDSAT 8.
6. Seleccionar las celdas (contar el número de celdas) para cada intervalo del NDVI considerado, en su correspondencia con los usos de suelo. Con los intervalos establecidos por la tabla 3.10.

7. Con el número de celdas para cada intervalo del NDVI se obtienen las superficies para cada uso de suelo.

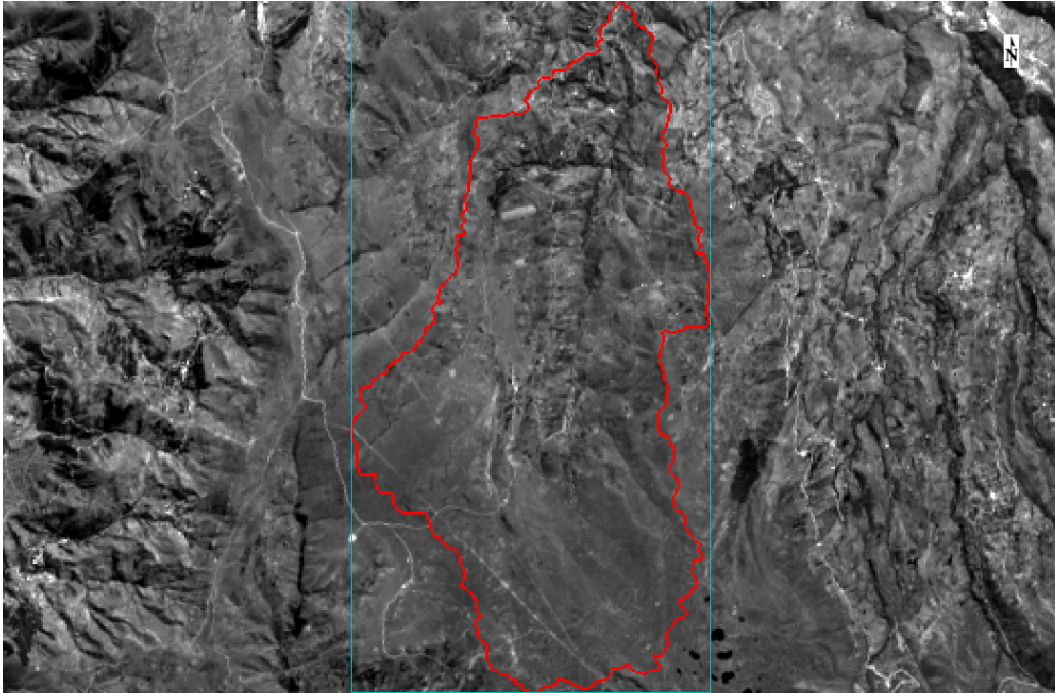


Figura 3.33: Región de interés, archivos LANDSAT y la cuenca Lambras Huayqo

Tabla 3.10: Relación del NDVI y el uso de suelo. fuente:(Linsley , Monserrat Ferrér [4])

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

3.4.3. Superficie para cada uso de suelo

Luego de obtener el NDVI para la cuenca se clasifica las celdas que disponen con valores en un intervalo de clase, las clases consideradas es la variación del NDVI de acuerdo a la tabla 3.10, los resultados obtenidos, la cantidad de celdas para cada intervalo, muestra el reporte desde ENVI 5.3, representada en la figura 3.34.

La figura 3.35 muestra la cantidad de celdas por tipo de uso de suelo, para la fecha analizada del archivo disponible LANDSAT, 15 de setiembre de 2016, en la misma

figura el elemento Class 2 contiene el número de celdas que se encuentran fuera de la cuenca, contiene el numero de celdas sin información. La tabla 3.11 muestra el NDVI, el uso de suelo, la superficie disponible y el número de curva.

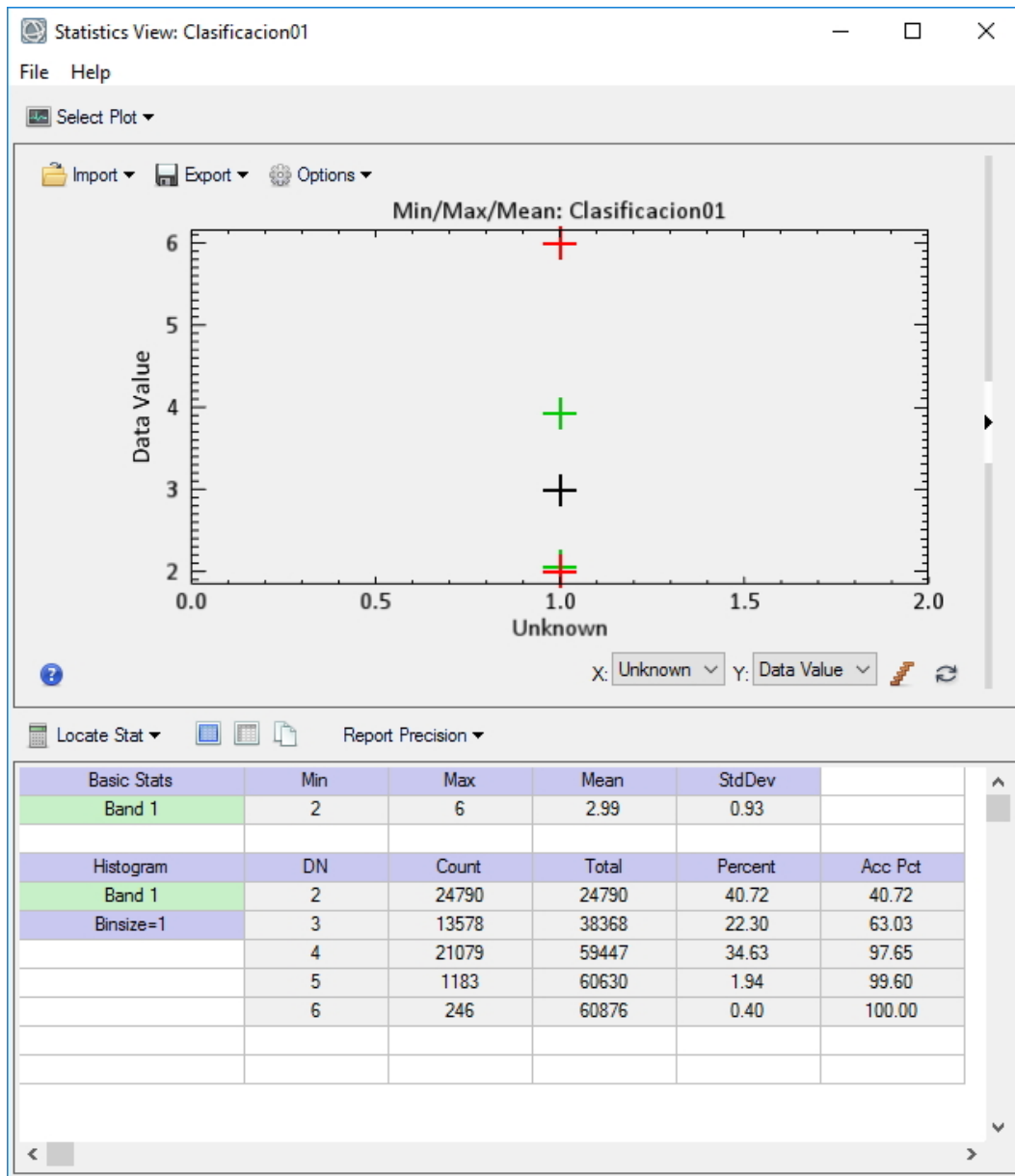


Figura 3.34: Estadística de la clasificación NDVI, cantidad de celdas

El número de curva ponderado determinado por el procedimiento actual es 76.79, de la misma manera se obtiene los números de curva ponderados con los archivos LANDSAT 5 Y LANDSAT 7, obteniendo números de curva de 46.8 y 64.3, respectivamente.

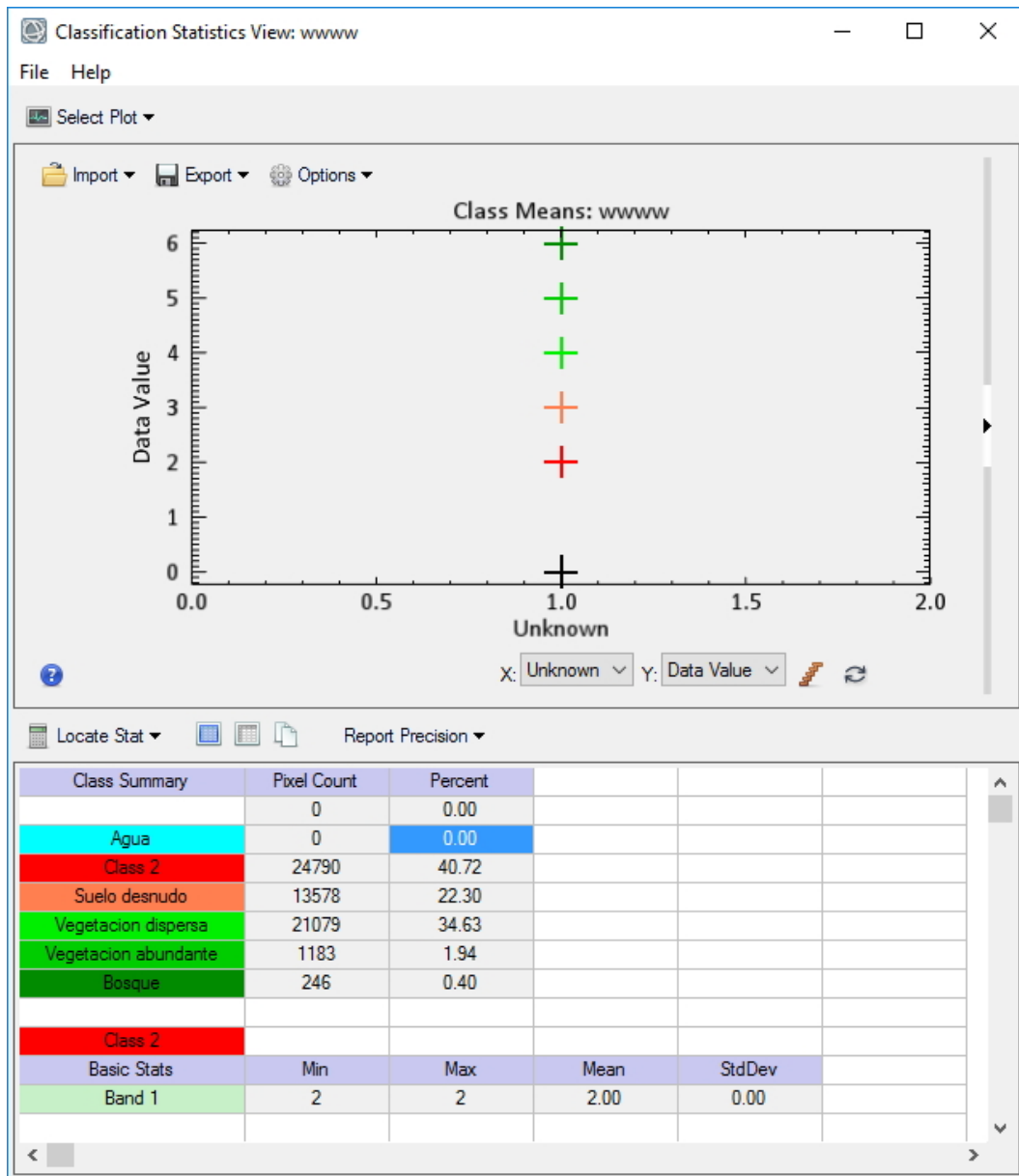


Figura 3.35: Estadística de la clasificación NDVI, cantidad de celdas indicando el uso de suelo

Tabla 3.11: Superficies para cada uso de suelo obtenida del programa envi 5.3

NDVI	Atributo	N CELDAS	Area (m2)	CN
desde -1 hasta 0	agua o cubiertas artificiales	0	0	100
desde 0 hasta 0.2	suelo desnudo o vegetación muerta	13578	12220200	82
desde 0.2 hasta 0.4	vegetación dispersa o poco vigorosa	21079	18971100	75
desde 0.4 hasta 0.6	vegetación Abundante y vigorosa	1183	1064700	65
desde 0.6 hasta 1	vegetación muy densa y vigorosa	246	221400	0

3.4.4. Caudales de máxima avenida

Los caudales de máxima avenida se determinan considerando los números de curva mostrados en la tabla 3.12, al transformación de la precipitación en escorrentía se realiza mediante los modelos empíricos de uso común, el proceso detallado de cálculo se muestran en el anexo.

Tabla 3.12: Número de curva para distintos periodos obtenida del programa envi 5.3

	FECHA	CN
LANDSAT 8	15/09/2016	76.79
LANDSAT 8	24/08/2014	73.73
LANDSAT 7	03/08/2006	64.3
LANDSAT 5	22/12/2002	46.8

Capítulo IV: Resultados obtenidos y su análisis

Se muestra los resultados obtenidos en la tesis realizada y el análisis de ésta, los resultados obtenidos son los caudales de máxima avenida para distintas épocas, tomando como base el registro el proyecto LANDSAT para la clasificación de usos de suelo en correspondencia al índice de vegetación de diferencia normalizada.

4.1. Resultados de la investigación

Los resultados obtenidos son los caudales de máxima avenida para distintos periodos en una misma cuenca hidrográfica, los resultados muestran la variación teniendo en cuenta la respuesta hídrica de la cuenca y es susceptible al cambio de uso de suelo que es generado por el hombre siempre con la finalidad de cubrir sus necesidades.

La figura B.1 muestra la clasificación de los usos de suelo obtenidos desde los registros de LANDSAT 8, el día específico para el cual se presenta esta clasificación queda establecida en la tabla 3.12, el color rojo corresponde a las celdas que se encuentran fuera de la zona de interés, por tanto, no disponen ningún valor.

Mientras, la figura 4.36, muestra el porcentaje de área que corresponde a cada uso de suelo en consideración a la clasificación y su correspondencia al índice de vegetación de diferencia normalizada.

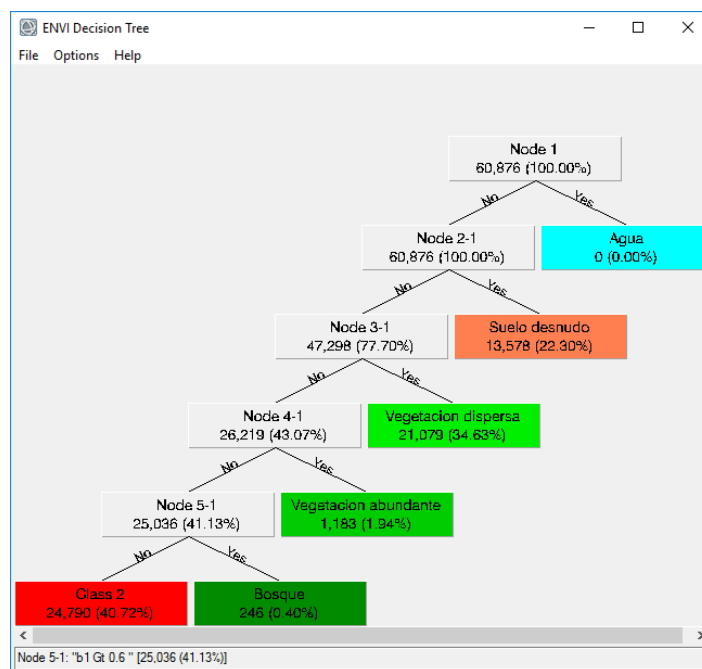


Figura 4.36: Determinación de las superficies en porcentaje, para cada tipo de uso de suelo

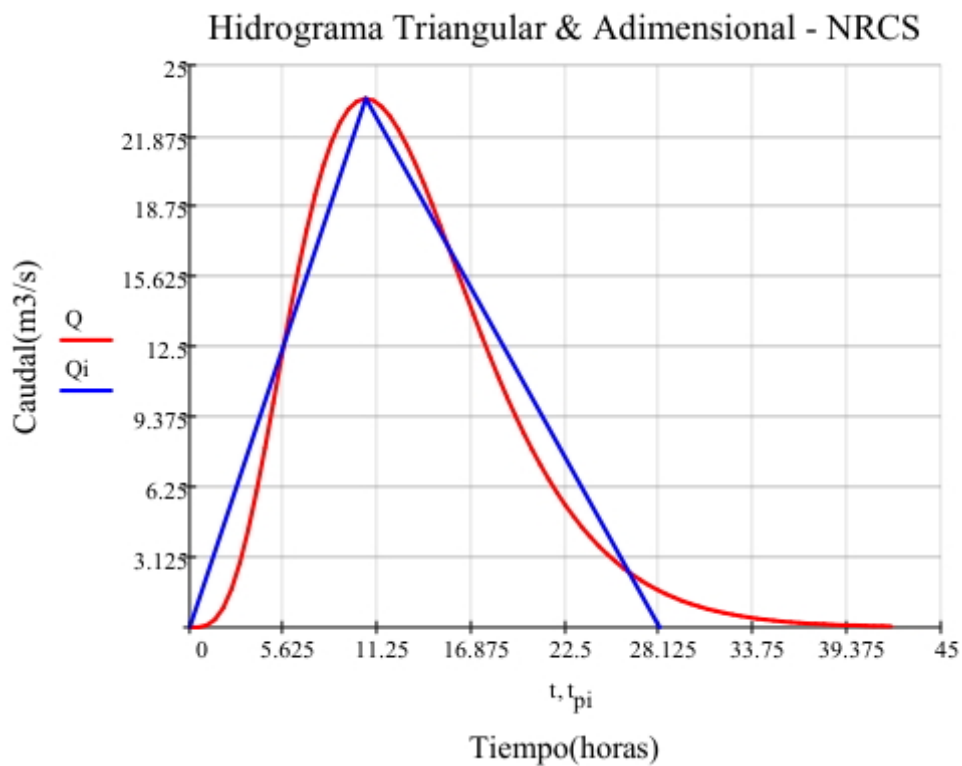


Figura 4.37: Hidrograma de máxima avenida, cuenca Lambras Huayqo

4.2. Usos de suelo y el NDVI

Cada componente del suelo (tierra, agua, todos los tipos de minerales, todos los tipos de plantas, animales, etc.) tiene una forma particular de reflejar la luz, esta característica propia de cada elemento es conocido y el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) -Índice de vegetación de diferencia normalizada utiliza las bandas, en este caso del proyecto LANDSAT, donde es posible la existencia de la reflectancia en mayor medida de las plantas, específicamente de las bandas rojo e infra-rojo cercano.

4.2.1. Nomenclatura de las bandas

Dependiendo de la versión del proyecto LANDSAT, para la obtención del NDVI, se deben utilizar las bandas adecuadas, estas bandas en las diferentes versiones del proyecto se encuentran mostradas en las tablas 4.13 al 4.15.

Tabla 4.13: Bandas LANDSAT 4 y 5 (Fuente: tomado desde <https://landsat.usgs.gov/>)

Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)
Band 1 - Blue	0.45-0.52	30
Band 2 - Green	0.52-0.60	30
Band 3 - Red	0.63-0.69	30
Band 4 - Near Infrared (NIR)	0.76-0.90	30
Band 5 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.55-1.75	30
Band 6 - Thermal	10.40-12.50	120 (30)
Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.08-2.35	30

4.2.2. Correcciones requeridas

Las bandas descargas de cualquier versión del proyecto LANDSAT, como los utilizados en el presente trabajo, las versiones 5, 7 y 8, requieren ser corregidos, el término utilizado es calibrados por efectos de la radianza y la reflectancia (corrección atmosférica).

Tabla 4.14: bandas LANDSAT 7 (Fuente: tomado desde <https://blogs.esri.com/>)

Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)
Band 1 Blue	0.45 – 0.52	30
Band 2 Green	0.52 – 0.60	30
Band 3 Red	0.63 – 0.69	30
Band 4 NIR	0.77 – 0.90	30
Band 5 SWIR1	1.55 – 1.75	30
Band 7 SWIR2	2.09 – 2.35	30
Band 8 Pan	0.52 – 0.90	15
Band 6 TIR	10.40 – 12.50	30/60

Tabla 4.15: Bandas LANDSAT 8 (Fuente: tomado desde <https://blogs.esri.com/>)

Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)
Band 1 Coastal	0.43 – 0.45	30
Band 2 Blue	0.45 – 0.51	30
Band 3 Green	0.53 – 0.59	30
Band 4 Red	0.64 – 0.67	30
Band 5 NIR	0.85 – 0.88	30
Band 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30
Band 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30
Band 8 Pan	0.50 – 0.68	15
Band 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30
Band 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100
Band 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100

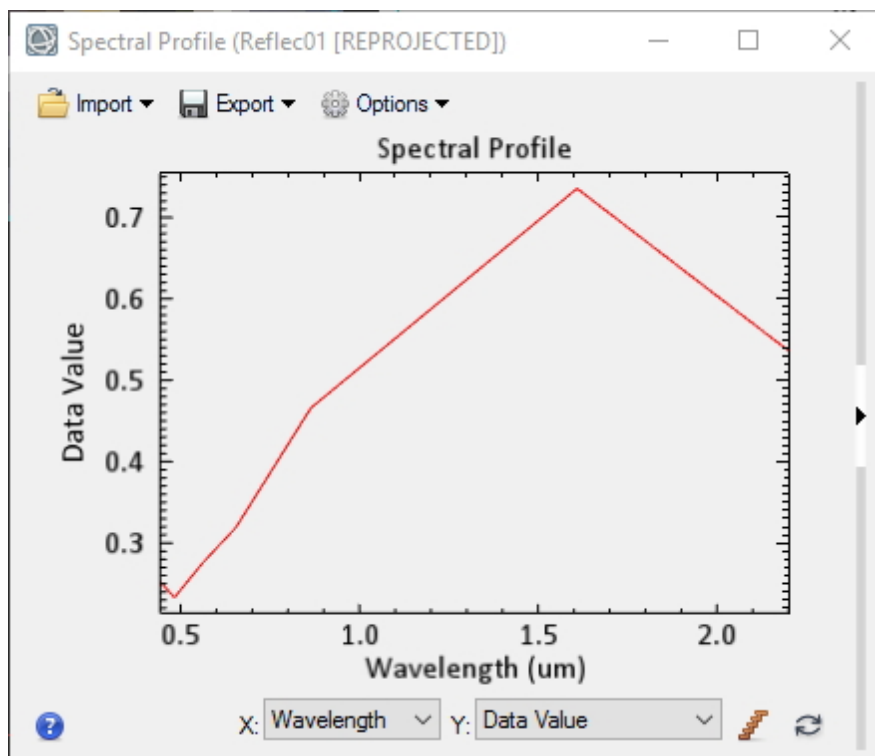


Figura 4.38: Firma espectral característico de la cuenca analizada

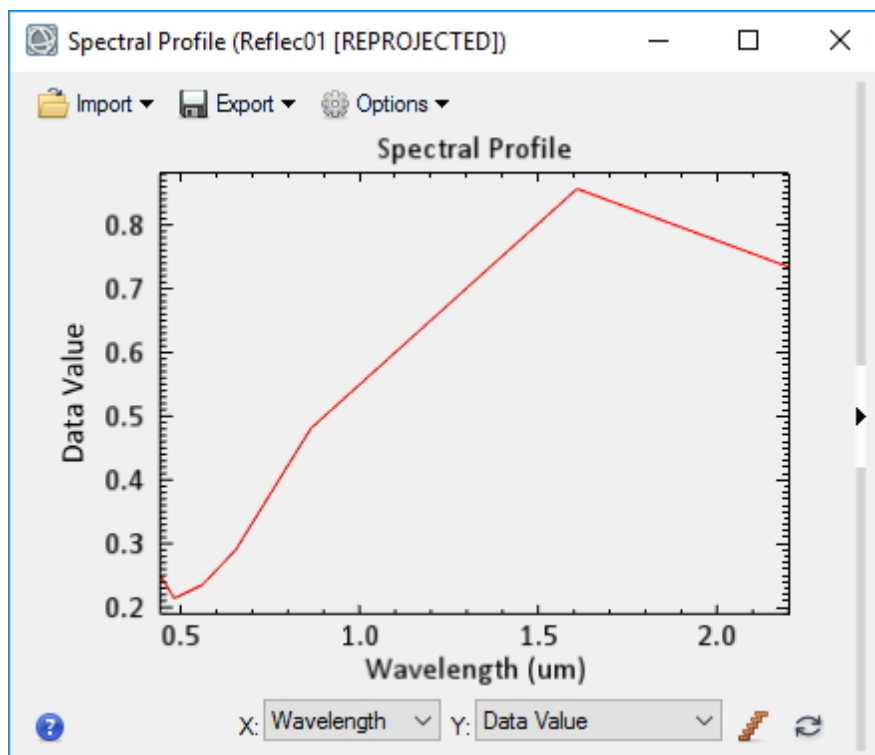


Figura 4.39: Firma espectral característico

4.2.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de Teledetección, su valor se encuentra en correspondencia a los usos de suelo actuales de la cuenca, las figuras 4.38 al 4.40 muestran las firmas espectrales de pixeles y secciones transversales de la cuenca analizada.

A partir de esta información se clasifica e identifica los usos de suelo, por esta razón es importante que la imagen seleccionada disponga de muy poca o ninguna nubosidad, con la finalidad de caracterizar la cuenca completa.

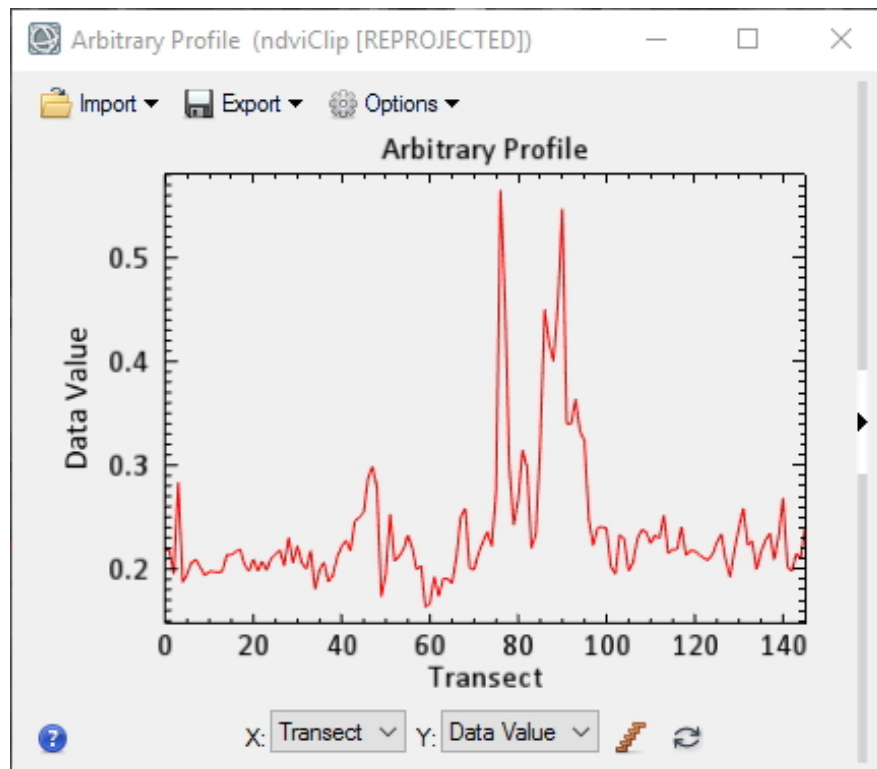


Figura 4.40: Firma espectral de una sección de la cuenca analizada

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas son las siguientes.

- Se determinó la variación hidrológica, a nivel de los caudales de máxima avenida, para distintas etapas de usos del suelo en la cuenca Lambras Huayqo y queda establecido en la tabla 5.16. Se concluye que en fechas posteriores la cuenca disponía de suficientes elementos de flora natural que hacía posible la retención de la precipitación, con el tiempo cambió mayormente para campos de agricultura, mermando la existencia de árboles autóctonos, y con esta actividad baja la capacidad de retención del suelo a las precipitaciones y aumenta la respuesta hídrica de la cuenca tomando en cuenta los caudales de máxima avenida,

Tabla 5.16: Número de curva para distintos periodos y caudal de máxima avenida

	FECHA	CN	CAUDAL (m^3/s)
LANDSAT 8	15/09/2016	76.79	24.85
LANDSAT 8	24/08/2014	73.73	24.07
LANDSAT 7	03/08/2006	64.3	21.64
LANDSAT 5	22/12/2002	46.8	15.23

- La variación del cambio de uso del suelo de la cuenca Lambras Huayqo se encuentra en correspondencia a los necesidades del hombre, así el uso del suelo ha

evolucionado en las fechas analizadas, para el 15/09/2016 un número de curva pondera de $NC = 76.79$, para el 24/08/2014 un $NC = 73.73$, para el 03/08/2006 un $NC = 64.30$ y para el 22/12/2002 un $NC = 46.8$; con el tiempo la cuenca analizada perdió la flora natural existente.

- Existe una relación directa entre el Índice de vegetación de diferencia normaliza y los usos del suelo, cada componente del suelo (tierra, agua, minerales, flora, etc.) dispone de una forma particular de reflejar la luz, gracias a esta característica es posible identificar los usos del suelo, obtenidas a partir de los archivos del proyecto landsat.
- Los usos del suelo tienen su equivalencia en números de curva, una vez obtenido el NDVI y clasificarlo en intervalos, queda determinada su correspondiente número de curva.
- Donde existe mayor NDVI es por la existencia de mayor cantidad de plantas, en consecuencia mayor abstracción.
- Las aplicaciones de libre distribución para el tratamiento de sistemas de información geográfica se encuentran suficientemente implementadas para efectuar trabajos con el propósito de obtener el NDVI.

5.2. Recomendaciones

En la obtención de los archivos LANDSAT, en todas sus versiones, es fundamental seleccionar aquellas que presenten poca presencia de nubes, con fines de obtener una adecuada clasificación de las imágenes.

Bibliografía

- [1] J. Barsi y col. “Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration”. En: *Remote Sensing* 6 (nov. de 2014), págs. 11607-11626. DOI: **10.3390/rs61111607**.
- [2] Percy Zorogastúa Cruz, Roberto Quiroz Guerra y Jaime Garatuza Payán. “Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura - Perú”. En: *Departamento Académico de Biología* (2011).
- [3] Damiano F. y Pizarro M. J. “Estimación del número de curva en la cuenca del río Arrefices - Provincia de Buenos Aires”. En: *Instituto de Clima y Agua de Argentina* (2010).
- [4] Montserrat Ferrér. “Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica”. En: *Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPT-MA 2.4* (1995).
- [5] Fernanda J. Gaspari, Gabriela E. Senisterra y Raúl M. Marlats. “Relación precipitación esorrentía y numero de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo, cuenca modal del sistema serrano de la Ventana, Argenetina”. En: *Revista FCA UNCuyo XXXIX.01* (2007), pp.21-28.
- [6] Wilpen L. Gorr. *GIS tutorial. For ArcGIS*. Ed. por Kristen S. Kurland. [10.3 edition]. Vol. 1. Basic workbook. Redlands, California: Esri Press, 2016. x, 478 Seiten. ISBN: 9781589484566.
- [7] Anita Graser. *Learning QGIS. The latest guide to using QGIS 2.14 to create maps and perform geoprocessing tasks with ease*. Third edition. Community

experience distilled. Birmingham: Packt Publishing, 2016. ix, 190 Seiten. ISBN: 9781785880339.

- [8] E.G. Manrique. “Índice de vegetación, aplicación del NDVI”. En: *VIII Congreso Nacional de Tele detección Albacete* (1999),
- [9] Víctor Olaya. *Sistemas de Información Geográfica*. Vol. Tomo I. 2012.
- [10] Víctor Olaya. *Sistemas de Información Geográfica*. Vol. Tomo II. 2012.
- [11] Hadley Wickham. *R for data science*. Ed. por Garrett Golemund. Beijing: O’Reilly, 2017. 1 volume. ISBN: 9781491910399.

Anexos

Anexo A

Caudales de máxima avenida

Determinación de caudales de máxima avenida, con la finalidad se elaboró una hoja de cálculo desde MathCad 15m045, los procesos que se siguen son:

- Ajuste de los registros (P24 máximo anual) a una función de distribución.
- Determinación de la precipitación de diseño.
- Precipitación efectiva.
- caudal de máxima avenida.



Universidad Nacional San Cristóbal de
Huamanga

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Análisis Estadístico de Datos Hidrológicos

Distribución Gumbel

1.0 Argumentos

Registro de precipitaciones diarias maximo anual

x := (16 18.2 19.5 19.6 19.8 19.9 20 20.2 22 22.9 23 23.2 23.6 24.2 24.4 24.5 24.7 24.8 25.8 26)

x =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	16	18.2	19.5	19.6	19.8	19.9	20	20.2	22	...

2.0 Distribución Gumbel

2.1 Estimación de parámetros (método de los momentos)

Número de elementos: n := cols(x) n = 43

- Promedio aritmético
- Desviación Estándar

$$X := \frac{\sum_{i=1}^n x_{1,i}}{n}$$

$$X = 30.019$$

$$S := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - X)^2}{n - 1}}$$

$$S = 9.214$$

Finalmente, los parámetros están dados por:

$$\alpha := \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot S$$

$$\mu := X - 0.57721566490153286061 \cdot \alpha$$

$$\alpha = 7.184$$

$$\mu = 25.872$$

2.2 Función densidad

$$f(x) := \frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}} \cdot e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}$$

2.2 Función densidad acumulada

$$F(x) := e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

3.0 Prueba de Smirnov - Kolmogorov

$$P := \left\{ \begin{array}{l} x_{\text{ord}} \leftarrow \text{sort}[(x^T)^{\langle 1 \rangle}] \\ \text{for } i \in 1, 2, \dots, n \\ \quad P_{i,1} \leftarrow i \\ \quad P_{i,2} \leftarrow x_{\text{ord}_i} \\ \quad P_{i,3} \leftarrow \frac{i}{n+1} \\ \quad P_{i,4} \leftarrow F(x_{\text{ord}_i}) \\ \quad P_{i,5} \leftarrow |P_{i,4} - P_{i,3}| \end{array} \right. P$$

m	Xord	p(x)	F(x)	Diff
1	16		0.023	0.019
2	18.2		0.045	0.055
3	19.5		0.068	0.088
4	19.6		0.091	0.091
5	19.8		0.114	0.097
6	19.9		0.136	0.101
7	20		0.159	0.104
8	20.2		0.182	0.111
9	22		0.205	0.18
10	22.9		0.227	0.22
11	23		0.25	0.225
12	23.2		0.273	0.234
13	23.6		0.295	0.254
14	24.2		0.318	0.283
15	24.4		0.341	0.293
16	24.5		0.364	0.298

Valor crítico del estadístico Smirnov - Kolmogorov (con un nivel de significación de 5%): $\Delta_0 := 0.22$

$$\Delta := \max(P^{(5)}) \quad \Delta = 0.097$$

$$R := \begin{cases} \Delta \leftarrow \max(P^{(5)}) \\ \text{"Distribución elegida adecuada"} & \text{if } \Delta_o > \Delta \\ \text{"Los datos no se ajustan a la distribución elegida"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

R = "Distribución elegida adecuada"

- Datos ordenados

$$yord := P^{(2)}$$

$$yord^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16	18.2	19.5	19.6	19.8	19.9	20	20.2	22	...

- Función de probabilidad acumulada (Weibull)

$$WeibuLL := P^{(3)}$$

$$WeibuLL^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.023	0.045	0.068	0.091	0.114	0.136	0.159	0.182	...

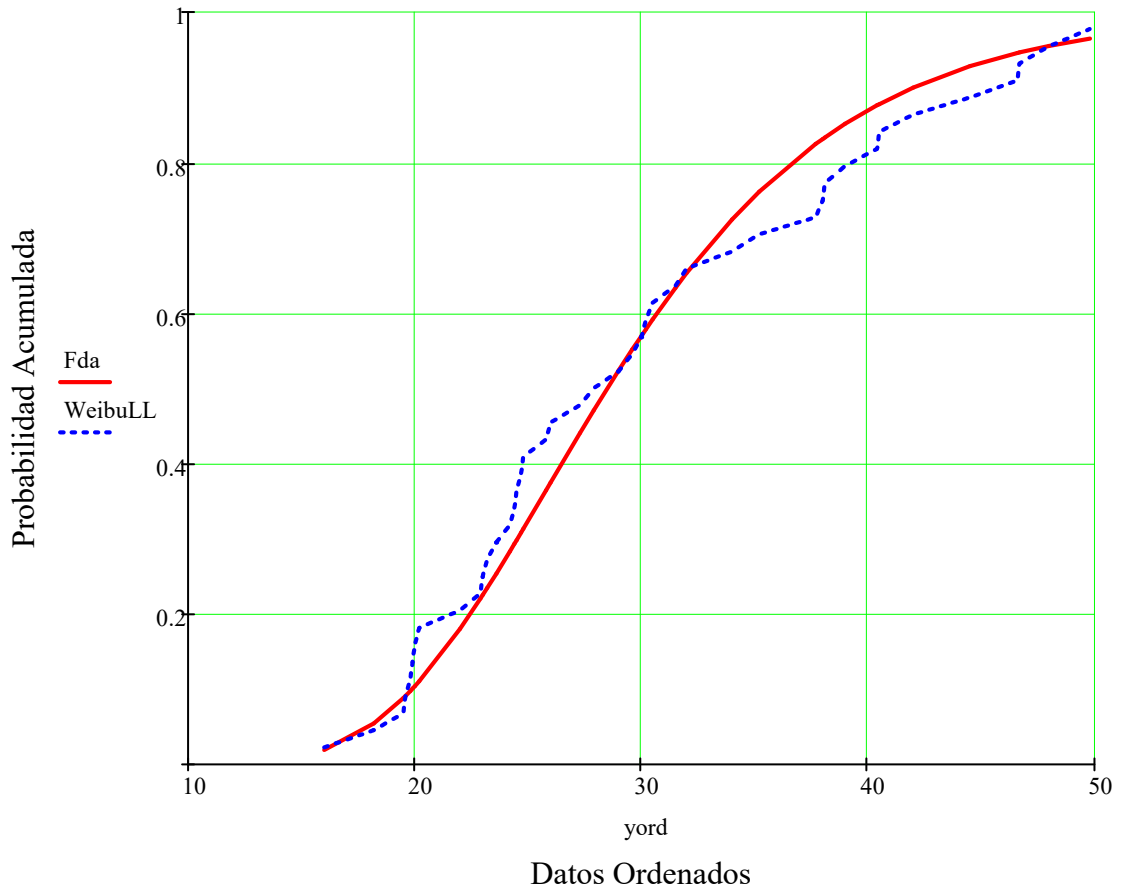
- Función de densidad acumulada

$$Fda := P^{(4)}$$

$$Fda^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.019	0.055	0.088	0.091	0.097	0.101	0.104	0.111	...

Gráfico Función de Distribución Acumulada



4.0 Determinación de Precipitaciones

Determinar la precipitación para distintos periodos de retorno

$$X_{ord} := P^{(2)} \quad F := P^{(4)}$$

Xord =

	1
1	16
2	18.2
3	19.5
4	19.6
5	19.8
6	19.9
7	20
8	20.2
9	22
10	22.9
11	23
12	23.2
13	23.6

F =

	1
1	0.019
2	0.055
3	0.088
4	0.091
5	0.097
6	0.101
7	0.104
8	0.111
9	0.18
10	0.22
11	0.225
12	0.234
13	0.254

$$Tr := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 30 \\ 45 \\ 50 \\ 100 \end{pmatrix}$$

13	23.6
14	24.2
15	24.4
16	...

13	0.254
14	0.283
15	0.293
16	...

- La probabilidad conocida es

$$p := 1 - \frac{1}{Tr}$$

$$p^T = (0.8 \ 0.9 \ 0.967 \ 0.978 \ 0.98 \ 0.99)$$

- Interpolando la precipitación, para una probabilidad de p

$$Q := (\text{linterp}(F, Xord, p))$$

Entonces la precipitación es:

$$Q = \begin{pmatrix} 36.729 \\ 42.045 \\ 50.132 \\ 52.178 \\ 52.587 \\ 54.428 \end{pmatrix} \quad \text{mm} \quad Tr = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 30 \\ 45 \\ 50 \\ 100 \end{pmatrix}$$



Universidad Nacional San Cristóbal de
Huamanga

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Tema:
Estimación de la Precipitación de Diseño

El método basado en las tormentas de diseño tipo NRCS - del "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (NRCS - Antiguo servicio de Conservación de Suelos SCS), proponen cuatro curvas adimensionales de lluvia acumulada para un periodo de 24 horas. Las gráficas propuestas son las siguientes:

- Tormenta tipo II: que corresponde a tormentas de corta duración y mayor intensidad.
- Tormenta tipo I y IA: son características de climas con inviernos húmedos y veranos secos, siendo las tormentas de tipo IA las de menor intensidad.
- Tormenta tipo III: corresponde a tormentas tropicales con grandes profundidades de lluvia en 24 horas

1.- Datos

1.2 Precipitación de diseño - Para un tiempo de retorno considerado

Precipitación (en mm) para un tiempo de retorno de 50 años

$P_{24pr} := 52.587$ mm

Nota:
representa de precipitación total

1.3 Elección del tipo de Precipitación

Teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Tormenta tipo I
2. Tormenta tipo IA
3. Tormenta tipo II
4. Tormenta tipo III

Elección del tipo de
precipitación

$TipoT := 2$

1.4 Precipitación Acumulada - RNCS

Para generar las tormentas acumuladas se realiza mediante:

```

t :=
  i ← 0
  for j ∈ 0, 0.5..24
    i ← 1 + i
    ti ← j
  t

```

	I	IA	II	III
Coefi :=	0.4511	0.3919	0.495	0.5
	9.995	7.96	11.8	12
	1	1	0.56	24
	-0.1617	0.843	10.6	24.04
	-3.0163	120.39	130	2
	0.013	0.3567	0.525	0.04
	0.5853	0.4228	0.75	0.75

{

a

b

c

d

e

f

g

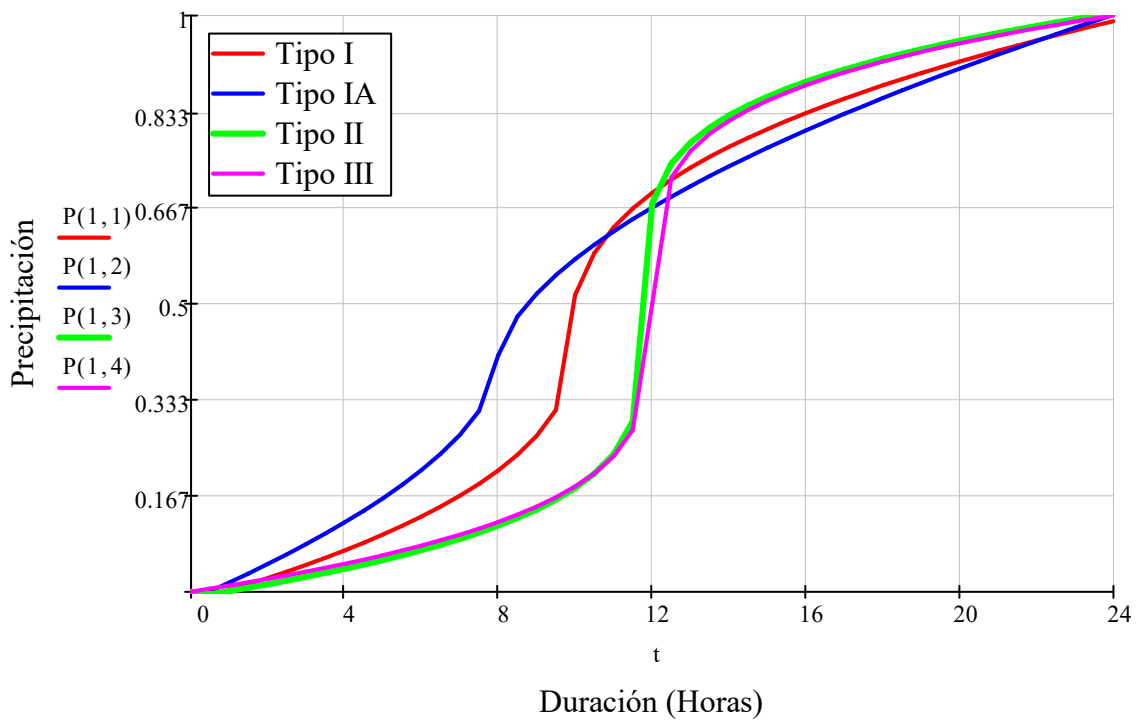
← Coefi^{<tipo>}

```

fo(x,y) ← 0
Po ← matrix(length(t), 1, fo)
for i ∈ 1, 2..length(t)
  Poi ← 0 if ti = 0
  Poi ← P24 · [ a + (ti - b) / c · ( (d / (e · |ti - b| + f))og ) ] otherwise
Po

```

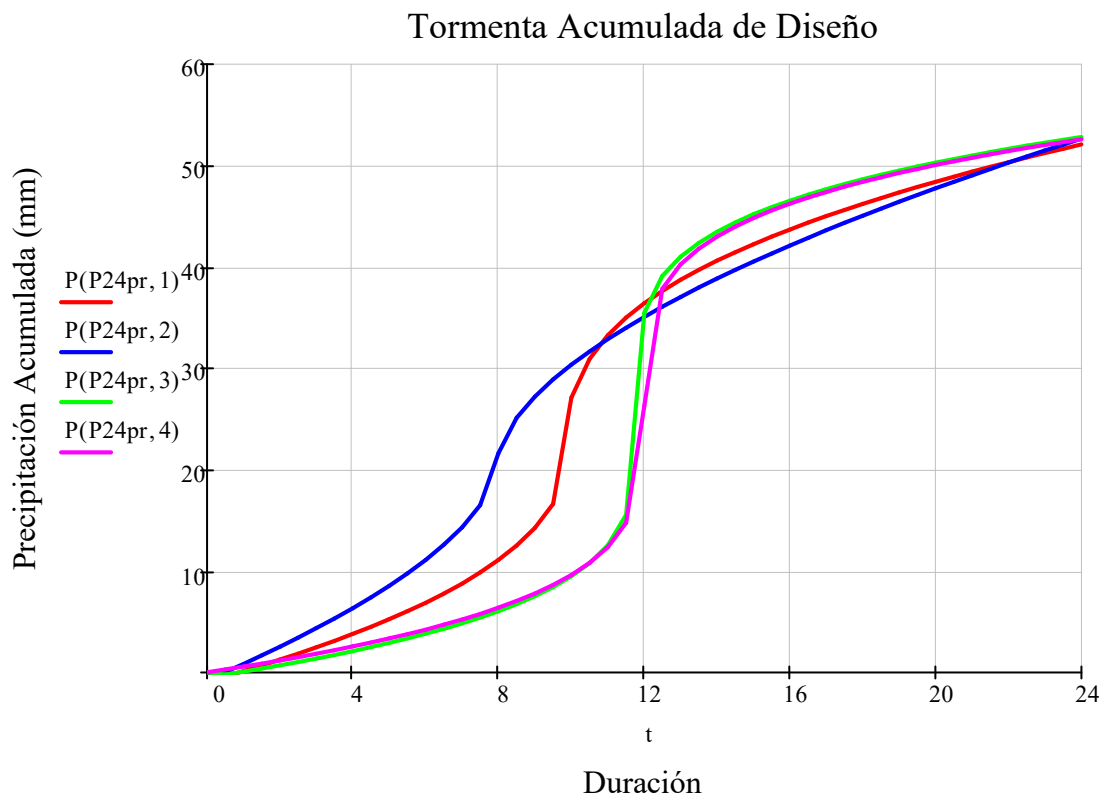
Tipos de Tormentas de Diseño - NRCS



2.- Proceso de Cálculo

2.1 Precipitación de diseño

El tipo de tormenta(I, IA, II y III) se elige teniendo en cuenta la similitud gráfica de la curva masa o precipitación acumulada de la precipitación (datos) comparado con las curvas propuestos por NRCS



El tipo de tormenta seleccionado es:

$$\text{TipoT} = 2$$

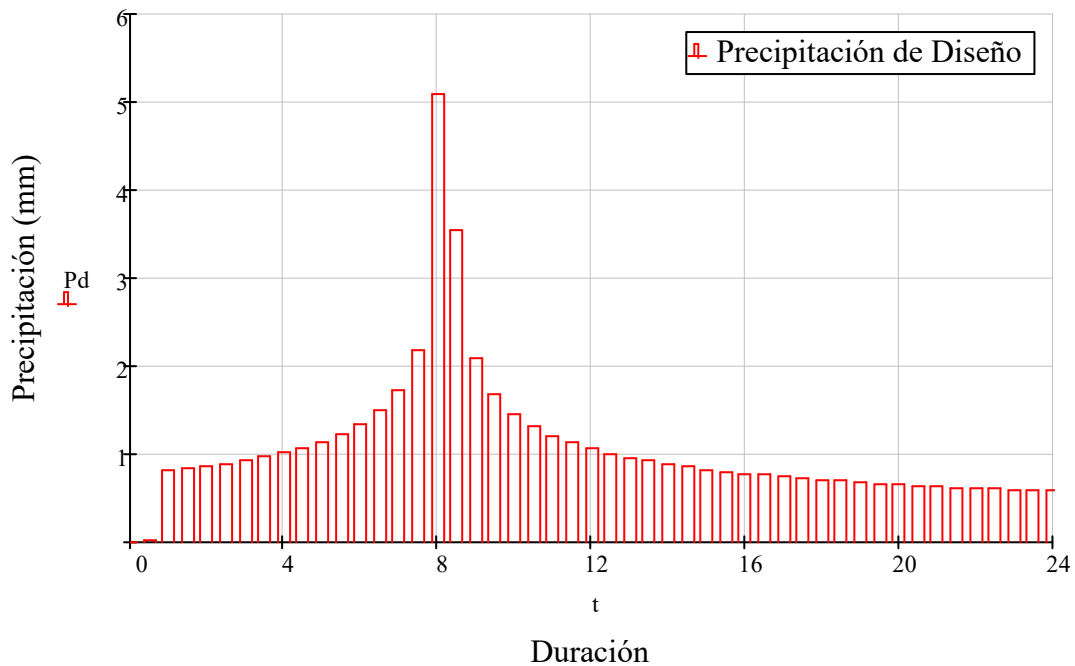
$$\text{Pac} := \text{P}(\text{P24pr}, \text{TipoT})$$

La precipitación de diseño(P_d), el hietograma de diseño

$$P_d := \text{Pac} \quad j := 2, 3 \dots \text{length}(\text{Pd})$$

$$P_{d_j} := \text{Pac}_j - \text{Pac}_{j-1}$$

Tormenta de Diseño



$Pd1 := \text{augment}(Pd, t)$

$$Pd1^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.025	0.808	0.833	0.861	0.892	0.927	0.968	1.015
2	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	...



Universidad Nacional San Cristóbal de
Huamanga

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Tema:
Estimación de la Precipitación Efectiva

El cálculo de la escorrentía para tormenta de diseño se estimará mediante el método propuesto por el "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (RNCS - Antiguo SCS)

El procedimiento sirve para obtener:

- La precipitación efectiva de una tormenta (tormenta de diseño)
- El volumen de tormenta perdido por las abstracciones (detención superficial, infiltración, evaporación, transpiración, etc)
- Distribución temporal de las abstracciones

1.- Datos

1.1 Precipitación de diseño (hietograma)

donde:

- hie: hietograma (Fila uno: Precipitación para Δt , Fila dos: tiempo)
- P: Precipitación en mm
- t: Duración (en unidad de tiempo)

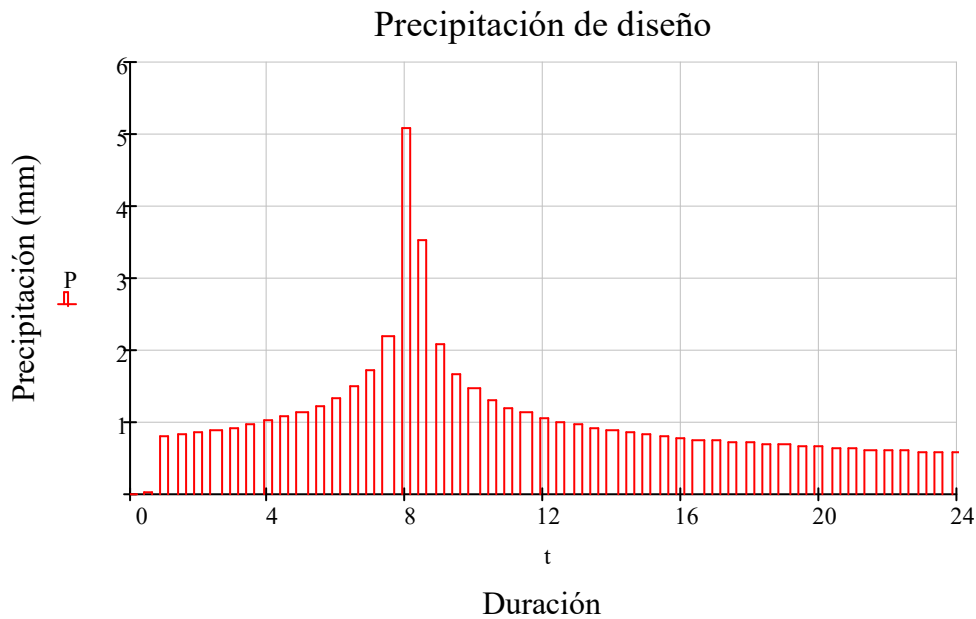
$$\text{hie} := \begin{pmatrix} 0 & 0.025 & 0.808 & 0.833 & 0.861 & 0.892 & 0.927 & 0.968 & 1.015 & 1.071 & 1.139 & 1.223 & 1.334 & 1.48 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 2.5 & 3 & 3.5 & 4 & 4.5 & 5 & 5.5 & 6 & 6.5 \end{pmatrix}$$

Donde:

$$P := (\text{hie}^T)^{\langle 1 \rangle} \quad t := (\text{hie}^T)^{\langle 2 \rangle}$$

$P^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	0	0.025	0.808	0.833	0.861	0.892	0.927	0.968	..

$t^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	...



1.2 Tipos y Usos del Suelo en la Cuenca

La capacidad de infiltración de un suelo y por lo tanto de generación de escorrentía depende de los siguientes factores: contenido inicial de humedad, tipo de suelo y tipo de uso del terreno. Para determinar las abstracciones mediante NRCS es necesario conocer el número de curva (CN) ponderado de la cuenca, teniendo en cuenta lo diferentes tipos y usos de suelo.

CN₀ := 76.79 Nota:
 CN para condición de humedad antecedente tipo II y I_a=0.2S

1.3 Condiciones de Humedad Antecedente

El Número de curva (CN) en la sección 1.2 es para condiciones de humedad antecedente tipo II, si la condiciones de humedad fueran distintas, del tipo I o III, es necesario transformar el CN a las condiciones requeridas.

1. Condición de humedad antecedente Tipo I
2. Condición de humedad antecedente Tipo II
3. Condición de humedad antecedente Tipo III

Seleccionar la condición de humedad antecedente

H₀ := 1

$$\text{CN} := \begin{cases} \text{CN} \leftarrow \frac{4.2 \cdot \text{CN}_0}{10 - 0.058 \cdot \text{CN}_0} & \text{if } H_0 = 1 \\ \text{CN} \leftarrow \text{CN}_0 & \text{if } H_0 = 2 \\ \text{CN} \leftarrow \frac{23 \cdot \text{CN}_0}{10 + 0.13 \cdot \text{CN}_0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{CN} = 58.151$$

2.- Proceso de Análisis

2.1 Precipitación Efectiva

- La abstracción Potencial "S" se puede estimar mediante:

$$S := \frac{25400}{CN} - 254 \quad S = 182.791$$

- La precipitación total está dado por:

$$P_{\text{total}} := \sum P \quad P_{\text{total}} = 52.626 \quad \begin{array}{l} \text{Nota:} \\ \text{Precipitación total en mm} \end{array}$$

- La abstracción inicial está dado por:

$$I_a := 0.2 \cdot S \quad I_a = 36.558$$

Es necesario comprobar la ocurrencia de la escorrentía directa, la precipitación total debe ser mayor a la abstracción inicial.

Existe precipitación neta o efectiva? - EpE

$$EpE := \begin{cases} \text{"Existe precipitación Efectiva"} & \text{if } P_{\text{total}} > I_a \\ \text{"No existe precipitación efectiva"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

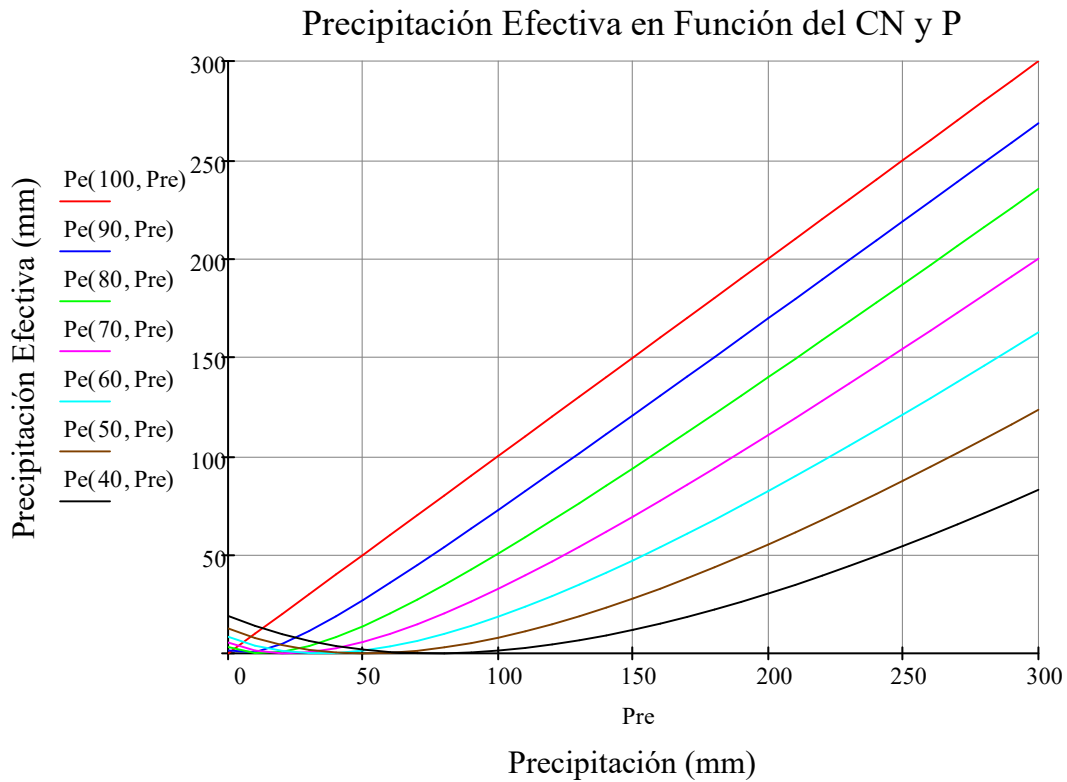
$$EpE = \text{"Existe precipitación Efectiva"}$$

- Obtención de la precipitación efectiva

$$Pe(CN, P) := \frac{\left[P - 0.2 \cdot \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \right]^2}{P + 0.8 \cdot \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)} \quad \begin{array}{l} \text{Nota:} \\ \text{cuando } P_{\text{total}} \text{ es mayor a } I_a \end{array}$$

Variación de la precipitación efectiva en función de la precipitación total y el número de curva

$$Pre := \begin{cases} u \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0, 10.. 300 \\ \quad \left| \begin{array}{l} u \leftarrow u + 1 \\ pre_u \leftarrow k \end{array} \right. \\ \quad pre \end{cases}$$



- la precipitación efectiva es:

$$P_e := Pe(\text{CN}, P_{\text{total}}) \quad P_e = 1.298 \quad \text{en mm}$$

2.2 Distribución Temporal de las Abstracciones del Método NRCS

- La precipitación acumulada (Pac) en mm

$$k := 2, 3 \dots \text{length}(t)$$

$$Pac := P$$

$$Pac_k := Pac_{k-1} + P_k$$

$$Pac^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0.025	0.833	1.666	2.527	3.419	4.346	

- Las abstracción inicial (Iao)

$$Iao := \left\{ \begin{array}{l} f(x,y) \leftarrow 0 \\ Iao \leftarrow \text{matrix}(\text{length}(t), 1, f) \\ Poo_1 \leftarrow Pac_1 \\ \text{for } k \in 1, 2.. \text{length}(t) \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} Iao_k \leftarrow Pac_k \text{ if } Ia \geq Pac_k \\ Iao_k \leftarrow Ia \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ Iao \end{array} \right.$$

$$Iao^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & \\ \hline 1 & 0 & 0.025 & 0.833 & 1.666 & 2.527 & 3.419 & 4.346 & \\ \hline \end{array}$$

- La abstracción continuada (Fa)

$$Fa := \left\{ \begin{array}{l} f(x,y) \leftarrow 0 \\ Fa \leftarrow \text{matrix}(\text{length}(t), 1, f) \\ \text{for } k \in 1, 2.. \text{length}(t) \\ \quad Fa_k \leftarrow \frac{S \cdot (Pac_k - Iao_k)}{Pac_k - Iao_k + S} \text{ if } Pac_k \geq Ia \\ Fa \end{array} \right.$$

$$Fa^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hline \end{array}$$

- La precipitación neta acumulada (Pnetaac) para cada variación de tiempo

$$Pnetaac := Pac - Iao - Fa$$

$$Pnetaac^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hline \end{array}$$

- La precipitación neta (Pneta) para cada variación de tiempo

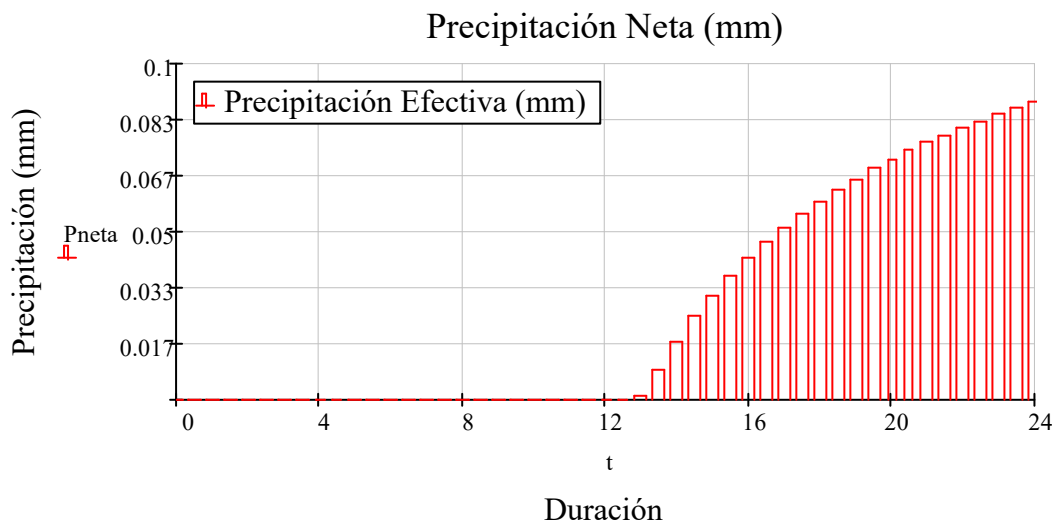
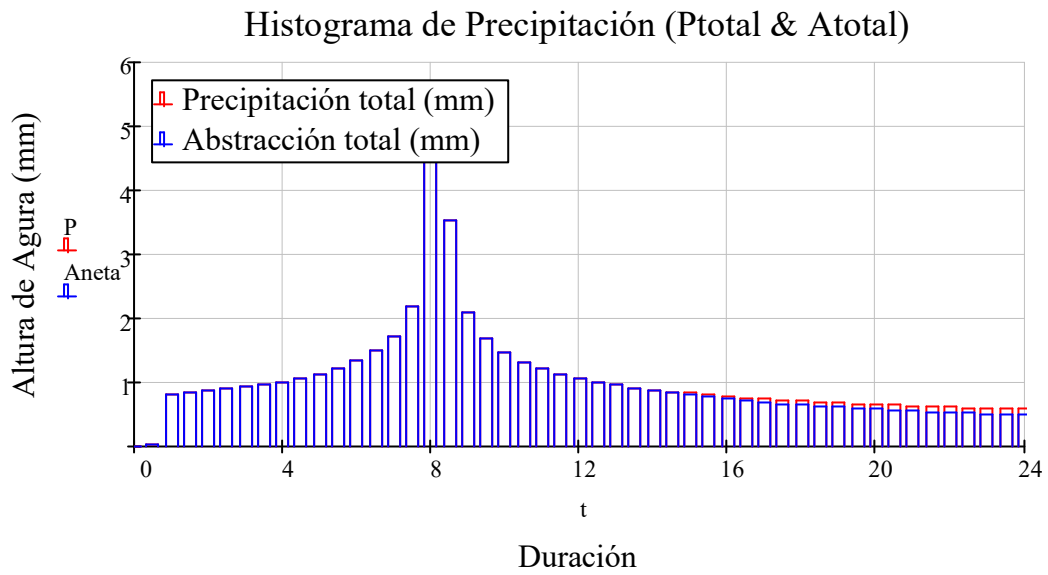
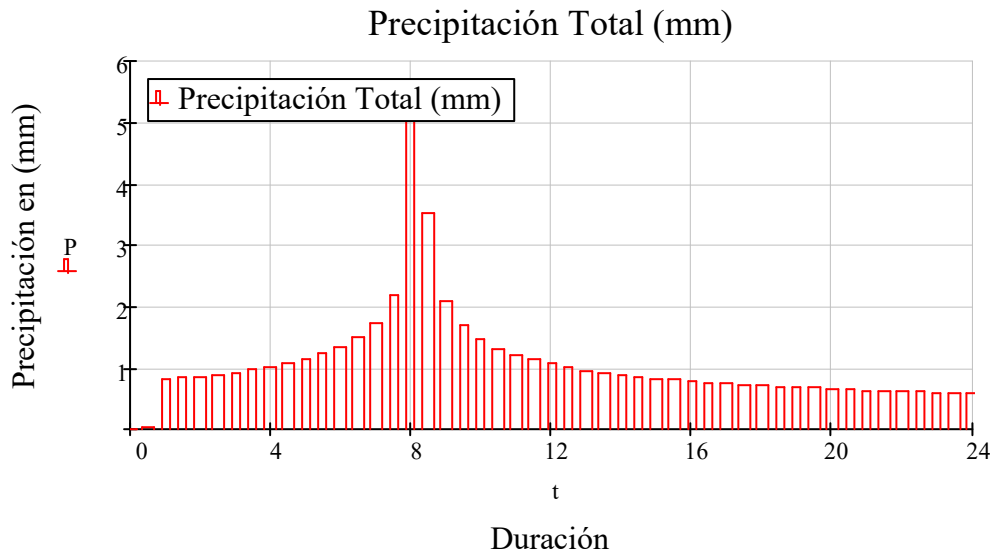
$$Pneta_k := Pnetaac_k - Pnetaac_{k-1}$$

$$Pneta^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hline \end{array}$$

- Las abstracciones neta para cada variación de tiempo

$$Aneta := P - Pneta$$

$$Aneta^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 1 & 0 & 0.025 & 0.808 & 0.833 & 0.861 & 0.892 & 0.927 & 0.968 & \\ \hline \end{array}$$





Universidad Nacional San Cristóbal de
Huamanga

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Tema:
Hidrograma Triangular NRCS-TR55 &
Hidrograma Adimensional NRCS

El "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (NRCS - Antiguo SCS) desarrolló el hidrograma triangular para aproximar el hidrograma generado por una tormenta, el método solamente obtiene el caudal máximo producido, el tiempo base del hidrograma y el tiempo para el cual se generara el caudal máximo.

El hidrograma adimensional del NRCS es resultado de observar numerosas pruebas que al dividir los caudales del hidrograma por el caudal máximo (caudal pico Q_p - resultado del hidrograma triangular del NRCS) y de igual manera, dividir el tiempo del hidrograma por el tiempo en la que ocurre el caudal máximo (t_p); los resultados así obtenidos (los hidrogramas adimensionales), para todas las cuencas son similares. El hidrograma adimensional obtenido es de utilidad para generar el hidrograma de cualquier cuenca, conociendo los parámetros generales.

El procedimiento sirve para obtener:

- El hidrograma de diseño, conociendo la precipitación efectiva (P_e), duración de la precipitación efectiva (D), el tiempo de concentración (t_c), el tiempo al caudal pico (t_p) y el caudal pico (Q_p)

1.- Datos

1.1 De la precipitación

Precipitación neta (P_e) en mm: $P_e := 36.758$

Duración de la precipitación neta (D) en horas: $D := 24 - 6 + 1$

1.2 De la cuenca

Superficie de la cuenca (km²): $A_w := 32.40$

Tiempo de concentración (t_c) en horas:

$$t_c := 1.73$$

1.3 Parámetros relacionados con el tipo de tormenta de diseño, la precipitación efectiva, la abstracción inicial y el factor de ajuste de encharcamiento

$$C0 := 1.91978$$

$$C1 := -0.28215$$

$$C2 := -0.07020$$

$$Fp := 0.96$$

2.- Cálculos

Tiempo de la punta: $t_p := \frac{D}{2} + \frac{3}{5} \cdot t_c$ $t_p = 10.538$

Tiempo base: $t_b := 2.67 \cdot t_p$ $t_b = 28.136$

Caudal de la punta(en m³/s):

- Teniendo en cuenta la superficie del triángulo

$$Q_p := \frac{P_e \cdot A}{1.8 \cdot t_b}$$

$$Q_p = 23.516$$

- Mediante el método NRCS-TR55

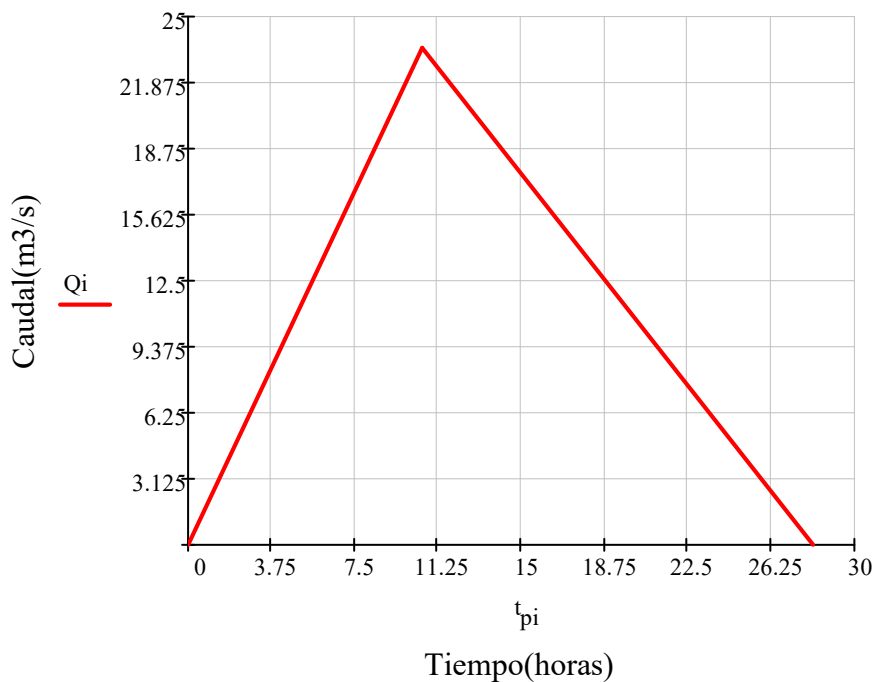
$$q_u := 4.3026 \cdot 10^{C0 + C1 \cdot \log(t_c) + C2 \cdot \log(t_c)^2 - 6}$$

$$Q_{po} := q_u \cdot A \cdot 100 \cdot P_e \cdot F_p$$

$$Q_{po} = 34.717$$

para el gráfico: $Q_i := \begin{pmatrix} 0 \\ Q_p \\ 0 \end{pmatrix}$ $t_{pi} := \begin{pmatrix} 0 \\ t_p \\ t_b \end{pmatrix}$

Hidrograma triangular NRCS -TR55



Haan y otros investigadores, proponen una ecuación general para los hidrogramas adimensionales de tipo:

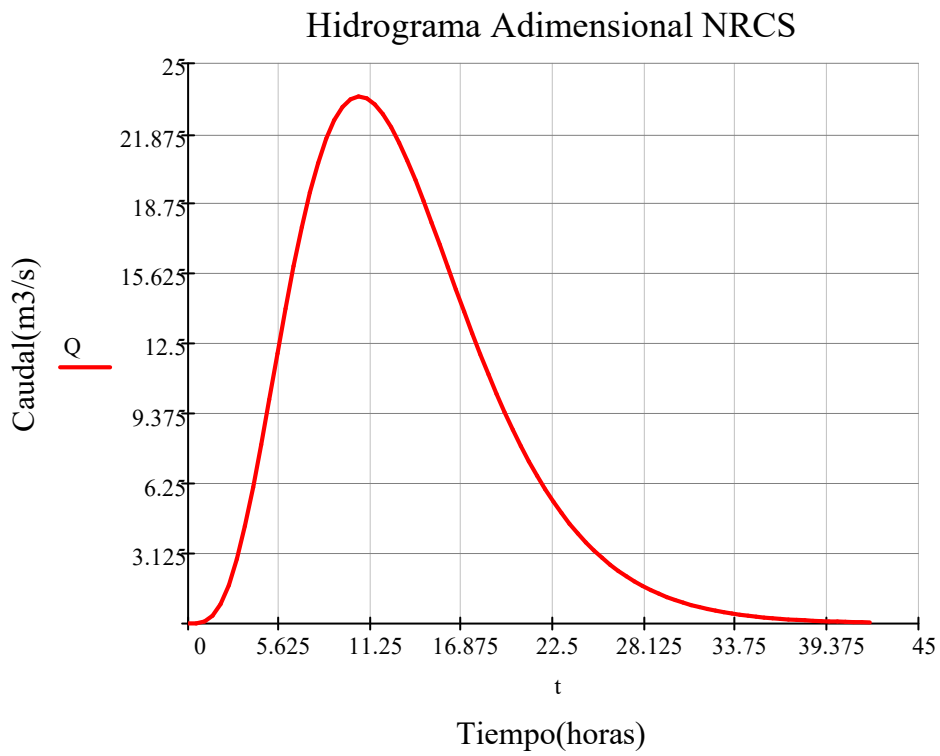
$$k := 3.89$$

$$Q_0(t) := Q_p \cdot \left(\frac{t}{t_p} e^{1 - \frac{t}{t_p}} \right)^k$$

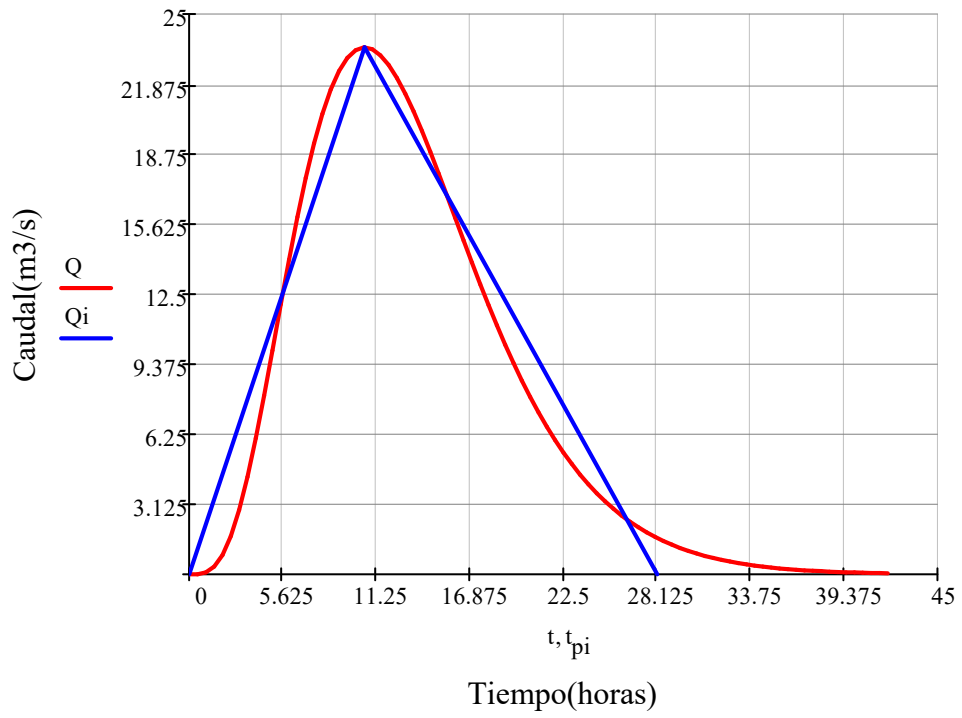
$$t := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0, 0.5..(1.5 \cdot t_b) \\ \quad \left| \begin{array}{l} j \leftarrow j + 1 \\ t_j \leftarrow k \end{array} \right. \\ t \end{cases}$$

$$j := 1, 2.. \text{length}(t)$$

$$Q_j := Q_0(t_j)$$



Hidrograma Triangular & Adimensional - NRCS



$Q_t := \text{augment}(t, Q)$

$$Q_t^T =$$

	1	2	3	4	5
1	0	0.5	1	1.5	2
2	0	$6.777 \cdot 10^{-3}$	0.084	0.336	...

Anexo B

Clasificación de uso del suelo

Se presenta la clasificación del uso del suelo, expresado mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada, mostrado en la figura B.1.

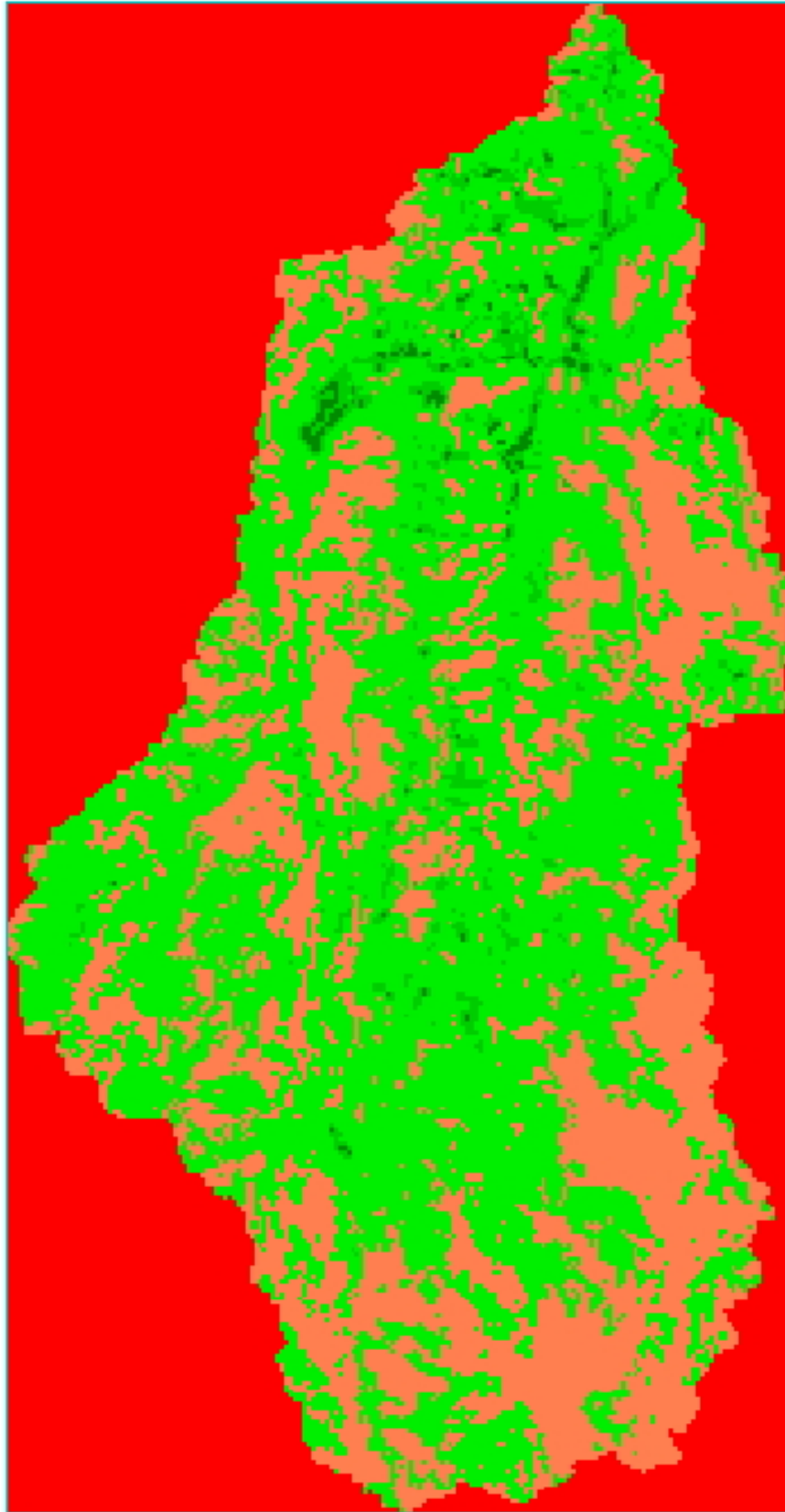


Figura B.1: Clasificación del NDVI en intervalos para uso de suelo

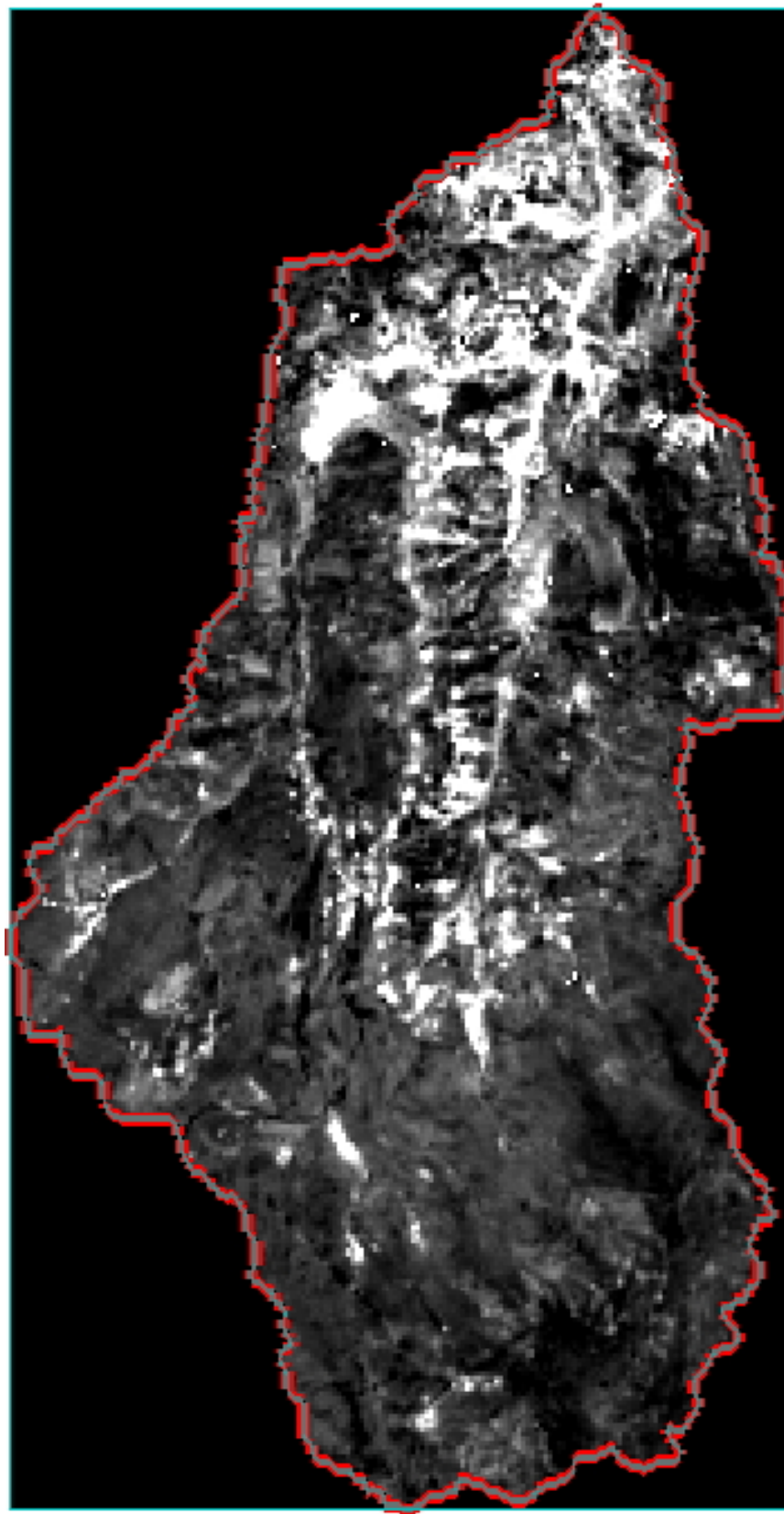


Figura B.2: NDVI para la cuenca Lambras Huayqo, escala de -1 hasta 1, en una vista a escala de grises

Anexo C

Estimación de caudales de máximas avenidas por el método racional

Caudal de máximas avenidas (Q):El método de la fórmula racional permite hacer estimaciones de los caudales máximos de escorrentía usando las intensidades máximas de precipitación.

El caudal máximo de escorrentía es directamente proporcional a la intensidad máxima de la lluvia para un período de duración igual al tiempo de concentración, y al área de la cuenca. El tiempo de concentración representa el tiempo que demora una partícula de agua para trasladarse del punto más remoto de la cuenca hasta el punto de desagüe. Cuando haya transcurrido este tiempo toda la cuenca estará contribuyendo a formar el caudal de la escorrentía que tendrá en consecuencia un valor máximo. La fórmula es:

$$Q = \frac{C.I.A}{360} \quad (C.1)$$

Donde:

Q: Caudal máximo de escorrentía.(m³/s)

C: Coeficiente de escorrentía.

I: Intensidad máxima de lluvia (mm/h)

A: Área de la cuenca.(ha)

Intensidad de diseño (I): La intensidad de la lluvia I, es la tasa promedio de la lluvia en milímetros por hora para una cuenca o sub cuenca de drenaje en particular. La intensidad se selecciona con base a la duración de la lluvia de diseño y el periodo de retorno de tal manera que:

$$I = \frac{Pd}{Tr} \quad (C.2)$$

Donde:

I: Intensidad máxima de lluvia (mm/h)

Pd: Precipitación de diseño.

Tr: Tiempo de retorno (hr)

Coefficiente de escurrimiento (C): ES la variable menos precisa del método racional. Su uso en la fórmula implica una relación fija entre la tasa de escurrimiento fijo y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje lo cual no es cierto en realidad. Una elección apropiada del coeficiente de escurrimiento, requiere del conocimiento y de la experiencia del hidrológico, La proporción de la lluvia total que alcanzara los drenajes de tormenta depende del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y del almacenamiento por dispersión.

El coeficiente de escurrimiento también depende de las características y condiciones del suelo. La tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continua y también es influida por las condiciones de humedad antecedente en el suelo. Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son, son la intensidad de la lluvia, la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo y la vegetación, debe de escogerse un coeficiente razonable para representar los efectos integrados en todos estos factores.

Estimacion de caudal de maximas avenidas para la cuenca Lambras Huayqo :

Para aplicar el siguiente método empírico debe realizarse el siguiente trabajo de gabinete:

- Determinar el área de influencia de la cuenca en hectáreas.
- Estimar una intensidad de lluvia máxima (mm/h)
- Aplicar cálculos con la fórmula racional

Para la determinación del caudal de máximas avenidas, se tomara como caso de estudio la cuenca Lambras huayqo, cuyos parámetros morfométricos se encuentran en la tabla 3.6, desde donde el valor de área de la cuenca es de $A=32.40\text{km}^2$ y un tiempo de concentración $T_c=1.73\text{hr}$.

Asimismo la precipitación máxima de diseño se obtiene a partir de los cálculos del Anexo A (estimación de precipitación de diseño), pagina 80, cuyo valor de precipitación de diseño es de $P_d = 5.09\text{mm}$, para un tiempo de retorno de 50 años una vez obtenido los valores se reemplazara en la ecuación C.1 los pasos seguidos son:

1. Área de la cuenca

$$A=3240 \text{ has}$$

2. Tiempo de concentración

$$T_c=1.73\text{hr}$$

3. Intensidad

$$I = \frac{P_d}{T_c} \Rightarrow I = \frac{5.09\text{mm}}{1.73\text{hr}} \Rightarrow I = 2.95 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$$

4. Coeficiente de escorrentía

Coeficiente	Tipo de suelo	Pendiente	Valores de (C)
A	cultivos generales en topografía ondulada	(S = 5 a 10 %)	0.60
B	cultivos generales en topografía inclinada	(S = 10 a 30 %)	0.72
C	cultivos de pastos en topografía ondulada	(S = 5 a 10 %)	0.36
D	cultivos de pastos en topografía inclinada	(S = 10 a 30 %)	0.42
E	cultivos de bosques en topografía ondulada	(S = 5 a 10 %)	0.18
F	cultivos de bosques en topografía inclinada	(S = 10 a 30 %)	0.21
G	áreas desnudas en topografía ondulada	(S = 5 a 10 %)	0.80
H	areas desnudas en topografía inclinada	(S = 10 a 30 %)	0.90

Tabla C.1: (Fuente: tomado desde :<http://www.oasification.com/tablasden.htm>)

Coeficiente escorrentia adoptado (C) : Para la cuenca lambras huayqo, considerando el tipo de suelo para cultivos generales en topografía inclinada y con pendiente de 11.68 % , se eligió el tipo B, cuyo valor es 0.72

5. Calculo de caudal maximo

$$Q = \frac{C.I.A}{360} = \frac{0.72 \times 2.95 \times 3240}{360} = 19.12 \frac{m^3}{seg}$$

Finalmente obtenemos el caudal de máximas avenidas para la cuenca de lambras huayqo, mediante el método racional.