



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

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ESTUDIO DE FLUJO DE SEDIMENTOS DE LA
CUENCA BAJA DEL RÍO PITA DESDE EL SECTOR DE
CASHAPAMBA HASTA LA SECCIÓN DE CONTROL DE LA ESPE**

AUTOR: LORA CARRANCO, CRISTIAN FIDEL

**DIRECTOR: DR. MASABANDA CAISAGUANO, MARCO
VINICIO**

SANGOLQUÍ

2020

CERTIFICADO DEL DIRECTOR



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, " **ESTUDIO DE FLUJO DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO PITA DESDE EL SECTOR DE CASHAPAMBA HASTA LA SECCIÓN DE CONTROL DE LA ESPE**" realizado por el señor **CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a el señor **CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de diciembre de 2019

Atentamente,

ING. MARCO VINICIO MASABANDA CAISGUANO

DIRECTOR

OFICIO DE AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO**, con cédula de identidad N° 1720529849, declaro que este trabajo de titulación "ESTUDIO DE FLUJO DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO PITA DESDE EL SECTOR DE CASHAPAMBA HASTA LA SECCIÓN DE CONTROL DE LA ESPE", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros, considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del trabajo de titulación mencionado.

Sangolquí, 16 de diciembre de 2019

Atentamente,

CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO
CI: 1720529849

OFICIO DE AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación "ESTUDIO DE FLUJO DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO PITA DESDE EL SECTOR DE CASHAPAMBA HASTA LA SECCIÓN DE CONTROL DE LA ESPE", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 16 de diciembre de 2019

Atentamente,

CRISTIAN FIDEL LORA CARRANCO

CI: 1720529849

DEDICATORIA

A mi familia, compañeros de clases y a todos los profesores que han sido parte de esta etapa de mi vida y han sabido guiarme con sus consejos.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, a mi director de quien nació la idea de este estudio y a todas las personas que directa o indirectamente han contribuido para la ejecución de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR	ii
OFICIO DE AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
OFICIO DE AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUCCIÓN	14
1.1. Planteamiento del problema.....	14
1.2. Antecedentes	14
1.3. Área de influencia	16
1.4. Justificación e importancia.....	16
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Objetivo General	17
1.5.2. Objetivos Específicos.....	17
1.6. Metas.....	18
CAPÍTULO II	19
MARCO TEÓRICO	19
2.1. Cuenca hídrica.....	19

2.2. Parámetros geomorfológicos.....	20
2.2. Caudal	25
2.3. Secciones transversales	29
2.4. Erosión	30
2.5. Perfil longitudinal	35
2.6. Vehículos aéreos no tripulados (UAV).....	35
2.7. Proceso fotogramétrico	37
2.8. Modelamiento en HEC-RAS	39
CAPÍTULO III	42
METODOLOGÍA	42
3.1. Parámetros geomorfológicos.....	42
3.2. Caudal del Río Pita	43
3.3. Secciones transversales	43
3.4. Erosión	45
3.5. Perfil longitudinal	47
3.6. Modelamiento en Hec-Ras.....	51
CAPÍTULO IV	55
ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.1. Parámetros geomorfológicos y meteorológicos.....	55
4.2. Caudal del Río Pita	56
4.3. Secciones transversales	59
4.4. Erosión	65
4.5. Perfil Longitudinal	70
4.6. Modelamiento en Hec-Ras.....	73
CAPÍTULO V	82

CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Diferencias demográficas en las parroquias de la cuenca del río Pita.	15
Tabla 2 Ecuaciones para calcular coeficiente α	29
Tabla 3 Agentes, tipos de erosión y procesos erosivos.	31
Tabla 4 Descripción de los factores implicados en la ecuación USLE.	47
Tabla 5 Parámetros de vuelo.	48
Tabla 6 Resultados de granulometría.	54
Tabla 7 Datos de precipitaciones del año 2005 hasta el 2015.	55
Tabla 8 Resultados geomorfológicos de la cuenca.	56
Tabla 9 Caudales máximos para la cuenca del Río Pita.	59
Tabla 10 Tabla de resultados de sedimentos en suspensión.	66
Tabla 11 Transformación de unidades de sedimentos.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de una cuenca hídrica.	19
Figura 2. Cuenca Hídrica del Río Pita.	20
Figura 3. Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas.	22
Figura 4. Ramificación de un cauce principal.	24
Figura 5. Módulos específicos de escorrentía.	27
Figura 6. Descripción de un proceso hidrológico en cuencas urbanas.	32
Figura 7. Tipos de drones según su estructura.	36
Figura 8. Diagrama de recubrimiento horizontal.	38
Figura 9. Ubicación de estaciones meteorológicas.	42
Figura 10. Vista de una sección, en la que se muestra los puntos de observación.	44
Figura 11. Muestreador de materiales de fondo.	46
Figura 12. Sitio de despegue.	48
Figura 13. Flujo de trabajo del ajuste fotogramétrico.	49
Figura 14. Esquema de archivos para creación de proyecto.	51
Figura 15. Coeficiente de Manning utilizado en cada sección.	52

Figura 16. Ventana de serie de flujo casi no permanente.	53
Figura 17. Distribución temporal de precipitaciones.	56
Figura 18. Ubicación de secciones de control.	60
Figura 19. Área mojada sección 1.	62
Figura 20. Área mojada sección 2.	63
Figura 21. Área mojada sección 3.	65
Figura 22. Filtros de resultados (Muestra 1, 2 y 3 respectivamente).	66
Figura 23. Diagrama de flujo para la obtención de mapa de erosión.	67
Figura 24. Mapa de riesgo potencial de erosión.	69
Figura 25. Perfil longitudinal del Río Pita.	70
Figura 26. Planes de vuelo.	71
Figura 27. Ventana de ajuste fotogramétrico.	71
Figura 28. Modelo de elevación para estudios hidrográficos.	72
Figura 29. Geometría del Río Pita.	73
Figura 30. Ventana de datos de secciones transversales.	74
Figura 31. Curva granulométrica.	74
Figura 32. Modelamiento sección de control 1.	75
Figura 33. Modelamiento sección de control 2.	76
Figura 34. Modelamiento sección de control 3.	76
Figura 35. Variación del perfil longitudinal.	77
Figura 36. Modelamiento sección de control 1.	77
Figura 37. Modelamiento sección de control 2.	78
Figura 38. Modelamiento sección de control 3.	78
Figura 39. Variación del perfil longitudinal.	79
Figura 40. Modelamiento sección de control 1.	79
Figura 41. Modelamiento sección de control 2.	80
Figura 42. Modelamiento sección de control 3.	80
Figura 43. Variación del perfil longitudinal.	81

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el volumen de sedimentos gruesos y en suspensión que son transportados en la cuenca baja del Río Pita. Para esto se realizó el estudio hidrológico de la cuenca en base al modelo digital obtenido mediante la toma y procesamiento de fotografías aéreas con un dron y los datos de precipitaciones mensuales registradas en un periodo de 10 años en las estaciones cercanas al área de estudio. Se determinó que el valor de precipitación media anual en la cuenca es de 1520.95 mm y un caudal medio de 11.85 m³/s. La erosión superficial de la cuenca del río Pita se presenta principalmente por el impacto de las gotas de lluvia en el suelo y el escurrimiento del agua sobre la superficie, por lo que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores como la topografía, clima, tipo de suelo, uso de suelo, características geológicas, entre otros. Para el cálculo de la cantidad de sedimentos transportados a lo largo de la cuenca se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo que arrojó como resultado 3382.17 t/año. En el capítulo 4 se presenta la modelación y simulación de la transformación del lecho del río calculado con el caudal medio, máximo en un periodo de retorno de 10 años y los calculados mediante aforos realizados en tres secciones transversales.

- **AFORO**
- **ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO**
- **RÍO PITA**
- **EROSIÓN SUPERFICIAL**
- **DRON**

ABSTRACT

This paper aims to determine the volume of thick and suspended sediments that are transported in the lower basin of the Pita River. For this, the hydrological study of the basin was carried out based on the digital model obtained by taking and processing aerial photographs with a drone and the monthly rainfall data recorded over a period of 10 years at stations near the study area. It was determined that the average annual precipitation value in the basin is 1520.95 mm and an average flow of 11.85 m³ / s. The surface erosion of the Pita river basin is mainly due to the impact of raindrops on the ground and the runoff of water on the surface, so erosive processes are the result of the interaction of factors such as topography, climate, soil type, land use, geological characteristics, among others. For the calculation of the amount of sediments transported along the basin, the universal soil loss equation was used, which resulted in 3382.17 t/year. Chapter 4 presents the modeling and simulation of the transformation of the river bed calculated with the average flow, maximum in a period of return of 10 years and those calculated by means of gauging in three cross sections.

- **GAUGING**
- **UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION**
- **PITA RIVER**
- **SURFACE EROSION**
- **DRONE**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.Planteamiento del problema

Los cambios que se han presentado en las áreas urbanas en los últimos años están generando enormes cambios paisajísticos, no solamente el relieve, sino también se han encargado de modificar el accionar hidrológico frente a distintos eventos. Algunos de los cambios más impactantes son la impermeabilización de gran parte de la superficie de la cuenca, el cambio de uso de suelo y construcciones alrededor de la cuenca para drenar más rápido y eficientemente la cuenca.

Estos cambios han provocado que las velocidades y caudales de flujo se incrementen, y esto a su vez ha incrementado la escorrentía (menos infiltración) y los caudales, el tiempo de concentración disminuye, causando problemas de inundación en la parte baja de la cuenca.

Complementariamente, los problemas de inundaciones se encuentran asociados a la cantidad de sedimentos que son transportados y depositados en la red de drenaje. Estos sedimentos pueden llegar a ocasionar problemas como lo es, la disminución de la capacidad hidráulica (Zambrano, 2015).

Es por esto que cada vez va ganando en importancia los estudios de determinación de producción de sedimentos debidos a la erosión hídrica, y una manera de realizarlo es mediante la modelación de flujo de sedimentos.

1.2.Antecedentes

La microcuenca del río Pita es parte de la cuenca del río Guayllabamba, y esta a su vez de la cuenca del río Esmeraldas que tiene su desembocadura en el Océano Pacífico (Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones, 2012). El río Pita nace en la zona occidental de los páramos del Sincholagua y de los deshielos del sector norte del Cotopaxi. El río Pita tiene su desembocadura en el río San Pedro después de recorrer 44 km. La topografía de la microcuenca del Pita está dada por la presencia de volcanes como el Sincholagua y el Cotopaxi y depósitos de origen volcánico. La mayor cota es de 5897

msnm, en la parte más alta del volcán Cotopaxi y su cota más baja se presenta en la intersección con el río San Pedro siendo de 2440 msnm (Freile & Fabara, 2009).

Un análisis realizado en el año 2005 indica que existe sobreutilización del páramo en las laderas del Sincholagua, en las cercanías del río Pita para el pastoreo del ganado vacuno y entre otros animales que se encuentran en estas zonas. El pisoteo provoca compactación en el suelo reduciendo la capacidad de infiltración de este y este a su vez provoca un aumento en la proporción escurrida y hace que el suelo esté más expuesto a la erosión hídrica (Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones, 2012).

De acuerdo al CLIRSEN-EMAAP-Q (2006), se puede encontrar erosión hídrica de los suelos de la microcuenca en forma localizada, en las laderas, por la disminución de vegetación y compactación, entre algunos otros motivos por el caminar de los diferentes tipos de animales en laderas sin cobertura vegetal. La erosión se presenta tanto por el impacto de las lluvias como por el escurrimiento superficial; el suelo queda descubierto en algunas áreas y es por esto que se presenta el fenómeno conocido como lavado de suelo (Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones, 2012).

Otro de los principales fenómenos más llamativos en cuanto a los cambios de uso de suelo dentro de la microcuenca es el crecimiento poblacional. En las últimas 4 décadas la población asentada en los sectores de Loreto Pedregal, San José del Pedregal y Santa Ana del Pedregal aumentó significativamente. De acuerdo a los últimos censos (2001 y 2010), la población de las parroquias Pintag y Machachi crecieron con tasas de 2.37% y 2.28% respectivamente (ver tabla 1), ubicándose sobre la tasa de crecimiento poblacional de Pichincha e incluso del cantón Quito (INEC, 2011).

Tabla 1
Diferencias demográficas en las parroquias de la cuenca del río Pita.

	2001	2010	Tasa 2001 – 2010 (%)
Machachi	22 492	27 623	2.28
Pintag	14 487	17 930	2.37
Sangolquí	62 562	81 140	2.89
Rumipamba	477	775	5.39

Fuente: (INEC, 2011).

1.3.Área de influencia

El presente proyecto se realizará en la cuenca baja del río Pita en el tramo ubicado desde el barrio de Cashapamba hasta la sección de control de la ESPE con una longitud de 5 km aproximadamente. El tramo que se encuentra ubicado puntualmente en las coordenadas geográficas UTM 17S 787200 E, 9963505 N y 784597 E, 9965764 N.

1.4.Justificación e importancia

Dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que fue aprobada en el mes de septiembre de 2015 por las Naciones Unidas se establece un nuevo camino hacia la sostenibilidad ambiental, económica y social.

Específicamente en su objetivo 11 se propone lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean sostenibles, seguros, resilientes e inclusivos y una de las metas trazadas para llegar a cumplir este objetivo es proteger el patrimonio natural del mundo (ONU, 2016). Así como también la Estrategia Territorial Nacional (ETN) planteada en el Plan de Desarrollo Nacional la cual posee una estructura enfocada a gestionar el espacio físico y las actividades que se puedan realizar sobre este (SENPLADES, 2017).

El material erosionado en una cuenca, parte es arrastrado por el flujo y parte es captado por la cobertura vegetal y topografía de la cuenca. La parte que es arrastrada por el flujo se deposita en zonas propicias para esta acción (Montoya & Montoya, 2005). Cuando ocurre el fenómeno de arrastre, se presenta la erosión del suelo y las partículas son transportadas hasta llegar a los valles o a almacenamientos, así hasta volverse a presentar las condiciones de arrastre durante un tiempo indefinido. Los volúmenes de sedimentos acumulados son una serie de datos importantes para el diseño de obras hidráulicas para estimar parámetros como el tiempo de azolve y desazolve de cauces u otras obras que así lo requieran. Para poder precisar los resultados de los volúmenes de sedimentación que se pueden obtener a través de los registros realizados en estaciones de aforo (Cervantes, Ferrerira, Guzmán, & Villagra, 2016).

Por lo tanto, la zona de estudio está expuesta además de la erosión por meteorización a una erosión del cauce por flujos de lahares provenientes del volcán Cotopaxi.

Uno de los fenómenos más llamativos en cuanto al cambio de uso de suelo es el elevado índice de crecimiento poblacional en el Cantón Rumiñahui. Este fenómeno hace que el aumento de la producción agrícola sea más importante para llegar a satisfacer la necesidad alimentaria del cantón. Algunos expertos y planificadores están de acuerdo que una agricultura sana sólo puede mantenerse sobre la base de recursos naturales estables, es así como se resalta la importancia de cuidar y mejorar la productividad del suelo (Fundación Futuro Latinoamericano, 2012).

Las áreas que históricamente han sido ricas en vegetación cada día sufren los efectos de la erosión por los desequilibrios naturales y la rápida desaparición de estos debido a su mal uso o uso excesivo en la cuenca debido a un manejo descuidado de la misma. La pérdida de suelo por erosión hídrica es uno de los problemas que puede afectar fuertemente la actividad económica a mediano y largo plazo (Flores, Martínez, Oropeza, Mejía, & Carrillo, 2003).

Una erosión acentuada causa problemas como desertificación, descenso de la productividad agrícola (debido a una degradación de la tierra), sedimentación de cauces y el colapso ecológico originado por la pérdida de las capas superiores del suelo, ricas en nutrientes (Flores, Martínez, Oropeza, Mejía, & Carrillo, 2003).

1.5.Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar el volumen de sedimentos producidos en la cuenca del Río Pita y que es transportado a lo largo de la cuenca baja del Río Pita desde el sector de Cashapamba hasta la sección de control de la ESPE.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los parámetros geomorfológicos y meteorológicos de la cuenca del Río Pita.
- Determinar el caudal del Río Pita.
- Determinar secciones transversales de control, área de las secciones y velocidad de flujo en cada una de estas.

- Comprobar la erosión existente mediante la medición de materiales de fondo y en suspensión en el tramo de estudio del río Pita.
- Trazar el perfil longitudinal del río Pita.
- Modelar el transporte de sedimentos mediante el método BSTEM en Hec-Ras

1.6.Metas

- Una base de datos homogeneizada y sistematizada
- Un plano con la totalidad de perfiles obtenidos
- Un modelo digital de transporte de sedimentos para estudios hidrográficos
- Un mapa de modelo de sedimentos y caudales

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Cuenca hídrica

La cuenca puede ser definida como una unidad territorial y ambiental delimitada por una línea divisoria de aguas que contribuye una red natural de drenaje; que tiene una única salida (ver figura 1). Dentro de la cuenca se encuentran contenidos varios recursos naturales interactuando entre sí. Los límites de una cuenca hidrográfica son definidos naturalmente y en forma práctica corresponde a las partes más elevadas de las áreas que encierra a un río (Tolón & Lastra, 2009).

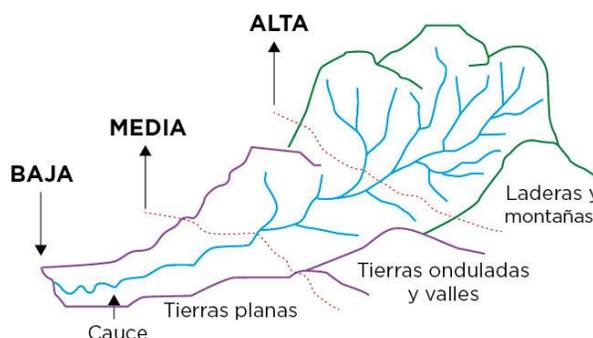


Figura 1. Partes de una cuenca hídrica.
Fuente: Adaptada de (World Vision).

Según el Instituto Nacional Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre (INEFAN), existen diferentes unidades hidrográficas y se clasifican según su extensión en:

- Sistema: Mayor a 300 000 has
- Cuenca: 100 000 a 300 000 has
- Subcuenca: 15 000 a 100 000 has
- Microcuenca: 4 000 a 15 000 has
- Mini cuenca o Quebrada: Menor a 4 000 has

Algunos de los principales componentes de una cuenca hídrica son:

- Biológicos: flora, fauna y ecológicos.
- Físicos: geológicos, geomorfológicos, climáticos, hídricos y edáficos.
- Socio – Económicos y Culturales: población, educación, salud y actividad económica.

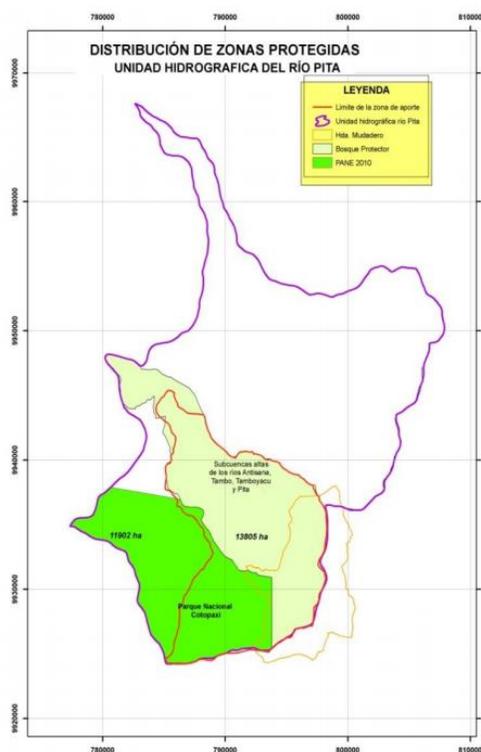


Figura 2. Cuenca Hídrica del Río Pita.
Fuente: Elaborado por (Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones, 2012).

2.2. Parámetros geomorfológicos

Las características físicas de una cuenca constituyen un conjunto que influye en la forma de comportarse de dicha cuenca tanto a nivel de excitaciones como de las respuestas de la cuenca tomada como sistema. Los parámetros geomorfológicos tratados en este capítulo se citan a continuación:

Área, perímetro, longitud de la cuenca y su ancho, factor de forma, coeficiente de compacidad, altitud media, curva hipsométrica, histograma de frecuencias altimétricas, rectángulo equivalente, red de drenaje, orden de corrientes, longitud de tributarios, densidad de corrientes, densidad de drenaje.

2.2.1. Área de la cuenca (A)

Superficie del terreno de las precipitaciones que convergen en un mismo punto de salida por medio de quebradas o cauces secundarios que se unifican en un cauce principal

2.2.2. Perímetro de la cuenca

Longitud que de la línea imaginaria formada por el área de la cuenca. Este parámetro es de gran utilidad para diferenciar la forma de la cuenca (redondeada o alargada).

2.2.3. Longitud de la cuenca (L)

Distancia formada por la unión del punto de salida del cauce principal y el punto más extremo en la cuenca.

2.2.4. Ancho de la cuenca (W)

Es la relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud de la misma (L).

$$W=A/L$$

2.2.5. Factor de forma (Ff)

Parámetro que explica que tan alargada es una cuenca hídrica. Se define como la relación entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de la longitud de la misma (L). Cuando una cuenca tiene un Ff bajo es menos sujeta a crecientes y si su $Ff > 1$, existe un achatamiento en la cuenca y su cauce principal es muy corto (ver figura 3).

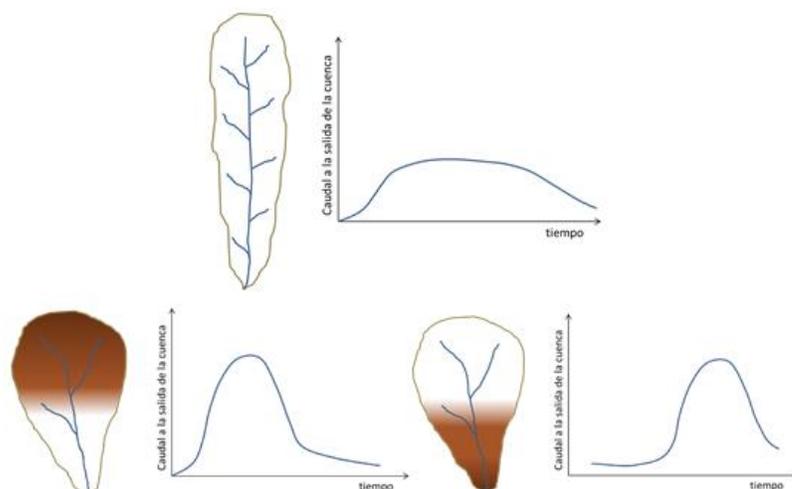


Figura 3. Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas.

Fuente: (World Vision).

$$Ff = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

2.2.6. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Kc)

Define la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área equivalente al área de la cuenca.

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Donde:

Kc= Coeficiente de compacidad

P= Perímetro de la cuenca en Km

A=Área de la cuenca en Km²

2.2.7. Altitud media de la cuenca (Hm)

Es un valor que representa varios aspectos naturales y climáticos de la cuenca, pues nos termina dando una idea general del clima que se presenta en el área. Este valor se lo obtiene mediante la realización de la curva hipsométrica.

$$H_{med} = \frac{\sum(h_i \cdot S_i)}{A} \quad (3)$$

Donde:

H_{med} = Altitud media de la cuenca en msnm

h_i = Altitud media de cada tramo de área contenido entre las curvas de nivel

S_i = Área contenida entre las curvas de nivel

A = Área total de la cuenca en km^2

2.2.8. Curva hipsométrica

Es la variación del relieve de la cuenca. Está representada las elevaciones sobre el nivel del mar en el eje de las “X” y el valor porcentual del área de la cuenca que se encuentra sobre la elevación indicada en el eje de las “Y”.

2.2.9. Histograma de frecuencias altimétricas

Es un complemento de la curva hipsométrica, permitiendo la determinación de las alturas que se presentan con mayor frecuencia dentro de la cuenca. Está representado el porcentaje parcial del área en el eje de las “X” y las elevaciones sobre el nivel del mar, ubicadas dentro de ese porcentaje en el eje de las “Y”.

2.2.10. Rectángulo equivalente

Es la representación geométrica de la cuenca hídrica en un rectángulo que posee igual área y perímetro. En este rectángulo las curvas de nivel están representadas por rectas paralelas al lado menor.

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (4)$$

$$l = \frac{P}{4} - \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (5)$$

Donde:

L, l = lado mayor y menor del rectángulo en km, respectivamente

P = perímetro de la cuenca en km

A = área de la cuenca en km^2

2.2.11. Red de drenaje

Son las trayectorias o relaciones que guardan entre sí, los cauces dentro de la cuenca. Indica el grado de eficiencia del sistema de drenaje, es decir, con que velocidad es desalojada el agua que a esta ingresa.

2.2.12. Orden de corrientes

Es una clasificación que indica el grado de derivaciones que posee el cauce principal.

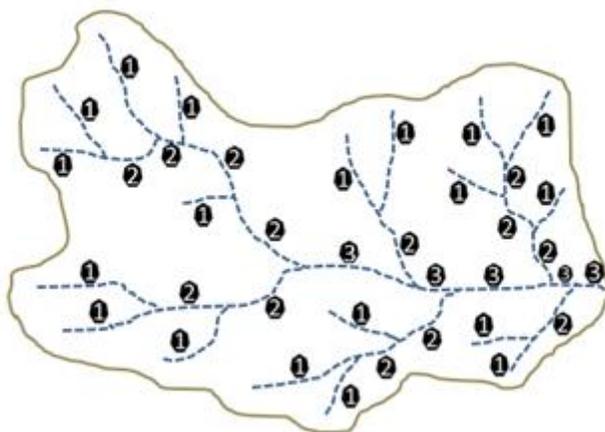


Figura 4. Ramificación de un cauce principal.
Fuente: (World Vision).

2.2.13. Longitud de tributarios

Es un indicador de la pendiente de la cuenca, así como del grado de drenaje.

2.2.14. Densidad de corrientes

Es la relación existente entre el número de corrientes de la cuenca y el área de la misma.

2.2.15. Densidad de drenaje

Es la relación que existe entre la suma de longitud total de los cauces y el área de la cuenca. De esta manera, expresa la capacidad de desalojar un volumen de agua dado.

$$Dd = \frac{Li}{A} \quad (6)$$

Donde:

Dd= densidad de drenaje

Li= largo total de los cursos de agua en km

A= área de la cuenca en km²

2.2. Caudal

De acuerdo a la RAE ASALE, (2019) el caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del río por unidad de tiempo.

El método Determinación de caudales con poca información hidrológica desarrollado en el 2014 por Sandoval & Aguilera, (2014), plantea ecuaciones adaptables a cuencas con escasa información hídrica, para determinar caudales máximo, medio y mínimo. A continuación, se describe el proceso del método.

- Volumen promedio de precipitaciones

De acuerdo con Sandoval & Aguilera (2014), la precipitación anual promedio de una cuenca, expresado en m³, es igual a:

$$V = 1000 \times P \times A \quad (7)$$

Donde:

P = promedio de precipitaciones anuales

A= área de la cuenca en km²

- Cálculo del caudal medio

$$Q_0 = \frac{31.71 \times P \times A \times C}{10^6} \quad (8)$$

Dónde:

Q_0 = caudal medio de la cuenca en m^3/s

C = coeficiente de escorrentía

P = promedio de precipitaciones anuales en mm

A = área de la cuenca en km^2

El coeficiente de escorrentía (C), se calcula con la siguiente expresión:

$$C = \frac{M_0 \times 10^6}{31.71 \times P} \quad (9)$$

Dónde:

M_0 = módulo específico de escorrentía

P = promedio de precipitaciones anuales en mm

Según el autor Porrut (1995), el módulo específico de escorrentía para el Ecuador se lo obtiene del mapa presentado en la figura 5.

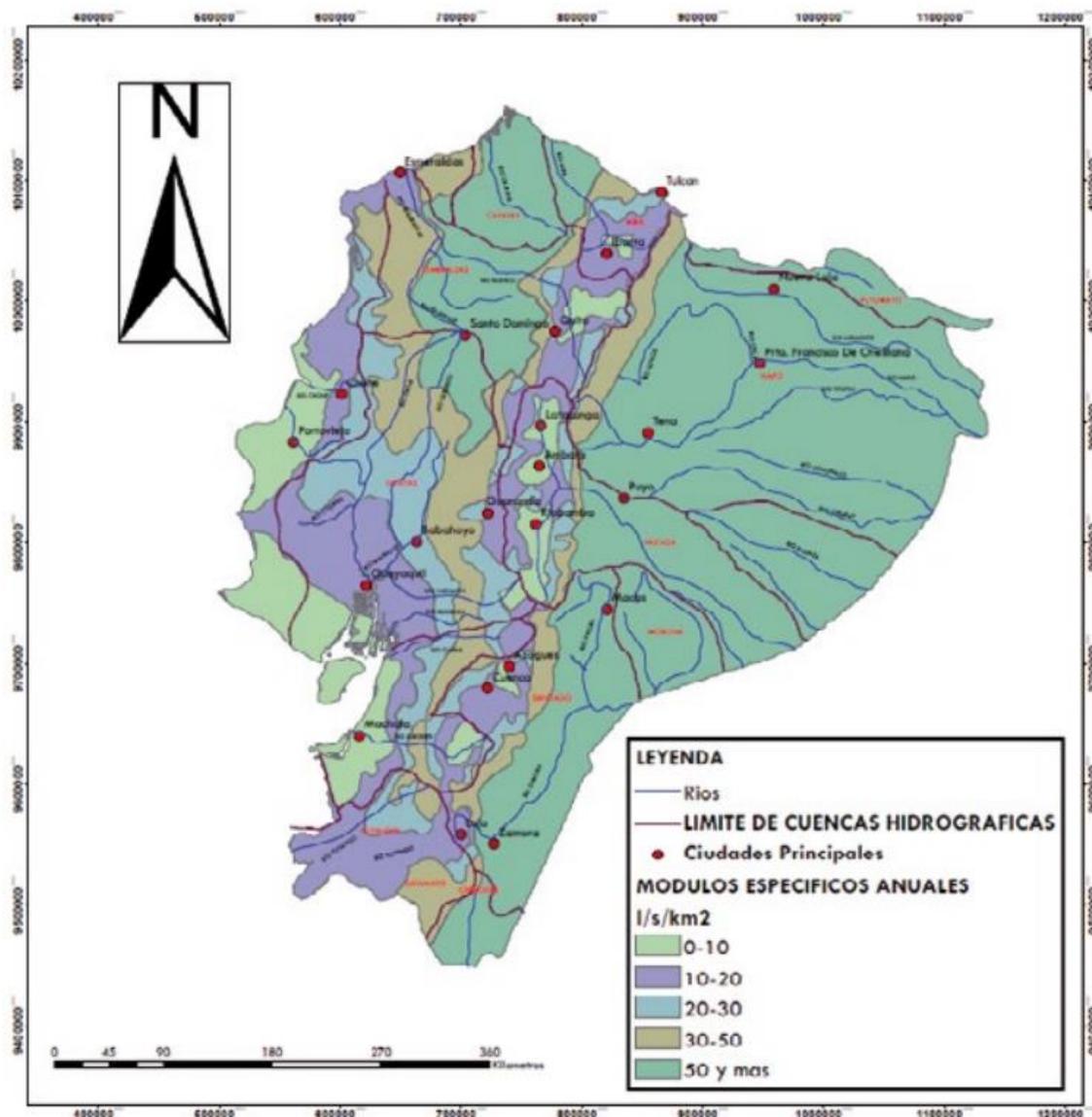


Figura 5. Módulos específicos de escorrentía.
Fuente: (Porrut, 1995).

- Coeficiente de escorrentía por el número de curva

Existen algunos métodos para el cálculo de la escorrentía superficial o directa. Uno de estos métodos es el Método del Número de Curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del departamento de Agricultura de Estados Unidos, y es uno de los métodos más utilizados.

Según este método el coeficiente de escorrentía se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{P_n}{P} \quad (10)$$

Dónde:

P_n = escorrentía superficial

P = precipitación total

La escorrentía superficial P_n , se calcula con la ecuación:

$$P_n = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4P_0} \quad (11)$$

Dónde:

P_0 = umbral de escorrentía o mínima cantidad de agua

P = precipitación total

Empíricamente se ha relacionado el umbral de escorrentía P_0 con el número de curva mediante:

$$P_0 = \frac{508}{N} - 5.08 \quad (12)$$

Dónde:

N = número de curva

El número de curva se encuentra tabulado de acuerdo al tipo de suelo, vegetación, uso de suelo, pendiente. El valor máximo que puede tomar N es 100, lo que significa que el agua procedente de la lluvia no se infiltra ni es retenida.

$$N = \sum_{i=1}^n \left(N_i \frac{S_i}{S} \right) \quad (13)$$

- Caudal máximo

Como se indica en el estudio de determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica de (Sandoval & Aguilera, 2014), se asume que los caudales máximos siempre están relacionados con un periodo de tiempo. También se tiene que el exponente f del área es variable de acuerdo al tamaño.

Para cuencas con áreas mayores a 45 km^2 , el caudal máximo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{máx}} = \alpha \frac{P\sqrt{A}}{(1 + \lg A)} (0.5 \ln T - 0.7) \quad (14)$$

Dónde:

α = coeficiente variable entre 0.01 y 0.1. Las expresiones para su cálculo se muestran a continuación.

Tabla 2

Ecuaciones para calcular coeficiente α .

Precipitación (mm)	500 - 2500	2500 - 4000
Fórmula para el coeficiente α	$\alpha = 0.644 - 0.08 \ln P$	$\alpha = 0.1256 \ln P - 0.965$

Fuente: (Sandoval & Aguilera, 2014).

2.3. Secciones transversales

2.3.1. Proceso de batimetría

La palabra Batimetría quiere decir “el arte de medir las profundidades”. En topografía se entiende por batimetría a la obtención del relieve de superficies acuáticas (Zambrano, 2015).

2.3.3. Mediciones y cálculo del caudal

El caudal se es expresado mediante la relación de unidades de volumen por unidad de tiempo, en otras palabras, es la cantidad de agua que pasa por una sección transversal. Existen varios métodos para medir el caudal, por lo general se expresa en función de la altura del agua en la sección de aforo (Organización Mundial Meteorológica, 2011).

2.3.4. Medición de la sección transversal

La medición de la anchura del cauce se obtiene midiendo a partir de un punto ubicado en la orilla del río en el mismo plano de la sección transversal. La distancia puede ser medida con cinta graduada o con un alambre extendido a lo ancho de la corriente.

La medición de la profundidad del río se obtiene mediante la utilización de varillas graduadas insertadas en el lecho a lo largo de la sección transversal (Organización Mundial Meteorológica, 2011).

2.4. Erosión

De acuerdo con la RAE ASALE, (2019), erosión es el desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro.

El término “erosión” viene de la palabra latín “erodere”, la cual significa roer; también se refiere a este fenómeno como el deterioro de la superficie de la tierra, mediante varios agentes erosivos, siendo los más conocidos e importantes el agua y el viento. De igual manera la erosión se define como el deterioro de los suelos, los sedimentos, los fragmentos de roca y el paisaje, mediante diferentes medios externos como son el agua, viento y el hielo (Pizarro, y otros, 2009).

La erosión también puede ser definida, de forma más amplia, como un proceso de arrastre del suelo por acción del agua o del viento; o como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por estos mismos factores (Pizarro, y otros, 2009).

Dentro de las principales características de la erosión, sabemos que existe de dos tipos:

Por su origen, que puede ser natural o antrópica y por agentes causantes que puede ser eólica (por viento) e hídrica (por agua) (ver tabla 2).

Tabla 3
Agentes, tipos de erosión y procesos erosivos.

Agente	Tipo de Erosión	Tipo de Proceso Erosivo
Gravedad	Erosión por gravedad	Derrumbes Movimiento en masas Suelos rapantes.
Viento	Erosión eólica	Abrasión Deflación
Hielo	Erosión glaciár	Movimiento de glaciares
Agua	Erosión hídrica	Erosión en cursos de agua Erosión de impacto Erosión laminar Erosión en rieles Erosión en cárcavas Erosión costera

Fuente: Field, 1997, citado por (Pizarro, y otros, 2009)

Por otra parte, Zaccagnini, Wilson, & Oszust (2014) definen a la erosión hídrica como un proceso de desprendimiento, remoción del suelo y del material que se encuentra en la superficie, transporte y depósito en zonas lejanas de las que fueron removidas.

Algunos de los factores que influyen en el proceso de erosión hídrica son:

- **Clima:** uno de los principales factores desencadenantes de la erosión son las precipitaciones y en especial la intensidad con la que estas se presentan. La distribución de las lluvias durante el año toma suma importancia si estas ocurren en temporadas con poca cobertura vegetal.
- **Topografía:** la intensidad de la pendiente de un terreno y la longitud de la misma son otro factor externo al suelo que genera la erosión hídrica, añadiéndole al agua un excedente de una precipitación. Estos factores, combinados con la cobertura vegetal son determinantes en la velocidad de escurrimiento del agua.

- Suelo: la textura, la estructura y la cantidad de materia orgánica presentes en el suelo son algunas de las variables que determinan la velocidad de infiltración del agua en el suelo.
- Vegetación: la presencia de vegetación aminora la energía del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo y disminuye la velocidad del escurrimiento del agua.
- Uso y manejo: toda práctica agronómica que tienda a incorporar restos vegetales en superficie y aumente la porosidad del suelo ayuda a disminuir el riesgo de erosión (Zaccagnini, Wilson, & Oszust, 2014).

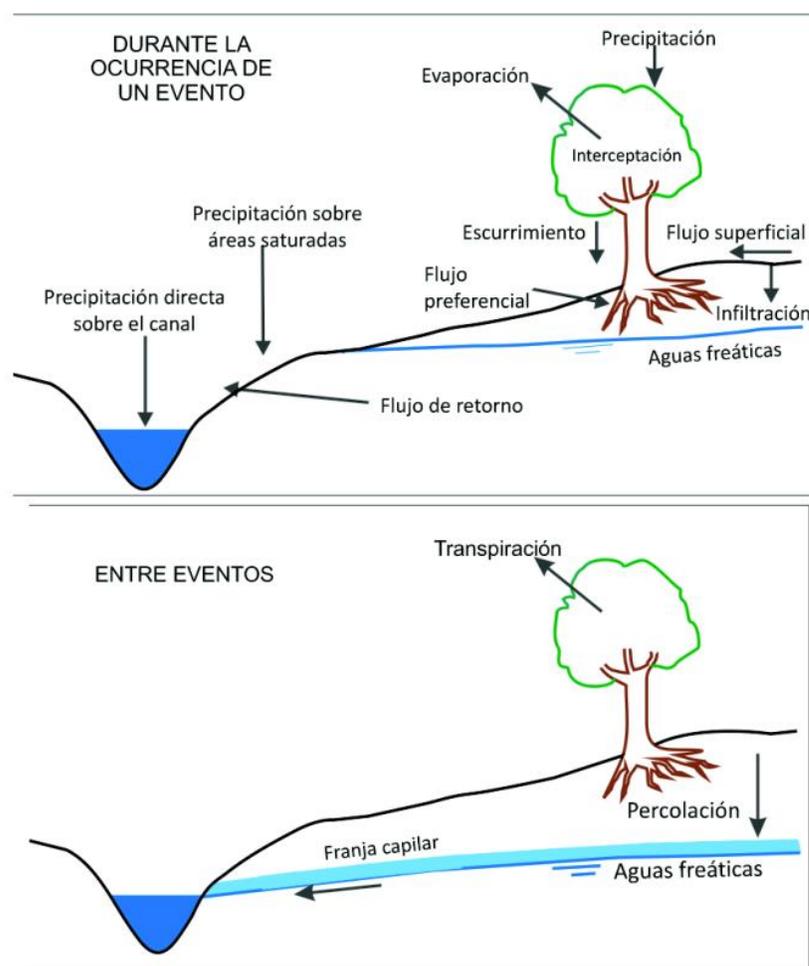


Figura 6. Descripción de un proceso hidrológico en cuencas urbanas.

Fuente: (Zambrano, 2015).

2.4.2. Ecuación universal de la pérdida de suelo

De acuerdo a Wischmeier (1976), la ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE) fue creada para poder calcular la erosión laminar y en surcos de terrenos; esta ecuación consiste en un modelo matemático que integra 6 procesos que están inmersos en la erosión hídrica (como se cita en Flores, Martínez, Oropeza, Mejía, & Carrillo, 2003).

El modelo USLE fue evolucionando conforme se fueron desarrollando prácticas e investigaciones del cálculo de la erosión, creando así el RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Los cambios realizados en esta ecuación consistían en: una aproximación que consiste en analizar la variación del tiempo en el factor K, una nueva forma en calcular el factor LS; y valores nuevos con respecto a las prácticas de conservación (Lianes, Marchamalo, & Roldán, 2009).

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (15)$$

Donde:

A: Promedio anual de pérdida de suelo (t/ha*año).

R: erosión por lluvia (MJ*mm)/(ha*h).

K: erosión del suelo (t*ha*h)/(MJ*mm*ha).

L: longitud de la vertiente (adimensional).

S: pendiente de la vertiente (adimensional).

C: factor de uso y manejo de suelo (adimensional).

P: factor de prácticas y conservación del suelo (adimensional).

2.4.3. Sistemas de Información Geográfica y su relación con la USLE

Un SIG es una herramienta de gran utilidad, utilizada para coleccionar, almacenar, recuperar transformar y desplegar datos espaciales, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones. La integración entre la USLE y un SIG empezó a tomar importancia, ya que esta relación ha permitido cuantificar la pérdida de suelo de manera eficaz y con un menor trabajo de campo (Flores, Martínez, Oropeza, Mejía, & Carrillo, 2003).

2.4.4. Inicio del movimiento de sedimentos

Los flujos de ríos, canales y en la zona de la costa suelen ir acompañados por transporte de sedimentos. Este transporte consta de transporte de sedimentos en suspensión y transporte de sedimentos arrastrados por la corriente. El transporte de depósitos arrastrados por la corriente se da en el área cercana al fondo y es un factor muy importante de moldeado del lecho del río. En aguas corrientes naturales, los procesos de erosión y sedimentación se alteran constantemente y caracterizan el balance de escombros del tramo del lecho del río (Iroume, 2003). De acuerdo a Beltrán & Ordoñez, (2012) los granos de sedimentos que se encuentran en el suelo se ponen en movimiento cuando se excede la tensión de corte crítica del fondo. Se diferencia entre tres posibilidades:

- Exceso frecuente o permanente: formación de dunas en el fondo
- Exceso solo en casos extremos como marejadas o inundaciones: cambio repentino del fondo
- Ningún exceso: depósito del material en suspensión, el fondo puede enlodarse a medio plazo.

2.4.5. Formas de transporte de sedimentos

Los sedimentos pueden ser transportados por el flujo de agua mediante diversas formas. Estas pueden ser desplazadas mediante rodamiento, saltación o deslizamientos sobre el lecho o en sus proximidades, o también pueden ser separados de este y transportarse mediante suspensión.

La forma en la que se transportan estas partículas está dada por sus características físicas como son: forma, tamaño, peso específico, entre otras, así también como la velocidad de flujo y de la profundidad (Organización Mundial Meteorológica, 2011).

- Rodadura (Rolling)
Los sedimentos permanecen en contacto constante con el fondo. Normalmente, ruedan granos de sedimentos grandes (piedras).
- Saltación
El grano de sedimentación es arrastrado del fondo por el flujo y deja brevemente el suelo. El flujo lo arrastra consigo antes de que se vuelva a depositar. Parece como si el grano saltara y es por eso de su nombre.
- Transporte de sedimentos en suspensión
Los materiales en suspensión son materias sólidas suspendidas en el agua y sin contacto con el fondo. Los factores fundamentales son:

- Velocidad de sedimentación (diámetro del grano, forma del grano, densidad del grano, densidad del agua).
- Parámetros de flujo (distribución de la velocidad en el canal, turbulencia)

2.5. Perfil longitudinal

El perfil longitudinal es el trazo de la intersección de un plano vertical imaginario con la superficie del terreno.

2.5.1. Modelo digital para estudios hidrográficos (MDEH)

El modelo digital de elevación específico para simulaciones hidráulicas, que no contempla vegetación se encuentra formado por el modelo digital de terreno y el modelo de elevaciones de edificaciones y construcciones en el que se excluyen los puentes, de esta manera se permite ejecutar un análisis adecuado en afectación y barreras que puedan existir en el trayecto del río (Cervantes, Ferrerira, Guzmán, & Villagra, 2016).

2.6. Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Según la definición de UVS International, un UAV es un diseño genérico de aeronaves para operar sin piloto humano a bordo. El término UAV se usa comúnmente en la comunidad geomática, pero también términos como Remotely Piloted Vehicle (RPV), Remotely Operated Aircraft (ROA), Remoted Controller (RC) Helicopter, los sistemas de vehículos no tripulados (UVS) y el modelo de helicóptero son utilizado con mucha frecuencia (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011).

2.6.1. Tipos de drones

La gran variedad de drones que han surgido en los últimos años ha creado la necesidad de crear clasificaciones que permitan categorizar las distintas naves de acuerdo al uso, peso o dimensiones. Una de estas clasificaciones es según la estructura y divide a los drones en 3 subcategorías (Fernández & Gutiérrez, 2016):

- Ala fija: este tipo de aeronaves tienen como principales características las de alcanzar grandes distancias y más autonomía de vuelo (1 hora aproximadamente). Debido a la forma de este tipo de aeronaves, el despegue se realiza desde

plataformas metálicas, mientras que los aterrizajes son mediante impactos directos contra el suelo.

- Ala rotatoria: estas aeronaves presentan una menor autonomía de vuelo (30 minutos aproximadamente) y las distancias que alcanzan son menores con respecto a los de ala fija. Los despegues y aterrizajes se realizan de forma vertical y llegan a tener entre 4 y 8 hélices.
- Ala mixta: esta aeronave es un modelo intermedio que presenta características similares a las anteriores naves.

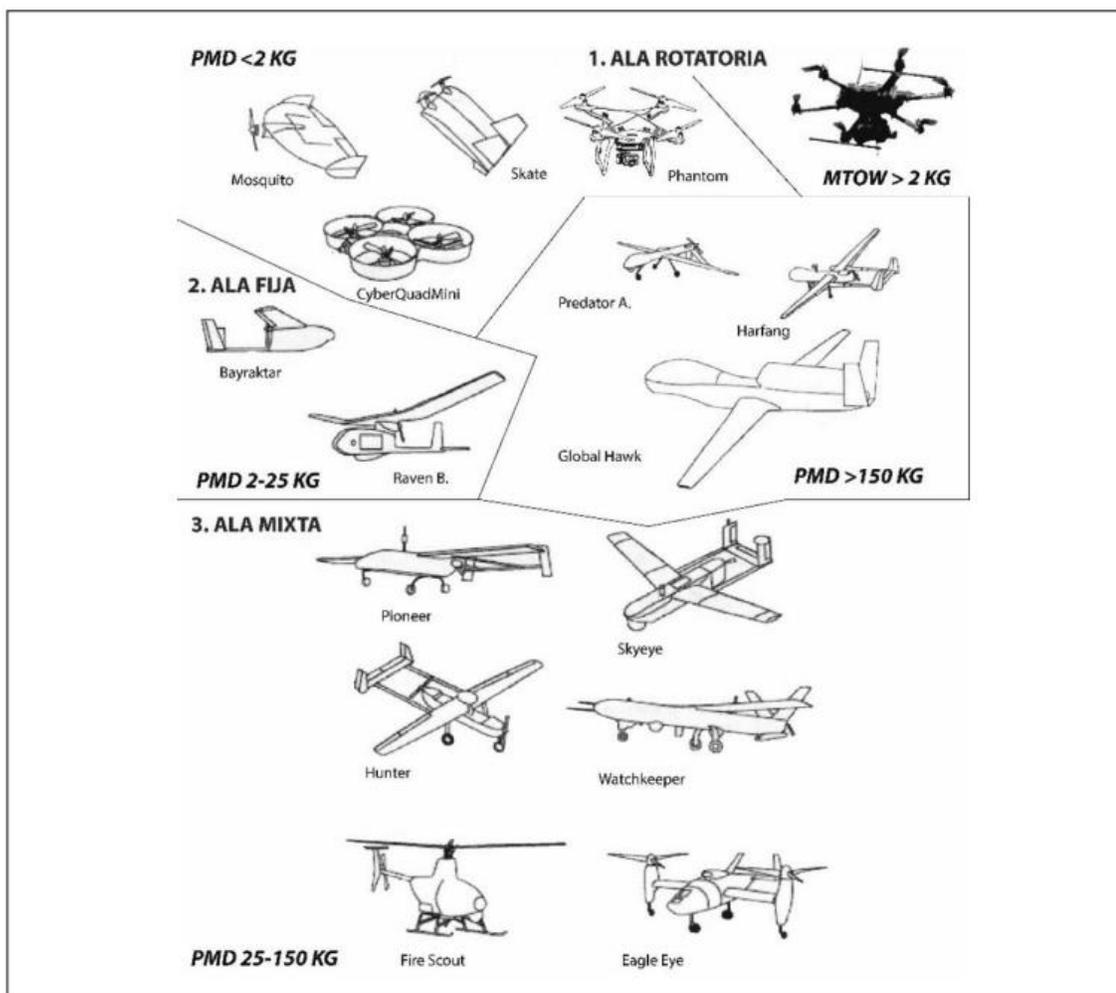


Figura 7. Tipos de drones según su estructura.
Fuente: (Fernández & Gutiérrez, 2016).

2.6.2. Tipos de sensores

La extensa variedad de drones existentes ofrece la ventaja de instalar diferentes sensores dependiendo el tipo de información que se desee obtener. Algunos de los sensores con mayor utilidad en el ámbito de las ciencias de la tierra están descritos a continuación (Chuvienco, 1995):

- Sensores para captura de imágenes: se trata de un sensor pasivo que se basa en la captura de energía procedente de la superficie de la tierra al ser reflejada por los rayos solares.
- Sensores LIDAR: es un sensor activo que basa su funcionamiento en la emisión de un haz de luz. Este haz registra los objetos y superficie sobre las que incide.
- Sensores geofísicos: captura información de gravimetría o electromagnética a distintas resoluciones.
- Sensores químicos: recogen datos en tiempo real como pueden ser gases, temperaturas, contaminantes, etc.

2.7. Proceso fotogramétrico

Como se indica en la investigación de los autpres Sani, Tierra, & Morillo, (2014), el proceso fotogramétrico lo podemos dividir en 4 etapas importantes y muy bien marcadas:

- Orientación Interna: es el proceso por el cual se reconstruye el haz de luz de una imagen o en otras palabras la reconstrucción de la cámara (focal calibrada, posición del punto principal, posición de las marcas fiduciales y función de distorsión).
- Orientación Relativa: proceso en el cual se realiza la determinación de la posición correcta en que debe quedar los puntos anteriores, de tal manera que al intersecarse los puntos homólogos en la fotografía se determine los puntos del objeto.
- Orientación Absoluta: posicionamiento y escalado del bloque fotogramétrico con apoyo de puntos de control.
- Restitución: fijación e identificación de los pares estereoscópicos con los puntos foto identificables.

2.7.1. Plan de vuelo

Previo a la ejecución de la realización de un vuelo fotogramétrico es necesario un estudio de planificación, teniendo en cuenta los distintos factores o condiciones que puedan llegar a afectar al vuelo. Algunas de las razones por las que a esta planificación se la llega a considerar un trabajo previo fundamental es por el ahorro de tiempo y en algunos casos de dinero que puede evitarnos en la ejecución de dicho vuelo, sin dejar de lado que esta planificación se puede presentar como garantía en el proceso de captura fotogramétrica y así evitar cometer errores (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011).

Los mayores problemas en el momento de planificar un vuelo se presentan cuando la zona de estudio es una zona montañosa, debido a que, a diferentes alturas en el terreno, se presentarán diferentes escalas en los fotogramas y por lo tanto, para que se lleguen a cumplir los parámetros iniciales de recubrimiento, será necesario que varíen el tiempo de exposiciones (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011).

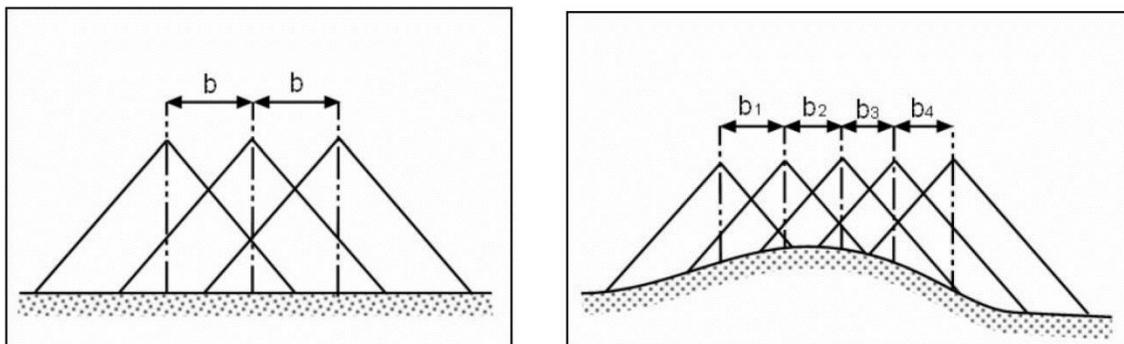


Figura 8. Diagrama de recubrimiento horizontal.

2.7.2. Cámaras métricas

Existen dos objetivos principales en la fotografía aérea, la fotogrametría y la fotointerpretación. Para la fotointerpretación, el principal requerimiento es una alta calidad del detalle de reproducción; siendo las mayores exigencias, la definición de la fotografía y la resolución de la óptica. Para la fotogrametría, la geometría es lo más importante.

2.8. Modelamiento en HEC-RAS

2.8.1. Hec-Ras

Hec-Ras (Hydrological Engineering Center – River Analys System) es un programa diseñado para un uso interactivo en múltiples tareas. El programa se encuentra compuesto de una interface gráfica, diferenciando los componentes del análisis hidráulico, almacenaje de datos y capacidad de administración, de gráficas y facilidad en el manejo de información.

2.8.2. Modelo BSTEM

El modelo BSTEM usa rutinas para determinar procesos geotécnicos bajo condiciones de flujo estable. Los resultados de este modelo están condicionados por las características de la sección de estudio (Guerra, 1998).

2.8.2.1. Coeficiente de Manning

Es un índice que determina la resistencia de un flujo en un canal. La fórmula del coeficiente de Manning o también conocido como coeficiente de rugosidad es sin duda la más popular aplicada para diseño de flujo en canales.

2.8.2.2. Archivo de flujo casi no permanente

El apartado que ofrece Hec-Ras de un flujo casi no permanente es aplicable únicamente para el transporte de sedimentos como es el caso de este estudio. Este flujo es una aproximación de un hidrograma en series de flujo permanentes con sus respectivas duraciones (García, 2017).

La simulación de transporte de sedimentos con un flujo casi no permanente es más estable que con un flujo no permanente, ya que en el flujo no permanente las condiciones son más complejas y se puede encontrar resultados con mayor rango de error.

El flujo casi no permanente dispone de 3 condiciones:

- Series de flujo: son series de gastos con sus respectivos tiempos donde cada registro ingresado debe tener una duración de flujo y tiempo de cálculo.

- Series de flujo lateral: son series de gastos con sus respectivos tiempos de un modelo tributario que ingresa a la sección del modelo.
- Flujo lateral uniforme: se puede distribuir las series de flujo lateral sobre varias secciones transversales.

2.8.2.3. Archivo de datos de sedimentos

Los parámetros de transporte y las condiciones iniciales son los primeros parámetros a definir. En esta sección se debe seleccionar la función más adecuada para el transporte de sedimentos de entre 8 funciones que se encuentran en Hec-Ras:

- Ackers y White
- England y Hansen
- Laursen
- Meyer y Peter and Muller
- Toffaleti
- MPM-Toffaleti
- Yang
- Wilcock y Crowe

Otro de los parámetros a seleccionar es la velocidad de caída, y en esta ocasión se debe elegir el algoritmo más apropiado entre los que se nombran a continuación:

- Ruby
- Toffaleti
- Van Rijn
- Dietrich

Para el cálculo del espesor del lecho móvil y el seguimiento vertical existen 3 métodos dentro del programa:

- Thomas (Ex5)
- Copeland (Ex7)
- Capa activa

2.8.3. Curva granulométrica

Es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría, la información obtenida del análisis granulométrico se presenta en dicha curva, donde el porcentaje que pasa es graficado en las ordenadas y el diámetro de las partículas en las abscisas (World Vision).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Parámetros geomorfológicos

Los datos hidrológicos recolectados en las estaciones del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) están relacionados con las precipitaciones que se presentaron entre el año 2005 y 2015 dentro de la cuenca del río Pita y para esto se tomaron en cuenta 4 estaciones con la mayor cantidad de información y más cercanas al área de estudio, entre las cuales tenemos las siguientes: La Tola, Izobamba, Uyumbicho, Rumipamba (ver figura 9).



Figura 9. Ubicación de estaciones meteorológicas.

3.1.1. Área de la cuenca

El cálculo del área de la cuenca del Río Pita se realizó mediante la utilización de herramientas del programa ArcGIS 10.3, utilizando el modelo digital del terreno obtenido a partir de curvas de nivel 1:50000 proporcionadas por el Fondo para la protección del agua (FONAG).

3.1.2. Longitud de la cuenca, longitud del cauce principal y perímetro

La longitud del cauce principal y de la cuenca del Río Pita se calculó en ArcGIS 10.3, mediante la utilización de las herramientas del programa y los datos obtenidos de ríos del Fondo para la protección del agua (FONAG).

El perímetro o divisoria de aguas (*divortium aquarum*) se lo obtuvo de la misma forma en el programa a partir de la delimitación de la cuenca.

3.1.3. Factor de forma, ancho de la cuenca y coeficiente de Gravelius

El cálculo de estos parámetros se realizó a través de una hoja de Excel con los datos obtenidos anteriormente en el programa ArcGIS 10.3 y que se presentan a continuación.

3.2. Caudal del Río Pita

Desafortunadamente, en Ecuador se dispone únicamente de datos de precipitaciones y, escasamente, de caudales registrados, por lo cual es muy difícil determinar la producción hídrica de las cuencas. Para solucionar esta situación, se realizó el cálculo del caudal mediante la metodología establecida en el estudio: Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica de Sandoval & Aguilera, (2014).

3.3. Secciones transversales

3.3.1. Proceso de batimetría (Aforos)

Con fecha 2 de julio se realizó 3 aforos, los cuales fueron realizados en 3 secciones del río Pita. El equipo utilizado para la medición consta de:

- Molinete marca OTT C31
- Contador electrónico de revoluciones marca Seba
- Hélice marca OTT 4-194456

- Juego de barras graduadas
- Cable de barras

En cada uno de las secciones se realizó un aforo de gasto líquido, el procedimiento utilizado en la medición de los caudales fue mediante el equipo hidrométrico con molinete montado sobre una barra graduada.

Se afirma la barra sobre el lecho fluvial, el molinete es desplazado a lo largo de ella, fijándolo en cada punto de la vertical en que se desea medir la velocidad, tomando en cuenta en mantener el molinete orientado perpendicularmente a la sección de aforo, orientado la hélice hacia aguas arriba. Las mediciones se las realizó con una separación de 1 m. Los aforos fueron realizados mediante el método completo por puntos, según este método se determina las velocidades del agua sucesivamente en distintos puntos de una vertical (0.20, 0.40, 0.60, 0.80). La cantidad de puntos depende de la profundidad de la sección como se muestra en la figura 10.

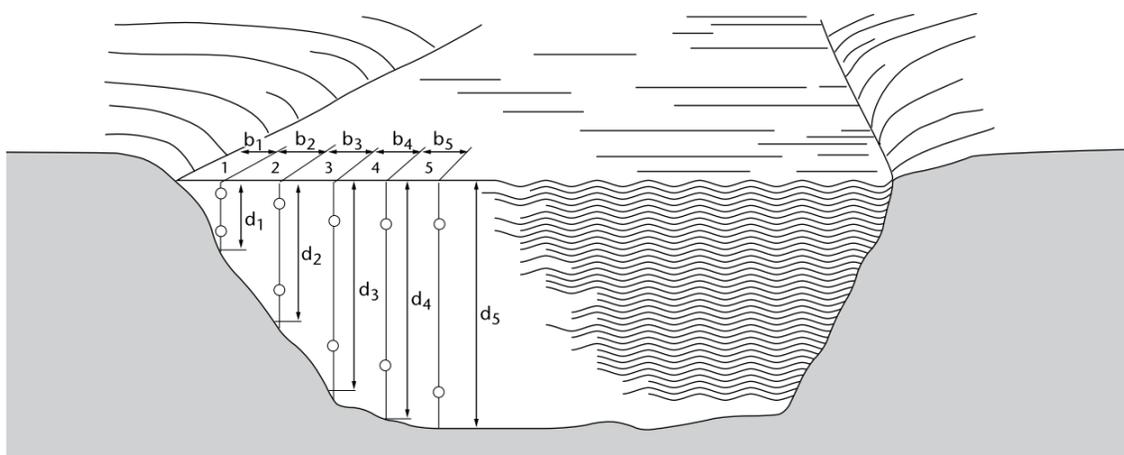


Figura 10. Vista de una sección, en la que se muestra los puntos de observación.
Fuente: (Organización Mundial Meteorológica, 2011).

3.4. Erosión

El cálculo de erosión en la cuenca del Río Pita se realizó mediante la recolección de muestras de sedimentos que son transportados a través de la corriente del río y mediante un trabajo de gabinete con información obtenida de la revisión bibliográfica.

3.4.1. Medición de sedimentos

El muestreo para el análisis de sedimentos en suspensión consiste en la toma de una muestra por cada sección, de preferencia de la zona central del río o de una zona que fluya el agua, pero sin turbulencia. El sedimento contenido en un volumen medido de agua se filtró, se secó y se pesó (Silva & Rivera, 2016).

3.4.1.1. Sólidos suspendidos

La toma de muestras de sedimentos transportados en el río Pita se realizó mediante un muestreo simple en tres secciones el día 2 de julio, la cantidad de líquido por cada muestra fue de 2L, las cuales fueron transportadas y analizadas en el laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE de acuerdo a la metodología explicada por la Organización Mundial Meteorológica, (2011) en su guía de prácticas hidrológicas en la sección de determinación de la concentración de sedimentos con ayuda de un procedimiento publicado por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. A continuación, se detalla el procedimiento:

- Lavar el filtro con 3 porciones de 20 ml de agua destilada y dejar al vacío durante 1 minuto para que se seque.
- Secar el filtro durante una hora a una temperatura de 105°C, dejar enfriar por 15 minutos y registrar el peso del filtro.
- Agitar la muestra varias veces y tomar rápidamente una muestra de 250 ml.
- Realizar el filtrado de la muestra y llevar el filtro a la estufa por una hora a una temperatura de 105°C, dejar enfriar por 15 minutos y registrar el peso del conjunto (filtro y sedimentos).

3.4.1.2. Materiales de fondo

El caudal de material de fondo se realizó mediante la colocación de un muestreador durante 2 días situado sobre el lecho del río en cada una de las secciones de estudio. Debido a que la medición del transporte de materiales de fondo es de difícil obtención, por factores como la aleatoriedad del lecho del río. Debido a que no se ha podido encontrar un aparato confiable que realice esta medición; se realizó un muestreador propio para cada sección del río.



Figura 11. Muestreador de materiales de fondo.

3.4.2. Estimación de sedimentos

3.4.2.1. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Se realizó el cálculo de la erosión presente en la cuenca del Río Pita mediante la utilización de la ecuación universal de pérdida de suelo.

La ecuación universal de pérdida de suelo involucra los siguientes factores (INIFAP, 2007):

Tabla 4

Descripción de los factores implicados en la ecuación USLE.

Factor	Descripción	Unidades
R	Agresividad de la lluvia para producir erosión	MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹
K	Susceptibilidad del suelo a recibir erosión.	t.ha.h.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹
LS	Longitud y grado de la pendiente.	Adimensional
C	Cobertura de suelo es el factor más importante de la erosión hídrica.	Adimensional
P	Prácticas mecánicas o manejo del terreno.	Adimensional
A	Tasa de erosión hídrica	t. ha ⁻¹ .año ⁻¹

Fuente: Adaptado de (INIFAP, 2007).

3.5. Perfil longitudinal

La pendiente media del Río Pita se calculó mediante el método de los valores extremos. Este método consiste en determinar la diferencia de nivel existente entre los puntos más elevado y más bajo del cauce, para después dividir este valor para la longitud del río.

La creación del modelo digital de estudios hidrográficos se realizó mediante las etapas que se describen a continuación.

3.5.1. Planificación del proceso fotogramétrico

Se delimitó el área de estudio que comprendió desde el barrio de Cashapamba hasta la sección de control de la ESPE y se realizó 5 planes de vuelo debido a la magnitud de la zona (100 Ha aproximadamente). Para la elaboración de dichos planes se utilizó la aplicación Drone Deploy, misma que es compatible con Android.

De acuerdo a las características de las zonas se definió los siguientes parámetros para los vuelos:

Tabla 5
Parámetros de vuelo.

Parámetros	Vuelos				
	1	2	3	4	5
Altura de vuelo	120 m				
Traslape transversal	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Traslape longitudinal	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Dirección de vuelo	111°	-13°	-56°	-45°	-43°
Número de fotografías	341	302	338	331	326
Velocidad de vuelo	15 m/s				
Tiempo de vuelo	23 min	20 min	23 min	22 min	23 min

3.5.2. Vuelo fotogramétrico

Para los sitios de despegue y aterrizaje del dron se buscó puntos de sectores cercanos a el inicio del plan de vuelo, con buena visibilidad y sin obstáculos que intervengan en el correcto funcionamiento del dron (cables, antenas, zonas prohibidas).



Figura 12. Sitio de despegue.

La realización del vuelo fotogramétrico se efectuó los días 25, 26 y 27 de junio para levantar 100 hectáreas aproximadamente, teniendo en cuenta las mejores horas para volar (10 am – 12 pm), basándonos en la disponibilidad de luz y el clima de la zona.

3.5.3. Ajuste fotogramétrico

El ajuste fotogramétrico se realizó en el programa Agisoft PhotoScan Professional que permite procesar imágenes para generar datos espaciales en 3D. El procesamiento se realizó individualmente por cada vuelo realizado ya que el programa no realiza procesos internamente, si no que depende completamente del procesador y memoria del computador. A continuación, se detalla el procedimiento realizado en el programa:

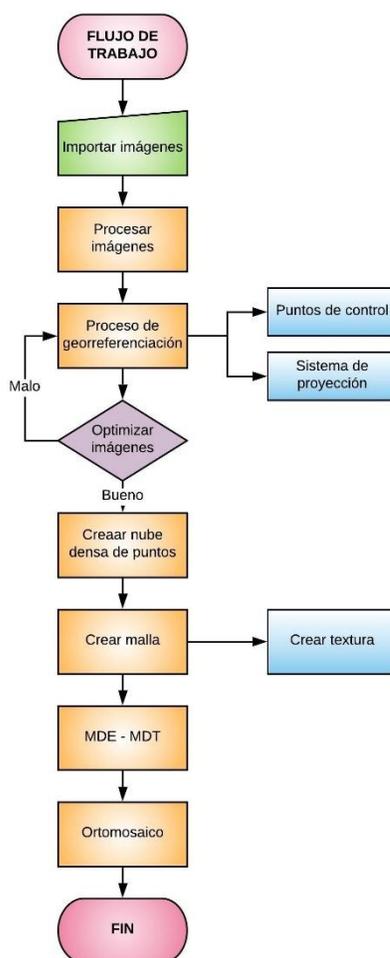


Figura 13. Flujo de trabajo del ajuste fotogramétrico.

- Importación de imágenes: para esto vamos a “flujo de trabajo” en donde vamos a encontrar el botón “añadir fotos”, seleccionamos la carpeta y cargamos las imágenes.
- Calibrar cámara: en este caso las imágenes se obtuvieron por una cámara conocida por el programa; esto quiere decir que las imágenes vienen con información de la cámara con las que se tomaron las fotografías.
- Orientación de imágenes: consiste en realizar una georreferenciación de las fotografías.
- Orientación de imágenes: en “flujo de trabajo” podemos encontrar la función “alinear fotos”. Escogemos la calidad del producto, que en este caso fue “Alta”. Una vez que el programa termino el proceso, se obtiene una nube de puntos y las fotografías alineadas.
- Nube densa de puntos: en “flujo de trabajo” picamos en “construir nube densa de puntos” y de la misma manera escogemos la calidad del producto que en este caso va a ser de la misma manera que en el proceso anterior “Alta” y esperamos el proceso.
- Malla: después de generar la nube densa de puntos en “flujo de trabajo” seleccionamos “construir malla” y de igual forma que en los procesos anteriores elegimos la calidad del producto y procesamos.
- Textura: continuando con el proceso, en “flujo de trabajo”, picamos en “crear textura” y de la misma manera cambiamos los parámetros que deseamos y procesamos.
- MDE: este es uno de los productos con mayor interés. Siguiendo el “flujo de trabajo”, seleccionamos “Crear MDE”.
- Orto mosaico: “Flujo de trabajo”, “Crear orto mosaico” y de igual manera, ajustamos los parámetros y procesamos.

3.5.4. Clasificación de la nube de puntos

La clasificación de la nube de puntos se ejecutó mediante el archivo *.las de cada uno de los planes de vuelo procesado y se realizó una clasificación no supervisada con la ayuda

del software Global Mapper¹⁸, reconociendo tres grandes categorías como lo son terreno, vegetación y construcciones. De estas 3 categorías se trabajó con la categoría de terreno, se procedió a la depuración de puntos no pertenecientes a terreno que habían sido clasificados de manera errónea y a continuación se generó una superficie basada en triangulaciones, teniendo como resultado una superficie en formato TIFF.

3.6. Modelamiento en Hec-Ras

3.6.1. Creación del proyecto

Para la realización del modelo de transporte de sedimentos en Hec-Ras, se procede a la creación de un archivo de proyecto que esté relacionado con otros archivos como son un archivo de geometría, un archivo de flujo, archivo de datos de sedimentos y el archivo de plan de análisis de sedimentos (ver figura 14).

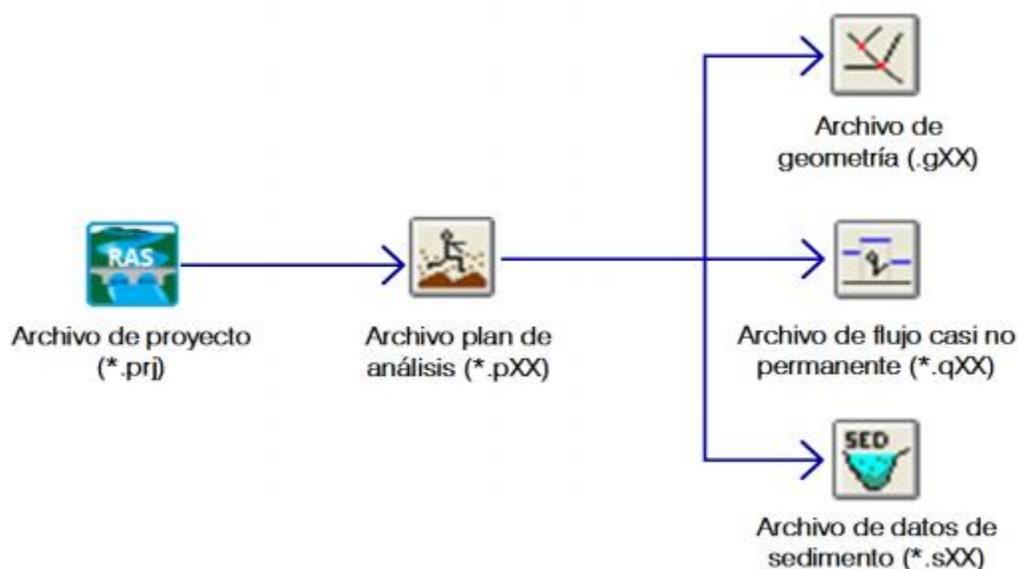


Figura 14. Esquema de archivos para creación de proyecto.

Fuente: (Salmerón, 2017).

3.6.1.1. Archivo de geometría

La creación del archivo de geometría se realizó mediante la extensión de Hec GeoRas de ArcGIS, para esto se utilizó el MDEH y la ortofoto. Para ello, se dibujó el esquema del río en dirección aguas arriba hacia aguas abajo (Guerra, 1998).

Una vez que se creó el esquema del río, se realizó la creación de las secciones transversales con las siguientes características: nombre, coordenadas de la sección, distancia entre secciones, coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035 por tratarse de un canal natural con abundante vegetación (ver figura 15), márgenes del cauce principal, coeficientes de expansión y contracción del cauce (García, 2017).

Dialog: Edit Manning's n or k Values

River: RIO PITA

Reach: PITA

Selected Area Edit Options: Add Constant ..., Multiply Factor ..., Set Values ..., Replace ..., Reduce to L Ch R ...

River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1 4100	n	0.035	0.035	0.035
2 4000	n	0.035	0.035	0.035
3 3900	n	0.035	0.035	0.035
4 3800	n	0.035	0.035	0.035
5 3700	n	0.035	0.035	0.035
6 3600	n	0.035	0.035	0.035
7 3500	n	0.035	0.035	0.035
8 3400	n	0.035	0.035	0.035
9 3300	n	0.035	0.035	0.035
10 3200	n	0.035	0.035	0.035
11 3100	n	0.035	0.035	0.035
12 3000	n	0.035	0.035	0.035
13 2900	n	0.035	0.035	0.035
14 2800	n	0.035	0.035	0.035
15 2700	n	0.035	0.035	0.035
16 2600	n	0.035	0.035	0.035
17 2500	n	0.035	0.035	0.035
18 2400	n	0.035	0.035	0.035
19 2300	n	0.035	0.035	0.035
20 2200	n	0.035	0.035	0.035
21 2100	n	0.035	0.035	0.035
22 2000	n	0.035	0.035	0.035
23 1900	n	0.035	0.035	0.035
24 1800	n	0.035	0.035	0.035

Channel n Values have a light green background

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura 15. Coeficiente de Manning utilizado en cada sección.

3.6.1.2. Archivo de flujo casi no permanente

En este caso se utilizó la condición de series de flujo, donde cada uno de los flujos tiene 2 consideraciones a tener en cuenta (ver figura 16):

- Duración de flujo: cada serie debe tener su respectiva duración que represente el tiempo en el cual el gasto es constante.
- Incrementos de cálculo: es una subdivisión de la duración del flujo en donde se introduce el tiempo que deben actualizarse los datos del cambio de geometría del cauce

Flow Series for RIO PITA PITA 4100

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 30oct2019 Time: 0000

Fixed Start Time: Date: 30oct2019 Time:

Hydrograph Data

No. Ordinates	Interpolate Values	Del Row	Ins Row	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m3/s)
1				30oct2019 0000	24	24	1	2.75
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								

Compute computation increments based on flow

Plot ... OK Cancel

Figura 16. Ventana de serie de flujo casi no permanente.

3.6.1.3. Archivo de datos de sedimentos

3.6.1.3.1. Funciones de transporte, métodos de velocidad de caída y métodos de clasificación.

La función de transporte que más se adecua a este análisis corresponde a Ackers-White, debido al tamaño de las partículas que se pudo apreciar en el estudio granulométrico. Además, se escogió la función de Wilcock-Crowe ya que esta función se basa en que el transporte es principalmente dependiente de las características del material en contacto con el fluido.

El método de velocidad que más se ajusta a las características del sedimento es el de Van Rijn, ya que la granulometría está compuesta desde gravas hasta pequeñas proporciones de arcilla.

En cuanto al método de clasificación, se utilizó el método de capa activa ya que este método limita la simplificación de capas profundas.

3.6.2. Granulometría de secciones transversales

Se tomó 1 muestra de sedimentos de fondo en el lecho del río la cual se analizó a través de un ensayo de granulometría en el laboratorio de suelos de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE (ver tabla 6).

Tabla 6
Resultados de granulometría.

Tamiz N°	Abertura Tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
3/4	19	77.19	77.19	9.06	90.94
3/8	9.5	144.21	221.4	16.91	74.02
4	4.75	9.67	231.07	1.13	72.89
10	2	165.4	396.47	19.41	53.49
18	1	180.25	576.72	21.15	32.34
35	0.5	105.8	682.52	12.41	19.92
40	0.43	97.8	780.32	11.47	8.45
60	0.25	47.5	827.82	5.57	2.88
100	0.15	22.54	850.36	2.64	0.23
Pan		1.99	852.35	0.23	0.00

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Parámetros geomorfológicos y meteorológicos

4.1.1. Revisión bibliográfica

El análisis de las precipitaciones es un parámetro de gran importancia para el siguiente estudio, ya que este es uno de los parámetros que influye de manera directa en la erosión y transporte de sedimentos dentro de la cuenca. Para el cálculo de algunos parámetros geomorfológicos de la cuenca se utilizó 4 estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) como se muestra detallado en la tabla 7:

Tabla 7

Datos de precipitaciones del año 2005 hasta el 2015.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Precipitación
LA TOLA	656.3	1013	875.1	1179.8	747	938.1	941.6	793.4	693.8	699	555.1	826.5
IZOBAMBA	1265	1465	1783.6	2032.3	1516.2	1774.4	1487.8	1400.6	1160.7	1393	1091.6	1488.2
UYUMBICHO	1300.5	1435	1459	1981.2	1602.9	1595.3	1581.3	1345.4	1227.2	1363.4	1124.2	1456.0
RUMIPAMBA	1433.7	2832	2099.5	5765.1	3347.2	1658.2	2684.2	1689.5	1229.4	1655.7	1050	2313.1
											Promedio	1520.95

Fuente: Adaptado de (INAMHI, 2016).

En el histograma que se presentan a continuación se observa la variación de las precipitaciones en el lapso de 10 años (ver figuras 17).

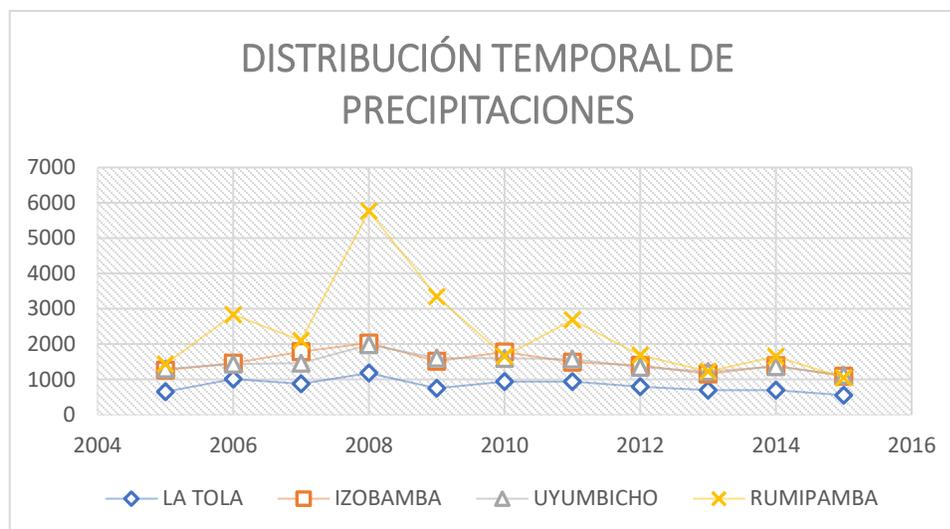


Figura 17. Distribución temporal de precipitaciones.

Tabla 8

Resultados geomorfológicos de la cuenca.

PÁRAMETROS GEOMORFOLÓGICOS		
1	Área (Km ²)	592
2	Perímetro (Km)	140
3	Longitud de Cuenca (Km)	44
4	Ancho (Km)	13.45
5	Longitud del Río Principal (Km)	58
6	Factor de Forma	0.31
7	Índice de Compacidad	1.61

4.2. Caudal del Río Pita

4.2.1. Volumen promedio de precipitaciones

El volumen promedio de precipitaciones anuales de la cuenca del río Pita se calculó teniendo en cuenta que la precipitación anual es 1520.95 mm y su área 592 km².

$$V = 1000 \times 1520.95 \text{ mm} \times 592 \text{ km}^2$$

$$V = 900402400 \text{ m}^3$$

4.2.2. Cálculo del caudal medio

Para el cálculo del caudal medio se utilizó el mapa de módulos específicos de Porrut, (1995), en el cual indica que la cuenca del río Pita tiene un módulo de escorrentía entre 10 y 20 l/s/km². Para el cálculo se utilizó 20 l/s/km², es decir 0.02 m³/s/km².

$$C = \frac{0.02 \frac{m^3}{s \cdot km^2} \times 10^6}{31.71 \times 1520.95 \text{ mm}}$$

$$C = 0.415$$

Una vez obtenido el coeficiente de escorrentía, se realizó el cálculo del caudal medio de la cuenca.

$$Q_0 = \frac{31.71 \times 1520.95 \text{ mm} \times 592 \text{ km}^2 \times 0.415}{10^6}$$

$$Q_0 = 11.85 \frac{m^3}{s}$$

4.2.3. Coeficiente de escorrentía por el número de curva

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se utilizó el método del número de curva, para esto se utilizó las ecuaciones que se muestra a continuación en el mismo orden. En la primera parte se determinó que N es 86.75, ya con este resultado se procedió a calcular el umbral de escorrentía, escorrentía superficial y por último el coeficiente de escorrentía.

Umbral de escorrentía

$$P_0 = \frac{508}{86.75} - 5.08$$

$$P_0 = 7.76 \text{ mm}$$

Escorrentía superficial

$$P_n = \frac{(126.74 \text{ mm} - 7.76 \text{ mm})^2}{126.74 \text{ mm} + 4 \times 7.76 \text{ mm}}$$

$$P_n = 89.72 \text{ mm}$$

Coefficiente de escorrentía

$$C = \frac{82.72 \text{ mm}}{126.74 \text{ mm}}$$

$$C = 0.65$$

Ya con el coeficiente de escorrentía calculado con el método de la curva, se recalculó el caudal medio de la cuenca de una forma más exacta, ya que con este método se considera otros factores como son el tipo de suelo, cobertura vegetal y pendientes.

$$Q_0 = \frac{31.71 \times 1520.95 \text{ mm} \times 592 \text{ km}^2 \times 0.65}{10^6}$$

$$Q_0 = 18.55 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

4.2.4. Caudal máximo

Los caudales máximos se encuentran relacionados con un determinado período de retorno en años, por lo que cualquier fórmula utilizada para este cálculo debe utilizar este factor.

Otro factor relevante para este cálculo de acuerdo a Sandoval & Aguilera, (2014) es el tamaño de la cuenca.

La precipitación media anual de la cuenca en estudio es de 1520.95 mm, motivo por el cual se utilizó la fórmula para precipitaciones entre 500 y 2500 mm.

$$\alpha = 0.644 - 0.08 \ln 1520.95$$

$$\alpha = 0.058$$

En el caso de este estudio el área de la cuenca es 592 km², por lo tanto, se utilizó las fórmulas para el cálculo de cuencas mayores a 45 km² como se muestra a continuación.

$$Q_{m\acute{a}x} = 0.058 \frac{1520.95\sqrt{592}}{(1 + \lg 592)} (0.5 \ln T - 0.7)$$

Tabla 9
Caudales máximos para la cuenca del Río Pita.

Periodo de retorno T (años)	10	25	50	100	500	1000	5000	10000
Caudal máximo (m³/s)	256.77	517.45	714.64	911.83	1369.70	1566.89	2024.76	2221.95

De acuerdo a los cálculos que se presentan en la tabla 8, se tiene que en un período de retorno de 10 años el caudal es de 256.77 m³/s.

4.3. Secciones transversales

4.3.1. Medición hidrométrica (Aforos)

Se seleccionó tres tramos del río Pita ubicadas en sectores estratégicos donde el cauce del río no posee curvas pronunciadas, para así evitar sobre elevaciones o cambios en su profundidad producidos por las curvas mismo (ver figura 21).

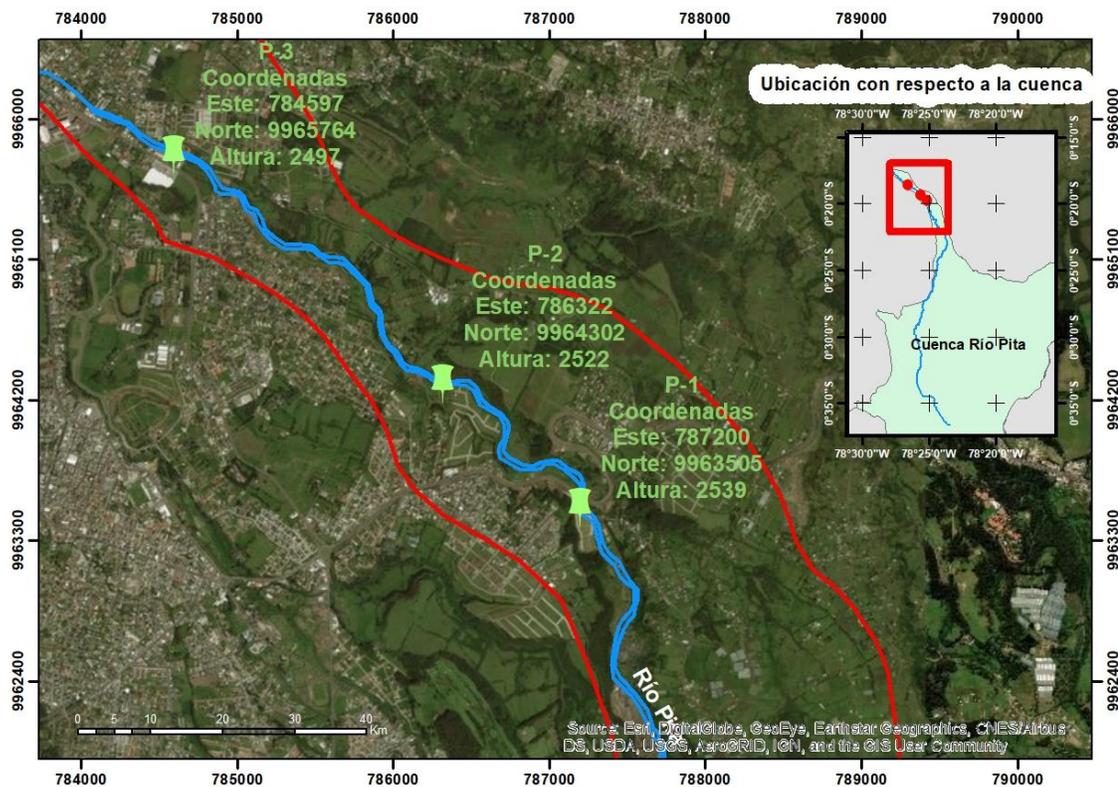


Figura 18. Ubicación de secciones de control.

El monitoreo de los puntos sobre el río Pita fueron realizados en época de estiaje, por lo que se puede estimar que este río puede aumentar significativamente en época invernal.

El caudal en los puntos P-1, P-2 y P-3 no varían significativamente, por lo que se estima que no existen afluentes y aporte subterráneo que aumenten el caudal en este tramo.

El resumen de resultados de las 3 secciones de control que se realizaron mediante aforos de gasto líquido se presenta a continuación y se graficó el área mojada de la sección transversal de los tres puntos.

- Sección de control 1

Resultados del Aforo	
Ancho de la sección (m)	7.4
Caudal líquido calculado (m ³ /s)	2.639
Área de la sección (m ²)	3.085
Velocidad media (m/s)	0.855
Velocidad máxima (m/s)	1.767
Profundidad máxima (m)	0.58
Perímetro mojado (m)	7.645
Radio hidráulico (M)	0.403
Tirante	0.416
Velocidad superficial media (m/s)	1.057

Los datos del área mojada de la sección de control y su representación gráfica se pueden observar en la figura 19.

Punto	Distancia horizontal (m)	Cotas (m)	
A-1	0.00	100.00	N.A. O.I.
2	1.00	99.58	
3	2.00	99.42	
4	3.00	99.47	
5	4.00	99.59	
6	5.00	99.57	
7	6.00	99.53	
8	7.00	99.65	
9-H	7.40	100.00	N.A. O.D.

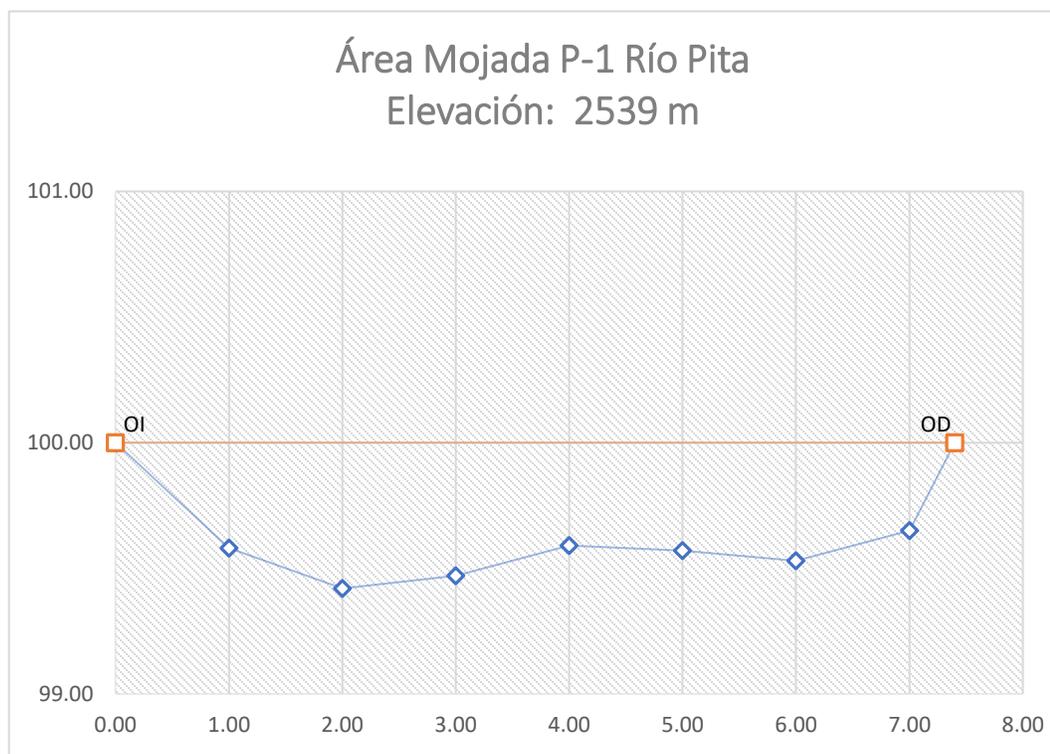


Figura 19. Área mojada sección 1.

- Sección de control 2

Resultados del Aforo

Ancho de la sección (m)	8.30
Caudal líquido calculado (m ³ /s)	2.647
Área de la sección (m ²)	2.815
Velocidad media (m/s)	0.929
Velocidad máxima (m/s)	1.732
Profundidad máxima (m)	0.480
Perímetro mojado (m)	8.473
Radio hidráulico (M)	0.332
Tirante	0.339
Velocidad superficial media (m/s)	1.096

Los datos del área mojada de la sección de control y su representación gráfica se pueden observar en la figura 20.

Punto	Distancia Horizontal (m)	Cotas (m)	
A-1	0.00	100.00	N.A. O.I.
2	1.00	99.85	
3	2.00	99.66	
4	3.00	99.52	
5	4.00	99.59	
6	5.00	99.55	
7	6.00	99.55	
8	7.00	99.66	
9	8.00	99.70	
10-H	8.30	100.00	N.A. O.D.

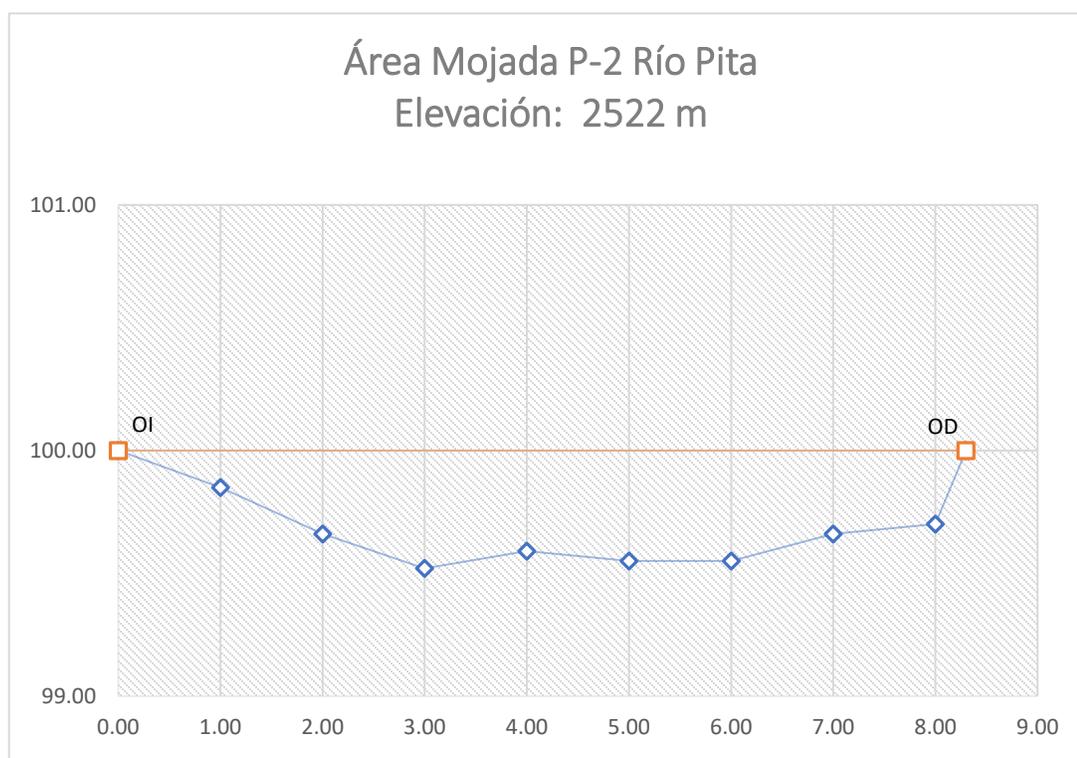


Figura 20. Área mojada sección 2.

- Sección de control 3

Resultados del Aforo

Ancho de la sección (m)	7.70
Caudal líquido calculado (m ³ /s)	2.675
Área de la sección (m ²)	3.081
Velocidad media (m/s)	0.868
Velocidad máxima (m/s)	1.329
Profundidad máxima (m)	0.540
Perímetro mojado (m)	7.902
Radio hidráulico (M)	0.389
Tirante	0.400
Velocidad superficial media (m/s)	0.962

Los datos del área mojada de la sección de control 3 y su representación gráfica se pueden observar en la figura 21.

Puntos	Distancia Horizontal (m)	Cotas (m)	
A-1	0.00	100.00	N.A. O.I.
2	1.00	99.75	
3	2.00	99.55	
4	3.00	99.50	
5	4.00	99.58	
6	5.00	99.46	
7	6.00	99.47	
8	7.00	99.54	
9-H	7.70	100.00	N.A. O.D.

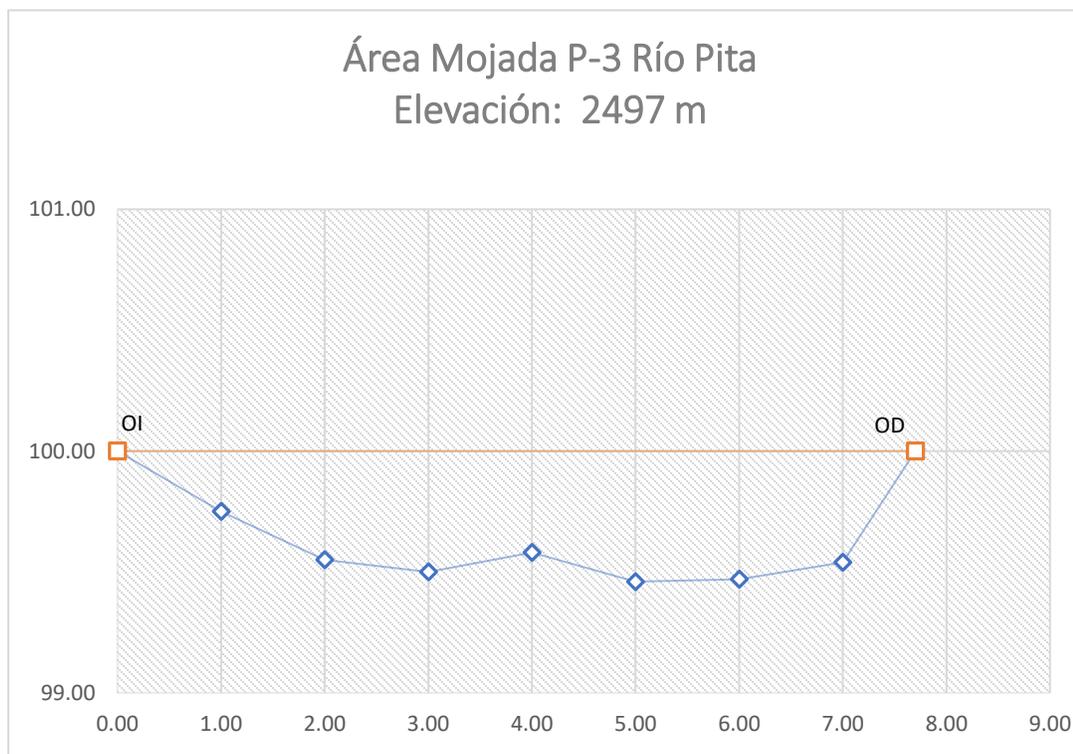


Figura 21. Área mojada sección 3.

4.4. Erosión

4.4.1 Estudio de campo

4.4.1.1. Sólidos suspendidos

Siguiendo la metodología explicada por la Organización Mundial Meteorológica, (2011) en su guía de prácticas hidrológicas en la sección de determinación de la concentración de sedimentos y con la ayuda de un procedimiento publicado por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia se realizó el análisis de las muestras obtenidas en los diferentes puntos de muestreo. A continuación, se presenta un resumen de los resultados.

$$SST = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \quad (16)$$

Tabla 10*Tabla de resultados de sedimentos en suspensión.*

SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A	Peso final del conjunto (filtro + cápsula) con el residuo seco. (g)	1.9965	1.9865	1.9712
B	Peso inicial del conjunto (filtro + cápsula). (g)	1.9612	1.9708	1.9634
V	Volumen de la muestra filtrada. (ml)	250.00	250.00	250.00
SST	Sólidos en suspensión totales. (g/L)	0.14	0.06	0.03
SST	Sólidos en suspensión totales. (mg/L)	141.20	62.80	31.20
SST	Sólidos en suspensión totales. (mg/m ³)	141200	62800	31200

*Figura 22. Filtros de resultados (Muestra 1, 2 y 3 respectivamente).***Tabla 11***Transformación de unidades de sedimentos.*

SEDIMENTOS EN DISTINTOS TIEMPOS		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A	Sedimentos en suspensión totales transportados en 1 día (mg/día)	32194955520	14362410240	7210944000
A	Sedimentos en suspensión totales transportados en 1 año (mg/año)	1.17512E+13	5.24228E+12	2.63199E+12
A	Sedimentos en suspensión totales transportados en 1 año (Ton/año)	11751.15	5242.27	2631.99

4.4.2. Estudio de gabinete

4.4.1. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Los factores que componen la ecuación universal de pérdida de suelo se estimaron como se detalla en el diagrama de flujo (ver figura 23).

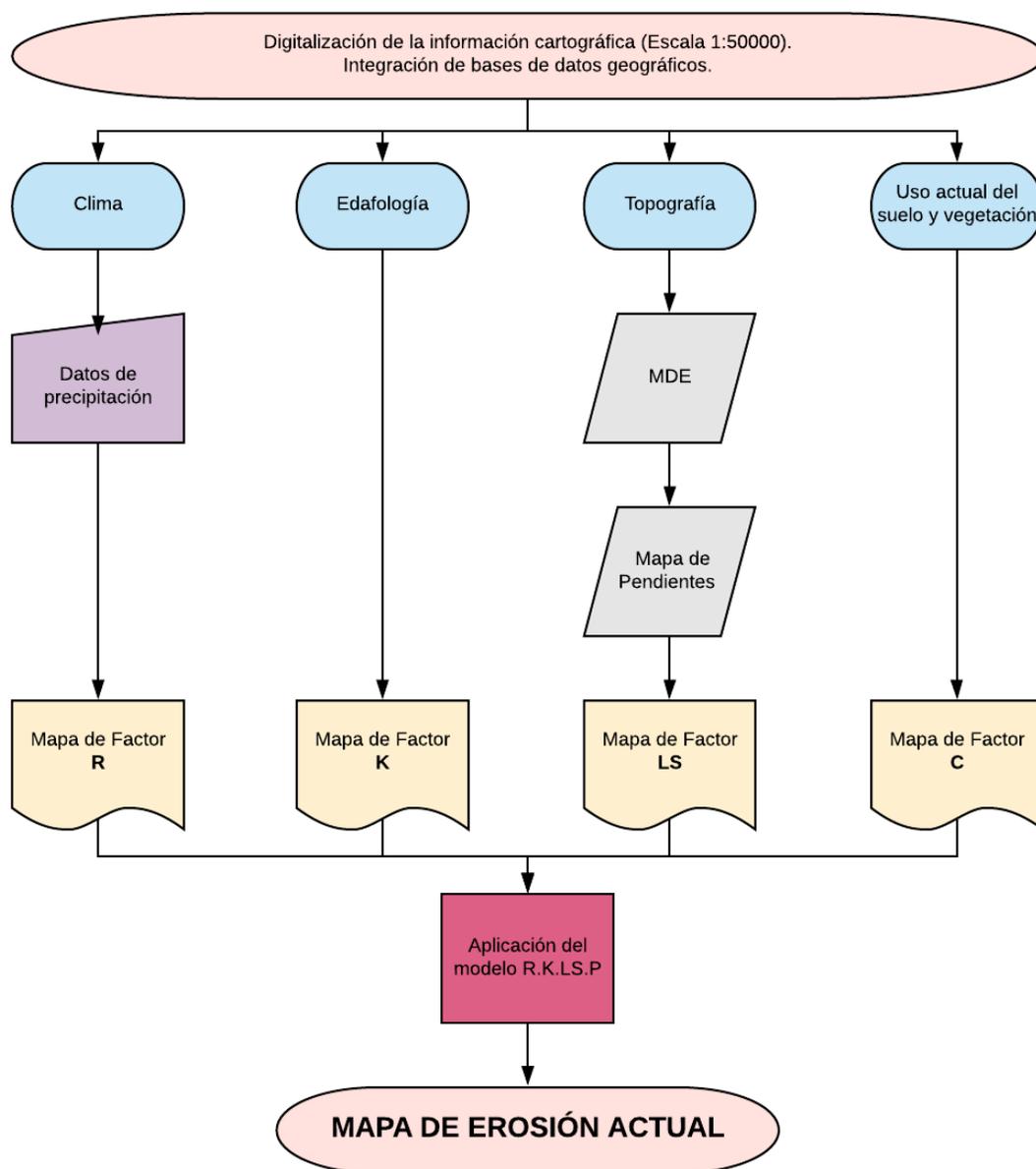
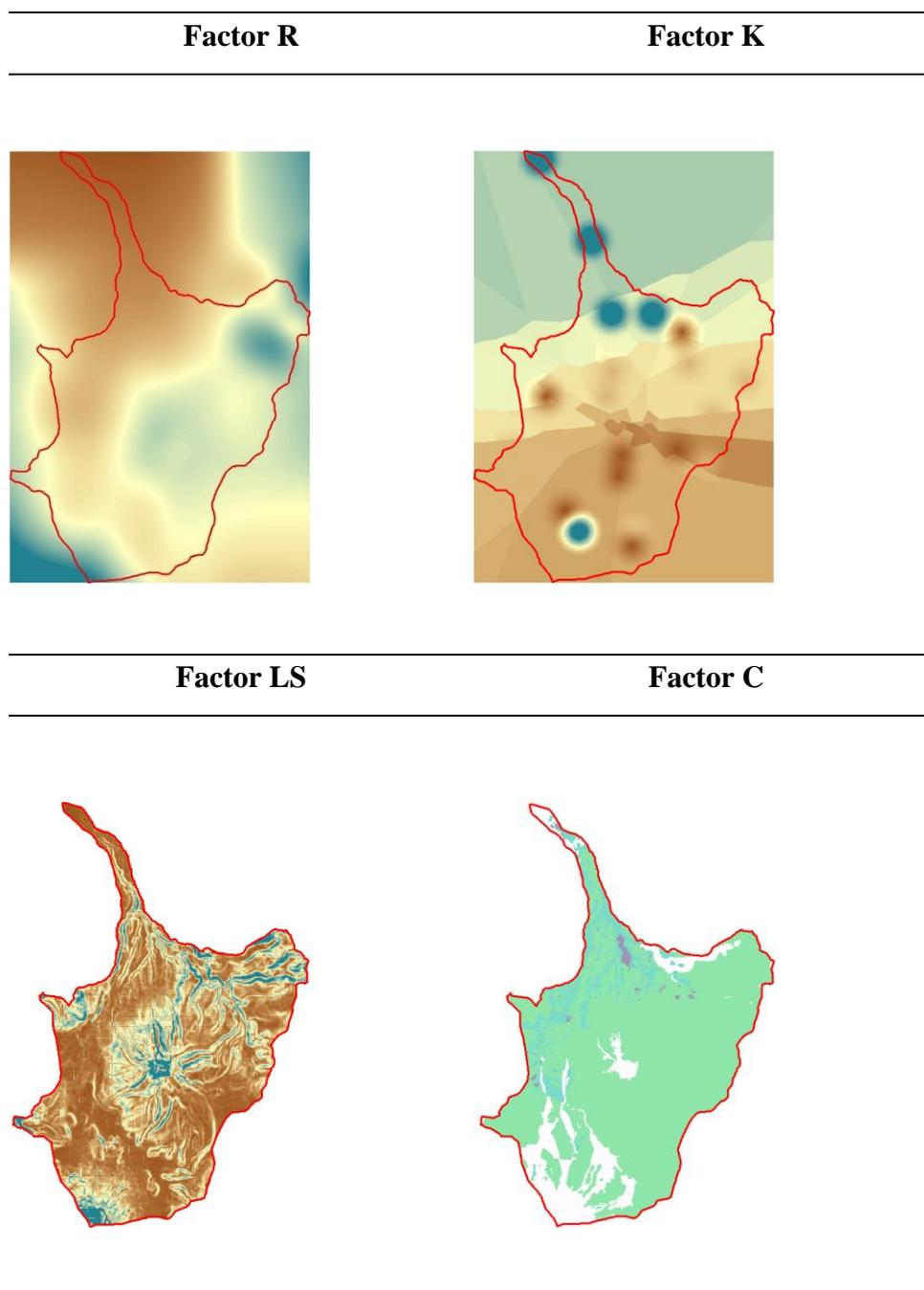


Figura 23. Diagrama de flujo para la obtención de mapa de erosión.

Una vez obtenidos los mapas en formato ráster de los factores necesarios se realizó el cálculo de la pérdida de suelo en la cuenca del Río Pita.



Los factores R, K LS y C, que forman parte de la USLE y que se obtuvieron para la cuenca de estudio son de gran importancia ya que la calidad de los resultados se encuentra en función directa a ellos. De acuerdo a Flores, Martínez, Oropeza, Mejía, & Carrillo

(2003), la fuente potencial mas grande de cometer un error en la predicción de la perdida de suelo es la trivialidad en la selección de los valores de los factores que a esta la componen.

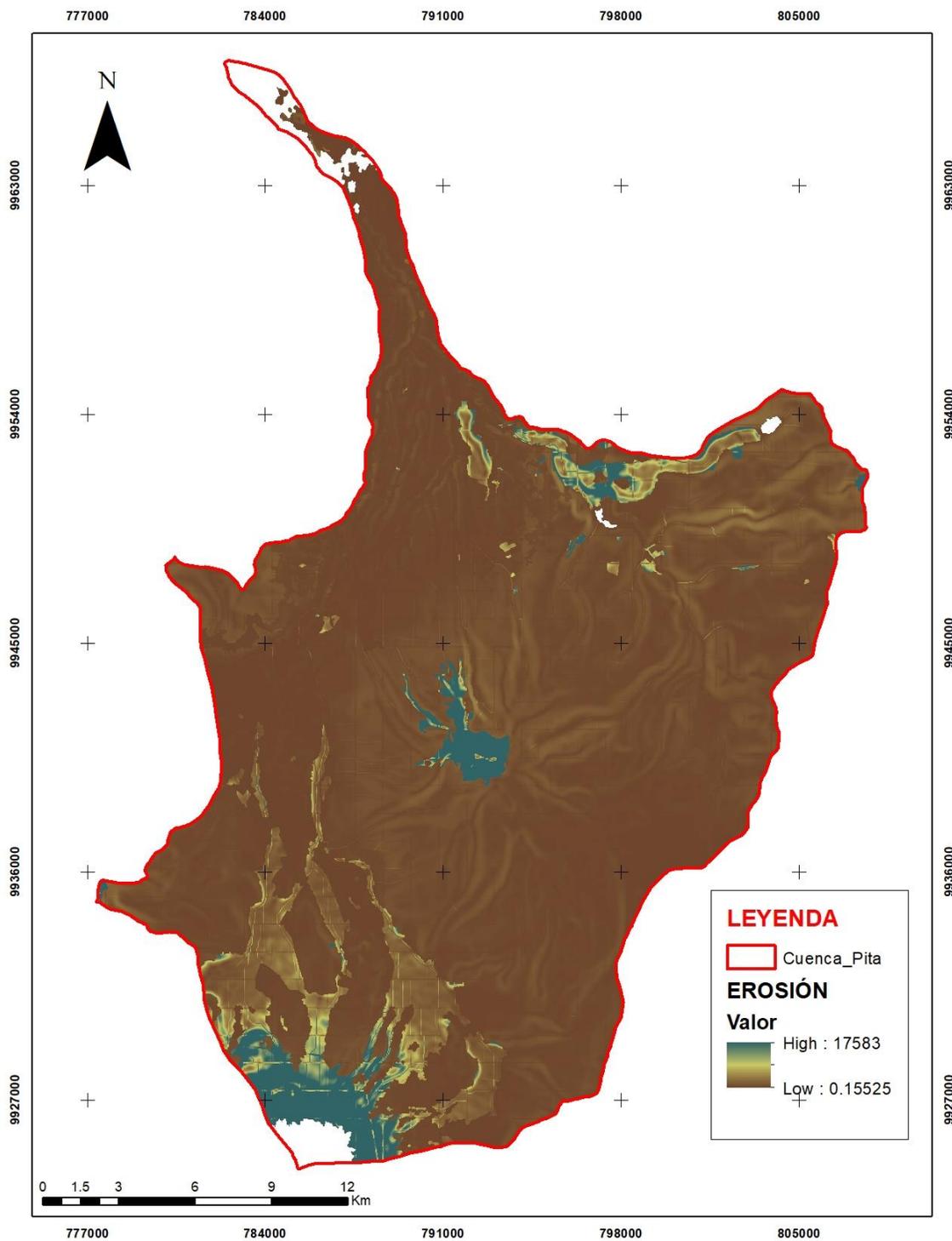


Figura 24. Mapa de riesgo potencial de erosión.

Sumando los valores de todas las celdas que pertenecen a la cuenca, se obtuvo el total que representa la erosión ocurrida en la cuenca del Río Pita. El total de sedimentos que se producen por erosión dentro de la cuenca es de 3382.17 t/año

Los valores de pérdida potencial de la cuenca no se deben interpretar como valores absolutos, sino como valores estimados, debido a que la ecuación de pérdida de suelo no fue creada para aplicarse en escenarios extremos de topografía; sin embargo, permite evaluar de una forma aproximada la susceptibilidad de erosión de ciertas áreas.

4.5. Perfil Longitudinal

Realizando el cálculo se determinó que la pendiente media del cauce es de 5.84 %. Sin embargo, la pendiente media del cauce dentro del área de estudio es de 1.26 % (ver figura 25).

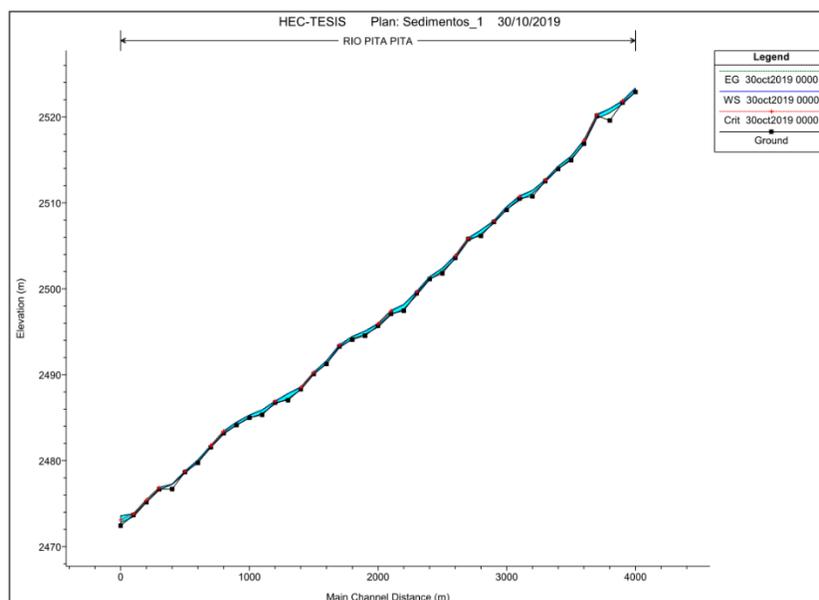


Figura 25. Perfil longitudinal del Río Pita.

4.5.1. Modelo digital para estudios hidrográficos

4.5.1.1. Planificación del proceso fotogramétrico

Debido a la extensión del área de estudio (aproximadamente 100 ha), se procedió a realizar varios planes de vuelo para intentar facilitar la toma de fotografías. Los parámetros que influyeron en esta división fueron: la autonomía de vuelo del dron y la

altura de vuelo. Al final, se terminó realizando 5 planes de vuelo con una duración de 22 min aproximadamente.

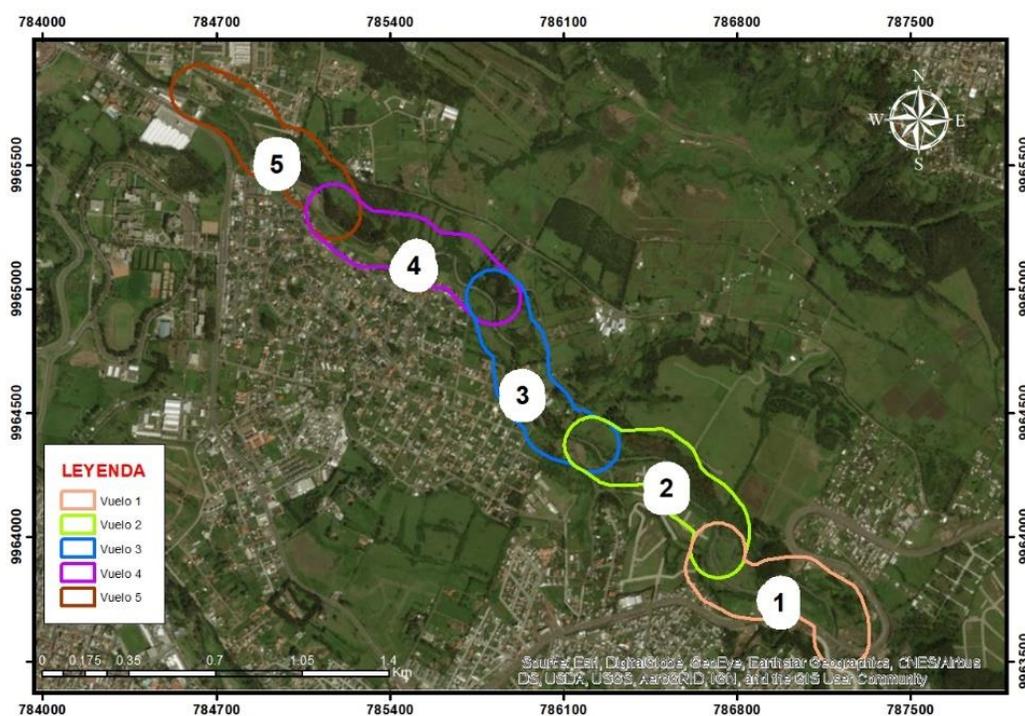


Figura 26. Planes de vuelo.

4.5.1.2. Ajuste fotogramétrico

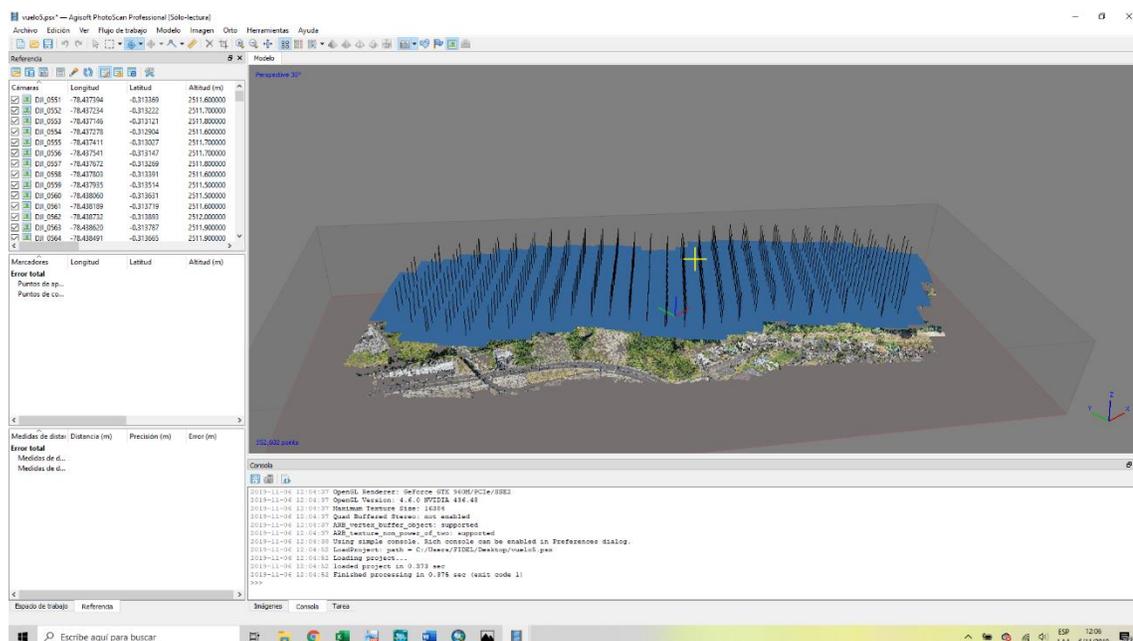


Figura 27. Ventana de ajuste fotogramétrico.

4.5.1.3. Clasificación de la nube de puntos

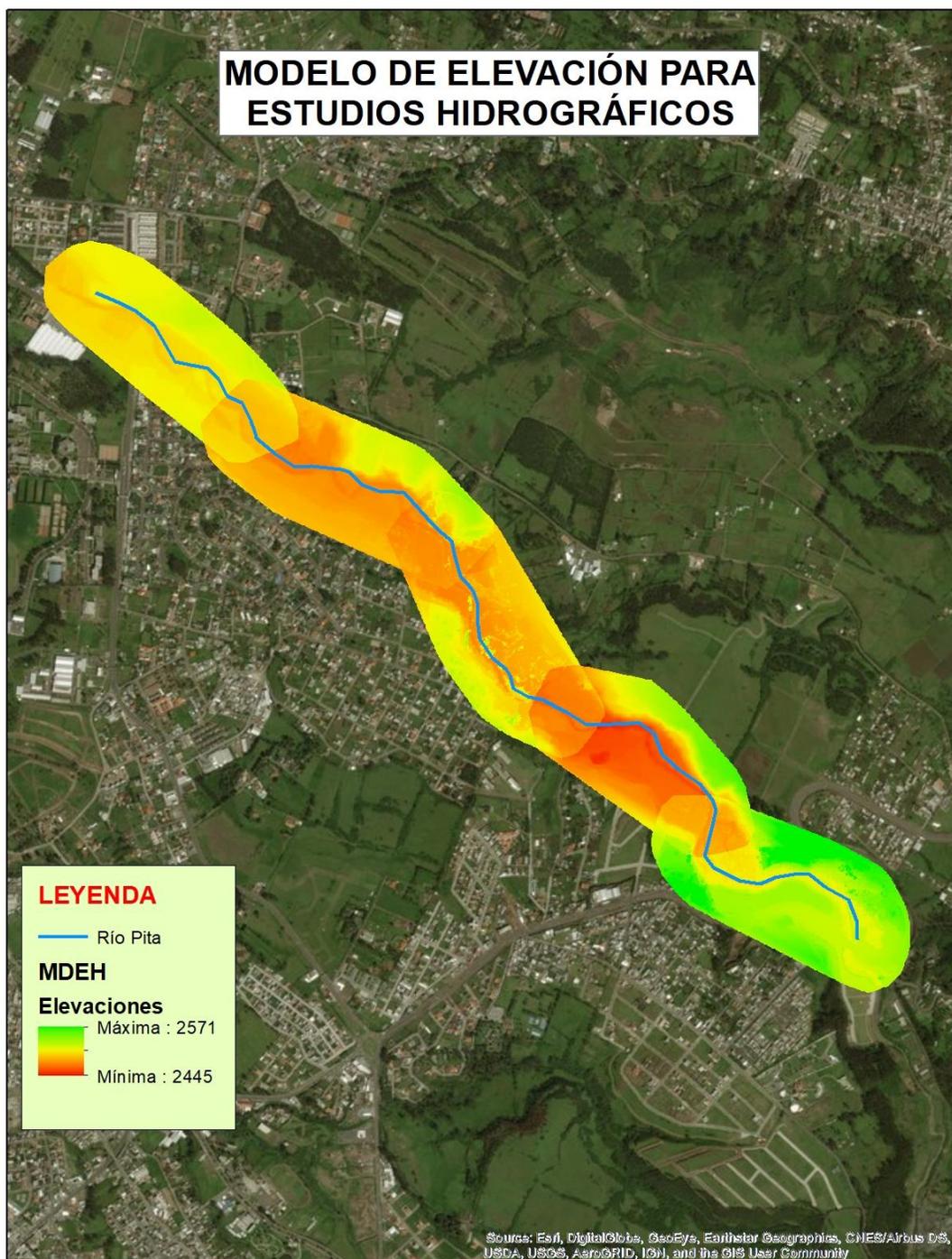


Figura 28. Modelo de elevación para estudios hidrográficos.

4.6. Modelamiento en Hec-Ras

4.6.1 Creación del proyecto

4.6.1.1. Archivo de geometría

La creación del archivo de geometría se realizó mediante la extensión de Hec GeoRas de ArcGIS, para esto se utilizó el MDEH y la ortofoto. Para ello, se dibujó el esquema del río en dirección aguas arriba hacia aguas abajo.

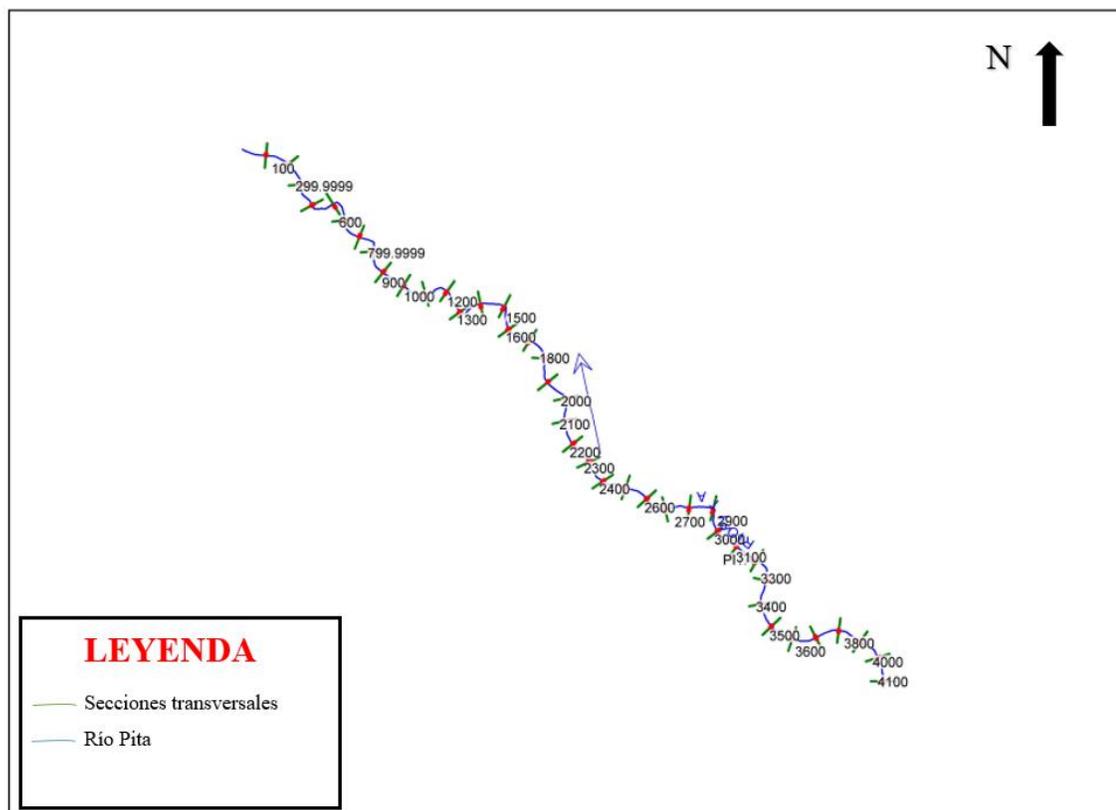


Figura 29. Geometría del Río Pita.

Una vez que se creó el esquema del río, se realizó la creación de las secciones transversales con las siguientes características: nombre, coordenadas de la sección, distancia entre secciones, coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035 por tratarse de un canal natural con abundante vegetación, márgenes del cauce principal, coeficientes de expansión y contracción del cauce.

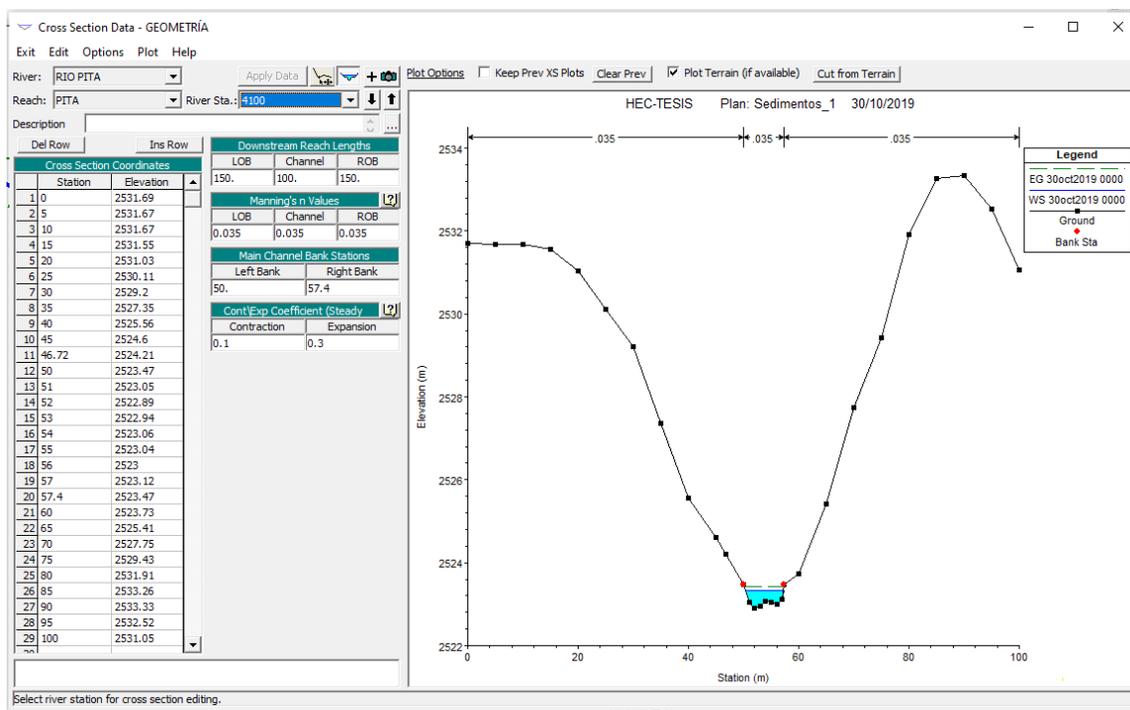


Figura 30. Ventana de datos de secciones transversales.

4.6.1.2. Granulometría de secciones transversales

Después de realizar el análisis con las muestras de los diferentes puntos se observó que la mayor parte de la muestra pasó por los tamices, por lo que se puede notar que existe un predominio de grava fina. Al realizarse la curva granulométrica con el agregado fino se encuentra que es un suelo arenoso.

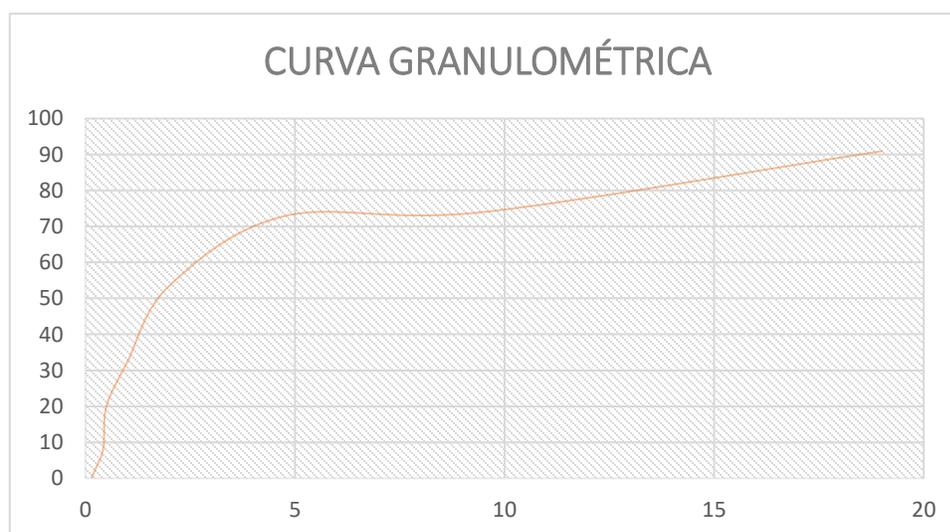


Figura 31. Curva granulométrica.

4.6.2. Desarrollo de simulación de caudales y sedimentos

4.6.2.1. Caudales de modelamiento

Los caudales con los que se realizó el modelamiento de transporte de sedimentos son los siguientes:

- Caudal medio calculado para la cuenca del río Santa Clara
Caudal 1 = $11.85 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal calculado promedio medido con molinete para las 3 secciones
Caudal 2 = $2.653 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal máximo para un periodo de retorno de 10 años
Caudal 3 = $256.77 \text{ m}^3/\text{s}$

A continuación, se presenta las figuras resultantes de la simulación de sedimentos con los diferentes caudales.

Las siguientes gráficas muestran una comparación temporal de la variación del lecho del río Pita. En negro se muestra el estado actual y en azul la variación después de un tiempo determinado.

- CAUDAL 1

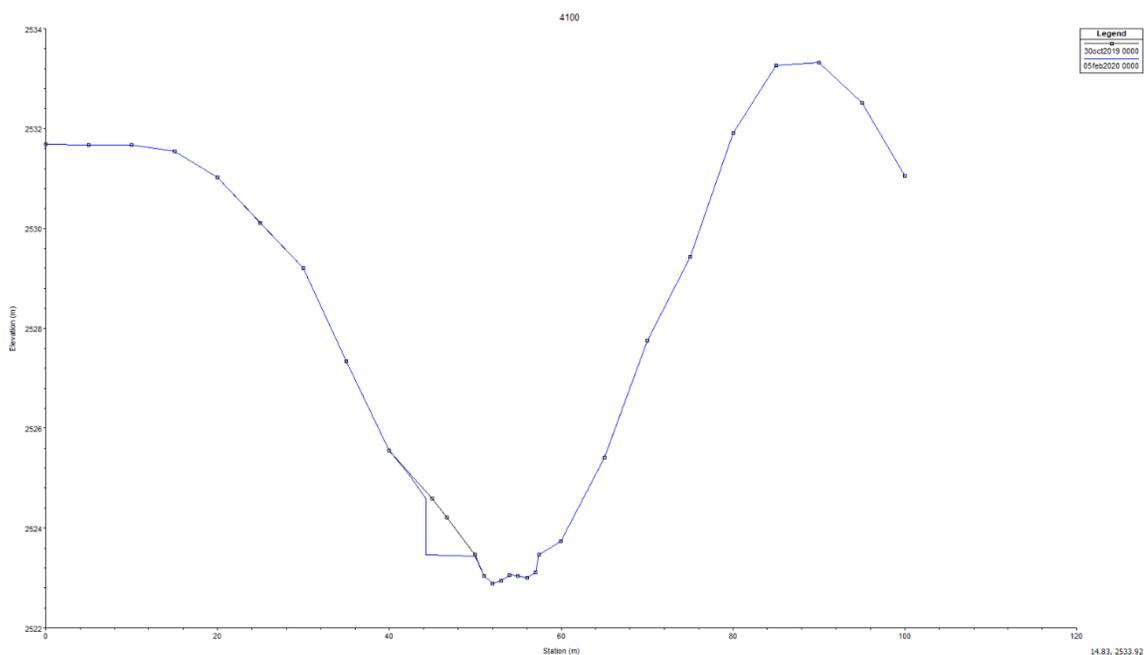


Figura 32. Modelamiento sección de control 1.

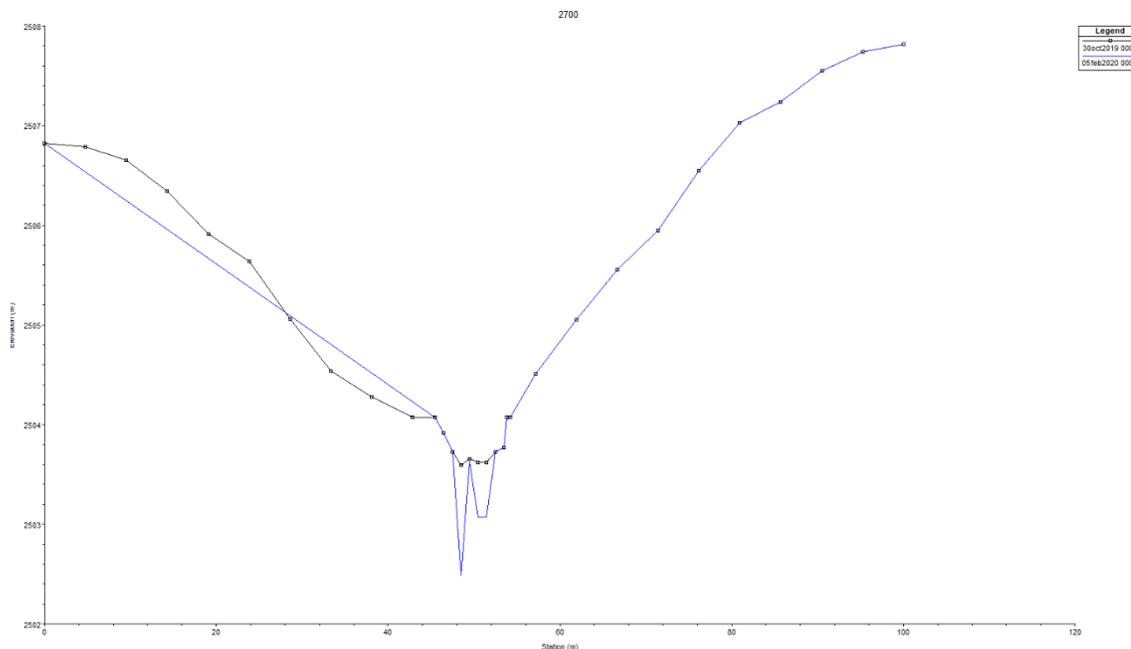


Figura 33. Modelamiento sección de control 2.

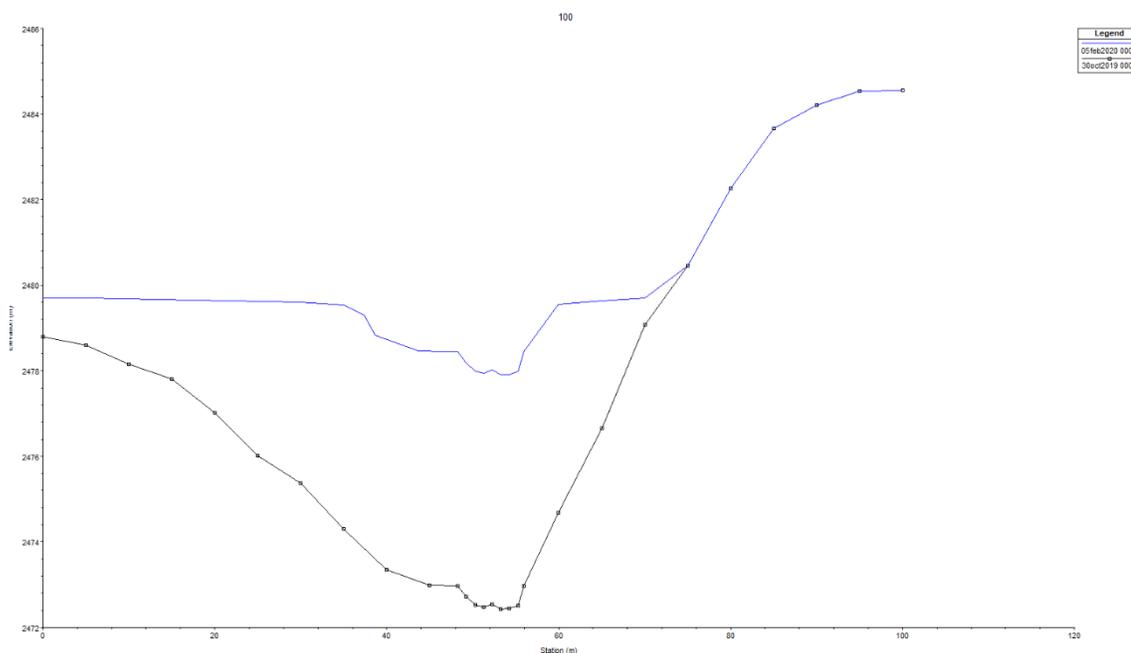


Figura 34. Modelamiento sección de control 3.

Las figuras anteriores muestran que la sección 3 es la que presenta una mayor variación en su lecho debido a que el modelamiento no posee una continuidad espacial y los sedimentos se acumulan en este perfil que es el final del modelo.

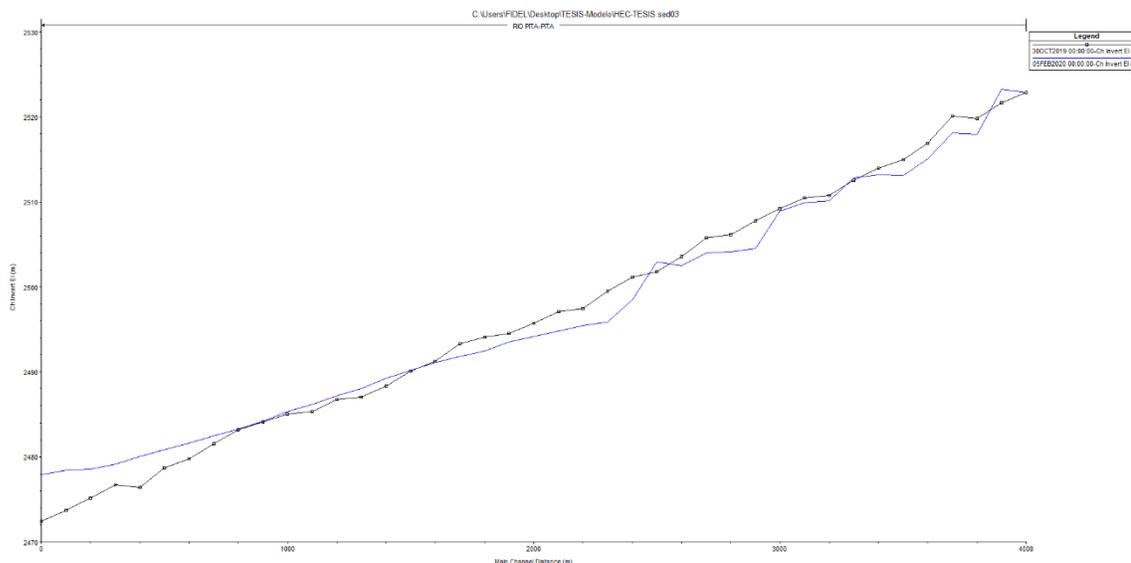


Figura 35. Variación del perfil longitudinal.

- CAUDAL 2

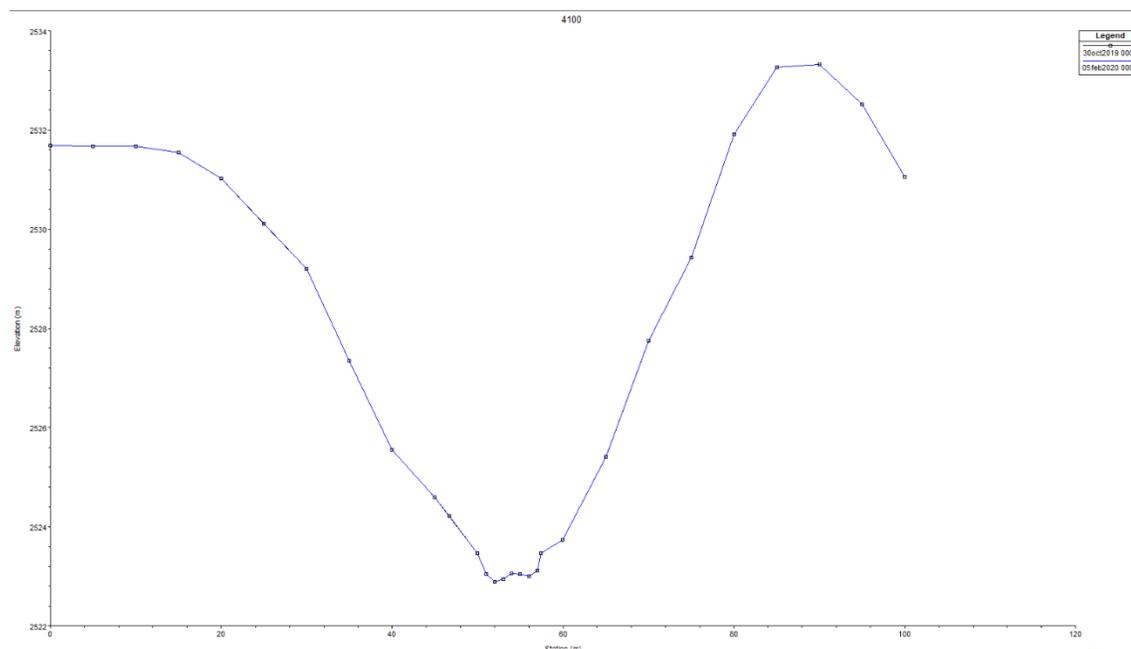


Figura 36. Modelamiento sección de control 1.

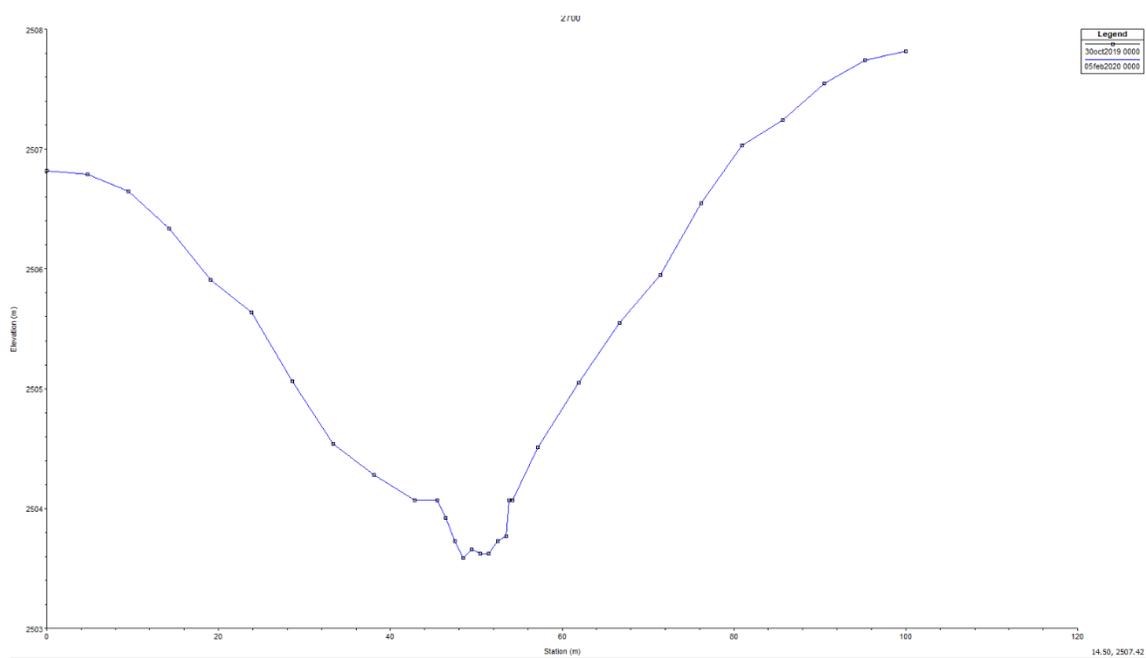


Figura 37. Modelamiento sección de control 2.

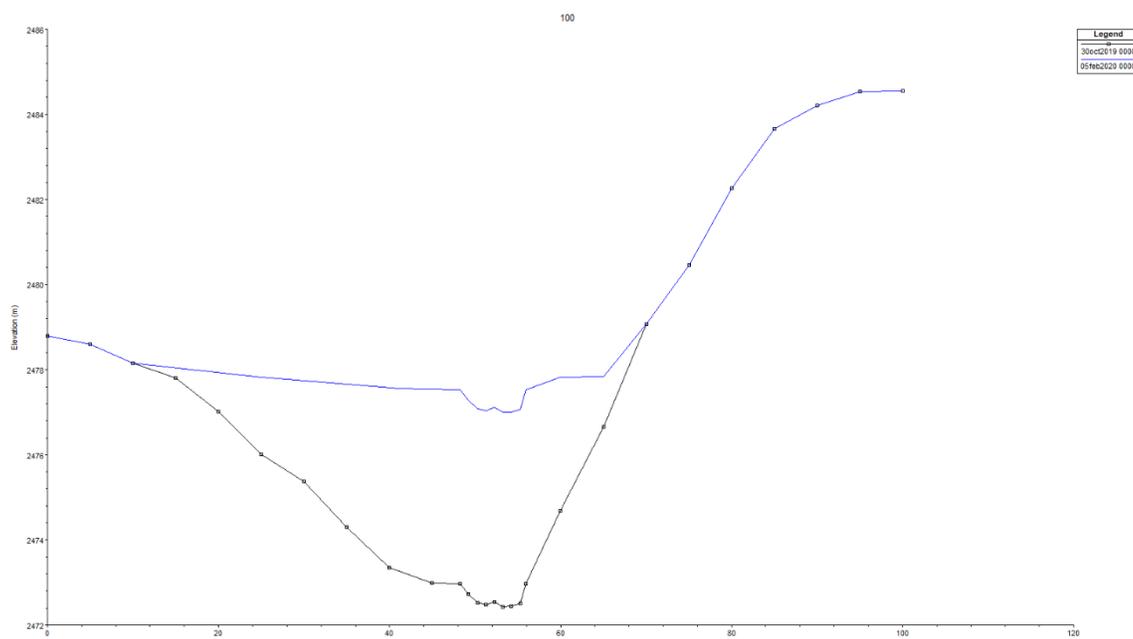


Figura 38. Modelamiento sección de control 3.

De la misma forma que en el modelamiento con el caudal 1, los cambios más significativos se logran visualizar en la sección 3, debido a que en este caso el modelamiento tiene su final en esta sección.

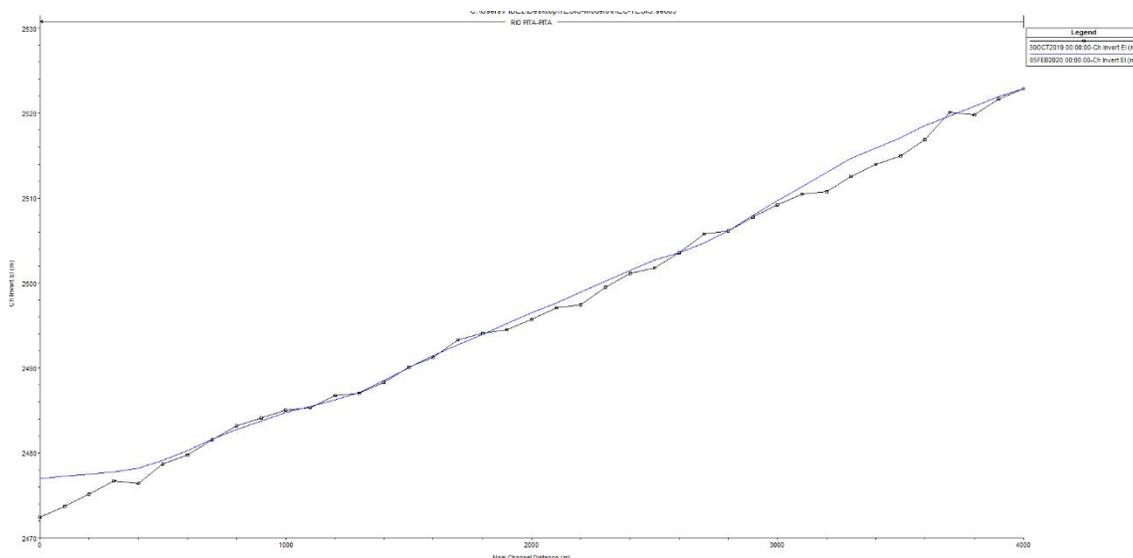


Figura 39. Variación del perfil longitudinal.

- CAUDAL 3

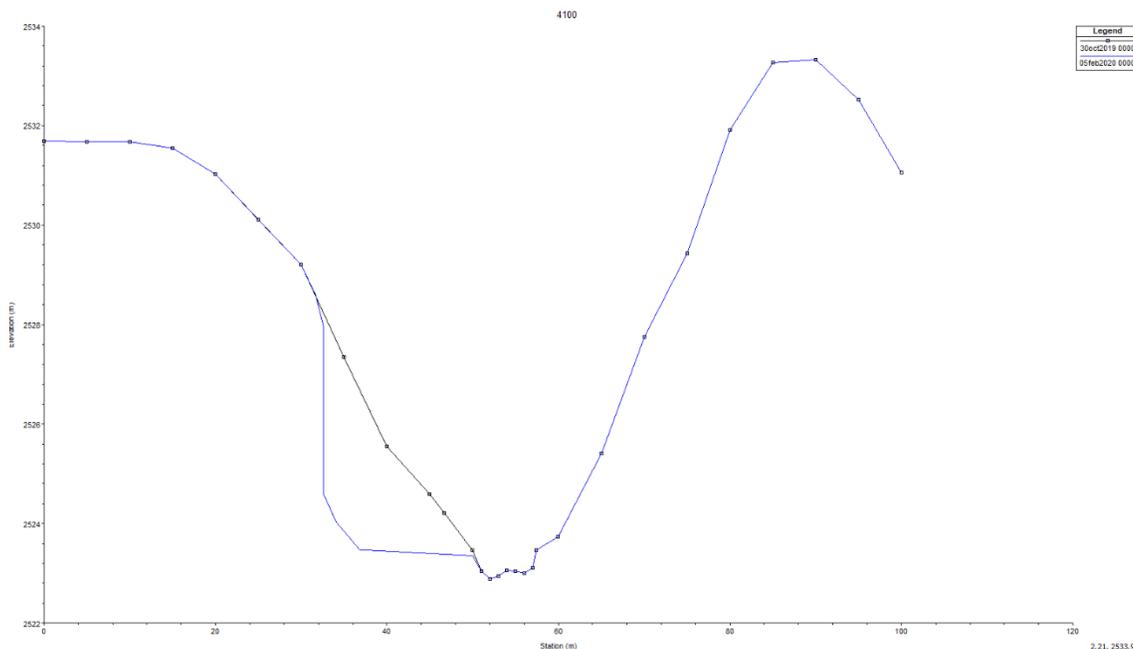


Figura 40. Modelamiento sección de control 1.

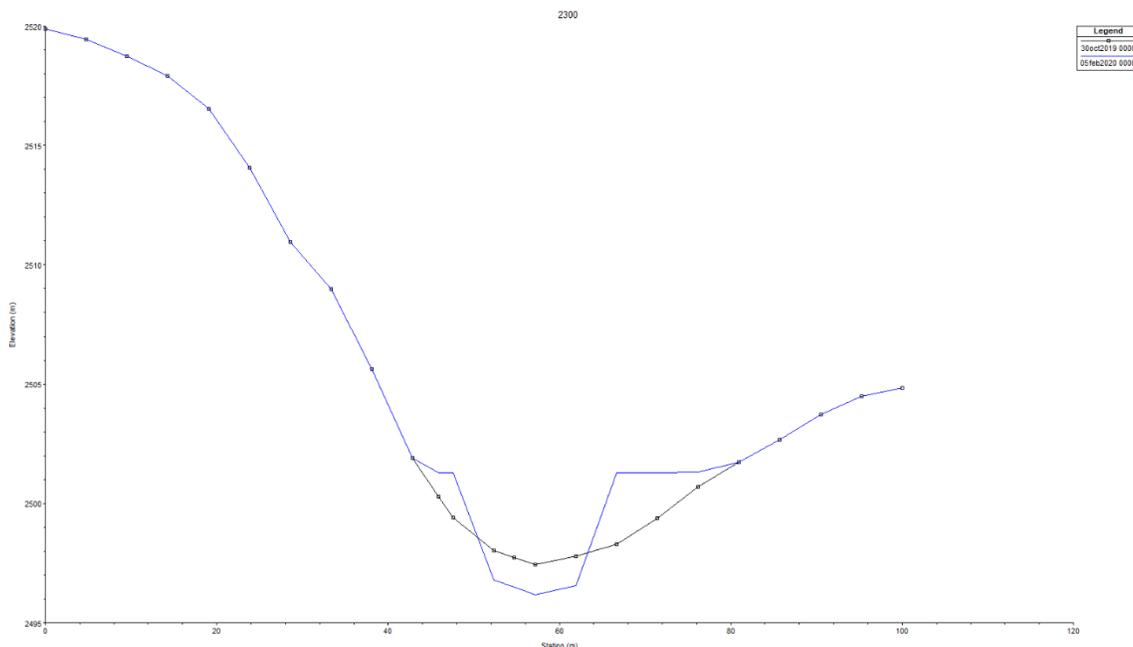


Figura 41. Modelamiento sección de control 2.

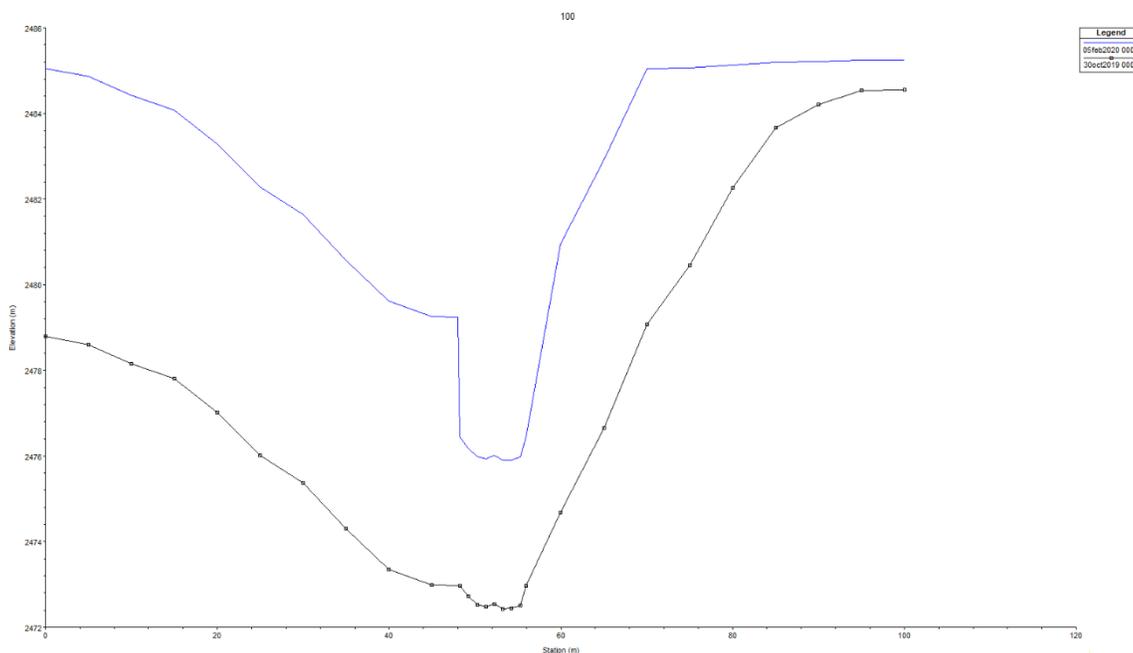


Figura 42. Modelamiento sección de control 3.

El modelamiento con el caudal 3 es el que más cambios presenta a lo largo de las secciones y sobre todo del perfil longitudinal, sin embargo, se puede observar que al igual que en las simulaciones anteriores, en la sección 3 se acumulan todos los sedimentos arrastrados a lo largo del río.

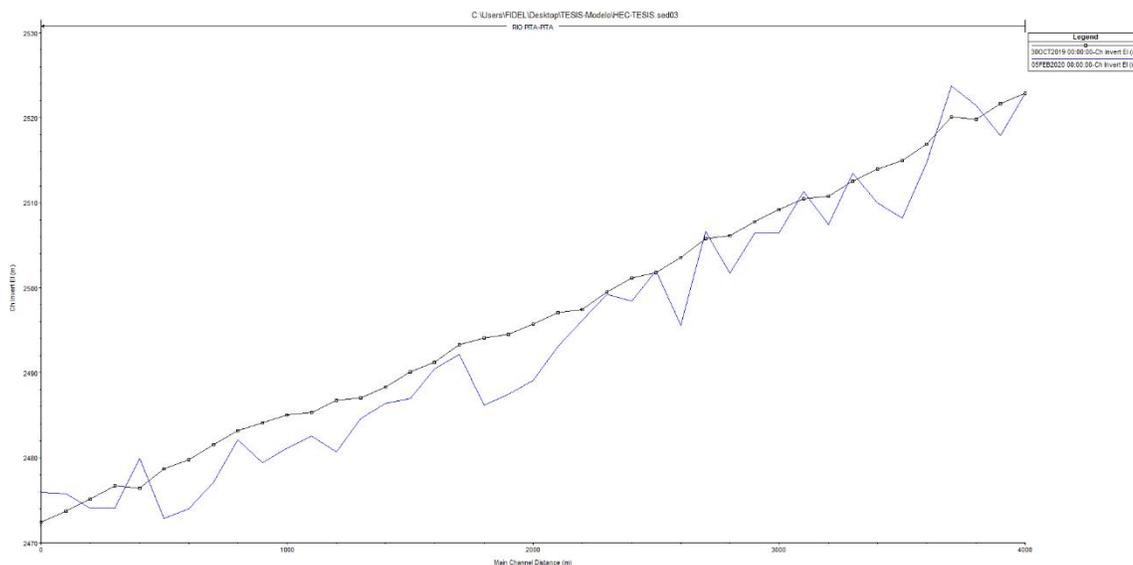


Figura 43. Variación del perfil longitudinal.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- La producción de sedimentos por erosión calculada mediante la ecuación universal de pérdida de suelo fue de 3382 t/año, mientras que los datos obtenidos mediante la toma de muestras en la sección de estudio fueron de 2632 t/año. Si bien la diferencia es de 23%, se debe tener en cuenta que el monitoreo y toma de muestras en cada punto se realizó en época de estiaje.
- Con la caracterización de los parámetros geomorfológicos obtenidos de la cuenca del Río Pita, se determinó que la cuenca tiene una forma ligeramente alargada y posee una pendiente media de 5.84 %. También se determinó que la densidad de drenaje es moderada, lo que refleja que es una cuenca que, si bien no se encuentra en el rango de tener problemas de drenaje, podría tener una respuesta hidrológica lenta. De acuerdo a la curva hipsométrica, esta cuenca se encuentra en una fase de equilibrio (madurez).
- Una vez realizado el estudio de campo se eligió 3 secciones a lo largo del cauce del Río Pita, en las cuales se realizó el aforo correspondiente mediante la metodología de flotadores y molinetes. Los caudales obtenidos mediante el método de aforamiento fueron de 2.639 m³/s, 2.647 m³/s y 2.675 m³/s siendo estos resultados que no varían significativamente, por lo que se estima que no existen afluentes y aporte subterráneo que aumente el caudal en este tramo. El monitoreo de los puntos sobre el Río Pita fue realizado en época de estiaje, por lo que se puede estimar que este río puede aumentar significativamente en época invernal.
- El proceso de integración de la ecuación universal de pérdida de suelo con los factores expresados en imágenes en formato ráster y procesadas en un SIG, permitió identificar puntos críticos o de riesgo de erosión de la cuenca el Río Pita. El mapa resultante puede ser utilizado como modelo predecible para toma de decisiones. En forma general, este procedimiento demostró que es posible integrar modelos como la USLE a los SIG's, especialmente cuando estos modelos pueden

ser expresados como funciones matemáticas o información a la que se pueda asignar información espacial.

- En el modelo numérico unidimensional realizado mediante el programa Hec-Ras se pudo obtener una aproximación para determinar la variación del lecho del río Pita en un intervalo de tiempo, sin embargo, la acumulación de sedimentos presentado en la sección de control 3 no muestra un modelamiento confiable, esta acumulación de sedimentos se debe a que el modelamiento no posee una continuidad espacial y el programa toma como fin del río a esta sección.

RECOMENDACIONES

- Una vez determinado las zonas susceptibles de erosión de la cuenca del río Pita, se recomienda la forestación y reforestación de las mismas para disminuir la erosión hídrica. Para llevar a cabo este procedimiento se puede tomar de base el mapa de riesgo potencial de erosión presentado en la figura 24.
- La utilización de la ecuación universal de pérdida de suelo entrega valores aproximados basados en distintos parámetros, o de los cuales no se tiene toda la información necesaria, por lo que se recomienda la utilización de este método únicamente si se tiene certeza que la información es correcta.
- La acumulación de sedimentos en el lecho del río, produce cambios en las secciones transversales de este que a largo plazo pueden provocar desbordamientos. El modelamiento mediante el método BSTEM en el programa Hec-Ras resulta eficiente para cuantificar o determinar la variación de estos lechos producidos por el arrastre de sedimentos en los cauces de los ríos, por lo que se recomienda su uso para este tipo de investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beltrán, J., & Ordoñez, D. (2012). Estudio para establecimiento de tasas de arrastre de fondo para el proyecto de generación hidroeléctrica Hidro San Bartolo mediante modelo físico de lecho móvil. *Universidad de Cuenca*.
- Cervantes, A., Ferrerira, A., Guzmán, I., & Villagra, K. (2016). Cuantificación del Transporte de Sedimentos en el río La Estrella, Limón, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29, 86-100. doi:10.18845/tm.v29i6.2905
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- COBINABE. (2010). *Generación y transporte de sedimentos en la cuenca Binacional del río Bermejo*. Buenos Aires.
- Fernández, J., & Gutiérrez, G. (2016). Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89-104.
- Flores, H., Martínez, M., Oropeza, J., Mejía, E., & Carrillo, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra Latinoamérica*, 21, 233-244.
- Freile, J., & Fabara, J. (2009). La sublime y trágica historia del valle del Pita. *Terra Incognita*.
- Fundación Futuro Latinoamericano. (2012). *Diagnóstico de gobernanza del agua de la microcuenca del río Pita*. Ecuador: FONAG.
- García, J. (2017). *Simulación física y numérica del depósito de sedimentos a la entrada de un embalse*. México: Ciudad Universitaria.
- Guerra, V. (1998). *HEC-RAS Sistema de análisis de ríos*. México: Instituto de Ingeniería Civil. Departamento de hidráulica.
- INAMHI. (2016). *Anuario Meteorológico*. Quito: Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología.
- INEC. (2011). *Resultados del censo de la población 2010*. Ecuador.
- INIFAP. (2007). *Predicción de riesgo a la erosión hídrica a nivel microcuenca*. San Luis: SAGARPA.

- Iroume, A. (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque*, 24, 125-35.
- Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la Rusle para el manejo de coberturas vegetales. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 217-235.
- Montoya, L., & Montoya, R. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de antioquia. *Revista Ingenierías*, 128-140.
- ONU. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago: Naciones Unidas.
- Organización Mundial Meteorológica. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas*. Suiza: OMM.
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R., & Balocchi, F. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*. Montevideo, Uruguay.
- Porrut, P. (1995). *El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía*. Quito: Corporación editora nacional.
- RAE ASALE. (07 de 2019). *Erosión*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/?id=G37i3AA>
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38.
- Salmerón, D. (2017). *Simulación física y numérica del depósito de sedimentos a la entrada de un embalse*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sandoval, W., & Aguilera, E. (2014). Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica. *UNEMI*, 100-110.
- Sani, J., Tierra, A., & Morillo, A. (2014). Vehículos aéreos no tripulados - UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS - ECUADOR. *SIRGAS 2014*. La Paz.
- Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones. (2012). *Proyecto de adaptación al impacto del retroceso acelerado de glaciares en los andes tropicales*. Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

- SENPLADES. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida*. Quito: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.
- Silva, W., & Rivera, J. (2016). Guías para la Elaboración de Estudios de Transporte de Sedimentos para la Extracción de Material en los Ríos de Puerto Rico. *Departamento de Recursos Naturales y Ambientales*. doi:10.13140/RG.2.2.15467.54563.
- Tolón, A., & Lastra, X. (2009). *Actas del III seminario internacional de cooperación y desarrollo en espacios rurales iberoamericanos. Sostenibilidad e indicadores*. Almería, España.
- World Vision. (s.f.). *Manual de Manejo de Cuencas*. Canadá: World Vision.
- Zaccagnini, M., Wilson, M., & Oszust, J. (2014). *Manual de buenas prácticas para la conservación del suelo, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos*. Buenos Aires: PNUD.
- Zambrano, J. (2015). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basada en SIG. *Flumen*.

ANEXOS