UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

TEMA:

"APLICACIÓN DE HIDROGRAMAS SINTÉTICOS SCS PARA EL MODELAMIENTO DE CRECIDAS EN LOS RÍOS PUYO Y PINDO"

AUTOR:
José Carlos Paredes López.

TUTOR:
Dr. C. Ricardo Abril

PASTAZA - ECUADOR
2021

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Quien suscribe PAREDES LÓPEZ JOSÉ CARLOS con C.I. 72723492, hace constar que es autor del Trabajo de Integración Curricular titulado: "Aplicación de Hidrogramas Sintéticos SCS para el modelamiento de crecidas en los ríos Puyo y Pindo", el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, PhD. Abril Saltos Ricardo. En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 24 días del mes de febrero del 2021.



_____

PAREDES LÓPEZ JOSÉ CARLOS

CI: 72723492

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación: "Aplicación de Hidrogramas Sintéticos SCS para el modelamiento de crecidas en los ríos Puyo y Pindo".



Firmado electrónicamente por:

JULIO CESAR MUNOZ RENGIFO

Dr. Julio César Muñoz Rengifo, Ph.D.
Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:

DARWIN JAVIER SUCOSHANAY VILLALBA

Dr. Darwin Javier Sucoshañay Villalba
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:

SANTIAGO NICOLAS AGUIAR NOVILLO

Msc. Santiago Nicolás Aguilar Novillo.
Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL SISTEMA ANTI PLAGIO

Quien suscribe el presente Dr/Msc Ricardo Abril con CI:1803113321 certifica que el Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: "Aplicación de Hidrogramas Sintéticos SCS para el modelamiento de crecidas en los ríos Puyo y Pindo", ha sido examinado a través del sistema Antiplagio URKUND y presenta un porcentaje de similitud del 2 %.

En el cantón Pastaza, a los 17 días del mes de Febrero del 2021.





Firmado electrónicamente por:

RICARDO VINICIO ABRIL SALTOS

Dr. Ricardo Abril

Director del Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo Paredes López José Carlos, declaro que el presente proyecto de investigación, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular.



_____

PAREDES LÓPEZ JOSÉ CARLOS

CI: 72723492

DEDICATORIA

Sin duda alguna este logro va dedicado principalmente a mis padres Paula y Rovinjut, que, aunque estando lejos me hacían sentir su cercana presencia; a mis abuelos Daniel, Lidia, Alfonso (que en paz descansen) y a Eva, quienes desde pequeño me inculcaron conocimiento, aprendizaje y valores.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy infinitamente gracias a Dios por haberme dado fuerza y valor para aventurarme en un lugar completamente desconocido y gracias a ello culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco también la confianza y el gran apoyo brindado por parte de mi madre Paula López Coloma, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. A mi padre Rovinjut Paredes Vásquez, por ser el apoyo en mi carrera y sé que está orgulloso de la persona en la cual me he convertido.

A mi tutor Ricardo Abril, por su apoyo, paciencia y conocimientos brindados. Un agradecimiento especial a Nancy Borja quien ha estado apoyándome en las buenas, en las malas y las peores, por ser mi compañía, mi dirección y mi alegría; muchas gracias.

Para finalizar gracias a la Universidad Estatal Amazónica por abrirme sus puertas y acogerme cálidamente.

RESUMEN

Las constantes precipitaciones que ocurren en la ciudad del Puyo traen como consecuencia el aumento del caudal de los ríos que la rodean; las zonas más bajas de la ciudad han sufrido en constantes ocasiones por las inundaciones generadas por la crecida de los ríos, lo que ha dejado como consecuencia incuantificables pérdidas materiales y humanas. Esta investigación tiene por objetivo Identificar las zonas vulnerables a inundaciones por eventos hidrometeorológicos extremos (avenidas) en los ramales Pindo y Puyo del Río Pastaza mediante la aplicación de hidrograma sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos. Se realizaron cálculos morfológicos en las cuencas hidrográficas de los ríos mencionados; y en base a los datos de precipitación del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), se establecieron lluvias de diseños para cinco periodos de retorno (2, 5, 10, 25 y 50 años). Como resultado se obtuvo una intensidad de lluvia máxima de 78.16 mm/h para periodo de retorno de 50 años, el río Puyo puede generar caudales que sobrepasan los 194.5 m^3/s; y el río Pindo puede sobrepasar los 95 m^3/s.

En los resultados de la simulación de inundación del tramo del río Puyo ubicado entre el malecón turístico y el barrio "La Isla", la profundidad puede incrementar a 2.9 m y la velocidad puede llegar a 3.168 m/s, esta zona fue identificada como una zona vulnerable a inundaciones. Se concluye que en las precipitaciones existentes pueden generar caudales elevados dentro de los ríos Pindo y Puyo, pudiendo ocasionar inundaciones.

Palabras Clave: hidrograma sintético, caudal, inundaciones, precipitación, vulnerable.

ABSTRACT

The constant rainfall that occurs in the city of Puyo brings as a consequence an increase in the flow of the rivers that surround it; The lower areas of the city have suffered on constant occasions from floods generated by the rising rivers, which has left unquantifiable material and human losses as a consequence. The objective of this research is to identify the areas vulnerable to flooding due to extreme hydrometeorological events (avenues) in the tributaries of the Pindo and Puyo rivers through the application of a synthetic hydrograph of the United States Soil Conservation Service (SCS). In order to fulfill the proposed objective, morphological calculations were carried out in the hydrographic basins of the rivers mentioned above; Likewise, based on precipitation data from the country's meteorological institute, design rains were established for five return periods (2, 5, 10, 25 and 50 years). As a result, it was obtained that the Puyo River generates a high flow in events of great precipitation, while the Pindo River, despite having more tributaries, will present a low flow. The sector or section of the Puyo River located between the tourist boardwalk and the La Isla neighborhood was identified as a zone vulnerable to flooding, the water can reach great depths. It is expected that this research can serve as a basis for future hydrological studies of the main rivers of the city, being able to further determine their dynamics and the interaction they present with the land use of the province.

Key Words: synthetic hydrograph, flow, floods, precipitation, vulnerable.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO I 16
1.1 INTRODUCCIÓN 16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
1.3 OBJETIVOS 19
1.3.1 Objetivo general 19
1.3.2 Objetivos específicos 19
1.4 JUSTIFICACIÓN 20
CAPÍTULO II 21
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 21
2.1 Conceptos generales 21
2.1.1 Agua 21
2.1.2 Modelación del cambio climático 21
2.1.3 Ciclo hidrológico 22
2.2 Variables hidrológicas 22
2.2.1 Precipitación 22
2.2.2 Evaporación 22
2.2.3 Temperatura 23
2.2.4 Caudales 23
2.3 Hidrografía en ecuador 23
2.3.1 Vertientes del pacífico 24
2.3.2 Vertientes del Amazonas 24
2.4 Contexto geológico 25
2.4.1 Caudal del río Puyo 25
2.4.2 Caudal del río Pindo 25
2.5 Cuenca hidrográfica 25
2.5.1 Características morfométricas de la cuenca 26
2.5.2 . Tiempo de concentración 27
2.5.3 Índice de Compacidad de Gravelius 27
2.5.4 Tiempo de retraso 28
2.5.5 Propiedades morfométricas 28
2.6 Hidrogramas 29
2.7 Modelamiento hidrológico de crecidas 30
2.8 Modelos hidrológicos 30
2.8.1 Modelo hidrológico HEC-RAS 30
2.8.2 Modelo hidrológico HEC-HMS 31

2.9 Método de transformación 31
2.9.1 Hidrograma unitario sintético SCS 31
2.9.2 Factores que afectan la infiltración según el método del SCS 34
2.9.3 Método de recesión para la estimación del flujo base 34
2.10 Gestión integrada de crecidas 35
2.10.1 Inundaciones 36
2.10.2 Elementos de la gestión integrada de crecidas 36
2.10.3 Tipos de crecidas 37
2.10.4 Acciones ante eventos de crecida 38
CAPÍTULO III 39
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 39
3.1 Localización 39
3.1.1 Delimitación la cuenca hidrográfica del río Pindo y río Puyo (área de estudio). 39
3.1.2 Coordenadas de las intersecciones de los ríos 40
3.2 Tipo de investigación 41
3.3 Métodos de investigación 41
3.3.2 Parámetros de las microcuencas 42
3.3.3 Estimación de la lluvia de diseño 45
3.3.4 Modelamiento de crecida en HEC-HMS 46
3.3.5 Mapa de inundaciones 50
CAPÍTULO IV 52
4. RESULTADOS 52
4.1 Características geomorfológicas de los principales afluentes de los ríos Puyo y Pindo: 52
4.2 Lluvia de proyecto (o lluvia de diseño) para las parroquias Puyo Shell y Tarqui en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 53
4.3 Modelamiento de crecida con el programa HEC-HMS de los afluentes de los ríos Puyo y Pindo 54
4.4 Modelo de inundabilidad de los sectores más vulnerables del centro urbano de la parroquia Puyo. 74
4.4.1 Simulación de inundación en el sector: La Isla, en la ciudad del Puyo. 74
4.4.2 Simulación de inundación del río Pindo en el sector: El Dorado, en la ciudad del Puyo. 76
CONCLUSIONES 78
RECOMENDACIONES 79
REFERENCIAS 80

Índice de figuras

Figura 1. Hidrograma adimensional SCS. Tomado de "Estudio de la Factibilidad para el Encausamiento con Enrocado para proteger el puente ubicado sobre el río Congo en el Recinto La Carlota del Cantón Balza," de M.L Párraga Muñoz, 2015 32
Figura 2. Hidrograma Unitario adimensional (curvilíneo) y su equivalencia con el hidrograma triangular. Obtenido de Modelación Hidrológica de eventos de crecida para el sistema de alerta temprana ante inundaciones en la cuenca del río Catamayo**,** de Castillo, 2017. 34
Figura 3. Método de recesión para la estimación del flujo de base en el hidrograma de crecida. Obtenido de "Caudal de crecida del río Grande, Chone", de Sandoval & Aguilera, 2013. 35
Figura 4. Pasos para determinar una cuenca hidrográfica 39
Figura 5. Mapa de las subcuencas de los ríos Pindo, Motolo, Plata, Pindo Chico, Pindo Grande, Salomé, Puyo y Pambay..... 40
Figura 6. Curvas IDF para la estación M008 Puyo. Tomado de "Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación", por INAMHI, 2019. 45
Figura 7. Proceso de elaboración para el modelamiento de crecida. 46
Figura 8. Nuevo proyecto en el programa HEC-HMS (paso 1 y 2). 47
Figura 9. Establecer un nuevo modelo de cuenca (pasos 3, 4 y 5). 47
Figura 10. Pasos para realizar el esquema gráfico de las subcuencas (pasos 7 – 10). 48
Figura 11. Pasos para agregar el mapa base y la red de drenaje (pasos 11, 12 y 13). 48
Figura 12. Configuración de los métodos de pérdida, transformación y base de caudal. 49
Figura 13. Componentes del software para el modelamiento de la crecida. 50
Figura 14. Diagrama de flujo para elaboración del mapa de inundaciones. 51
Figura 15. Cuenca y subcuencas del río Pindo y Puyo, previo modelamiento en el HEC-HMS. 55
Figura 16. Simulación de crecida del río Motolo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 56
Figura 17: Pérdida de precipitación en el río Motolo. 57
Figura 18. Simulación de crecida del río Pindo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 58

Figura 19. Pérdida de precipitación en el río Pindo. 59
Figura 20. Unión de caudales de los ríos Motolo y Pindo. 60
Figura 21. Simulación de crecida del río Plata en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 61
Figura 22. Pérdida de precipitación en el río Plata. 62
Figura 23. Unión de caudales de los ríos Plata y Pindo. 63
Figura 24. Simulación de crecida del río Pindo Chico en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 64
Figura 25. Pérdida de precipitación en el río Pindo Chico. 65
Figura 26: Unión de caudales de los ríos Pindo y Pindo Chico. 66
Figura 27. Simulación de crecida del río Salomé en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 66
Figura 28. Pérdida de precipitación en el río Salomé. 67
Figura 29. Unión de caudales de los ríos Salomé y Pindo Grande. 68
Figura 30. Simulación de crecida del río Puyo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 69
Figura 31. Pérdida de precipitación en el río Puyo. 70
Figura 32. Simulación de crecida del río Pambay en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. 71
Figura 33. Pérdida de precipitación en el río Pambay. 72
Figura 34. Unión de caudales de los ríos Puyo y Pambay. 73
Figura 35. Simulación de inundación del río Puyo, sector La Isla, parámetro: velocidad. 75
Figura 36. Simulación de inundación del río Puyo, sector La Isla, parámetro: profundidad. 75
Figura 37. Simulación de inundación del río Pindo, sector El Dorado, parámetro: profundidad. 76
Figura 38. Simulación de inundación del río Pindo, sector El Dorado, parámetro: velocidad. 77

Índice de tablas

Tabla 1: Rangos del índice de compacidad. _____28
Tabla 2: Parámetros morfológicos de una Cuenca Hidrológica. _____29
Tabla 3: Coordenadas de los ríos en estudio._____40
Tabla 4 Pasos para determinar el número de curva NC. _____44
Tabla 5 Ríos y parámetros necesarios para el modelamiento en el HEC-HMS. _____46
Tabla 6 Parámetros hídricos y geomorfológicos para el modelamiento de crecida de los ríos Puyo y Pindo. _____52
Tabla 7: Lluvia diseño para la ciudad del Puyo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. en milímetros/ hora (mm/h)._____53

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es considerada un recurso fundamental para la vida y un factor esencial para el desarrollo social y económico, debido a esto, desde tiempos remotos el ser humano se ha interesado en su estudio. Los ríos forman un importante sistema de circulación jerarquizado y estructurado para trasladar sedimentos y fluidos vitales (agua) a través de las Cuencas Hidrográficas y sus desembocaduras, realizando complejas reacciones dinámicas, mecánicas, entre otras, con el propósito de dar sustento en todo su recorrido a la vida en sus diferentes formas (Campoblanco & Gomero, 2000). La precipitación y distribución del agua, así como la determinación de caudales en cuencas hidrográficas ha sido motivo de diversos estudios hidrológicos. En el transcurso de los años, los hidrólogos han usado distintos métodos para el cálculo de caudales máximos en cuencas hidrográficas, se utilizaron métodos empíricos como las avenidas históricas, curvas envolventes, fórmulas empíricas, etc. Actualmente existen métodos hidrometeorológicos (Método Racional, los Hidrogramas Unitarios, Tradicionales, Complejos y Sintéticos, como los de Snyder, Triangular y SCS) como estadísticos (puntuales y regionales.) para el cálculo de estos caudales máximos.

Es importante mencionar que en la actualidad existen programas de computadora (Softwares), que realizan con mayor eficiencia los cálculos de caudales máximos en una cuenca hidrográfica, entre los cuales se pueden mencionar los softwares desarrollados por el cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, tal como el HEC-HMS, el HBV, entre otros, los cuales son utilizados en diferentes partes del mundo entre los que se encuentra nuestro país. La hidrología por supuesto es una ciencia aplicable a todas las áreas del conocimiento y en este caso de enorme trascendencia para el área de la Ingeniería Ambiental y afines.

El presente trabajo constituye una aproximación mediante simulaciones de las crecidas de caudal en los principales ríos de la Subcuenca del río Puyo y Pindo, a base de precipitaciones que se han presentado en las parroquias de Puyo, Shell y Tarqui de la Provincia de Pastaza, en base de datos obtenidos por la estación meteorológica Puyo (M008) publicadas oficialmente por el Instituto Nacional de Meteorología e hidrología,

y la simulación de inundaciones de los sectores más vulnerables de las parroquias mencionadas, estos estudios pretenden servir para futuros estudios de la rama.

El proyecto fue aplicado en las parroquias Puyo, Shell, y Tarqui de la provincia de Pastaza que se encuentra dentro de la región amazónica del Ecuador, una de las provincias más lluviosas del país que está rodeada por distintos cauces de agua (ríos); aunque estas parroquias presentan gran cantidad de recursos hídricos no existe un estudio que correlacione las características geomorfológicas e hídricas de sus ríos en conjunto, es por ello que este busca establecer modelos de crecida (aproximados) de los cauces de los ríos que rodean dichas parroquias para poder observar su comportamiento y en un futuro utilizar esta información para establecer zonas de vulnerabilidad e inundabilidad dentro de las parroquias. Este Trabajo de Integración Curricular tuvo una duración de seis meses y consta en su totalidad de revisión bibliográfica y el manejo de datos obtenidos a la fecha de trabajos de titulación situados en el repositorio de la Universidad Estatal Amazónica y de proyectos vinculación con la sociedad.

La investigación está basada en la aplicación de hidrogramas sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos realizados en el software HEC–HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) para generar un modelamiento de crecida en los principales ríos de la subcuenca de los ríos Puyo y Pindo de las parroquias Puyo, Shell y Tarqui; así mismo se trabajó en la creación de simulaciones de inundación en el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center y River Analysis System) en las partes del río aledañas a poblaciones o asentamientos humanos para identificar lugares de alto riesgo a inundaciones. Se utilizó estos softwares debido su flexibilidad, se adaptan a los parámetros e información que se maneja, son de libre acceso y permiten realizar modelaciones detalladas, siendo ideales a las condiciones actuales que no nos permiten realizar investigación de campo. Los resultados de esta investigación permitirán tener una mejor comprensión de la dinámica de los ríos que se encuentran en las parroquias antes mencionadas, a su vez pueden servir como base para futuros proyectos de manejo de cuencas hidrográficas, así como para diagnosticar las zonas pobladas más vulnerables a inundaciones.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es conocido que la provincia de Pastaza presenta una de las mayores precipitaciones anuales del país, mayores a 4500 mm (Valera & Ron, 2020); y además que en los periodos más lluviosos del año ocurren eventos hidrometereológicos extremos (avenidas) que ocasionan inundaciones en algunos sectores de sus parroquias, producto del desbordamiento de los ríos; las pérdidas que estas traen como consecuencia son incuantificables debido a que no solo se pierden bienes materiales, sino que en algunos casos cobra vidas humanas. Aunque sabemos el potencial peligro de las inundaciones solo son identificadas en el momento que llegan a ocurrir. Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNRG), en los meses de octubre a diciembre del 2019, se han producido 19 eventos hidrológicos, hecho que produjo que 1590 personas resulten impactadas (damnificadas y afectadas). En la ciudad del Puyo los sectores más propensos a padecer este tipo de eventos son: asentamiento humano La Isla, barrio México, Amazonas y El Obrero; en la parroquia Tarqui: Sector Salomé, en la parroquia Shell: Sector San Antonio. Estas afectaciones suceden porque no hay un estudio que englobe los factores del suelo, las características meteorológicas-climatológicas de la provincia de Pastaza y la geomorfología en los ríos Puyo, Pindo y sus afluentes, que cruzan las parroquias Puyo, Shell y Tarqui, que son necesarios para establecer la dinámica del comportamiento de los ríos previo al momento de los eventos hidrológicos extremos (avenidas), esto en conjunto con la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) permitirá determinar los caudales de crecida en los ríos mencionados, tiempos de descarga máxima, velocidad de caudales, zonas más profundas ante una inundación y evaluar zonas de vulnerabilidad ante inundaciones causadas por avenidas; esto sumado al escaso accionar de las autoridades provinciales y municipales para la prevención de riesgos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Identificar las zonas vulnerables a inundaciones por eventos hidrometeorológicos extremos (avenidas) en los afluentes de los ríos Pindo y Puyo del río Pastaza, mediante la aplicación de hidrogramas sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las características geomorfológicas de los principales afluentes de los ríos Puyo y Pindo.
- Generar la lluvia de proyecto mediante las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de precipitaciones de la estación metereológica Puyo (Curvas IDF) para los periodos de retorno: 2, 5, 10, 25 y 50 años de los afluentes de los ríos Pindo y Puyo que afectan las parroquias Shell, Puyo y Tarqui.
- Generar el modelamiento de crecida de los ríos Pindo y Puyo a través del programa HEC- HMS para los períodos de retorno de 2, 5,10, 25, 50 años que afectan a las parroquias Shell, Puyo y Tarqui.
- Diseñar un modelo de inundabilidad de los sectores más vulnerables del centro urbano de la parroquia Puyo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El interés por el estudio de las cuencas hidrográficas y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) nació en anteriores semestres, esto sumado a las constantes precipitaciones que caen sobre la ciudad fueron el motivo de esta investigación.

La presencia de precipitaciones con altas intensidades genera un incremento dentro de los caudales en los ríos, lo cual a su vez puede generar zonas de inundación dentro de una cuenca, el tener conocimiento de los datos históricos de intensidades de lluvias en diferentes periodos de retorno nos permite conocer y proyectar cuales son las máximas intensidades que se pueden presentar en esos periodos. Con el uso de estas intensidades de precipitaciones y con la ayuda de modelo de hidrogramas unitarios sintéticos como el SCS, los cuales son aplicados dentro softwares especializados como el HEC-HMS nos permite determinar cuáles son los máximos caudales que se pueden presentar dentro de un río de una cuenca y también determinar que zonas pueden presentar problemas de inundación en diferentes periodos de retorno.

La importancia de este proyecto radica en el aporte que se ha generado con respecto al manejo de cuencas hidrográficas, tema que poco avance ha tenido en la provincia de Pastaza y en la ciudad del Puyo. Aunque los aportes que se han generado no han sido los esperados (por el contexto actual), algunos pueden tomarse como base para futuros estudios hidrometereológicos, que combinados con trabajo de campo podrían muestrear de mejor manera la dinámica, comportamiento y la estrecha relación que tienen los eventos hidrometereológicos y las características del suelo.

Aunque las avenidas son fenómenos hidrológicos que son parte de la dinámica y evolución de un río y están relacionadas al desbordamiento del cauce; se pueden evitar con este tipo de estudios y complementándolo con una buena política administrativa de la ciudad, se pueden evitar futuras pérdidas materiales, e incluso humanas.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Conceptos generales

2.1.1 Agua

El agua es la base de toda forma de vida y constituye uno de los líquidos más abundantes del planeta tierra. El agua denominada dulce ocupa solo el 3%, siendo muy escaso en muchos lugares del mundo, este elemento vital se encuentra en diferentes formas (Pereyra, Agustín, & Salas, 2008). El agua es esencial para la vida y para el desarrollo de las sociedades y posee propiedades únicas (Fernández, 2012).

2.1.2 Modelación del cambio climático

Durante los últimos años del siglo XX, el hombre ha incrementado su desarrollo en todos los aspectos de la industria, provocando cambios radicales en la naturaleza, como consecuencia de esto hemos visto la contaminación de mares, ríos, lagunas, aire, en algunos casos provocando la sequía de ciertos lagos y ríos, además de los cambios intensos de temperatura y clima (Días, 2015). El clima influye en el desarrollo de las actividades socioeconómicas de las poblaciones y hoy en día es uno de los retos más fuertes al que debe hacer frente la humanidad, como es la afectación a las cosechas en los campos agrarios debido a las fuertes lluvias o la muerte de animales por el aumento de temperaturas. En los documentales se aprecia claramente el aumento del nivel de agua de los océanos y la disminución de capas de hielo y nieve, el incremento radical de temperatura, lo que ha provocado grandes desastres en distintas zonas geográficas del mundo, como son los incendios forestales, las inundaciones, los vientos extremos, que son producto de las variaciones en las precipitaciones y fenómenos meteorológicos (Useros, 2012).

La modelación climática es un modelo de predicción atmosférica y oceánica, que, mediante ejercicios matemáticos y ciertas variables como la temperatura y precipitaciones, desarrollan predicciones, para tomar las medidas necesarias ante la venida de un fenómeno natural (Días, 2015).

Código de campo cambiado

2.1.3 Ciclo hidrológico

Se estima que el total de agua que existe en la tierra en sus tres fases (sólida, líquida y gaseosa) siempre se ha mantenido constante gracias al ciclo hidrológico del agua. El ciclo del agua está definido como la secuencia de procesos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre en la fase vapor (evaporación, transpiración y sublimación) a la atmósfera, y regresa en fase líquida o sólida nuevamente a la superficie (lluvia, nieve, granizo, etc) (Pereira, *et al*., 2010).

2.2 Variables hidrológicas

Las variables hidrológicas presentan una distribución espacial y temporal, los caudales, temperatura, la evaporación y las precipitaciones son variables registradas con equipos de medición (Aragón, *et al*., 2019).

2.2.1 Precipitación

La precipitación es cualquier forma de agua sólida o líquida que cae de la atmósfera a la superficie terrestre. Esto incluye la lluvia, la llovizna, el granizo y la nieve (Tapia, 2016). Pueden distinguirse tres tipos de precipitaciones: ciclónicas, convección y orográficas (Sánchez, 2021).

2.2.2 Evaporación

La evaporación es el paso que sufren las sustancias del agua que está en estado líquido al vapor (Manzur & Cardoso, 2015). Este proceso es muy importante ya que de toda el agua que se precipita 3/4 regresa a la atmósfera sea por evaporación o por evo transpiración. Este proceso generalmente se produce por el aumento de energía cinética que hace que las moléculas de agua brinquen a la atmósfera (Toledo, 2015).

En situaciones cotidianas la evaporación puede ser muy eficaz para eliminar sales, metales pesados y variedad de materiales peligrosos de solución, un claro ejemplo de esto es el perfume, ya que al aplicarse en el cuerpo y tener contacto con el calor de la piel, éste se evapora dejando las sustancias aromáticas (Suárez, Jácome, & Ures, 2015).

Código de campo cambiado

2.2.3 Temperatura

Este componente permite determinar el correcto funcionamiento de los sistemas acuáticos, tiene una influencia directa en otros componentes del agua como en el oxígeno disuelto. La temperatura de las aguas está ligada a la absorción de radiación solar, afecta la mayoría de los procesos biológicos que tienen lugar en los ecosistemas acuáticos (Soria, Repositorio Universidad Estatal Amazónica, 2015).

Código de campo cambiado

2.2.4 Caudales

Es la cantidad del agua en litros que fluye por una determinada sección, sea esta laguna, arroyo, río o quebrada, durante un período determinado (González, 2014). Conocer el comportamiento hidráulico es importante a la hora de realizar diseños hidráulicos como carreteras, puentes y acueductos, así como también para evitar tragedias e inundaciones en las épocas invernales, ya que es donde aumentan los caudales.

La fórmula que se utiliza para medir un caudal es:

$$Q = \frac{v(m^3)}{t\ (s)}$$

Donde:

Q= caudal en litros por segundo l/S

V= volumen en metros cúbicos (m^3)

T= tiempo en segundos (s)

Se calcula de la siguiente manera:

2.3 Hidrografía en ecuador

El territorio ecuatoriano está conformado por 31 sistemas hidrográficos, estos sistemas corresponden a las dos vertientes hídricas que nacen en la cordillera de los Andes y drenan por el este hacia el Amazonas y por el oeste hacia el Océano pacífico con un número de 24 cuencas. En Ecuador hay abundante agua y la mayor parte se encuentra en la región amazónica, cuyos ríos son caudalosos y rápidos, y tienen amplias zonas navegables (Zuñiga, 2000).

2.3.1 Vertientes del pacífico

El río Chota es una corriente del pacífico que nace en los Olivos entre Imbabura y Carchi, desembocando en el Pacífico con el nombre de Mira. La cuenca del río Esmeraldas, tiene una longitud de 385km, sus afluentes más importantes son el Blanco, el Guayabamba, el Viche y el Tiaone, y desemboca en el puerto de Esmeraldas; el río Guayas que tiene su nacimiento en el norte del país entre Pichincha y Cotopaxi, recibe las aguas de Daule y Babahoyo, siendo éstos formados por los ríos Chimbo y Chanchán, la cuenca del Guayas es la más grande vertiente del Pacífico. El río cañar recorre las provincias de Cañar y Guayas y desemboca en el golfo de Guayaquil. El rio Jubones nace en la sierra sur en la provincia del Azuay con los ríos León, Girón y Rircay San Francisco, se une con el río de la provincia del Oro y desembocan en el Pacífico. El último río de esta vertiente es el Macará que nace en Loja con el nombre de Espíndola, recorre la provincia con el nombre de Calvas y se une al Catamayo formando el Macará, llega con el nombre de Chira al pacífico del Perú (Santiago, 2007).

Código de campo cambiado

La mayor parte de los ríos que desembocan en el pacífico por la región costera son sumamente contaminados en su trayectoria, acarreando grandes cantidades de basura y desechos, provocando la muerte de un sin números de especies marinas, así como enfermedades a las personas que viven en las orillas de los mismos.

2.3.2 Vertientes del Amazonas

Iniciando por el norte de la Amazonía, se tiene al río Putumayo, aunque es un río de origen colombiano recibe las aguas del río San Miguel, que desemboca en el Amazonas. El río Napo inicia en la provincia de Tungurahua y Cotopaxi, recibe aguas de ríos de la provincia de Orellana como son: El río Coca, Aguarico y Curaray, desembocando en el Marañón que posteriormente pasa a llamarse Amazonas. El río Tigre nace en la provincia de Pastaza con los ríos Conambu y Pitayacu, para luego desembocar en el Marañón. El río Pastaza nace en la provincia de Tungurahua con los ríos Cutuchi y Patate, en su recorrido se une con los afluentes de los ríos Palora y

Guasago, que luego llega al Marañón, se considera al río Pastaza como uno de los que comunica el circo interandino con el Amazonas. Finalmente se tiene al río Santiago que nace tras la unión de los ríos Namangoza y Zamora, recibe las aguas de los ríos Nangaritza y Yacuambl de la provincia de Loja, para luego desaguar en el Marañón (Santiago, 2007).

2.4 Contexto geológico

La zona de estudio se ubica dentro del mega-cono aluvial del Pastaza (Baby, et al., 2014), que se desarrolla hacia la cuenca del río Marañón del Perú; está considerada como uno de los abanicos aluviales más grandes del mundo (Räsänen, et al., 1992); caracterizada por presentar rocas cuaternarias y compuesta por las formaciones: Napo, Tena, Arajuno y Mera (Tschopp, 1953; Brito, 1985; Bes de Berc, 2003; Baby, et al., 2014).

2.4.1 Caudal del río Puyo

Es un cauce hídrico permanente que desemboca al río Pastaza alcanza una longitud de 37 km, conforma una subcuenca de aproximadamente 370km^2, en sus orillas se asienta la ciudad de Puyo y comunidades indígenas, que durante época de lluvias afecta a varias zonas de la ciudad y comunidades con grandes inundaciones, además de destruir muebles y enseres (Vallejo, 2019).

Código de campo cambiado

2.4.2 Caudal del río Pindo

Se encuentra en el cantón Mera, nace en la parte baja de la cordillera de Habitagua y posee características de corriente perdurable, sus afluentes son el río Bravo y YuxuYaku, posee una longitud aproximada de 2.548 km, en temporadas de lluvia provoca grandes inundaciones en la zona de la Moravia y el dique de la Shell (Landázuri, 2012).

Código de campo cambiado

2.5 Cuenca hidrográfica

La Organización de los estados Americanos [OEA], (2010) asegura que las cuencas hidrográficas son áreas naturales que recolectan y almacenan el agua que utilizamos para el consumo humano y animal, el área de las cuencas pueden ser superficiales o subterráneas que tiene una forma cóncava, donde se escurre el agua que llueve y vierten a una red hidrográfica natural con uno

o varios cauces. A continuación, se presenta los diferentes tipos de cuencas hidrográficas.

- Arréicas, cuando no logran drenar a un río mar o lago, sus aguas se pierden por evaporación o infiltración sin llegar a formar escurrimiento subterráneo.
- Criptorréicas, cuando sus redes de drenaje superficial no tienen un sistema organizado o aparente y corren como ríos subterráneos.
- Endorréicas, cuando sus aguas drenan a un embalse o lago sin llegar al mar.
- Exorréicas, cuando las vertientes conducen las aguas a un sistema mayor de drenaje como un gran río o mar.

2.5.1 Características morfométricas de la cuenca

Para conocer el proceso de las inundaciones, se debe tener conocimiento sobre las características físicas de la zona de estudio, en cuanto a la pendiente y a las elevaciones, esto permite comprender el proceso lluvia – escorrentía. Desde que inicia un caudal se tiene el proceso de escorrentía, ya que el caudal se forma del proceso de filtración o escurrimiento del agua por los terrenos, de las grandes cantidades de lluvia. A medida que va avanzando va llevando consigo una cantidad de sedimentos que encuentra a su paso, hasta llegar a los ríos, lagos, lagunas u océanos (OEA, 2010).

Las características físicas tienen su relación con el tiempo que se demora las aguas en recorrer de la cuenca alta hasta la cuenca baja. Influye mucho la forma de la cuenta en el tiempo de traslado del agua.

Área y perímetro: En la cartilla informativa publicada por el Dr. Ordoñez Gálvez en 2011, define al área de una cuenca como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural, y así mismo define al perímetro de una cuenca como la longitud del contorno del área de la cuenca.

La ecuación usada para definir la pendiente es

$$S = \left(\frac{Ei - Ef}{L}\right)$$

Siendo:

L= longitud de la corriente

S= Pendiente

Ei – Ef = diferencia entre las elevaciones máxima y final.

2.5.2 . Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda la escorrentía superficial en recorrer la cuenca desde la parte alta hasta el sitio de interés, cuando existen inundaciones, es el punto de análisis del problema, bien puede ser una comunidad, estructura u obra (OEA, 2010). Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida (Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2011). El cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$Tc = 0.000325 * (\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}})$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración.

L: longitud del cauce principal de la cuenca (m).

S: pendiente del cauce principal.

2.5.3 Índice de Compacidad de Gravelius

Este índice compara la cuenca en estudio con una cuenca ideal de forma circular con sus cauces dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central (Gaspari, *et al*. 2012). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Kc = 0.28P\sqrt{A}$$

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad

P: Perímetro de la cuenca en Km

A: Área de la cuenca en Km^2

Tabla 1:
Rangos del índice de compacidad.

Clase de Forma	Índice de Compacidad (Kc)	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 a más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: Gaspari, et al., 2012. (Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina.)

2.5.4 Tiempo de retraso

El "Soil Conservation Service" (SCS) propone que el tiempo de retraso o “lag time” es 0,6 veces el tiempo de concentración, por lo tanto, se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_{lag} = 0.6 * (Tc)$$

Donde:

Tc: es tiempo de concentración

2.5.5 Propiedades morfométricas

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica brindan una descripción física espacial permitiendo comparar distintas cuencas hidrográficas, además pueden proporcionar conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica, ante eventos climáticos, está relacionada con la posibilidad de aprovechamiento hídrico y con la generación de una respuesta a los mismos (Gaspari, *et al.*, 2012). Las propiedades morfométricas se presentan acontinuación:

Tabla 2

Parámetros morfológicos de una Cuenca Hidrológica.

DIVISIÓN	PARÁMETRO	SIMBOLOGÍA
PARÁMETROS GENERALES	Área de la cuenca	A
	Longitud del cauce principal	L
	Perímetro	P
	Ancho	W
	Desnivel altitudinal	DA
PARÁMETROS DE FORMA	Coeficiente de compacidad o de Gravelius	K_c
	Coeficiente de forma	K_f
	Coeficiente de masividad	K_m
	Índice de alargamiento	I_a
PARÁMETROS DE RELIEVE	Pendiente media del cauce	j
	Pendiente media de la cuenca	J
	Altura media	H
	Curva Hipsométrica	-
PARÁMETROS DE LA RED DE DRENAJE	Orden de corriente	-
	Densidad de drenaje	D_d
	Tiempo de concentración	T_c
	Tiempo de retardo	T_{lag}
	Relación de bifurcación	Rb
	Número de escurrimientos	-
	Tiempo de retardo	Lc
	Relación de elongación	Re

Fuente: Obtenido de "Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional pico de Tancítaro", de Fuentes Junco, 2004. & "Morfología de las cuencas hidrográficas", de Íbañez Asensio, et al, (2011).

2.6 Hidrogramas

Es una expresión gráfica que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica, se expresa así Q=f(t), que puede representarse a escalas muy diversas (Sanchez, 2017). Un hidrograma representa de forma gráfica la respuesta que tiene una cuenca a la precipitación que cae sobre ella, permite entender la relación existente entre la lluvia y caudales, cuando se genera un aguacero (Universidad Militar Nueva Granada [UMNG], 2013).

Los hidrogramas unitarios sintéticos se utilizan para estimar el escurrimiento superficial con base en las características morfométricas. (Vargas, Torres, & Carrilo, 2019).

2.7 Modelamiento hidrológico de crecidas

"Los modelos hidrológicos juegan un papel importante en el desarrollo de sistema de alerta de crecidas" (Mendoza, 2015, p. 8). El fin que persigue la modelación hidrológica es generar respuestas frente a precipitaciones extremas, modificaciones en el uso del suelo y cambio climático. Las investigaciones sobre modelamiento hidrológico de crecidas han ayudado con valiosos aportes con fines de simulación y de pronósticos de caudales de crecida. La modelación hidrológica de cuenca es una herramienta fundamental en la gestión sostenible de cuencas tanto urbanas como rurales, permite evaluar la prevención y control de la erosión del suelo, los puntos de contaminación, el cambio climático y el manejo del uso del suelo en la dinámica hídrica (Escamilla, 2019).

2.8 Modelos hidrológicos

Es una representación abstracta de la forma, funcionamiento y estructura de un sistema real, el cual pretende limitar el comportamiento de dicho sistema. Existen una diversidad de modelos hidrológicos que son utilizados para la generación de hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo. Estos modelos hidrológicos son una herramienta muy importante a nivel mundial, su relevancia radica en el estudio de avenidas, para el análisis y prevención de inundaciones (Estrada & Pacheco, 2012).

Código de campo cambiado

A continuación, se detallan algunos de los más utilizados.

2.8.1 Modelo hidrológico HEC-RAS

La aplicación Hydrological Engineering Center – River Analysis System o por sus siglas HEC – RAS. Es un programa de modelización hidráulica, nos permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua, teniendo como objetivo principal realizar estudios de procesos de precipitación-escorrentía y determinar las

zonas inundables. Este software toma en cuenta diferentes factores como la forma del cauce, su pendiente, su naturaleza, presencia de vegetación, etc. (Nanía & Molero, 2007).

2.8.2 Modelo hidrológico HEC-HMS

El modelo HEC-HMS es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE. UU, para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas (López & Patiño, 2017). Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc. Además, tiene la posibilidad de conectarse a un sistema de información geográfica (ArcGIS) (Estrada & Pacheco, 2012). Así mismo el programa permite definir el área de las cuencas, el método que se usará para obtención del hidrograma, metodología de infiltración y método de estimación de flujo base (Días, 2015). Estrada y Pacheco (2012) testifican que el modelo hidrológico HEC-HMS, es un programa completo ya que permite a través de los métodos calcular aspectos de gran interés hidrológico.

2.9 Método de transformación

Según Estrada y Pacheco (2012) firman que el método de transformación convierte el exceso de lluvia en escorrentía cuando el suelo está saturado, los métodos del modelo hidrológico HEC – HMS son los siguientes: Kinematic wave, Mod Clark, User Specied S-Graph, User Specied Unit Hydrograph, Hidrogramas sintéticos: Clark, SCS y Snyder. El software HEC – HMS posee varios métodos de transformación, sin embargo, para el estudio se consideró para la modelación de crecidas en el río Puyo y Pindo, a la modelación de hidrogramas unitarios del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos SCS.

2.9.1 Hidrograma unitario sintético SCS

El Hidrograma unitario sintético SCS (Figura 1) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, SCS por sus siglas en inglés, se trata de un modelo de lluvia-escorrentía basados en hidrógrafas

sintéticos que utilizan los parámetros morfológicos, este hidrograma sintético relaciona el caudal con el pico y el tiempo con relación al tiempo de ocurrencia del pico. El análisis de este modelo se estableció en base a estudios de una serie de hidrogramas unitarios naturales en cuencas de diferentes tamaños y en distintas geografías de los Estados Unidos (Vargas, Torres, & Carrilo, 2019).

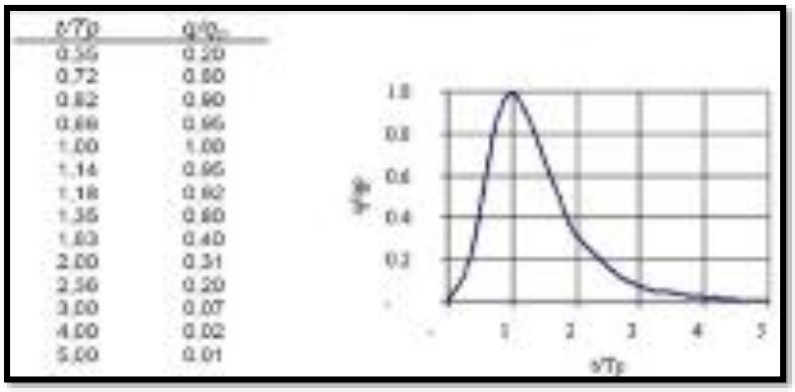

Figura 1. Hidrograma adimensional SCS. Tomado de "Estudio de la Factibilidad para el Encausamiento con Enrocado para proteger el puente ubicado sobre el río Congo en el Recinto La Carlota del Cantón Balza," de M.L Párraga Muñoz, 2015

El hidrograma unitario sintético triangular simplificado permite estimar los valores del caudal del pico y el tiempo de ocurrencia del pico. Para un milímetro de lluvia efectiva, en el sistema métrico, el caudal de pico es igual a:

$$Q_p = 0.208x(\frac{A}{T})$$

Donde:

Qp= es el caudal (m3/s))

A= es el área de drenaje de la cuenca (km2)

T= es el tiempo al pico del hidrograma triangular (h)

Para estimar el tiempo al pico la SCS determina la relación con el tiempo de retardo de la cuenca de la siguiente manera.

Tp= (10/9)T

La ecuación que permite estimar los valores de tiempo al máximo está dada por la siguiente ecuación:

$$T_p = \left(\frac{D}{2}\right) + T_{lag}$$

Donde:

Tp= Tiempo al máximo

D= Duración de la Tormenta

T_{lag}= Tiempo de retraso

Para calcular el tiempo base, se aplica la siguiente ecuación.

$$T_b = 2.67 x T_p$$

Donde:

Tb= Tiempo base

Tp= Tiempo al máximo

Mientras que, para calcular el caudal pico, está dada por la siguiente ecuación.

$$A_p = 0.555 \left(\frac{A}{T_b}\right)$$

Donde:

Ap= Caudal máximo

A= Área de la Cuenca

Tb= Tiempo base

Según Castillo (2017), el método del hidrograma unitario sintético del SCS, está basado en un hidrograma pico adimensional es decir curvilíneo (figura 2) que permite tener una relación con un hidrograma triangular, a continuación, se realiza una representación gráfica de esta relación de hidrogramas.

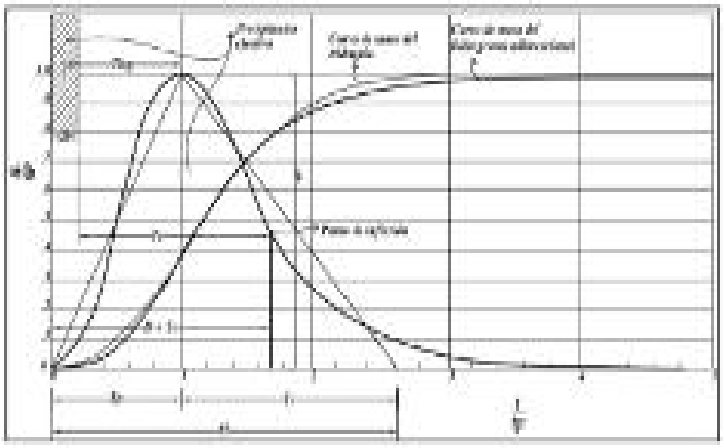

Figura 2. Hidrograma Unitario adimensional (curvilíneo) y su equivalencia con el hidrograma triangular. Obtenido de Modelación Hidrológica de eventos de crecida para el sistema de alerta temprana ante inundaciones en la cuenca del río Catamayo**,** de Castillo, 2017.

2.9.2 Factores que afectan la infiltración según el método del SCS

De acuerdo a Olivares (2005), los factores que afectan la infiltración o escorrentía son los siguientes:

- Tipo de suelo: Hace referencia a la capacidad de infiltración que tiene un terreno.
- Tipo de uso del terreno: En este factor el suelo sufre cierto tipo de transformación como es el caso de la pavimentación y los suelos donde se ha realizado la forestación y que han sido utilizado con fines agrarios.
- Pendiente del terreno y características topográficas: Distingue terrenos llanos y con pendiente.
- Contenido inicial de humedad: Predomina la condición seca del suelo al arrastrar varios años de escasa precipitación.

Código de campo cambiado

2.9.3 Método de recesión para la estimación del flujo base

El autor Días (2015) afirma que: “Uno de los aspectos importantes al momento de modelar hidrogramas de crecidas, es el flujo

base y la estimación del mismo, ya que de su variabilidad depende el flujo de escorrentía directa de la crecida que se pretende analizar" (p45). Analizando desde otro punto el autor Gómez (2016), manifiesta que "el flujo de base puede ser utilizado como indicador de la sostenibilidad de la reserva hídrica en cuencas (p3)". El modelo Hidrográfico HEC – HMS, utiliza este método de recesión para modelar el flujo de base, ya que es el más completo, puesto que permite identificar el tramo de descarga y el tramo de carga (Días, 2015) (figura 3).



Figura 3. Método de recesión para la estimación del flujo de base en el hidrograma de crecida. Obtenido de "Caudal de crecida del río Grande, Chone", de Sandoval & Aguilera, 2013.

El caudal de flujo base está dado por la siguiente ecuación.

$$Q_b = Q_o * K^t$$

Donde

Qb= Caudal del flujo de base

Qo = Caudal flujo inicial

K= Constante de recesión

T= Tiempo

2.10 Gestión integrada de crecidas

Para la Asociación Mundial para el agua, la gestión integrada de crecidas es un proceso que aspira al desarrollo y la gestión coordinada de los recursos hídricos, es decir vincular a la sociedad, a su economía con el uso adecuado

de los recursos naturales tanto del agua como de los suelos (Organización Metereológica Mundial, 2009).

La crecida de un río, es un fenómeno natural que forma parte del proceso hidrológico, propio de las características meteorológicas y fisiográficas de cada región. Las crecidas son eventos naturales que destruyen y dejan grandes desastres por su recorrido, de una u otra forma se ha querido disminuir mediante canales, bypass, embalses y presas, pero no han sido lo suficientemente efectivas para remediar los daños causados por las crecidas. La problemática de las inundaciones se presenta en toda la geografía mundial en todo tipo de regiones incluyendo a las desérticas, y que afecta al medio natural (Carmona, 2015).

Los desastres naturales causan mucho sufrimiento especialmente en los países pobres donde sus economías de bajos ingresos se ve afectada por la pérdida de cosechas, vivienda, infraestructura, y pérdidas de vidas humanas.

2.10.1 Inundaciones

Son el producto de otros procesos hidrológicos de recurrencia, como son las precipitaciones., las inundaciones transportan y arrastran grandes cantidades de barro, rocas, madera, generando grandes turbulencias (Lasso, 2017). Hacer una buena planeación de prevención ante estos fenómenos, disminuye las consecuencias catastróficas, en este apartado hace hincapié la importancia de aplicar un modelo de hidrograma para el modelamiento de crecidas en los Ríos Pindo y Puyo.

En el área de estudio las inundaciones son muy comunes, y prácticamente se producen por el desbordamiento de los ríos, debido a las fuertes lluvias propio del clima de la región amazónica, normalmente los efectos negativos de las inundaciones se deben por la deforestación, y la ubicación de viviendas en las orillas de los ríos (CENAPRED, 2009).

2.10.2 Elementos de la gestión integrada de crecidas

Según Changshen (2006), “la gestión integrada de crecidas tiene como finalidad maximizar los beneficios y minimizar la pérdida de vidas causadas por las inundaciones” (p15). Esta gestión consiste en una combinación

integrada de estrategias, puntos y tipos de intervención adecuados. Los elementos esenciales de la gestión integrada de crecidas son:

- Adoptar un enfoque centrado en la cuenca para la gestión de crecidas
- Introducir un enfoque multidisciplinar
- Disminuir la vulnerabilidad y los riesgos debidos a las inundaciones
- Reforzar la participación de la población interesada
- Fomentar la conservación y preservación de los ecosistemas

2.10.3 Tipos de crecidas

La Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2009), clasifica a las crecidas según los efectos que éstas producen sobre las planicies de inundación y el origen o formación de las mismas. A continuación de describen la clasificación de las crecidas:

- Crecidas fluviales: Estas "se originan en planicies de inundación o en terrenos de arrastre cuando el caudal excede la capacidad de los canales naturales y tiende a derramarse sobre los márgenes naturales o bordos artificiales" (OMM, 2011).
- Crecidas repentinas: "Estas se producen por una ligera liberación de la escorrentía en las zonas montañosas, en consecuencia, de las fuertes precipitaciones, deslizamiento de tierra o fallos en las estructuras de los ríos." Cuando se tiene este tipo de crecida es muy notorio la rapidez con la que las aguas avanzan río abajo llevando todo lo que encuentren a su paso con un fuerte torrencial (Arteaga, 2017).
- Crecidas urbanas: Este tipo de crecidas afecta directamente a las construcciones de vivienda, calles, alcantarillados, cunetas, desagües, energía, transporte, incluso se producen inundaciones por el desvío de causes que afectan a la población (Carmona, 2015).
- Crecidas rurales: Generalmente este tipo de inundaciones ocurre en zonas agropecuarias y en los medios de producción, ocasionando grandes daños materiales a las personan que dependen económicamente de este tipo de trabajo.

2.10.4 Acciones ante eventos de crecida

De acuerdo a Arteaga (2017), consiste en una serie de acciones sistemáticas para reducir el impacto de amenazas naturales y desastres ambientales, que son consecuencia del aumento del volumen de la escorrentía provocando disminución de la capacidad de los cauces fluviales que producen un desborde que afecta a las planicies, éstas acciones consisten en cuatro etapas:

- Prevención: Se trata de identificar y planificar medidas estructurales y no estructurales para diques, canales de drenaje y planificación del uso del suelo.
- Preparación: En esta etapa se analiza eventos históricos de crecidas e inundaciones, sobre todo lo que concierne a eventos de crecidas.
- Respuesta: Consiste en un pronóstico hidrológico y de crecidas, así como la puesta en práctica de las medidas de prevención y evacuación.
- Recuperación: En esta última etapa se pone atención prioritaria el control de enfermedades y salud, se repara obras de infraestructura, se mejora las capacidades de adaptación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

El presente proyecto de investigación se realizó en las parroquias Puyo, Shell y Tarqui de la provincia Pastaza, situada a altitud que oscila entre 800 m s.n.m a 2000 m s.n.m., con coordenadas UTM 832010 E, 9835782 N, la precipitación promedio anual, varía entre 4.516 mm y 5.130 mm anuales. La provincia de Pastaza limita por el norte con las provincias de Napo y Orellana, por el sur con la provincia de Morona Santiago, por el este con Perú y el oeste con la provincia de Tungurahua. El estudio se realizó en las microcuencas de los ríos: Motolo, Pindo, Plata, Pindo Chico, Pindo Grande, Salomé, Pambay y Puyo (altura del puente metálico del paseo turístico) y sus respectivas uniones (figura 5).

3.1.1 Delimitación la cuenca hidrográfica del río Pindo y río Puyo (área de estudio).

Mediante la aplicación Google Earth Pro (IBM; USA) se definen las coordenadas (UTM), a continuación, las coordenadas se transportan al programa EXCEL (IBM; USA), seguidamente se procedió a realizar el procesamiento de datos mediante la aplicación ArcMap por medio del uso de imágenes DEM (Modelo de elevación digital); a través del uso de la herramienta Hidrology de la aplicación se moldeará digitalmente el área de la Cuenca Hidrográfica de los ríos, y a su vez los parámetros morfológicos de la cuenca hidrográfica (Ffigura 4).

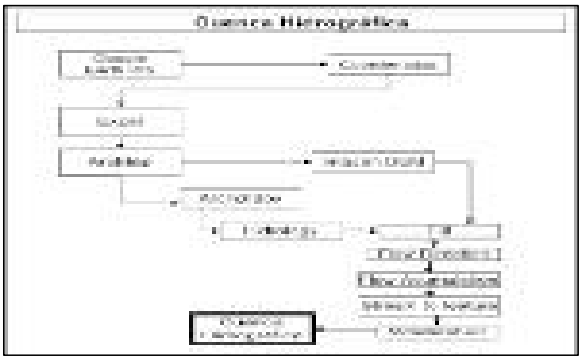

Figura 4. Pasos para determinar una cuenca hidrográfica



Figura 5. Mapa de las subcuencas de los ríos Pindo, Motolo, Plata, Pindo Chico, Pindo Grande, Salomé, Puyo y Pambay.

3.1.2 Coordenadas de las intersecciones de los ríos

Los ríos en estudio son siete, las coordenadas mostradas en la siguiente tabla pertenecen a la intersección de dichos ríos con otro afluente, estos puntos están representados por coordenadas pertenecientes a la proyección UTM WGS84 y están representados gráficamente en la figura 5.

Tabla 3

Coordenadas de los ríos en estudio.

Ríos	ESTE	NORTE
Río Pindo	827703	9833963
Río Motolo	827318	9833315
Río Plata	831233	9834058
Río Pindo Chico	833277	9834479
Río Salomé	167076	9832723

Río Pindo Grande	169377	9830796
Río Puyo	166320	9836522
Río Pambay	166299	9836525

3.2 Tipo de investigación

El presente proyecto es una investigación experimental donde un conjunto de variables se mantiene constantes (parámetros morfológicos), mientras que el otro conjunto de variables varía en función del tiempo (precipitaciones), se fundamenta principalmente en la manipulación de variables para realizar simulaciones experimentales. El enfoque dado al trabajo de integración curricular es cuantitativo, con diseño explicativo experimental.

3.3 Métodos de investigación

El Proyecto de Integración Curricular se trabajó con data secundaria obtenida previa al año 2020 (años anteriores), ~~se consideró~~en el proyecto de vinculación con la colectividad "Recuperación y restauración Ambiental de la microcuenca del rio Puyo" ~~realizado por el~~dirigida por el ~~ingeniero~~ Dr. Ricardo Abril, docente de la Universidad Estatal Amazónica (UEA), proyectos de titulación situados en el repositorio de la UEA que involucran el estudio de los ríos Pindo, Motolo, Plata, Pindo Chico, Pindo Grande, Pambay y Puyo, además de documentos y artículos científicos relacionado al manejo de cuencas hidrográficas. A partir de estos datos se combinó la investigación documental y experimental para hacer cumplir los objetivos propuestos. No se ~~consideró el~~realizó trabajo de campo.~~.~~

3.3.1 Equipos, materiales y software's

Equipos:

- Smartphone (teléfono inteligente)
- Cámara fotográfica
- Laptop
- Calculadora
- Impresora

Materiales:

- Libreta de campo

- Cinta métrica
- Regla
- Nivel
- Insumos de oficina

Software:

- Google Earth Pro.
- Excel.
- HEC-HMS 4.2.1
- ArcGIS 10.5
- Word.
- HEC-RAS
- HEC-GeoRas

- Para el cumplimiento del primer objetivo específico: "Determinar las características geomorfológicas de los principales afluentes de los ríos Puyo y Pindo.", se utilizó la siguiente metodología:

3.3.2 Parámetros de las microcuencas

3.3.2.1 Parámetros geomorfológicos de las microcuencas

- Área y perímetro: para la determinación del área y el perímetro de las cuencas hidrográficas se procedió a descargar un Modelo de Elevación Digital (DEM) y realizar el geoprocesamiento en el programa ArcGis (figura 4).
- Pendiente del cauce: se usó uno de los métodos más representativos para el cálculo se obtiene dividiendo la diferencia total de la altitud mayor del cauce y la altitud menor del cauce entre la longitud horizontal del curso de agua entre esos dos puntos:

$$S\% = \frac{\Delta H}{D} * 100$$

Donde:

ΔH: diferencia de altura entre el punto.

D: distancia lineal entre el punto más alto y el de descarga del río.

- Tiempo de concentración: Se realizó el cálculo mediante la siguiente fórmula:

$$Tc = 0.000325 * (\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}})$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración.

L: longitud del cauce principal de la cuenca (m).

S: pendiente del cauce principal.

- Tiempo de retraso: el "Soil Conservation Service" (SCS) propone que el tiempo de retraso o “lag time” es 0,6 veces el tiempo de concentración, por lo tanto, se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_{lag} = 0.6 * (Tc)$$

Donde:

Tc: es tiempo de concentración

3.3.2.2 Parámetros hidrológicos

- Medición de Caudal: Se utilizó el método empírico más conocido y aplicado para estimar el caudal, la Ecuación de Manning, el cual puede medir el caudal de manera directa o mediante procedimientos indirectos. La fórmula fue creada por Manning en 1998:

$$Q = AxV$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s).

A: Área de la sección transversal del cauce (m^2).

$$V = \frac{1}{n} x (R^{\frac{2}{3}})(S^{\frac{1}{2}})$$

Donde:

n: coeficiente de rugosidad del cauce.

R: radio hidráulico (m) (área de mojado / perímetro de mojado).

S: pendiente de la línea de agua.

- Número de Curva (CN): Debido a que las zonas de estudio son siete, se recopiló la información plasmada en los proyectos de grado que se han ejecutado sobre los ríos en estudio en años anteriores. El río Pindo Chico, Pambay no contaban con la información suficiente para estimar el número de curva, por lo que se procedió a estimarla con datos obtenidos en la asignatura de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la UEA, periodo lectivo 2019-2020.

Tabla 4

Pasos para determinar el número de curva NC.

	ACCIONES
Parte 1	Medir la precipitación ocurrida en la ciudad durante 5 días previos al cálculo.
Parte 2	Medir el espesor del Humus y la hojarasca alrededor del río para establecer la condición Hidrológica del suelo (C.H).
Parte 3	Determinar el tipo de suelo mediante la infiltración acumulada Fc (dato calculado en proyectos de grado anteriores)
Parte 4	Determinar la condición de humedad.
Parte 5	Relacionar los parámetros antes mencionados en la tabla de CN para condición de humedad II y realizar la transformación a CH (I) o CH (III).

- Para el cumplimiento del segundo objetivo específico: "Generar la lluvia de proyecto mediante las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de precipitaciones de la estación metereológica Puyo (Curvas IDF) para los periodos de retorno: 2, 5, 10, 25 y 50 años de los afluentes de los ríos Pindo y Puyo que afectan las parroquias Shell, Puyo y Tarqui", se utilizó la siguiente metodología:

3.3.3 Estimación de la lluvia de diseño

Se emplearon las curvas de Duración, Intensidad y Frecuencia (IDF) publicadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) el año 2019 para la ciudad del Puyo, estación metereológica automática M008-Puyo (Figura 6). Este método se complementó con el uso de las ecuaciones de intensidad en intervalos de tiempo t: 5 -120 minutos y t: 120- 1440 minutos para estimar las intensidades en diferentes periodos de tiempo; este proceso se realizó durante 24h (1440 minutos) para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

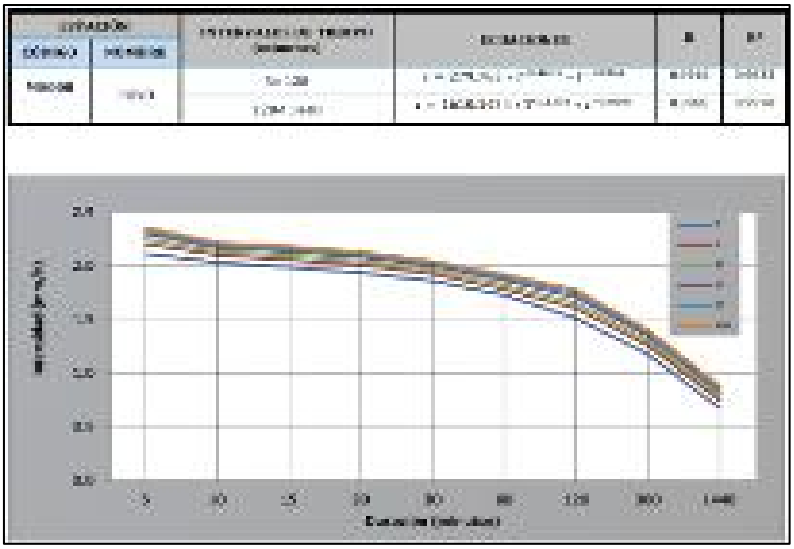

Figura 6. Curvas IDF para la estación M008 Puyo. Tomado de "Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación", por INAMHI, 2019.

- Para el cumplimiento del tercer objetivo específico: "Generar el modelamiento de crecida de los ríos Pindo y Puyo a través del programa HEC-HMS para los períodos de retorno de 2, 5,10, 25, 50 años que afectan a las parroquias Shell, Puyo y Tarqui", se utilizó la siguiente metodología:

3.3.4 Modelamiento de crecida en HEC-HMS

Mediante los resultados de la lluvia diseño para todos los periodos de retorno y los parámetros geomorfológicos de la cuenca determinados con SIG (ArcGis, USA), se realizó el modelamiento de crecida de los ríos en estudio. Los parámetros fueron exportados a la aplicación HEC-HMS, usar sus herramientas y determinar los Hietogramas e Hidrogramas para cada periodo de retorno (figura 7).

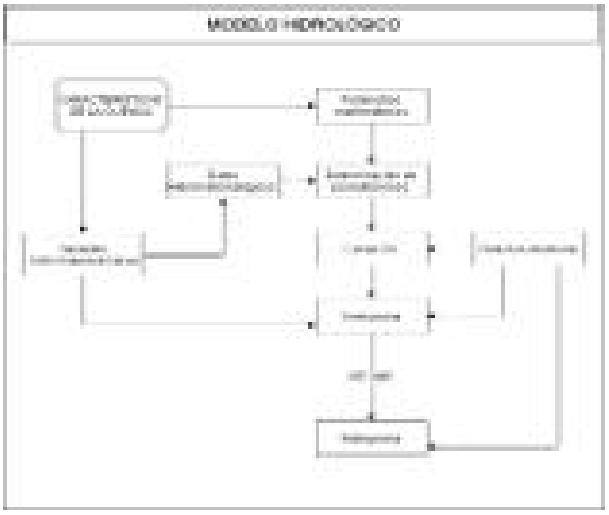

Figura 7. Proceso de elaboración para el modelamiento de crecida.

Una vez definidos los ríos que se desean modelar, se deberá tener en cuenta los parámetros que el software necesita para realizar un correcto modelamiento y que no presente errores:

Tabla 5

Ríos y parámetros necesarios para el modelamiento en el HEC-HMS.

Ríos	Parámetros
Motolo	- Área de la cuenca
Pindo	- Perímetro de la cuenca
Plata	- Distancia lineal entre la cota más alta y la más baja.
Pindo Chico	- Pendiente.
Salomé	- Longitud del cauce más largo.

Puyo	- Cauda (Q) mensual
Pambay	- Tiempo de concentración (Tc) en minutos
	- Tiempo de retraso (T_{lag}) en minutos
	- Número de curva (NC)
	- Lluvia diseño para los periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años y 50 años.

- A continuación, se procedió a cargar un nuevo proyecto, a nombrarlo, guardar en una carpeta a nuestra elección y establecer las unidades para el proyecto.



Figura 8. Nuevo proyecto en el programa HEC-HMS (paso 1 y 2).

- Se crea un nuevo modelo de cuenca (basin model manager) y se procede a nombrarla para luego agregar las subcuencas o ríos con los que se trabajó.

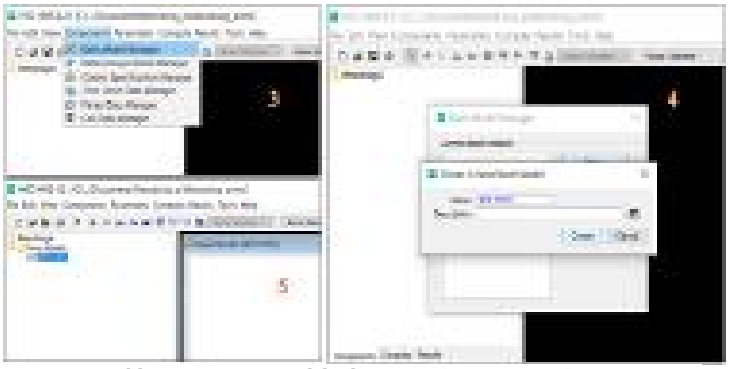

Figura 9. Establecer un nuevo modelo de cuenca (pasos 3, 4 y 5).

- Posteriormente se realiza el esquema de la cuenca de manera gráfica, añadiendo las subcuencas (Subbasin creation tool) y las uniones (juntion creation tool) de los mismos en la barra de herramientas.

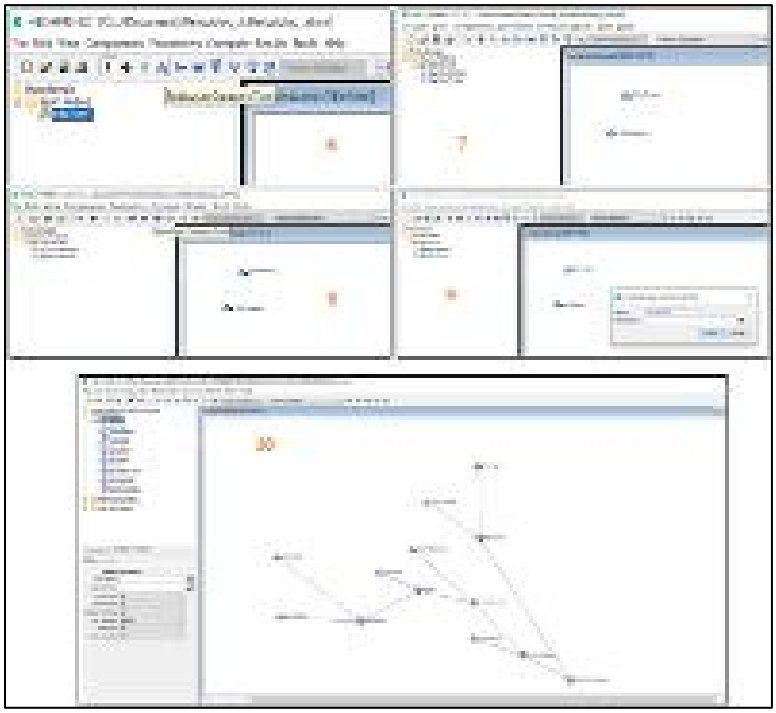

Figura 10. Pasos para realizar el esquema gráfico de las subcuencas (pasos 7 – 10).

- En la pestaña *view* (ver), añadimos nuestro mapa base (background maps) de la cuenca principal y la red de drenaje para mantener ordenadas las subcuencas y sus uniones en el esquema.



Figura 11. Pasos para agregar el mapa base y la red de drenaje (pasos 11, 12 y 13).

- En los componentes de las subcuencas (components-subbasin) se configurael método de pérdida (loss method), método de transformación (transform method) y el método de flujo base (baseflow method) de todas las subcuencas, así mismo, en la herramienta de parámetros se procede a llenar los parámetros antes mencionados: “loss”,transform”, “baseflow”, colocamos las áreas y así mismo se rellena los caudales mensuales de todas las cuencas.

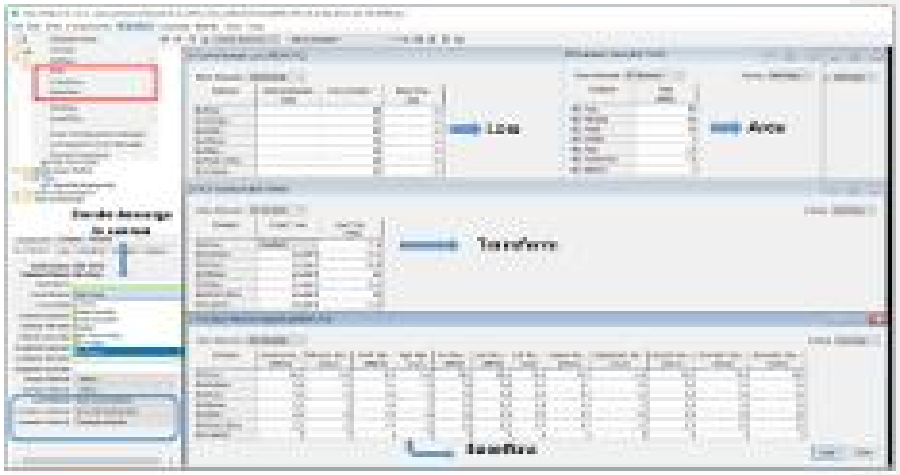

Figura 12. Configuración de los métodos de pérdida, transformación y base de caudal.

- A continuación, se generó un *“time serie data”* para ingresar la lluvia diseño de los periodos de retorno de la(s) estaciones más aledañas a los ríos en estudio; acto seguido generamos un Modelo meteorológico *(“meteorologic model”)* donde tendremos que especificar la cuenca principal que se modelará y especificar las subcuencas que se modelarán; para finalizar añadimos un *“control specifications”* para determinar la hora y fecha en la que queremos realizar el modelamiento respectivo; luego de realizar estos pasos generamos un cómputo para luego visualizar los resultados del modelamiento de crecida.



Figura 13. Componentes del software para el modelamiento de la crecida.

- Para el cumplimiento del cuarto objetivo específico: "Diseñar un modelo de inundabilidad de los sectores más vulnerables del centro urbano de la parroquia Puyo", se utilizó la siguiente metodología:

3.3.5 Mapa de inundaciones

La elaboración del mapa de inundaciones está basada en un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del Servicio Geológico de Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés; la imagen fue procesada en ArcGis y se transformó en una Red Irregulares de Triángulos (TIN por su siglas en inglés), para posteriormente darle la topografía respectiva y digitalizar los ríos, se le agrega una capa de topografía 3D para luego exportarlo al programa HEC-RAS y continuar con el modelamiento, en este programa se le agregaron datos de pendiente y coeficientes de Manning según las características físicas de los ríos.

El procesamiento de datos contempla los Hidrogramas que son el resultado del modelo hidrológico y mediante la aplicación HEC- GEO RAS se obtiene los caudales de crecida, generando una imagen bidimensional de las zonas de estudio con los respectivos caudales de crecida ante eventos extremos (simulación de inundaciones) (figura 14).

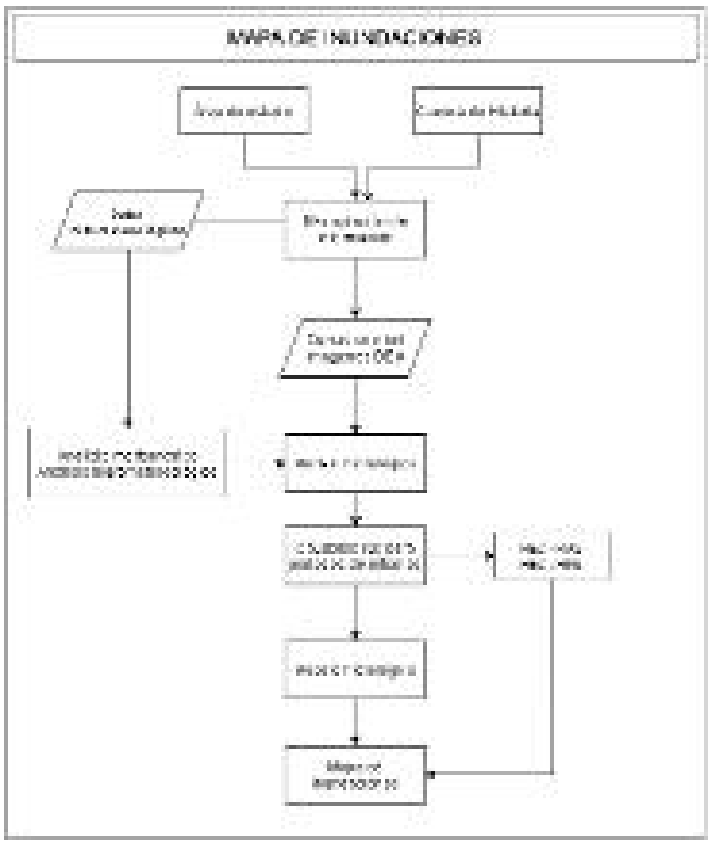

Figura 14. Diagrama de flujo para elaboración del mapa de inundaciones.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En cumplimiento del primer objetivo: "Determinar las características geomorfológicas de los principales afluentes de los ríos Puyo y Pindo", tenemos lo siguientes resultados:

4.1 Características geomorfológicas de los principales afluentes de los ríos Puyo y Pindo:

Luego de realizar los mapas de las cuencas de los ríos en estudio, desarrollar las fórmulas y hallar los parámetros necesarios, se obtuvieron los resultados expuestos en la siguiente tabla:

Tabla 6

Parámetros hídricos y geomorfológicos para el modelamiento de crecida de los ríos Puyo y Pindo.

	RÍOS	Pindo	Motolo	Plata	Pindo Chico	Salomé	Pambay	Puyo
PARÁMETROS	Caudal* (m^3)	4.3	1.5	3.2	2.7	5.4	3.1	26.5
	Área (km^2)	35	3	7.2	7.5	7	10	90
	Perímetro (km)	31	5	5.1	14	6	17	47.3
	N.C**	36	38	55	38	26	23	41
	Pendiente (%)	4.9	3.5	4,2	4	2	2	5
	Long. de cauce más grande (km)	12.6	3	1.5	5.3	2.6	5.26	18
	Tc (min)	98	40	32	52	58	89	121
	T_{lag} (min)	58.8	24	19.2	32	34.5	53.4	72.6

* (Huatatoca & Chanaluisa, 2019); (Soria, 2015); (Illanes & Paucar, 2019).

** (Mejía, 2013), (Abril, *et al.*, 2019).

En cumplimiento del segundo objetivo: “Generar la lluvia de proyecto mediante las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de precipitaciones de la estación metereológica Puyo (Curvas IDF) para los periodos de retorno: 2, 5, 10, 25 y 50 años de los afluentes de los ríos Pindo y Puyo que afectan las parroquias Shell, Puyo y Tarqui”, tenemos los siguientes resultados:

4.2 Lluvia de proyecto (o lluvia de diseño) para las parroquias Puyo Shell y Tarqui en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Para empezar con el modelamiento de crecida de los ríos en estudio, se obtuvieron las lluvias de diseño de los periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años y 50 años, obtenidos de las curvas IDF para la estación meteorológica M008 Puyo, la lluvia diseño se encuentra tabulada en la siguiente tabla:

Tabla 7

Lluvia diseño para la ciudad del Puyo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años. en milímetros/ hora (mm/h).

Periodos de retorno	2 años	5años	10 años	25 años	50 años
1 hora	0,95	1,08	1,18	1,33	1,46
2 horas	1,02	1,16	1,27	1,43	1,57
3 horas	1,11	1,25	1,37	1,55	1,70
4 horas	1,21	1,37	1,50	1,69	1,86
5 horas	1,33	1,51	1,65	1,87	2,05
6 horas	1,49	1,69	1,85	2,09	2,29
7 horas	1,70	1,92	2,11	2,38	2,61
8 horas	1,98	2,24	2,46	2,78	3,05
9 horas	2,40	2,71	2,98	3,36	3,69
10 horas	3,09	3,49	3,83	4,33	4,75
11 horas	4,47	5,05	5,54	6,26	6,87
12 horas	20,25	23,60	26,49	30,81	34,52
13 horas	53,10	59,28	64,42	71,92	78,16
14 horas	5,90	6,66	7,31	8,26	9,06
15 horas	3,64	4,11	4,51	5,10	5,59
16 horas	2,70	3,05	3,34	3,78	4,15

17 horas	2,17	2,45	2,69	3,04	3,33
18 horas	1,83	2,07	2,27	2,56	2,81
19 horas	1,59	1,79	1,97	2,22	2,44
20 horas	1,41	1,59	1,74	1,97	2,16
21 horas	1,27	1,43	1,57	1,78	1,95
22 horas	1,16	1,31	1,43	1,62	1,78
23 horas	1,06	1,20	1,32	1,49	1,63
24 horas	0,99	1,11	1,22	1,38	1,52

En cumplimiento del tercer objetivo: “Generar el modelamiento de crecida de los ríos Pindo y Puyo a través del programa HEC- HMS para los períodos de retorno de 2, 5,10, 25, 50 años que afectan a las parroquias Shell, Puyo y Tarqui”, tenemos lo siguientes resultados:

4.3 Modelamiento de crecida con el programa HEC-HMS de los afluentes de los ríos Puyo y Pindo

Se representa el esquema gráfico de la cuenca de los ríos Puyo y Pindo (con sus respectivos afluentes) obtenido del software HEC-HMS, incluida el área de la cuenca hidrográfica y la red hídrica de la misma; esta contiene los principales afluentes de los ríos Pindo y Puyo, mismos que han sido considerados para el estudio.



Figura 15. Cuenca y subcuencas del río Pindo y Puyo, previo modelamiento en el HEC-HMS.

El resultado del modelamiento de crecida de los ríos: Motolo, Pindo, Plata, Pindo Chico, Salomé, Puyo y Pambay se muestran en las siguientes gráficas, estas comparan el flujo o caudal producido por los ríos durante un evento en un tiempo de 23 horas del día; además muestran la pérdida de la precipitación en milímetros por hora (mm/h) en una gráfica de barras donde las variables medidas son la infiltración (azul) y la escorrentía (naranja).

Río Motolo

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma del río Motolo, con las simulaciones realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 1.5 m^3/s. En los periodos de retorno de 2 años y 5 años el río alcanza su descarga máxima a las 14:00 horas, con un flujo de 1.7 m^3/s y 2.2 m^3/s respectivamente; mientras que en los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años la descarga máxima del río se produjo a las 13:00 horas, con un flujo de 2.8 m^3/s, 4.1 m^3/s y 5.5 m^3/s respectivamente (Figura 16).

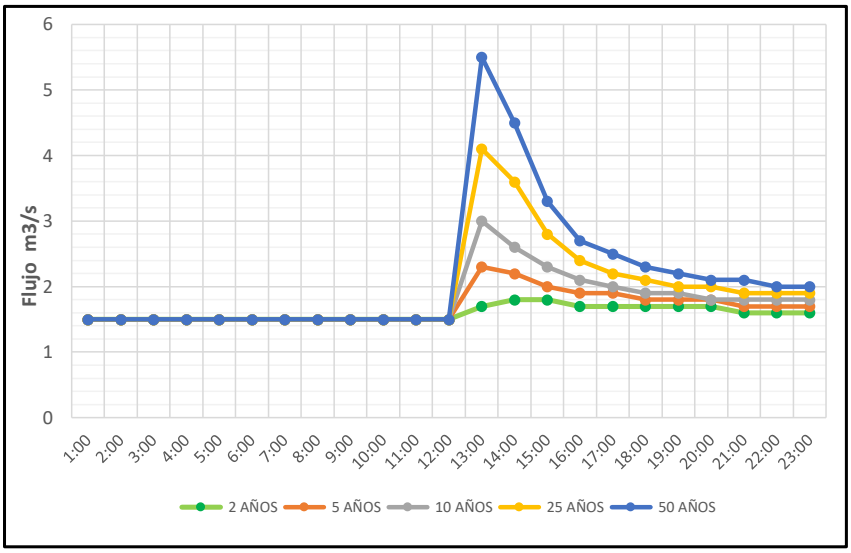

Figura 16. Simulación de crecida del río Motolo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se muestra la infiltración y escorrentía de la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno*;* en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.88 mm, de los cuales 113.33 mm se pierden por infiltración mientras que 2.52 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 125.82 mm se pierden por infiltración y 5.11 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 135.73 mm se pierden por infiltración mientras que 7.89 mm generaron escorrentía; por otra

parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 149.38 mm y generando escorrentía 12.91 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02 mm perdiéndose por infiltración 160.12 mm y generando escorrentía 17.9 mm (Figura17).

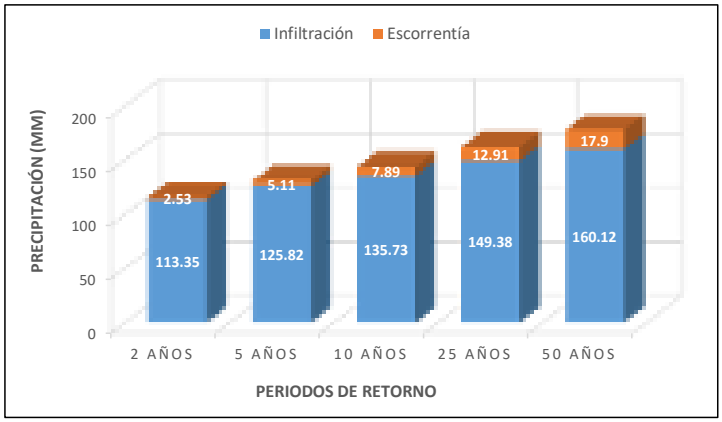

Figura 17: Pérdida de precipitación en el río Motolo.

Río Pindo

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma del río Pindo, con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 4.3 m^3/s. En los periodos de retorno de 2 años el río puede alcanzar su descarga máxima a las 16:00 horas, con un flujo de 5.9 m^3/s, en el periodo de retorno de 5 años la descarga máxima se puede producir a las 15:00 horas con un flujo de 8.7 m^3/s mientras que en los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años la descarga máxima del río se estima que se produzca a las 13:00 horas, con un flujo de 13.4 m^3/s, 23.6 m^3/s y 34.8 m^3/s respectivamente (Figura 18).

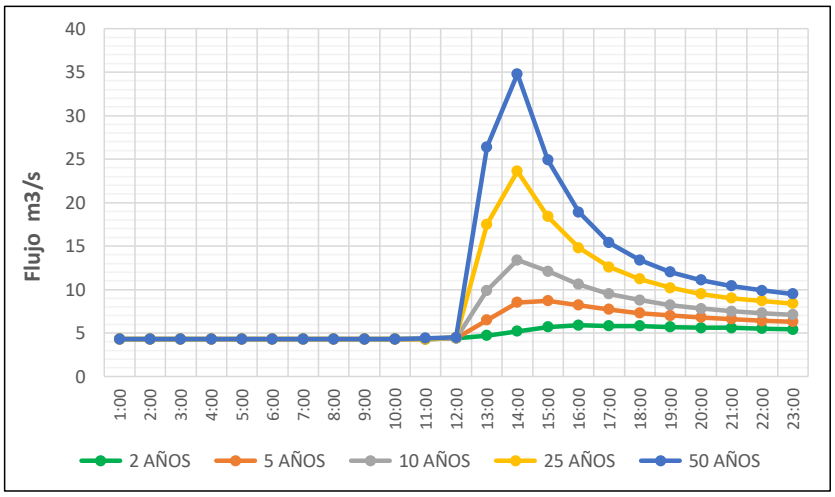

Figura 18. Simulación de crecida del río Pindo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se evidencia la infiltración y escorrentía de la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno*;* en el periodo de retorno de 2 años puede alcanzar un volumen de precipitación de 115.88 mm, de los cuales 114.42 mm se pierden por infiltración mientras que 1.46 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años puede alcanzar un volumen de precipitación 130.96 mm, de los cuales 127.47 mm se pierden por infiltración y 3.46 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanzaría un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 137.86 mm se pierden por infiltración mientras que 5.76 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación se vería incrementado a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 152.25 mm y generando escorrentía 10.04 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendería a 178.02 mm perdiéndose por infiltración 163.62 mm y generando escorrentía 14.4 mm (Figura 19).

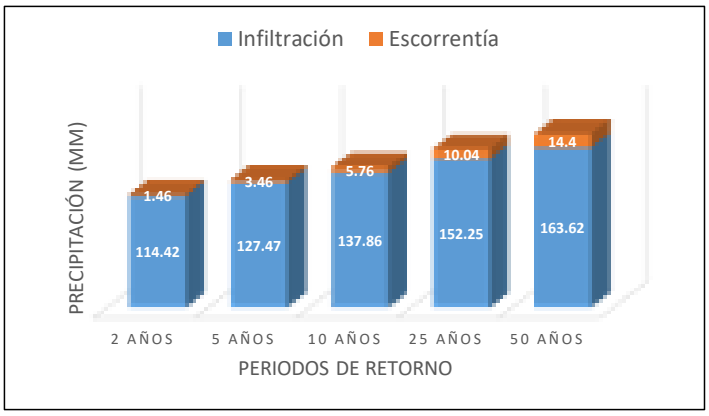

Figura 19. Pérdida de precipitación en el río Pindo.

Unión del río Motolo y río Pindo (río Pindo)

En este punto el caudal del río Motolo (figura 16) y el río Pindo (figura 18) y se han juntando, originando un cauce más grande, en este punto no se utiliza la lluvia diseño debido a que esta se utilizó en los ríos antes mencionados y este tramo solo está juntando sus aguas.

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de las uniones de los ríos Motolo y Pindo con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 5.8 m^3/s, mismo que corresponde a la suma de los caudales base de los ríos mencionados anteriormente. En el periodo de retorno de 2 años el río podría alcanzar su descarga máxima a las 16:00 horas, con un flujo de 7.6 m^3/s, en el periodo de retorno de 5 años la descarga máxima se produciría a las 14:00 horas con un flujo de 10.7 m^3/s, por otra parte en el periodo de retorno de 10 años la descarga máxima del río podría darse a las 14:00 horas, con un flujo de 16 m^3/s; la descarga máxima del periodo de retorno de 25 años podría producir un flujo de 27 m^3/s y se llevarse a cabo a las 14:00 horas; finalmente el periodo de retorno de 50 años presentaría flujo de 39.1 m^3/s en su descarga máxima que sucedería a las 14:00 horas (Figura 20).

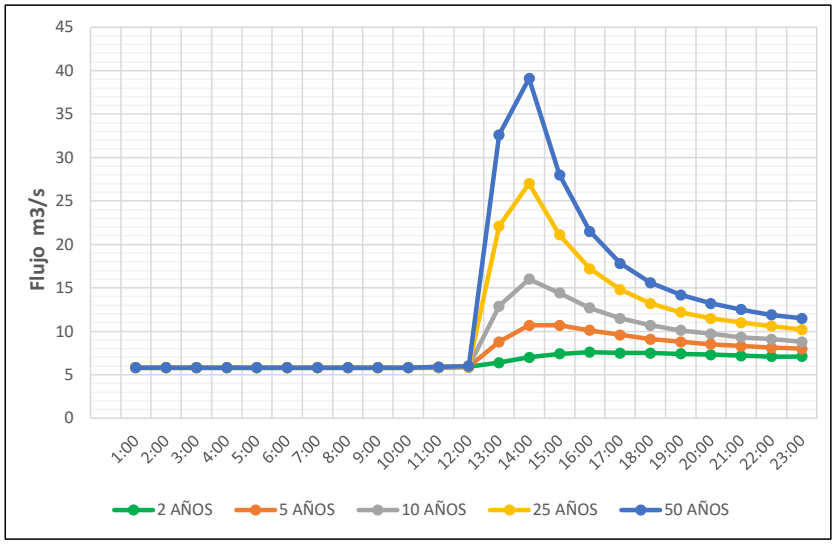

Figura 20. Unión de caudales de los ríos Motolo y Pindo.

Río Plata

En el diagrama corresponde al hidrograma de crecida del río Plata con las simulaciones realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años; se observa un flujo base promedio mensual del río Plata de 3.2 m^3/s y se eleva cuando se produce la precipitación (Figura 21). En todos los periodos de retorno el río alcanza su descarga máxima a las 13:00 horas, con un flujo que varía en cada periodos de retorno; en el periodo de retorno de 2 años el flujo aumenta a 8.5 m^3/s, para el periodo de retorno de 5 años el flujo puede aumentar a 10.9 m^3/s, en el periodo de retorno de 10 años el flujo puede llegar a 13.1 m^3/s, para periodo de retorno de 25 años a 16.5 m^3/s y para el periodo de retorno de 50 años el flujo puede llegar a 19.5 m^3/s (Figura 21).

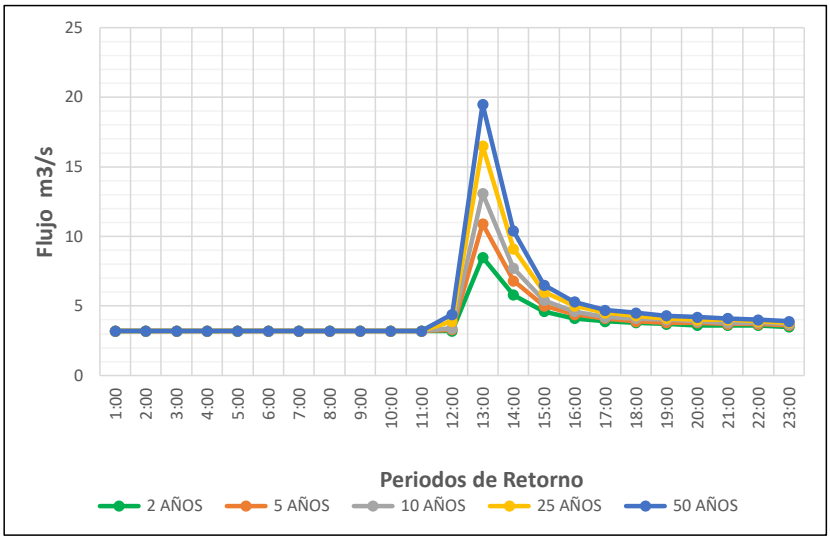

Figura 21. Simulación de crecida del río Plata en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

El volumen de la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno*;* en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.85 mm, de los cuales 96.24 mm se pierden por infiltración mientras que 19.64 mm generaron escorrentía; en el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 103.95 mm se pierden por infiltración y 26.98 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 109.9 mm se pierden por infiltración mientras que 33.72 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 117.85 mm y generando escorrentía 44.44 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02mm perdiéndose por infiltración 123.84 mm y generando escorrentía 54.18 mm (Figura 22).

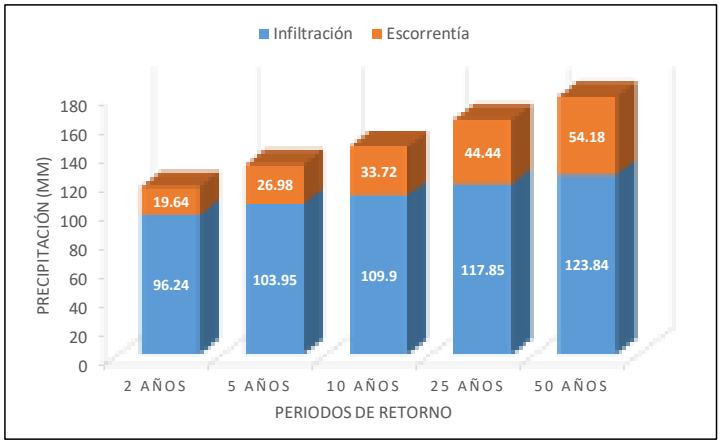

Figura 22. Pérdida de precipitación en el río Plata.

Unión río Plata y río Pindo (río Pindo)

En este punto el caudal del río Pindo (Figura 20) y el río Plata (Figura 21) se han juntando, originando un cauce más grande, en este punto no se utiliza la lluvia de diseño debido a que esta ya se utilizó en los ríos antes mencionados (Plata y Pindo).

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de las uniones de los ríos Plata y Pindo con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 9 m^3/s, mismo que corresponde a la suma de los caudales base de los ríos mencionados anteriormente. En todos los periodos de retorno el río alcanza su descarga máxima a las 13:00 horas, con un flujo que varía en cada periodos de retorno; periodo de retorno de 2 años: 14.9 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 19.7 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 25.9 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 38.6 m^3/s, periodo de retorno de 50 años: 52.2 m^3/s (Figura 23).

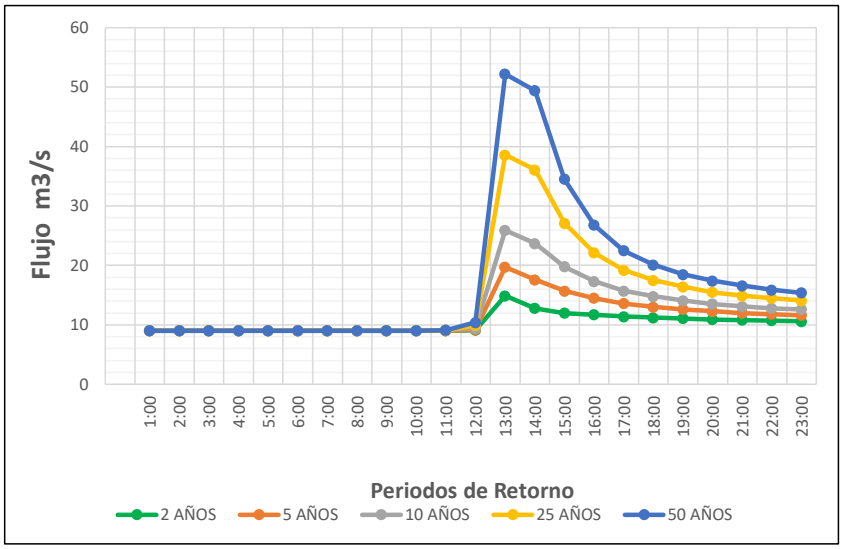

Figura 23. Unión de caudales de los ríos Plata y Pindo.

Río Pindo Chico

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma del río Pindo Chico, con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años; se observa un flujo base promedio mensual del río de 2.7 m^3/s. En el periodo de retorno de 2 años el río puede alcanzar su descarga máxima a las 14:00 horas, con un posible flujo de crecida de 3.4 m^3/s; mientras que en los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años la descarga máxima del río se puede producir a las 13:00 horas, con posibles flujos de crecidas de 4.5 m^3/s, 6.4 m^3/s y 10.2 m^3/s y 14.3 m^3/s respectivamente (Figura 24).

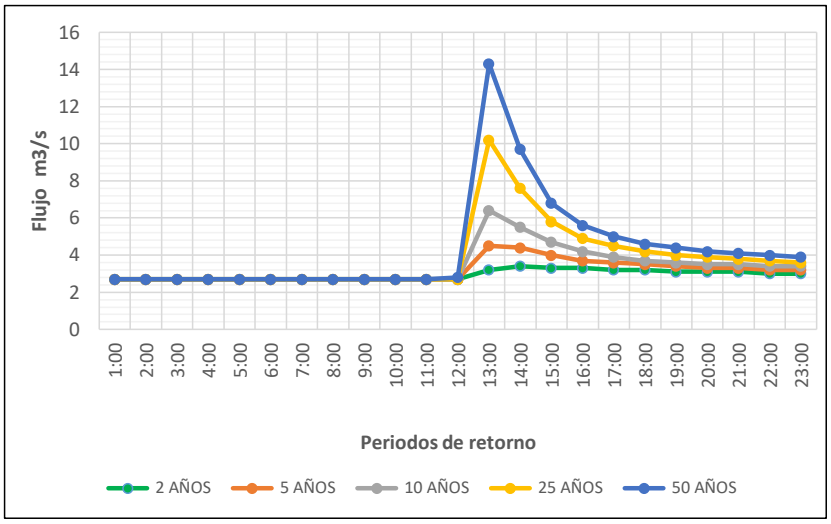

Figura 24. Simulación de crecida del río Pindo Chico en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se evidencia la infiltración y escorrentía de la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno*;* en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.85 mm, de los cuales 113.35 mm se pierden por infiltración mientras que 2.53 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 125.82 mm se pierden por infiltración y 5.11 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 135.73 mm se pierden por infiltración mientras que 7.89 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 149.38 mm y generando escorrentía 12.91 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02mm perdiéndose por infiltración 160.12 mm y generando escorrentía 17.9 mm (Figura 25).

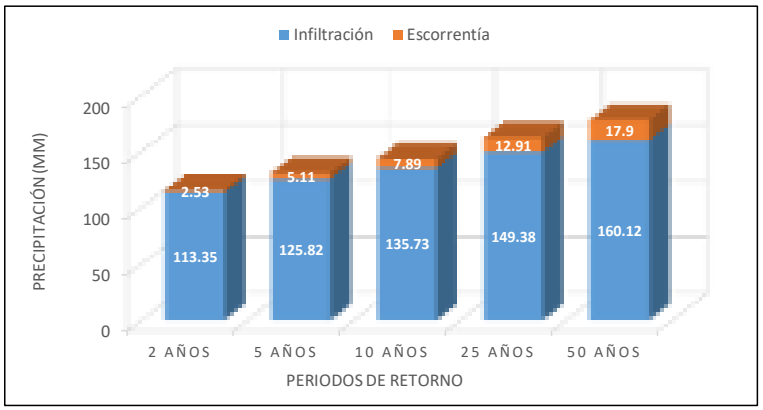

Figura 25. Pérdida de precipitación en el río Pindo Chico.

Unión río Pindo y río Pindo Chico (Río Pindo Grande)

En este punto el caudal del río Pindo (figura 23) y el río Pindo Chico (figura 24) se han unido, originando un cauce más grande en este punto no se utiliza la lluvia diseño debido a que esta se utilizó en los ríos antes mencionados y este tramo solo está juntando sus aguas.

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de las uniones de los ríos Pindo y Pindo Chico (ahora pasará a llamarse Pindo Grande) con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 11.8 m^3/s, mismo que corresponde a la suma de los caudales base de los ríos mencionados anteriormente. En todos los periodos de retorno el río alcanza su descarga máxima a las 13:00 horas, con un flujo que varía en cada periodos de retorno; periodo de retorno de 2 años: 18 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 24.2 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 32.2 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 48.8 m^3/s, periodo de retorno de 50 años: 66.5 m^3/s (Figura 26).

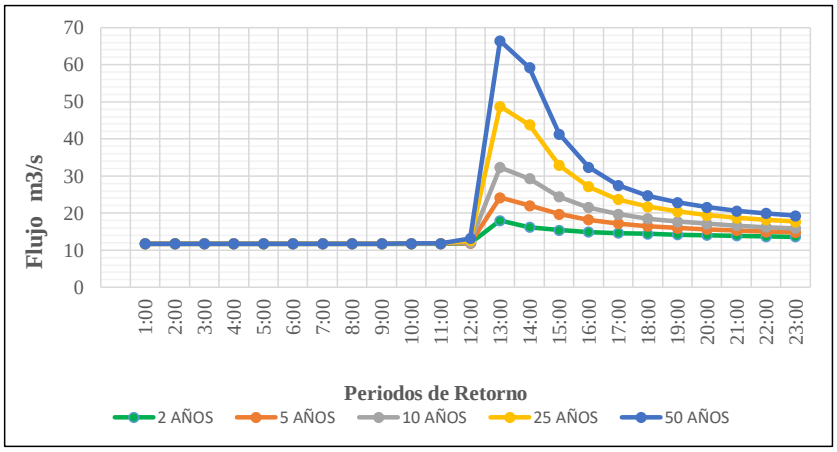

Figura 26: Unión de caudales de los ríos Pindo y Pindo Chico.

Río Salomé

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma del río Motolo, con las simulaciones realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 5 m^3/s. En los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años el río alcanza su descarga máxima a las 13:00 horas, con un flujo de8.2 m^3/s, 11.2 m^3/s, 14.3 m^3/s y 20 m^3/s respectivamente; mientras que en el periodo de retorno de 50 años la descarga máxima del río se produjo a las 14:00 horas, con un flujo de 26.3 m^3/s (Figura 27).

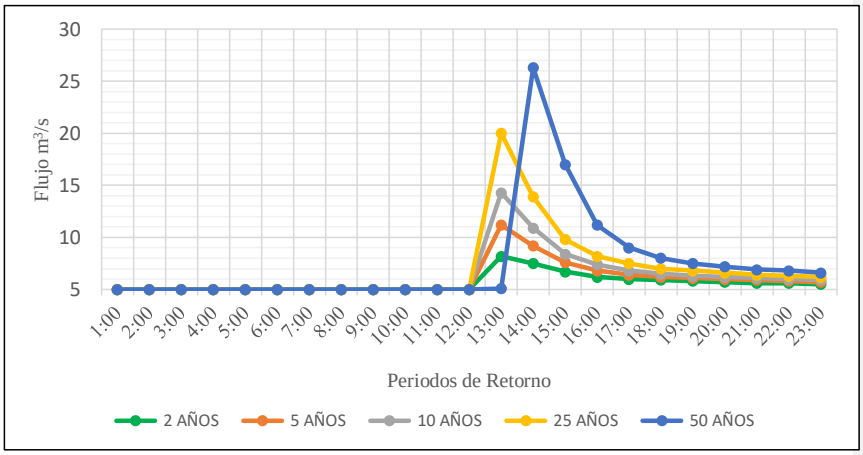

Figura 27. Simulación de crecida del río Salomé en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se evidencia la infiltración y escorrentía de la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.85 mm, de los cuales 115.8 mm se pierden por infiltración mientras que 0.08 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 130.83 mm se pierden por infiltración y 0.1 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 143.51 mm se pierden por infiltración mientras que 0.11 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 161.72 mm y generando escorrentía 0.57 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02mm perdiéndose por infiltración 176.4 mm y generando escorrentía 1.62 mm.

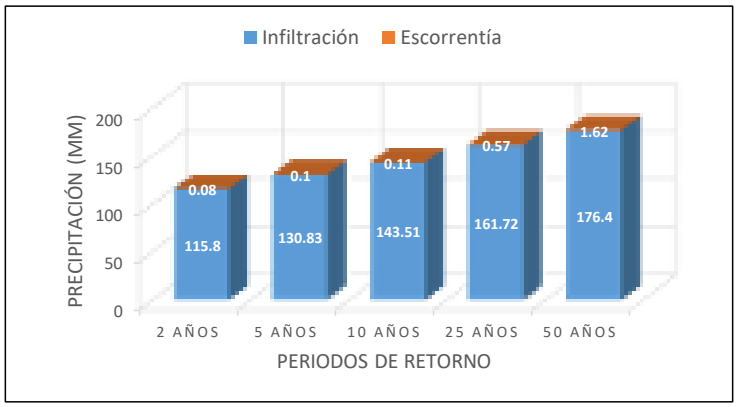

Figura 28. Pérdida de precipitación en el río Salomé.

Unión del río Salomé y Pindo Grande (Río Pindo Grande)

En este punto el caudal del río Salomé (Figura 26) y el río Pindo Grande (figura 28) se han unido, originando un cauce más grande, en este punto no se utiliza la lluvia diseño debido a que esta se utilizó en los ríos antes mencionados y este tramo solo está juntando sus aguas.

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de las uniones de los ríos Salomé y Pindo Grande (conserva el nombre de Pindo Grande) con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 16.7 m^3/s, mismo que corresponde a la suma de los caudales base de los ríos mencionados anteriormente. En los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años el río alcanza su descarga máxima a las 13:00 horas, con un flujo de: periodo de retorno de 2 años: 26.2 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 35.3 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 46.6 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 68.8 m^3/s; así mismo el periodo de retorno de 50 años obtuvo un caudal de 95 m^3/s a las 14:00 horas (Figura 29).

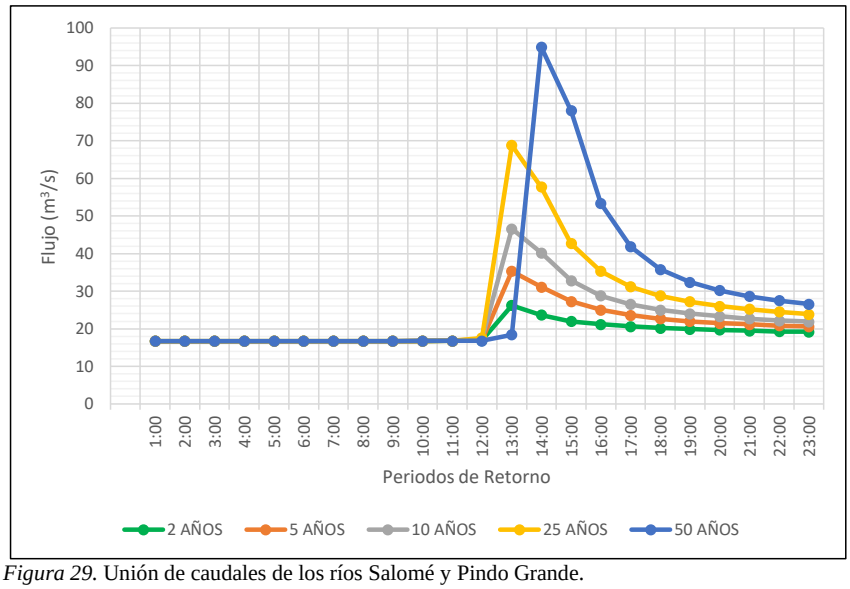

Figura 29. Unión de caudales de los ríos Salomé y Pindo Grande.

Río Puyo

Se indica el diagrama correspondiente al hidrograma de crecida del río Puyo con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 26.6 m^3/s. En todos los periodos de retorno el río alcanza su descarga máxima a las 14:00 horas, con un flujo que varía en cada periodos de retorno; periodo de retorno de 2 años: 42.9 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 62.4 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 84.3 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 124.5 m^3/s, periodo de retorno de 50 años: 165.2 m^3/s (Figura 30).

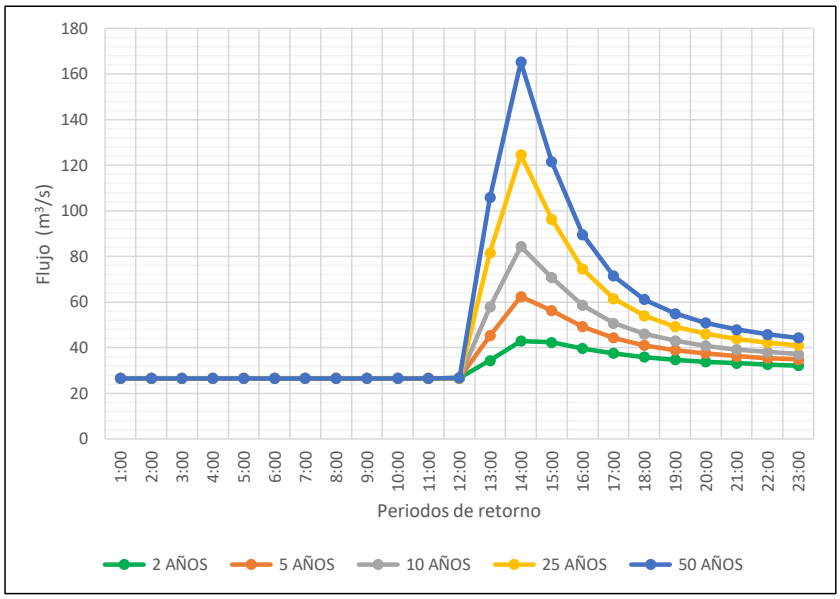

Figura 30. Simulación de crecida del río Puyo en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se evidencia la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno; en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.85 mm, de los cuales 111.31 mm se pierden por infiltración mientras que 4.57 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 122.91 mm se pierden por infiltración y 8.02 mm

generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 132.08 mm se pierden por infiltración mientras que 11.54 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 144.68 mm y generando escorrentía 17.61 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02mm perdiéndose por infiltración 154.51 mm y generando escorrentía 23.51 mm (Figura 31).

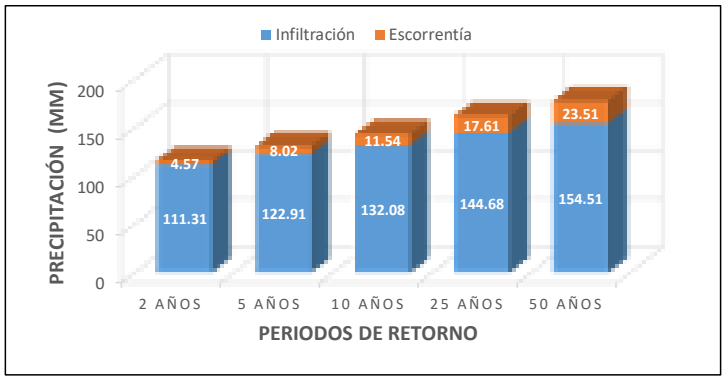

Figura 31. Pérdida de precipitación en el río Puyo.

Río Pambay

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de crecida del río Pambay con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 3.1 m^3/s. En los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años el río alcanza su descarga máxima a las 14:00 horas, con un flujo de: periodo de retorno de 2 años: 6.9 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 9.9 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 13.1 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 18.6 m^3/s; así mismo el periodo de retorno de 50 años obtuvo un caudal de 24.5 m^3/s a las 15:00 horas (figura 32).

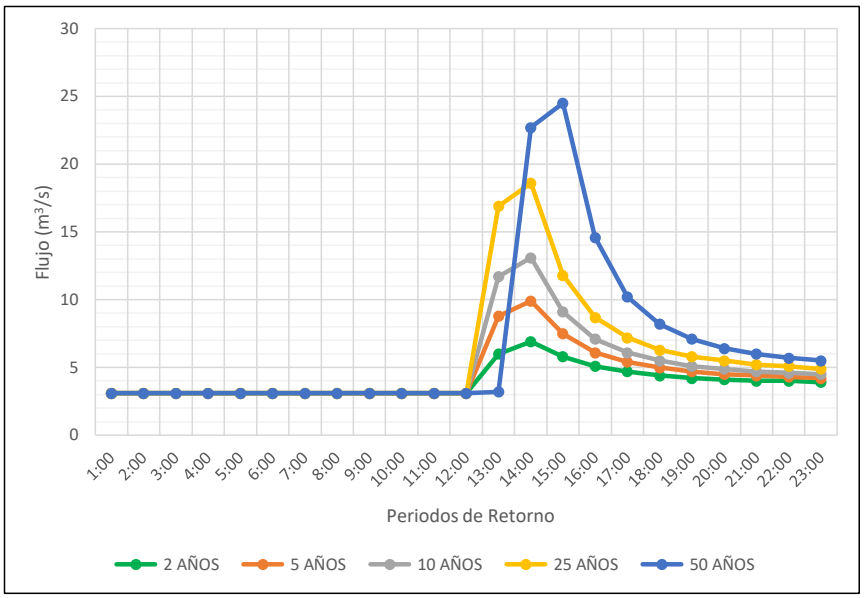

Figura 32. Simulación de crecida del río Pambay en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Se evidencia en la lluvia ocurrida en los diferentes periodos de retorno; en el periodo de retorno de 2 años alcanza un volumen de precipitación de 115.85 mm, de los cuales 108.78 mm se pierden por infiltración mientras que 7.1 mm generaron escorrentía; el periodo de retorno de 5 años 130.96 mm fue el volumen de precipitación de los cuales 119.55 mm se pierden por infiltración y 11.38 mm generan escorrentía; en el periodo de retorno de 10 años alcanza un volumen de precipitación 143.62 mm, de los cuales 127.99 mm se pierden por infiltración mientras que 15.63 mm generaron escorrentía; por otra parte en el periodo de retorno de 25 años el volumen de precipitación incrementa a 162.29 mm, perdiéndose por infiltración 139.53 mm y generando escorrentía 22.76 mm; finalmente el volumen de precipitación del periodo de retorno de 50 años ascendió a 178.02mm perdiéndose por infiltración 148.37 mm y generando escorrentía 29.48 mm (Figura 33).

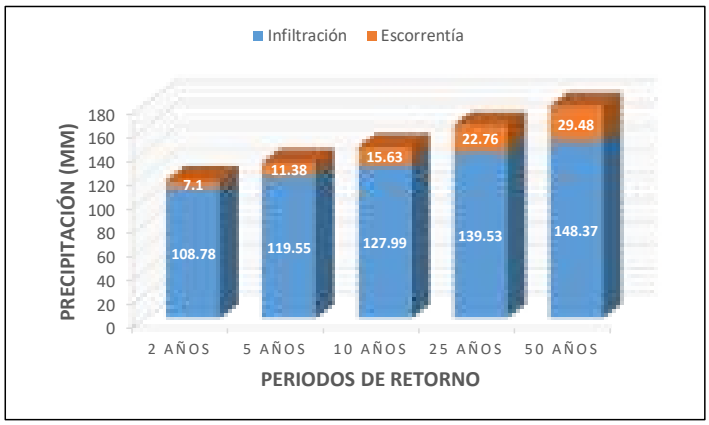

Figura 33. Pérdida de precipitación en el río Pambay.

Unión del río Puyo y Pambay (río Puyo)

Se muestra el diagrama correspondiente al hidrograma de las uniones de los ríos Puyo y Pambay con las simulaciones de crecida realizadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años, observándose un flujo base promedio mensual del río de 29.7 m^3/s, mismo que corresponde a la suma de los caudales base de los ríos mencionados anteriormente. En los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años el río alcanza su descarga máxima a las 14:00 horas, con un flujo de: periodo de retorno de 2 años: 49.8 m^3/s, periodo de retorno de 5 años: 72.4 m^3/s, periodo de retorno de 10 años: 97.3 m^3/s, periodo de retorno de 25 años: 143 m^3/s; así mismo el periodo de retorno de 50 años obtuvo un caudal de 194.5 m^3/s a las 15:00 horas.

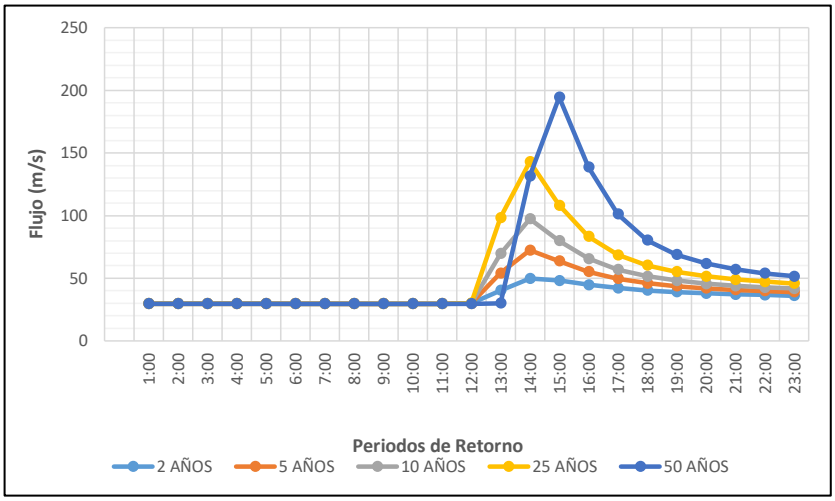

Figura 34. Unión de caudales de los ríos Puyo y Pambay.

En cumplimiento del cuarto objetivo: “Diseñar un modelo de inundabilidad de los sectores más vulnerables del centro urbano de las parroquias Puyo y Tarqui”, se obtuvieron los siguientes resultados:

4.4 Modelo de inundabilidad de los sectores más vulnerables del centro urbano de la parroquia Puyo.

4.4.1 Simulación de inundación en el sector: La Isla, en la ciudad del Puyo.

La simulación de inundación muestra dos de los parámetros más importantes en un evento de crecida: La profundidad del río (Figura 35) y la velocidad del flujo (Figura 36). El color azul representa la profundad del río y el color naranja representa su velocidad, mientras más intenso sea el color significa mayores serán los valores de estos parámetros. En esta simulación la profundidad máxima que puede alcanzar el río Puyo en el sector La Isla es de 5.5 m, en los sectores con mayor profundidad el río alcanza bajas velocidades, promediando los 0.2 m/s; en las partes menos profundas del río, se obtiene una velocidad mayor, pudiendo alcanzar valores de velocidad aproximados a 4.9 m/s.

Se trabajó con un periodo de retorno de 50 años, y un flujo de caudal de 194.5 m^3/s (Figura 34), la posible área de inundación del río Puyo en el sector La Isla es de 7750 m^2 para una longitud del río de 800 m.

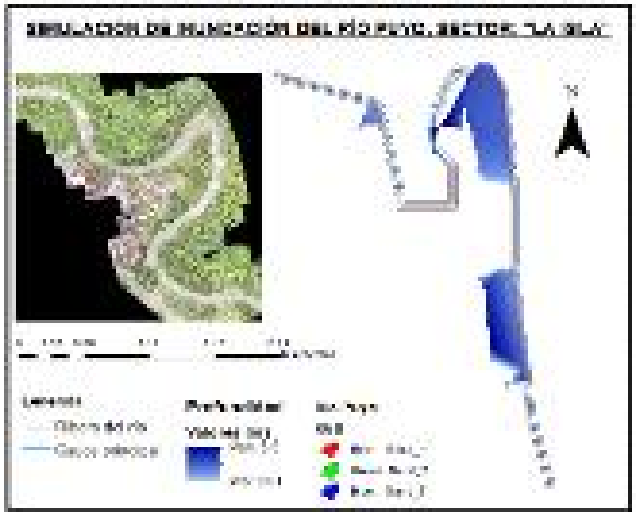

Figura 36. Simulación de inundación del río Puyo, sector La Isla, parámetro: profundidad.

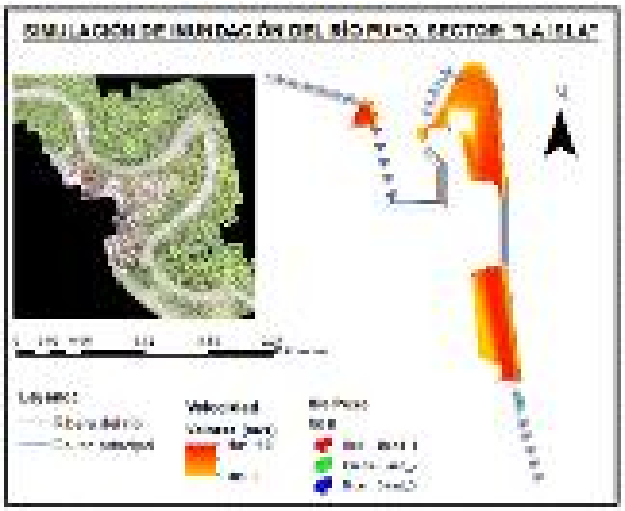

Figura 35. Simulación de inundación del río Puyo, sector La Isla, parámetro: velocidad.

4.4.2 Simulación de inundación del río Pindo en el sector: El Dorado, en la ciudad del Puyo.

La simulación de inundación del río Pindo en el sector El Dorado muestra dos de los parámetros más importantes en un evento de crecida: La profundidad del río (Figura 37) y la velocidad del flujo (Figura 38). El color azul representa la profundad del río y el color naranja representa su velocidad, mientras más intenso sea el color significa mayores serán los valores de estos parámetros. En esta simulación la profundidad máxima que puede alcanzar el río Pindo en el sector El Dorado es de 4.5 m, en los sectores con mayor profundidad el río alcanza bajas velocidades, promediando los 0.13 m/s; en las partes menos profundas del río, se obtiene una velocidad mayor, pudiendo alcanzar valores de velocidad aproximados a 3.28 m/s.

Se trabajó con un periodo de retorno de 50 años, y un flujo de caudal de 66.5 m^3/s (Figura 26), la posible área de inundación del río Pindo en el sector El Dorado es de 57 830 m^2 para una longitud del río de 2 076 m.

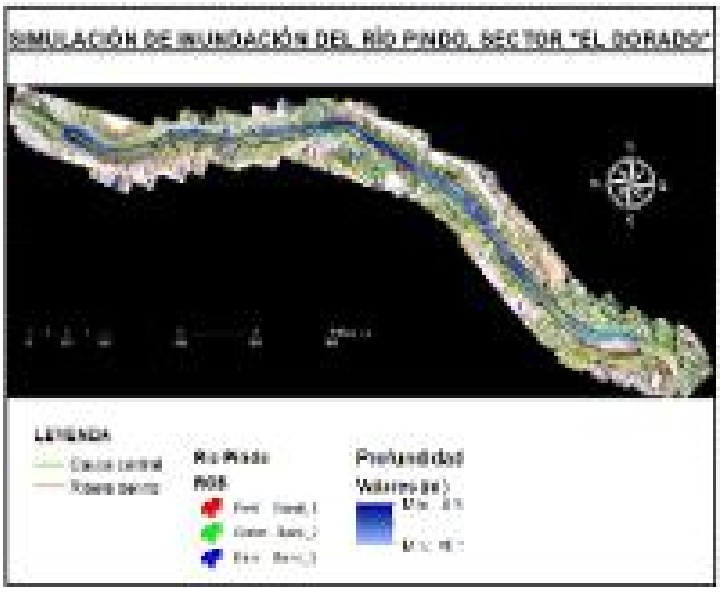

Figura 37. Simulación de inundación del río Pindo, sector El Dorado, parámetro: profundidad.

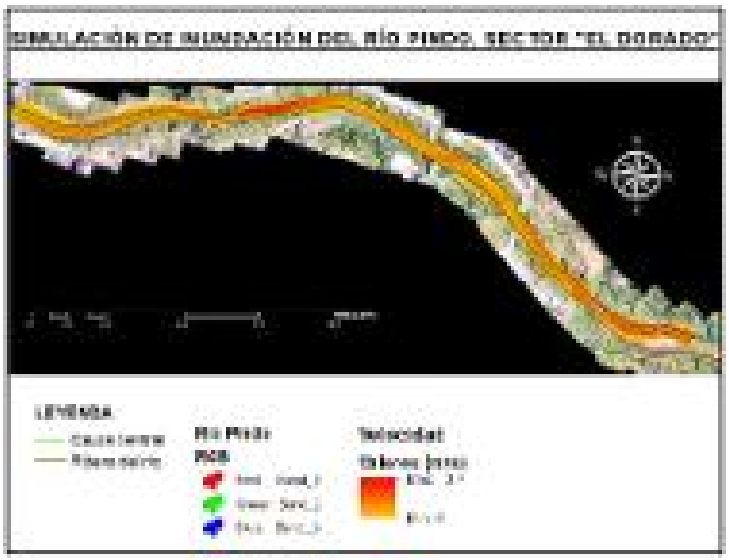

Figura 38. Simulación de inundación del río Pindo, sector El Dorado, parámetro: velocidad.

CONCLUSIONES

A partir de los objetivos planteados en la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se determinaron las características geomorfológicas de las cuencas hidrográficas de los ríos Pindo, Puyo y sus afluentes, pudiendo observar que las cuencas que presentan un número de curva (CN) más elevado tienden a presentar un mayor valor de escorrentía, aunque el área de su cuenca hidrográfica sea pequeña.

- Luego del análisis de las precipitaciones proporcionadas por el INAMHI, se generó la lluvia de proyecto (o lluvia diseño) para las parroquias Puyo, Shell y Tarqui en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años; esta fue la base para poder lograr el modelamiento de las crecidas del caudal de los ríos en estudio.

- Se generaron los modelamientos de crecida de los ríos Pindo y Puyo con sus respectivos afluentes; el volumen total de precipitación alcanzado fue de 177.85 mm. El total de precipitación que se convirtió en flujo del cauce de los ríos estudiados (escorrentía) fue de 460.84 mm, lo que equivale a 460 litros de agua en un metro cuadrado de suelo.

- Al generar el modelo de inundación, el río Puyo presentó el mayor flujo de crecida en todos los periodos de retorno aplicados, esto debido a tener el mayor tamaño de área de cuenca hidrográfica, la longitud de cauce más larga, mayor cantidad de tributarios, y sobre todo a presentar un caudal de 26.6 m^3/s, muy superior al resto de los ríos. El tramo del río Puyo sector La isla y el tramo del río Pindo, sector El Dorado se identificaron como zonas vulnerables ante un evento de crecida de magnitudes considerables; sin embargo, el sector La Isla es más propenso a inundaciones.

RECOMENDACIONES

- Antes de hacer uso de las herramientas informáticas (softwares) se recomienda hacer la configuración del computador, respecto a los formatos de números y decimales, esto debido a que los programas utilizados en este proyecto son de origen norteamericano y están programados en inglés.

- Se recomienda exportar la tabla de resultados del programa HEC-HMS a la aplicación EXCEL para generar los gráficos manualmente, esto mejora la precisión de los gráficos.

- Se recomienda leer el manual de uso del software HEC-HMS para evitar posibles errores al momento de correr la simulación.

- Guardar todos los archivos creados en el ARCGIS en una sola carpeta para poder encontrarlos fácilmente y no haya errores de cálculo al momento de generar el área de las cuencas hidrográficas.

- Trabajar ordenadamente es la base para que el proyecto salga de la mejor manera posible, tener una libreta de apuntes es una buena opción al momento de recopilar información.

- Realizar mediciones de campo para obtener resultados más exactos.

REFERENCIAS

Abril, R., Yanez, Y., Villaroel, C., Idrovo, I., Caicedo, E., Vargas, M., . . . Valle, M. (9 de Noviembre de 2019). INFLUENCE OF LAND USE AND GEOMORPHOLOGY ON THE FLOW OF THE PINDO RIVER, ECUADOR. *Journal of Environmental Hydrology*, *27*, Paper 9.

Aragón, J., Aguilar, G., Velásquez, U., Jiménez, M., & Mayo, A. (2019). Distribución espacial de las variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de iterpolación. *Scielo*, 1-15.

Arteaga, O. (8 de marzo de 2017). *Repositorio Universidad Politécnica Nacional*. Obtenido de Evaluación del Modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/CD-8129.pdf

Baby, P., Rivadeneira , M., & Barragán, R. (2014). *LA CUENCA ORIENTE: GEOLOGÍA Y PETROLEO* (Vol. III). Quito, Ecuador: Institut français d'études andines.

Bes de Berc, S. (06 de Junio de 2003). TECTONIQUE DE CHEVAUCHEMENT, SURRECTION (EXEMPLE DE LA ZONE SUBANDINE EQUATORIENNE, HAUT BASSIN AMAZONIEN). *Tesis de Maestría.* Université de Toulouse, Toulouse, Occitania, Francia.

Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial*. Tlalpan, Ciudad de México, México: Universidad Autponoma Metropolitana.

Brito, S. (05 de 01 de 1985). GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO 77°45' - 78°00' DE LONGITUD OESTE Y 01°00' - 01°10' DE LATITUD SUR, ESCALA 1:50.000 (ÁREA APROXIMADA: 500KM2) LOCALIZADA EN PUERTO NAPO, PROVINCIA DE NAPO. *Tesis de ingeniería.* Universidad Politécnica del Litoral, Guayaquil, Guayas, Ecuador.

Campoblanco, H., & Gomero, J. (2000). IMPORTANCIA DE LOS RÍOS EN EL ENTORNO AMBIENTAL. *Revista del Instituto de Innvestigación de la Facultad de Geología, Minas y Metalurgia y Ciencias Geográficas.*

Carmona, C. (2 de febrero de 2015). *RALCEA*. Obtenido de Gestión Integrada de crecidas: http://www.produccion-animal.com.ar/libros_on_line/63-Inundaciones.pdf

Castillo, W. (10 de 17 de 2017). *Repositorio Universidad Central del Ecuador*. Obtenido de Modelación Hidrológica de eventos de crecida para el sistema de alerta temprana ante inundaciones en la cuenca del río Catamayo: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/T-UCE-011-309.pdf

CENAPRED. (2 de Agosto de 2009). *Protecciónciviil.gob*. Obtenido de INUNDACIONES: http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/377/1/images/folleto_i.pdf

Changshen, L. (3 de Agosto de 2006). *Organización Metereológica Mundial*. Obtenido de Aspectos ambientales de la gestión integrada de crecidas: https://www.apfm.info/pdf/ifm_environmental_aspects_Sp.pdf

Días, A. (5 de mayo de 2015). *Repositorio Universidad de Chile*. Obtenido de Modelación de hidrogramas de crecidas usando proyecciones de precipitaciones diarias del modelo climático MK3.6 Aplicación en la cuenca Butamalal, Chile: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Modelacion-de-hidrogramas-de-crecidas-usando-proyecciones-de-precipitaciones-del-modelo....pdf

Escamilla, V. (11 de agosto de 2019). *Red Mexicana de Cuencas*. Obtenido de Implicaciones y aplicaciones de la modelación hidrológica en cuencas: https://remexcu.org/index.php/blog/188-implicaciones-y-aplicaciones-de-la-modelacion-hidrologica-en-cuencas-i

Estrada Sifontes, V., & Pacheco Moya, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, XXXIII*(1), 94-105.

Estrada, V., & Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montaosas de la region oriental de Cuba. *Ingeniería Hidraúlica y Ambiental*, 94-105.

Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *QuímicaViva*, 147-170.

Fuentes Junco, J. (Jului de 2004). *ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE CUENCAS: CASO DE ESTUDIO DEL PARQUE NACIONAL PICO DE TANCÍTARO.* Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y COnservación de Ecosistemas, Tancítaro. Obtenido de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/morfometria_pico_tancitaro.pdf

Gaspari, F., Rodriguez , A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente.*, *4*, 143-158.

Gaspari, F., Rodriguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 143-158.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande. Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, *4*, 143-158. Obtenido de http://revistas.unlp.edu.ar/index.php/domus/issue/current/showToc

Gomez, S. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algortirmos numéricos en cuencas de montaña: Cuencia del río Suratá y cuenca del Río Oro. *Redalyc*, 213-22.

González, A. (2014). *Manual piraguero 3 - Medición del caudal*. Medellín: Libro Arte.

Huatatoca, J., & Chanaluisa, W. (2019). GEOMORFOLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RIO PAMBAY, Y MODELAMIENTO HIDROLOGICO MEDIANTE EL HEC – HMS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS. *Tesis de Grado.* Universidad Estatall Amazónica., Pastaza.

Íbañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2011). *MORFOLOGÍA DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS.* Artículo Docente, Valencia. Obtenido de http://hdl.handle.net/10251/10782

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica.* Valencia.

Illanes, I., & Paucar, M. (2019). CARACTERIZACIÓN EDAFOLÓGICA, HIDROLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA ZONA DE RECARGA DEL RÍO PLATA, BARRIO LAS PALMAS, CANTÓN PASTAZA. *Tesis de grado.* Universidad Estatal Amazónica, Pastaza.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (04 de abril de 2019). *normalización.gob*. Obtenido de Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/cpe_inen_5%20Parte_9-1.pdf

Instituto Nacional de Meteoroología e Hidrología. (2019). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación.* Quito.

Landázuri, A. (8 de noviembre de 2012). *Repositorio Universidad Estatal Amazónica*. Obtenido de LINEA BASE HIDROLOGICA DE LA MICROCUENCA MEDIA – ALTA DEL RIO: https://repositorio.uea.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/120/T.AMB.B.UEA.%203037?sequence=1&isAllowed=y

Lasso, S. (23 de septiembre de 2017). *Repositorio Universidad Austral de Chile* . Obtenido de Modelación de Inundaciones generadas por crecidas del río Blanco en la localidad de Chaitén, post eventos del 2008: http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2017/fcb322m/doc/fcb322m.pdf

López, X., & Patiño, D. (2017). Aplicación de modelos hidrológicos de las microcencas del área de bosque y vegetación protector Aguarongo con ecoque al cambio climático. *(Tesis de pregrado).* Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca., Cuenca.

Lux , B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.* Guatemala.

Manzur, A., & Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. *Scielo*, 31-34.

Mejía, G. (2013). DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DE LA MICRO CUENCA DEL RÍO MOTOLO Y PROPUESTA DE PLAN DE MANEJO EN LA PARROQUIA SHELL, CANTÓN MERA. *Tesis de grado.* Universidad Estatal Amazónica, Pastaza.

Mendoza, P. (6 de marzo de 2015). *ResearchGate*. Obtenido de Pronóstico de Caudales de Crecida Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido y la Asimilación de Datos Observados: https://www.researchgate.net/publication/47804769_Pronostico_de_Caudales_de_Crecida_Mediante_un_Modelo_Hidrologico_Distribuido_y_la_Asimilacion_de_Datos_Observados

Mendoza, P. (6 de marzo de 2015). *ResearchGate*. Obtenido de Pronóstico de Caudales de Crecida Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido y la Asimilación de Datos Observados: https://www.researchgate.net/publication/47804769_Pronostico_de_Caudales_de_Crecida_Mediante_un_Modelo_Hidrologico_Distribuido_y_la_Asimilacion_de_Datos_Observados

Nanía , L., & Molero, E. (2007). MANUAL BÁSICO DE HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1. *Manual.* Universidad de Granada, Granada.

Olivares, A. (2 de septiembre de 2005). Repositorio Universidad de Valencia. *Dialnet*, 155 - 182. Obtenido de Modelización Hidrológica Pseudo - Distribuida del Barranc del Carraixe.

OMM. (2 de abril de 2011). *www.wmo.int*. Obtenido de Manual sobre la predicción y avisos de crecidas: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4089

OMS. (29 de diciembre de 2019). *who.int*. Obtenido de Agua Saneamiento e higiene: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/es/

Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). ¿QUÉ ES CUENCA HIDROLÓGICA? *Cartilla Informativa.* SENAMHI, Lima.

Organización de los estados Americanos. (2 de mayo de 2010). *dipecholac.net*. Obtenido de Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de:

http://dipecholac.net/docs/herramientas-proyecto-dipecho/honduras/Guia-SAT-Inundaciones.pdf

Organización Metereológica Mundial. (02 de junio de 2009). *www.wmo.int*. Obtenido de https://www.floodmanagement.info/publications/concept_paper_s.pdf: https://www.floodmanagement.info/publications/concept_paper_s.pdf

Párraga Muñoz, M. L. (2015). Estudio de la Factibilidad para el Encausamiento con Enrocado para proteger el puente ubicado sobre el Río Congo en el Recinto "La Carlota" del Cantón Balza. *Tesis de ingeniería*. UniversidadLaica Vicente Rocafuerte deGuayaqui, Guayaquil, Ecuador. Obtenido de https://docplayer.es/58049662-Universidad-laica-vicente-rocafuerte-de-guayaquil-facultad-de-ingenieria-civil.html

Peña, E. (26 de junio de 2007). *Repositorio Universidad Politécnica del Litoral*. Obtenido de Calidad de Agua: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf

Pereira Díaz, D., Pérez Sesma, J. A., & Salas Ortega, M. (2010). HIDROLOGÍA. (G. d. Veracruz, Ed.) *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz, 1*, 88-122. Obtenido de http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/9650

Pereyra, D., Agustín, J., & Salas, M. (20 de enero de 2008). *Repositorio Universidad Veracruzana*. Obtenido de Hidrología : file:///C:/Users/Usuario/Downloads/04HIDROLOGIA.pdf

Räsänen, M., Neller, R., Salo, J., & Jungner, H. (1992). RECENT AND ANCIENT FLUVIAL DEPOSITION SYSTEMS IN THE AMAZONIAN FORELAND BASIN, PERÚ. *Geological Magazine, 129*(3), 293-306. doi:10.1017/S0016756800019233

Rojo Hernández, J. R. (s.f.). *ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS USANDO HIDROGRAMAS UNITARIOS.* Medellín. Recuperado el 22 de Agosto de 2020, de http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/modelos_lluvia_escorrentia.pdf

Sanchez, F. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea.* Salamanca: Independent Pub.

Sánchez, J. (18 de Febrero de 2021). *Hidrología.usal*. Obtenido de Precipitaciones: https://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf

Sandoval, W., & Aguilera, E. (4 de marzo de 2013). Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas. *REVISTA DIGITAL CONGRESO DE CIENCIA*, 81-87. Obtenido de Caudal de crecida del Río Grande, Chone.: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/88-209-1-SM.pdf

Santiago, S. (2 de noviembre de 2007). *Geografía.laguia*. Obtenido de Ecuador: hidrografía: https://geografia.laguia2000.com/hidrografia/ecuador-hidrografia

Soria, R. (2015). ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO PUYO RAMAL SALOME. *Tesis de grado.* Universidad Estatal Amazónica, Pastaza.

Soria, R. (23 de Marzo de 2015). *Repositorio Universidad Estatal Amazónica*. Obtenido de Estudio Hidrológico de la calidad del agua de la cuenca media del río Puyo Ramal Salomé: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/tesis-Ruth-Soria.pdf

Suárez, J., Jácome, A., & Ures, P. (1 de septiembre de 2015). *Repositorio Universidad de Coruña*. Obtenido de Evaporación : https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Evaporizaci%C3%B3n.pdf/d8e51741-e013-5202-966d-251a21f26726

Tapia, J. (01 de Marzo de 2016). *Repositorio Universidad de Cuenca*. Obtenido de Estructura de la precipitación y su viabilidad espacio - temporal a lo largo de una gradiente altitudinal: https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/24348/1/tesis.pdf

Toasa, F. (10 de Noviembre de 2012). *Repositorio Universidad Central del Ecuador*. Obtenido de Validación de los métodos de ensayo para fenoles, tensoactivos, sólidos suspendidos y total de sólidos disueltos (tds): http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/894/1/T-UCE-0017-19.pdf

Toledo, L. (1 de Marzo de 2015). *Repositorio Universidad Autónoma del Estado de México*. Obtenido de Evaporación y transpiración: https://core.ac.uk/download/pdf/55525744.pdf

Tschopp, H. J. (1953). Oil Explorations in the Oriente of Ecuador. *AAPG BUlletin, 37*(10), 2303-2347. doi:https://doi.org/10.1306/5CEADD94-16BB-11D7-8645000102C1865D

UNICEF. (4 de Enero de 2011). *ACF International*. Obtenido de Saneamiento e higiene para las poblaciones en riesgo: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/acf_hermann_editeurs_agua_saneamiento_e_higiene_para_las_poblaciones_en_riesco_2011.pdf

Universidad Militar Nueva Granada. (02 de diciembre de 2013). Obtenido de Implementación de la metodología del hidrograma unitario geomorfológico en la cuenca del río negro: https://core.ac.uk/download/pdf/143450116.pdf

Useros, J. (2012). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *Dialnet*, 71 98.

Valera, A., & Ron, S. (23 de Noviembre de 2020). *bioweb.bio*. Obtenido de Geografía y Clima del Ecuador: https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/

Vallejo, C. (01 de marzo de 2019). *Repositorio Universidad Central del Ecuador*. Obtenido de La vulnerabilidad física frente a inundaciones del río Puyo en el sector de la Isla: Cantón Pastaza: http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17879/1/T-UCE-0012-FIG-079.pdf

Vargas, L., Torres, O., & Carrilo, G. (2019). Evaluación del modelo de hidrogrma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander . *Jornal of Engineering sciences*, 6-13.

WORLD VISION. (2013). *MANUAL DE MANEJO DE CUENCAS.* Ottawa.

Zuñiga, M. (2000). Agua para el siglo XXI para América del Sur. *InduAmbiente*, 2-88.