



**Implementación del Modelo Automata Celular de Evolución del Paisaje CAESAR-
Lisflood, para determinar zonas posibles de inundación en la subcuenca del río
Portoviejo**

Moncayo Galárraga, Diego Sebastián

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio
Ambiente

Ing. Robayo Nieto, Alexander Alfredo Msc.

21 de enero del 2022

COPYLEAKS

TESIS_MONCAYO_DIEGO_.docx

Scanned on: 15:0 January 21, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Escaneado electrónicamente por:
ALEXANDER
ALFREDO ROBAYO
NIETO

Identical Words	789
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Ommited Words	5389



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

Certifico que el trabajo de titulación: **“Implementación del Modelo Automata Celular de Evolución del Paisaje CAESAR-Lisflood, para determinar zonas posibles de inundación en la subcuenca del río Portoviejo.”**, fue realizado por el Sr. **Moncayo Galárraga Diego Sebastián**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por lo cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de enero del 2022



Ing. Robayo Nieto, Alexander Alfredo Msc.

C.C.: 1709139065



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERIA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Sr. Moncayo Galárraga Diego Sebastián con cédula de ciudadanía N° 1717553976 declaro que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **"Implementación del Modelo Automata Celular de Evolución del Paisaje CAESAR-Lisflood, para determinar zonas posibles de inundación en la subcuenca del río Portoviejo."**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Sangolquí, 21 de enero del 2022

Diego Sebastián Moncayo Galárraga

C.C.:1717553976



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERIA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Sr. Moncayo Galárraga Diego Sebastián con cédula de ciudadanía N° 1717553976 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación: **“Implementación del Modelo Automata Celular de Evolución del Paisaje CAESAR-Lisflood, para determinar zonas posibles de inundación en la subcuenca del río Portoviejo.”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de enero del 2022

Una firma manuscrita en tinta que dice 'Diego Moncayo'.

Diego Sebastián Moncayo Galárraga

C.C.:1717553976

Dedicatoria

A mis padres, Germán y María de Lourdes que me han dado su amor y apoyo incondicional en todos los años de mi vida, desde mi niñez, adolescencia y en mi camino de los estudios en la universidad, siempre dándome una palabra de aliento cuando más lo necesité, para no rendirme por mis sueños a pesar de las dificultades; ellos siempre me recuerdan que la familia es lo más importante y debemos saber apoyarnos en los buenos y malos momentos.

A mis hermanos mayores, con los que he compartido a lo largo de mi vida grandes experiencias y me han dado valiosos consejos para ser una mejor persona y rectificar mis errores, por lo que son mi ejemplo a seguir. Mis hermanos supieron ayudarme en muchas ocasiones en mis estudios de la universidad y en el proceso de realizar mi proyecto de investigación.

A todos mis amigos que conocí en toda mi carrera universitaria, algunos siguieron otro camino y otros se quedaron, pero de cada uno de ellos tengo buenos recuerdos, me dieron consejos, pero sobretodo una amistad verdadera. Con ellos compartí momentos de felicidad y tristeza que me hicieron valorar su amistad cuando entre todos nos supimos apoyar para salir adelante en los estudios.

A todos mis familiares que los aprecio mucho, y que todo momento estuvieron presente, preguntándome de cómo me va con los estudios y en mi vida personal, dándome siempre su apoyo.

A mi perrito, que en el comprendí lo que es el amor de un ser tan inocente, y que me acompañó en las largas noches, haciendo mis deberes y estudiando.

Diego Sebastián Moncayo Galárraga

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad para vivir cada día en este mundo, a mis padres y hermanos quienes han sido mi pilar fundamental para lograr mis metas y estar en el lugar donde me encuentro ahora, a mis familiares y amigos quienes me han dado su apoyo, ayuda y consejos para salir adelante en todos los momentos a lo largo de mi vida.

Un especial agradecimiento a los ingenieros Alexander Robayo y Oswaldo Padilla, por su paciencia, apoyo, guía y valioso conocimiento para cumplir con los objetivos y metas del proyecto de investigación.

Al Ing. Alexis Pavón por la ayuda y guía que me brindo para realizar el modelamiento en el proyecto de investigación.

A los ingenieros Santiago Echeverría y Ramiro Aguilar, quienes me facilitaron información para realizar el proyecto de investigación.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE, lugar donde conocí excelentes docentes de la Carrera Ingeniería Geográfica y del medio Ambiente quienes me transmitieron sus valiosos conocimientos para mi formación académica y profesional.

Diego Sebastián Moncayo Galárraga

Índice de contenidos

Índice de contenidos.....	8
Índice de Tablas	17
Índice de Figuras	22
Resumen	28
Abstract.....	29
Capítulo I.....	30
Aspectos generales	30
Antecedentes.....	30
Planteamiento del problema	32
Objetivos	34
Objetivo General.....	34
Objetivos Específicos	35
Metas	36
Descripción del área de estudio para el modelamiento de inundaciones	36
Capítulo II.....	38
Marco teórico	38
Gestión de riesgos.....	38
Riesgo.....	38
Peligro o amenaza.....	38
Peligros o amenazas generados por fenómenos de origen natural	39

Peligros o Amenazas Seudo o socio naturales	39
Vulnerabilidad	39
Inundaciones.....	40
Tipos de inundaciones.	41
Inundaciones pluviales.....	41
Inundaciones fluviales.....	41
Inundaciones por ruptura de presas.....	41
Causas de inundaciones.	42
Causas Antrópicas.	42
Causas Naturales.....	42
Consecuencia de las inundaciones.	43
Cuenca Hidrográfica.....	43
División de una Cuenca Hidrográfica	44
Partes de una Cuenca Hidrográfica.....	44
Morfometría de Cuencas Hidrográficas.....	45
Parámetros generales de una Cuenca Hidrográfica	45
Área (A).	45
Perímetro (P) (km).	45
Longitud del cauce principal (L) (m).....	45
Ancho de la Cuenca.....	46
Parámetros de forma.....	46
Coeficiente de compacidad o Gravelius (kc).....	46

Factor de Forma de Horton (kf)	47
Parámetros de relieve	47
Elevación media de la cuenca.	47
Desnivel Altitudinal (DA).....	48
Pendiente Media.....	48
Pendiente del cauce principal.....	49
Curva Hipsométrica.....	50
Caracterización de la red de drenaje	50
Densidad de drenaje (D_d).....	51
Orden de corrientes.....	51
Densidad de corriente.....	53
Coeficiente de torrencialidad.	53
Índice de sinuosidad.	54
Caracterización hidrológica e hidrométrica de una cuenca hidrográfica	54
Precipitación media de una cuenca hidrográfica.....	54
Polígonos de Thiessen.....	54
Isoyetas.	55
Escorrentía.	56
Número de curva en la escorrentía.	57
Tiempo de concentración.	59
Caudales y precipitaciones máximas con métodos estadísticos y HEC-HMS.	60
Análisis de frecuencias.....	60

Modelos de distribución de probabilidad.....	61
Distribución de Gumbel.....	61
Período de retorno.....	62
Curvas IDF (Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia).....	63
Hietograma.....	63
Hidrograma unitario.....	64
Obtención de caudales máximos con el software HEC-HMS.....	65
Coefficiente de Rugosidad (n de Manning).....	67
Método de Cowan.....	67
Método de Strickler.....	68
Análisis granulométrico de sedimentos.....	68
Transporte de sedimentos.....	69
Flujo en Canales.....	70
Flujo permanente (estacionario) y no permanente (no estacionario).....	72
Flujo uniforme y flujo variado.....	72
Estados de Flujo.....	73
Flujo en régimen subcrítico, crítico y supercrítico.....	74
Autómatas celulares.....	74
Elementos que forman a los autómatas celulares.....	75
Arreglo Regular.....	75
Conjunto de estados.....	75
Vecindades.....	76

Función o regla de transición.....	77
Modelación numérica de inundaciones fluviales	77
Modelos unidimensionales	78
HEC -RAS (Modelo unidimensional).....	79
Ecuación de conservación de energía en flujo permanente (HEC-RAS 1D).....	79
Modelos bidimensionales	80
Modelo de evolución del paisaje CAESAR.....	81
CAESAR-Lisflood.....	81
Rutina hidrológica de CAESAR-Lisflood.....	83
Rutina Hidráulica de CAESAR -Lisflood.	85
Rutina de procesos de erosión y deposición de sedimentos en CAESAR.	87
Rutina de pendiente con movimientos de masa arrastre.	87
Capítulo III	88
Caracterización de los parámetros morfométricos, hidrológicos e hidrométricos de la microcuenca del río Portoviejo	88
Descripción y delimitación de la cuenca, subcuenca y microcuenca del río Portoviejo.....	88
Caracterización morfométrica de la microcuenca del Río Portoviejo	91
Parámetros de forma de la microcuenca del Río Portoviejo	91
Coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius (Kc).....	91
Factor de Forma de Horton (kf).	92
Parámetros de relieve de la microcuenca del Río Portoviejo	93
Elevación media	93

Pendiente media.....	94
Pendiente media del cauce principal.....	96
Curva Hipsométrica.....	99
Parámetros de drenaje de la microcuenca del Río Portoviejo	99
Densidad de drenaje.....	99
Orden de corrientes.....	100
Densidad de Corriente.....	102
Coeficiente de Torrencialidad.....	102
Índice de sinuosidad.....	103
Caracterización hidrológica e hidrométrica de la microcuenca del río Portoviejo.....	103
Precipitación media	103
Precipitación media por Método de los Polígonos de Thiessen.....	111
Precipitación media por Método de las Isoyetas.....	112
Tiempo de concentración	114
Tiempo de concentración con la ecuación de Temez.....	114
Tiempo de concentración con la ecuación de Kirpich.....	115
Tiempo de concentración con la ecuación de retardo.....	115
Precipitaciones y caudales máximos por métodos estadísticos y HEC-HMS.....	120
Obtención de las Curvas IDF (Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia).....	120
Obtención de hietogramas a partir de curvas IDF.....	131
Caudales máximos a partir de hietogramas.....	135
Basin Model.....	135

Time Series Data Manager.....	136
Meteorologic Model Manager.....	137
Caudales máximos a partir del modelo de distribución de Gumbel.....	139
Capítulo IV.....	141
Modelamiento de inundaciones con Caesar Lisflood en la parroquia Colón del cantón Portoviejo.....	141
Información y Datos.....	141
Caracterización granulométrica del cauce del río Portoviejo.....	141
Cálculo del n de Manning en el cauce del río.....	148
Preparación del DEM para CAESAR Lisflood.....	151
Depuración de los valores NoData del DEM en la parroquia Colón.....	152
Quema del canal principal de la subcuenca del río Portoviejo.....	153
Creación del DEM de lecho de río y transformación a formato ASCII.....	155
Preparación de archivos hidrometeorológicos.....	155
Archivos de precipitación .txt.....	155
Archivo de descarga.txt.....	158
Introducción de información en CAESAR Lisflood.....	160
Files (Archivos).....	160
Numérica.....	160
Sedimentos.....	161
Hidrología.....	162
Vegetación.....	162

Procesos de Pendiente.....	163
Modelo de flujo.....	163
Capítulo V.....	167
Resultados y análisis de las zonas de inundación obtenidas mediante el modelo Automata Celular Caesar- Lisflood y comparación con los resultados de HEC-RAS.....	167
Áreas y alturas de inundación.....	169
Áreas y alturas de inundación utilizando el modo de alcance (Reach Mode) de CAESAR-Lisflood.....	169
Áreas y alturas de inundación utilizando el modo de alcance (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood.....	174
Análisis de diferencias significativas entre las áreas de afectación (ANOVA)	177
Análisis de diferencias significativas entre las alturas máximas de flujo (ANOVA)	179
Porcentaje de áreas de afectación por barrios de la parroquia Colón, CAESAR Lisflood (Reach y Catchment Mode)	180
Análisis de afectación a edificaciones, utilizando el Modelo CAESAR-Lisflood: Reach y Catchment Mode, y su comparación con HEC-RAS	183
Cuantificación de edificaciones afectadas de la parroquia Colón-Portoviejo	187
Análisis de afectación a tierras agrícolas de la parroquia Colón-Portoviejo	191
Análisis del peligro a inundaciones en la parroquia Colón-Portoviejo	192
Análisis del peligro de inundaciones, CAESAR Lisflood -Reach Mode	195
Análisis de peligro a inundaciones, CAESAR-Lisflood, Catchment Mode	198
Análisis del peligro de inundaciones a edificaciones de la parroquia Colón	201
Análisis del nivel de peligro a edificaciones en la parroquia Colón	204

Comparación con inundaciones históricas	209
Propuesta de actividades para la prevención y mitigación de inundaciones en la subcuenca del río Portoviejo	210
Prevención de erosión	210
Dragado del río Portoviejo	211
Muros de encauzamiento y canales de alivio	212
Regulación del uso del suelo y reubicación	213
Sistemas de filtración en zonas urbanas.....	213
Programas de capacitación a la población frente al riesgo de inundaciones.....	213
Capítulo VI.....	215
Conclusiones y Recomendaciones	215
Conclusiones	215
Recomendaciones.....	217
Referencias Bibliográficas	220
ANEXOS	228

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Grupos hidrológicos (Servicio de Conservación de Suelos -SCS)</i>	58
Tabla 2 <i>Parámetros generales de la microcuenca del río Portoviejo</i>	91
Tabla 3 <i>Clasificación del índice de compacidad de Gravelius</i>	91
Tabla 4 <i>Clasificación del índice de Factor de Forma de Horton</i>	92
Tabla 5 <i>Valores de altura máxima y mínima de cada una de las áreas parciales (A_i) y promedio de altura (e_i),</i>	93
Tabla 6 <i>Valores de pendiente máxima y mínima (%), divididas en 8 rangos</i>	94
Tabla 7 <i>Rango de pendientes de una cuenca hidrográfica y su descripción</i>	96
Tabla 8 <i>Valores de longitud (m) y elevación (m) de los 9 subtramos, del río Portoviejo</i>	97
Tabla 9 <i>Rangos de pendiente del cauce principal</i>	98
Tabla 10 <i>Clasificación de la red de drenaje de las cuencas</i>	100
Tabla 11 <i>Número de corrientes de la microcuenca del río Portoviejo</i>	101
Tabla 12 <i>Número de cursos por orden y relación de bifurcación</i>	102
Tabla 13 <i>Índices de sinuosidad</i>	103
Tabla 14 <i>Estaciones meteorológicas con su respectiva precipitación media no corregida</i> ...	104
Tabla 15 <i>Resumen estadístico de las 2 muestras de cada estación meteorológica</i>	105
Tabla 16 <i>Resumen estadístico de t_c (t calculado) y t crítico (t de tabla) – (Prueba t Students)</i>	107
Tabla 17 <i>Resumen estadístico de F_c (F calculado) y F crítico (F de tabla) – (Prueba F de Fisher)</i>	109
Tabla 18 <i>Precipitación media en cada área obtenida por el método Polígonos de Thiessen</i>	112
Tabla 19 <i>Precipitación media en cada área obtenida por el método de Isoyetas</i>	113
Tabla 20 <i>Clasificación de los usos del suelo</i>	116

Tabla 21 Valores de curva número para cada grupo hidrológico y uso de suelo	119
Tabla 22 Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Portoviejo UTM(M005).....	121
Tabla 23 Parámetros estadísticos de la base de datos de precipitaciones máximas en 24 horas	122
Tabla 24 Valores de precipitación máxima y mínima aceptada	123
Tabla 25 Precipitación máxima probable aplicando la distribución de Gumbel.....	124
Tabla 26 Probabilidades de que se supere o no se supere la precipitación máxima probable	124
Tabla 27 Coeficientes de duración	125
Tabla 28 Precipitación máxima probable (mm) a distintos tiempos de duración (hr).....	126
Tabla 29 Intensidad de la lluvia (mm/hr) a diferentes períodos de retorno	126
Tabla 30 Aplicación de regresión potencial para el cálculo de las variables de d y n	127
Tabla 31 Valores promedio de los términos de regresión d y n – Portoviejo UTM (M005) ...	128
Tabla 32 Regresión potencial para calcular los valores de K y m	129
Tabla 33 Intensidades de la lluvia (mm/hr) de acuerdo a tiempos de duración – Portoviejo UTM (M005).....	130
Tabla 34 Valores de intensidad de precipitación según Duración de la misma – Portoviejo UTM (M005).....	131
Tabla 35 Variables para obtener la precipitación alternada (hietograma) – Portoviejo UTM(M005).....	133
Tabla 36 Parámetros utilizados para calcular los hidrogramas en HEC-HMS	136
Tabla 37 Valores de caudales en m^3/s con un tiempo de duración de 8 horas con intervalos de 30 minutos y caudales máximos -Distintos períodos de retorno	138
Tabla 38 Variables probabilísticas de caudales máximos.....	139
Tabla 39 Caudales máximos estación hidrológica Portoviejo en Santa Ana (H0267)	140
Tabla 40 Caudales máximos obtenidos a partir del modelo de distribución de Gumbel.....	140

Tabla 41 Lugares de la toma de muestras con sus respectivas coordenadas.....	142
Tabla 42 Variables para calcular el porcentaje de humedad de las 5 muestras de sedimentos	144
Tabla 43 Porcentaje de humedad en cada una de las muestras	145
Tabla 44 Peso de las muestras secas antes del lavado (M_{s1}) y después del lavado (M_{s2}) ...	146
Tabla 45 Variables calculadas para curva granulométrica.....	147
Tabla 46 Cálculo de parámetro n_0 a partir de los diámetros característicos D_{50} Y D_{90}	149
Tabla 47 Parámetros de la ecuación de Cowan y n de Manning	150
Tabla 48 Modelo Digital de Elevación y su respectivo DEM en lecho rocoso	160
Tabla 49 Tamaño de las partículas y su proporción o porcentaje retenido	161
Tabla 50 Variables para calcular la evapotranspiración (ETP)	165
Tabla 51 Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el Modelo Bidimensional CAESAR-Lisflood-Reach Mode	171
Tabla 52 Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el modelo Unidimensional HEC-RAS.....	172
Tabla 53 Alturas máximas y mínimas de agua (CAESAR-Lisflood-Reach Mode y HEC-RAS)..	173
Tabla 54 Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood-Catchment Mode	174
Tabla 55 Alturas máximas y mínimas de agua (CAESAR-Lisflood-Catchment Mode y HEC-RAS)	175
Tabla 56 Suma, promedio y varianza de áreas de afectación	178
Tabla 57 Análisis de la varianza (ANOVA) para áreas de afectación.....	178
Tabla 58 Alturas máximas de flujo en metros (CAESAR Lisflood: Reach Mode, Catchment Mode; y HEC-RAS)	179
Tabla 59 Suma, promedio y varianza de alturas o profundidades máximas de flujo	180
Tabla 60 Análisis de la varianza (ANOVA) para alturas o profundidades máximas de flujo .	180

Tabla 61 <i>Barrios o comunidades por inundaciones a diferentes períodos de retorno-CAESAR Lisflood-Reach Mode</i>	181
Tabla 62 <i>Barrios o comunidades afectadas por inundaciones a diferentes períodos de retorno-Catchment Mode</i>	181
Tabla 63 <i>Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno utilizando el modo Reach -CAESAR-Lisflood</i>	184
Tabla 64 <i>Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno utilizando el modo Catchment-CAESAR-Lisflood</i>	184
Tabla 65 <i>Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno utilizando el Modelo Unidimensional HEC-RAS</i>	185
Tabla 66 <i>Suma, promedio y varianza de porcentaje de afectación a edificaciones</i>	186
Tabla 67 <i>Análisis de la varianza (ANOVA) para porcentaje de afectación a viviendas</i>	186
Tabla 68 <i>Cuantificación de las edificaciones afectadas por una eventual inundación, períodos de retorno de 10, 25 y 50 años</i>	187
Tabla 69 <i>Cuantificación de las edificaciones afectadas por una eventual inundación, períodos de retorno de 100 y 500 años</i>	188
Tabla 70 <i>Instituciones Educativas que pueden ser afectadas en todos los períodos de retorno, Reach Mode</i>	190
Tabla 71 <i>Instituciones educativas que no serían afectadas en ningún período de retorno, CAESAR-Lisflood Reach Mode</i>	190
Tabla 72 <i>Centros de salud afectados en todos los períodos de retorno, CAESAR-Lisflood Catchment Mode</i>	191
Tabla 73 <i>Niveles de intensidad de acuerdo a la profundidad o altura del agua</i>	193
Tabla 74 <i>Clasificación de la probabilidad o frecuencia de inundaciones de acuerdo al período de retorno</i>	194

Tabla 75 <i>Peligro de inundaciones en función del nivel de intensidad y probabilidad de ocurrencia o frecuencia</i>	194
Tabla 76 <i>Afectación a edificaciones con peligrosidad alta</i>	205
Tabla 77 <i>Afectación a edificaciones con peligrosidad media</i>	205

Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación del cantón Portoviejo y parroquia Colón	37
Figura 2 <i>Factores de la vulnerabilidad, exposición, fragilidad y resiliencia</i>	40
Figura 3 <i>Delimitación de una cuenca hidrográfica</i>	43
Figura 4 <i>Curva Hipsométrica</i>	50
Figura 5 <i>Orden de corrientes según Strahler</i>	52
Figura 6 <i>Distribución de las áreas aferentes según los polígonos de Thiesen</i>	55
Figura 7 <i>Distribución y cálculo de la precipitación por Isoyetas</i>	56
Figura 8 <i>Descripción esquemática del hidrograma</i>	64
Figura 9 <i>Esquema del tratamiento de las variables en el modelo HEC-HMS</i>	65
Figura 10 <i>Sección trapezoidal de un canal</i>	71
Figura 11 <i>Espacio Euclidiano de un autómata celular</i>	75
Figura 12 <i>Conjunto de estados de un autómata celular</i>	76
Figura 13 <i>Vecindad en un Autómata Celular</i>	76
Figura 14 <i>Representación de los términos de la representación de energía</i>	79
Figura 15 <i>Descripción de los valores iniciales y reglas aplicas en el modelo CAESAR -Lisflood83</i>	
Figura 16 <i>Cuenca del Río Portoviejo dividida en las 3 subcuencas que lo conforman del Río Portoviejo</i>	88
Figura 17 <i>Dirección y acumulación de flujo en la subcuenca del río Portoviejo</i>	89
Figura 18 <i>División de la subcuenca del río Portoviejo</i>	90
Figura 19 <i>Delimitación microcuenca río Portoviejo</i>	90
Figura 20 <i>Elevaciones de la microcuenca del río Portoviejo</i>	93
Figura 21 <i>Pendientes de la microcuenca del río Portoviejo</i>	95
Figura 22 <i>Gráfico del perfil longitudinal del cauce principal del río Portoviejo en Google Earth</i>	97

Figura 23 <i>Gráfico del perfil longitudinal del cauce principal del río Portoviejo</i>	98
Figura 24 <i>Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca del río Portoviejo</i>	99
Figura 25 <i>Orden de corrientes de la microcuenca del río Portoviejo</i>	101
Figura 26 <i>Polígonos de Thiessen en la microcuenca del río Portoviejo</i>	111
Figura 27 <i>Isoyetas de la microcuenca del río Portoviejo</i>	113
Figura 28 <i>Uso y cobertura del suelo de la microcuenca del río Portoviejo</i>	115
Figura 29 <i>Clasificación del uso de suelo de la microcuenca del río Portoviejo</i>	117
Figura 30 <i>Clasificación del tipo de suelo (Grupo Hidrológico) en la microcuenca del río Portoviejo</i>	118
Figura 31 <i>Tabla CNLookup que contiene el número curva y los usos de suelo de acuerdo a la metodología de (Villegas, 2017)</i>	118
Figura 32 <i>Gráfico de la primera regresión potencial con su respectiva ecuación y valor de R^2</i>	128
Figura 33 <i>Gráfico de la segunda regresión potencial con su respectiva ecuación y valor de R^2</i>	129
Figura 34 <i>Curva IDF de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005)</i>	131
Figura 35 <i>Hietograma de precipitación a un período de 25 años – Portoviejo UTM (M005)</i>	134
Figura 36 <i>Importación de los archivos shapefile de la microcuenca del río Portoviejo, su red de drenaje y el punto de aforo de interés</i>	135
Figura 37 <i>Hidrograma de la microcuenca del río Portoviejo a distintos períodos de retorno</i>	139
Figura 38 <i>Ubicación de los puntos de muestreo</i>	142
Figura 39 <i>Toma de muestras en el punto 1 (Entre Presa Poza Honda y Honorato Vásquez)</i>	143
Figura 40 <i>Toma de muestras en el punto 4 (Santa Ana)</i>	143
Figura 41 <i>Muestras pesadas antes de ingresarlas al horno</i>	144
Figura 42 <i>Lavado de las muestras por el tamiz No. 200</i>	146
Figura 43 <i>Tamizado de las muestras de sedimentos del río Portoviejo</i>	147

Figura 44 <i>Curva granulométrica del punto de muestreo P5-Parroquia Colón -Portoviejo</i> ..	148
Figura 45 <i>Subcuenca del río Portoviejo Delimitada</i>	151
Figura 46 <i>Modelo Digital del Terreno reclasificado en función de la altitud – Parroquia Colón</i>	152
Figura 47 <i>Río Portoviejo rasterizado</i>	153
Figura 48 <i>Modelo Digital del Terreno estandarizado</i>	154
Figura 49 <i>Modelo Digital del terreno quemado o resaltado el río Portoviejo en CAESAR- Lisflood</i>	154
Figura 50 <i>Archivo .txt que contiene los valores de precipitaciones históricas y máximas probables (Período de retorno 25 años)</i>	156
Figura 51 <i>Curva de tendencia entre las estaciones meteorológicas Portoviejo UTM (M005) y Teodomira (M1208)</i>	157
Figura 52 <i>Curva de tendencia entre las estaciones metereológicas Portoviejo UTM (M005) Y Sancán (M449)</i>	157
Figura 53 <i>Archivo .txt que contiene los valores de caudales en m3/ históricos y máximos probables (Período de retorno 25 años)</i>	159
Figura 54 <i>Curva de tendencia entres las estaciones Hidrológicas H267 (Portoviejo en Santa Ana) y HA2D (Portoviejo en Picoazá)</i>	159
Figura 55 <i>Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 10 años Reach Mode CAESAR Lisflood</i>	170
Figura 56 <i>Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 50 años Reach Mode CAESAR Lisflood</i>	170
Figura 57 <i>Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 500 Años Reach Mode CAESAR-Lisflood</i>	171
Figura 58 <i>Comparación de las áreas afectadas (km²) obtenidas a partir de CAESAR – Lisflood - Reach Mode y HEC-RAS</i>	172

Figura 59 Comparación de las áreas afectadas (km ²) obtenidos a partir de CAESAR-Lisflood-Catchment Mode y HEC-RAS	175
Figura 60 Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 10 Años Catchment Mode CAESAR-Lisflood	176
Figura 61 Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 50 años Catchment Mode CAESAR-Lisflood	176
Figura 62 Zonas posibles de inundación en parroquia Colón-PR 500 años Catchment Mode CAESAR-Lisflood	177
Figura 63 Alturas máximas de flujo en metros (CAESAR Lisflood: Reach Mode, Catchment Mode; y HEC-RAS)	179
Figura 64 Porcentaje de áreas afectadas en los barrios de la parroquia Colón a períodos de retorno de 10, 50 y 500 años – CAESAR -Lisflood- Reach Mode	182
Figura 65 Porcentaje de áreas afectadas en los barrios de la parroquia Colón a períodos de retorno de 10 50 y 500 años -CAESAR-Lisflood-Catchment Mode	183
Figura 66 Comparación del porcentaje de edificaciones afectadas, obtenidas a partir de CAESAR-Lisflood-Reach y Catchment Mode; y HEC-RAS	186
Figura 67 Cantidad de viviendas afectadas, CAESAR Lisflood: Catchment y Reach Mode	188
Figura 68 Cantidad de edificaciones afectadas (Centros de Salud, Escuelas y Colegios), CAESAR-Lisflood Reach Mode	189
Figura 69 Cantidad de edificaciones afectadas (Centros de Salud, Escuelas, Colegios), CAESAR-Lisflood Catchment Mode	189
Figura 70 Áreas de tierras agrícolas afectadas en la parroquia Colón	191
Figura 71 Rangos para cada nivel de intensidad para inundaciones.....	193
Figura 72 Peligro de inundación de acuerdo a la altura del agua (m) -CAESAR -Lisflood-Reach Mode	195

Figura 73 Peligro de inundación en la parroquia Colón -REACH MODE-CAESAR Lisflood -PR 10 años.....	196
Figura 74 Peligro de inundación en la parroquia Colón-REACH MODE-CAESAR-Lisflood-PR 50 años.....	197
Figura 75 Peligro de Inundación en la parroquia Colón-REACH MODE-CAESAR Lisflood-PR 500 años.....	197
Figura 76 Peligro de inundación de acuerdo a la altura del agua (m) -CAESAR -Lisflood-Reach Mode	199
Figura 77 Peligro de inundación en la parroquia Colón-CATCHMENT MODE-CAESAR-Lisflood-PR 10 años.....	199
Figura 78 Peligro de inundación en la parroquia Colón-CATCHMENT MODE-CAESAR -Lisflood -PR 50 años.....	200
Figura 79 Peligro de inundación en la parroquia Colón -CATCHMENT MODE -CAESAR Lisflood -PR 500 años	200
Figura 80 Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad baja (Alturas del agua menores a 0.6 m)	202
Figura 81 Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad media (Alturas del agua entre 0.6 a 1.2 m).....	202
Figura 82 Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad alta (Alturas del agua mayores a 1.2 m)	203
Figura 83 Instituciones educativas con peligro de inundación alto	205
Figura 84 Instituciones educativas con peligro de inundación medio	206
Figura 85 Centros de salud con peligro de inundación medio	207
Figura 86 Viviendas con peligro de inundación alto	208
Figura 87 Viviendas con peligro de inundación medio	208
Figura 88 Zonas de Manabí afectadas por las inundaciones del Niño 1997-1998	209

Figura 89 <i>Zonas de inundación histórica 1997-1998 y zonas de inundación a un período de retorno de 500 años en la parroquia Colón</i>	210
Figura 90 <i>Muros de contención y canales de alivio</i>	212

Resumen

En el cantón Portoviejo de la provincia de Manabí, históricamente han ocurrido inundaciones, como consecuencia de eventos de lluvias extremas y del desbordamiento del río Portoviejo, lo que ha causado daños materiales, pérdidas económicas y de vidas humanas. Hoy en día, los modelos hidrodinámicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales constituyen una herramienta que permiten simular el flujo de agua en las cuencas hidrográficas. En el presente estudio se determinó las zonas con posibilidad de inundación a diferentes períodos de retorno en la parroquia Colón del cantón Portoviejo utilizando el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Catchment Mode y Reach Mode; los insumos que se utilizaron para la simulación fueron: los datos de precipitaciones y caudales a diferentes períodos de retorno (históricos y máximos probables); el tamaño de los sedimentos que se obtuvieron a partir de análisis granulométrico por tamizado y un Modelo Digital de Elevaciones de ALOS PALSAR con resolución de 24.5 m. Las áreas y alturas de flujo de agua que se obtuvieron fueron comparadas con las que determinaron (Aguilar & Echeverría, 2018), quienes utilizaron el modelo unidimensional HEC-RAS para simular el flujo de agua. Con la técnica estadística ANOVA (Análisis de la varianza) de un factor, con un nivel de significancia del 95 %, se determinó que no existen diferencias significativas entre las medias de las áreas de afectación y de las alturas o profundidades de flujo, empleando los dos modos de CAESAR Lisflood y HEC -RAS. Se realizó el análisis de peligro de inundaciones sobre las edificaciones de Colón, considerando dos factores: la probabilidad de ocurrencia en función del período de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años), a mayor período de retorno menos probabilidad de ocurrencia; y la intensidad que se clasifica en baja, media y alta dependiendo de la altura o profundidad del flujo de agua; instituciones educativas, centros de salud y viviendas fueron las edificaciones de interés a analizar el peligro medio y alto. Además, se propuso un plan integral de actividades para prevenir inundaciones en la subcuenca del río Portoviejo.

PALABRAS CLAVE:

- **PELIGRO DE INUNDACIÓN**
- **MODELOS HIDRODINAMICOS**
- **CAESAR-Lisflood**
- **HEC-RAS**
- **PERÍODO DE RETORNO**

Abstract

In the Portoviejo canton, province of Manabí, floods have historically occurred, a product of the extreme rains and the overflowing of the Portoviejo River, which has caused material damages, financial losses, and human lives. Nowadays, one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic models make it possible to simulate the flow of water in watersheds. In the present study, the areas with the possibility of flooding at different return periods were determined in the Colón parish of the Portoviejo canton using the two-dimensional CAESAR-Lisflood model: Catchment Mode and Reach Mode, the inputs that were used for the simulation were: the rainfall and flow data (historical and maximum probably) to different return periods the size of the sediments that were obtained from sieving particle size analysis and a Digital Elevation Model of ALOS PALSAR with resolution of 24.5 m. The areas and heights of water flow that were obtained were compared with those determined by (Aguilar & Echeverría, 2018), who used the one-dimensional model HEC-RAS to simulate the flow of water. ANOVA (Variance analysis) statistical technique of a factor with a significance level of 95%, it was determined that there are no significant differences between the means of the affectation areas and the heights or depths floods, using the two modes of CAESAR Lisflood and HEC -RAS. The flood hazard analysis was carried out on the buildings of Colón, considering two factors: the probability of occurrence as a function of the return period (10, 25, 50, 100, and 500 years), the longer the return period the less probability of occurrence; and the intensity that is classified into low, medium and high depending on the height or depth of the water flow; educational institutions, health centers, and housing were the buildings of interest to analyze their danger to floods. In addition, a comprehensive plan of activities was proposed to prevent floods in the sub-basin of the Portoviejo River.

KEYWORDS:

- **FLOOD HAZARD**
- **HYDRODYNAMIC MODELS**
- **CAESAR-Lisflood**
- **HEC-RAS**
- **RETURN PERIOD**

Capítulo I

Aspectos generales

Antecedentes

Desde hace algunas décadas la modelación de fenómenos naturales como las inundaciones, ha despertado el interés entre los diferentes investigadores. Las inundaciones han sido una de las mayores causas de pérdida de grandes cantidades de bienes materiales, daños a tierras agrícolas, cultivos y también aumentan el riesgo de enfermedades en la población.

La modelación hidrodinámica ha sido utilizada como una herramienta para el análisis y prevención de inundaciones en las zonas bajas de las cuencas hidrográficas; es decir, la determinación de zonas susceptibles a inundación utilizando modelos numéricos, ha permitido adquirir un mayor criterio para planificar y ejecutar acciones preventivas y de mitigación, que ayuden a minimizar los daños a la infraestructura y evitar pérdidas humanas de una población en el momento que se presenten grandes flujos de agua en las llanuras de inundación de una cuenca hidrográfica.

En algunos estudios de mapeo de inundaciones se han realizado usando modelos hidrodinámicos unidimensionales y bidimensionales (1D/2D). Los modelos hidráulicos bidimensionales son considerados como la mejor tecnología para simular el flujo de agua. Sin embargo, la desventaja de este tipo de modelos es que se requieren gran cantidad de datos, hardware y software, lo que implica tiempos de procesamiento altos (Timbe & Willems, 2011). Los modelos unidimensionales son los más utilizados para el modelamiento de inundaciones y se obtienen resultados precisos en el cauce principal del río, pero tienen una menor precisión para modelar el flujo de desbordamiento sobre las planicies de inundación (Timbe & Willems, 2011)

HEC-RAS ha sido el modelo hidrodinámico unidimensional más utilizado para el modelamiento de inundaciones en cuencas hidrográficas. En la tesis “Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, Cantón Portoviejo Manabí” realizada por Aguilar & Echeverría (2018), se determinó las áreas con amenaza a inundación en la Parroquia Colón del cantón Portoviejo para diferentes períodos de retorno de crecidas del Río Portoviejo, utilizando el Software Hidráulico HEC- RAS.

CAESAR-Lisflood es un modelo bidimensional de evolución del paisaje bidimensional, que permite enrutar el flujo de agua por medio de una malla regular de celdas, que se conocen como autómatas celulares; (Pavón, 2017) utilizó este modelo para determinar zonas con amenaza de inundación en la parroquia Montalvo del Cantón Montalvo, provincia de los Ríos, perteneciente a la microcuenca del río Cristal; y fue la primera vez que se utilizó este tipo de modelo hidrodinámico en una microcuenca hidrográfica del Ecuador.

En Ecuador alrededor del 35 % de la población ecuatoriana habita en zonas amenazadas por inundaciones. En las cuencas bajas de la Costa y Amazonía las inundaciones han sido más frecuentes que en la región Andina.

En la región Costa del Ecuador, a inicios de febrero del año 2017 se produjo elevados volúmenes de precipitaciones, como consecuencia a 3 factores asociados con el fenómeno del niño: anomalías térmicas del Pacífico ecuatorial, en el que la temperatura alcanzó cerca de 2°C por encima de los valores usuales; formación de sistemas nubosos por desplazamiento de la zona de convergencia intertropical hacia la línea ecuatorial y la inestabilidad atmosférica de la Amazonia. (Pacheco et al., 2019).

En la provincia de Manabí 2.500 familias fueron afectadas por las inundaciones, como producto de las fuertes lluvias. Los cantones que más sufrieron daños fueron Santa Ana, Portoviejo, Rocafuerte, Chone.

Portoviejo, capital de Manabí tuvo registros pluviométricos que superaron los promedios históricos, esto causó el desbordamiento del río Portoviejo y quebradas; además

de deslizamientos de tierra e interrupciones del agua potable, colapso del sistema de alcantarillado y riego (Pacheco et al., 2019).

Planteamiento del problema

En los meses de lluvias extremas, el caudal y calado del río Portoviejo aumentan, y en consecuencia el río se desborda de sus límites, lo que se convierte en un gran problema debido a que las poblaciones se asientan en las llanuras de inundación, que son de fácil acceso, fértiles, topografía plana, características que permiten el desarrollo urbano.

El flujo de agua que se desborda del río Portoviejo se mueve a grandes velocidades y distintas alturas por las llanuras de inundación, afectando edificaciones como: viviendas, centros de salud, escuelas, colegios; tierras agrícolas y vidas humanas, lo que ocasiona grandes pérdidas económicas en la reconstrucción de las edificaciones.

La cuenca del Río Portoviejo desde el año 1990 al 2014 ha tenido una pérdida de su bosque en aproximadamente de 35. 624. ha. (López, 2015). En consecuencia, sin vegetación no existe retención del agua, y la lluvia comienza a erosionar el suelo, disminuyendo la tasa de infiltración del mismo, por tanto, se incrementa el escurrimiento superficial el cual lleva consigo barro, grandes volúmenes de material y escombros, rellenándose rápidamente los lechos de los ríos, seguido de su desbordamiento, provocando inundaciones (Sánchez et al., 2013).

En el cantón Portoviejo, la problemática de las inundaciones se agrava porque la población no tiene un adecuado conocimiento sobre la gestión de riesgos, lo que implica una falta de conciencia para realizar de forma adecuada la disposición final de los residuos sólidos que generan, los cuales obstruyen los alcantarillados pluviales y los cauces de los ríos; además la falta de políticas de planeamiento urbano ocasiona que se construyan edificaciones en zonas planas o con pendiente baja y que son susceptibles a inundaciones (Burgos et al., 2019).

La construcción de la presa Poza Honda, fue construida con el fin de almacenar el agua para el riego agrícola y agua potable, y prevenir las inundaciones; sin embargo, en épocas de fuertes lluvias no ha ayudado a minimizar el impacto de inundaciones, sino todo lo contrario; la presa Poza Honda ha sufrido hasta un 30 % de azolve es decir se han depositado los sedimentos y por lo tanto la capacidad de almacenamiento ha sido reducida, lo que ha causado que grandes volúmenes de agua sean evacuados causando inundaciones; además de la suspensión de agua potable y alcantarillado primero por la pérdida de agua y segundo por la contaminación, ya que se encuentran sólidos suspendidos en el agua.

Justificación e importancia

La parroquia Colón, del cantón Portoviejo, cuenta con infraestructura importante, que podría ser afectada por el flujo de agua en un evento de inundación. Existen 20 instituciones educativas vulnerables a daños por inundaciones, lo que provocaría que las clases presenciales se interrumpieran por algunos meses, hasta reparar o reconstruir las edificaciones educativas. Del mismo modo, la parroquia Colón cuenta con 7 centros de salud y el sistema de salud se vería afectado al no contar con la infraestructura suficiente para atender, enfermedades o urgencias para toda la población.

La reconstrucción o reparación de las edificaciones tendrían un determinado costo, dependiendo de los materiales que se utilicen, por lo que los daños materiales se convierten en pérdidas económicas

La población de la parroquia Colón ubicada en la cuenca baja del Río Portoviejo, se dedica a la agricultura como actividad económica más importante de su economía, de manera que una inundación causa importantes pérdidas de tierras de cultivo, ocasionando un efecto negativo en el abastecimiento de productos agrícolas y bajos ingresos para los agricultores.

Colón, al ser una parroquia con gran vulnerabilidad a inundaciones, urge la necesidad de realizar el modelamiento de las zonas posibles de inundación, utilizando el

modelo de autómatas celulares de evolución del Paisaje CAESAR como una herramienta prospectiva, puesto que sin la delimitación exacta de las áreas de inundación, la población de la parroquia Colón, se encuentra expuesta a sufrir futuros daños a su infraestructura, pérdidas económicas y de vidas humanas; además de que permitirá al GAD parroquial de Colón y al GAD cantonal de Portoviejo establecer un adecuado planeamiento urbano, impidiendo la construcción de viviendas en zonas vulnerables, con la respectiva delimitación de los usos de suelo.

Además, el río Portoviejo constituye la mayor fuente de agua para la provincia de Manabí, proporciona agua potable a miles de personas de los cantones Santa Ana, Portoviejo y Rocafuerte. Sin embargo, en la parroquia Colón del Cantón Portoviejo en la comunidad de Mapasingue Adentro, escasea el agua, a diferencia de la comunidad Mapasingue Afuera, donde se abastecen de agua a través de un canal con el cual se realiza el riego de las plantaciones. En el caso de los agricultores de Mapasingue Adentro, la falta de agua no permite sacar el mayor provecho a su tierra, por lo que tienen que esperar que llegue la temporada lluviosa para poder realizar el riego a sus cultivos (Cedeño & Quijije, 2016).

Una inundación en la parroquia Colón implicará importantes pérdidas de agua para abastecer a las comunidades, debido a la acumulación de sedimentos en la Presa Honda la cual abastece de agua de riego y consumo para los cantones Portoviejo y Rocafuerte; por tanto, la población deberá recorrer distancias largas para conseguir este recurso.

Objetivos

Objetivo General

Determinar posibles zonas de inundación en la parroquia Colón, Cantón Portoviejo, Manabí, utilizando el modelo autómatas celulares de evolución del Paisaje "CAESAR-Lisflood" para implementarlo como una herramienta de apoyo a la gestión de riesgos.

Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros morfométricos e hidrométricos de la microcuenca del río Portoviejo.
- Determinar parámetros de precipitación e intensidades de la microcuenca del río Portoviejo.
- Realizar un análisis granulométrico del cauce principal de la microcuenca del río Portoviejo.
- Simular los canales y patrones de flujo de llanuras de inundación para cada período de retorno en la parroquia Colón Cantón Portoviejo, utilizando el modelo autómatas celular CAESAR-Lisflood.
- Determinar y analizar la peligrosidad de inundación en la parroquia Colón del Cantón Portoviejo.
- Realizar una Comparación de los resultados de las zonas posibles de inundación y edificaciones afectadas, obtenidas de la metodología del modelo bidimensional CAESAR-Lisflood, con los resultados de la metodología del estudio “Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, cantón Portoviejo-Manabí” en el cual se utilizó el software de análisis hidráulico HEC-RAS modelo unidimensional.
- Recopilar y analizar datos geoespaciales históricos de inundaciones que han ocurrido en la parroquia Colón, y compararlos con los resultados con la metodología del modelo CAESAR-Lisflood
- Analizar las zonas de inundación obtenidas a partir del modelamiento, para realizar una propuesta de actividades para la prevención y mitigación de inundaciones en la subcuenca del río Portoviejo.

Metas

- Geodatabase con los parámetros geomorfológicos e hidrométricos de la microcuenca del río Portoviejo.
- Hietogramas, Curvas IDF a diferentes períodos de retorno de la microcuenca del río Portoviejo.
- Base de datos de los tamaños de los sedimentos y curvas granulométricas del cauce principal, que serán utilizados para el modelamiento en CAESAR Lisflood.
- Base de datos alfanumérica y gráfica en formato ASCII del DEM y DEM del lecho del río indispensable para el modelamiento en CAESAR-Lisflood.
- Base de datos hidrometeorológicos en formato ASCII, que es compatible con el modelo CAESAR-Lisflood.
- Mapas a escala 1:35 000 de las posibles zonas de inundación y peligrosidad en la parroquia Colón, obtenidas del modelamiento con el modelo CAESAR, utilizando dos modos: modo de Captación (Catchment mode) y modo alcance (Reach mode).
- Propuesta de actividades para la prevención y mitigación de inundaciones en la parroquia Colón-Cantón Portoviejo

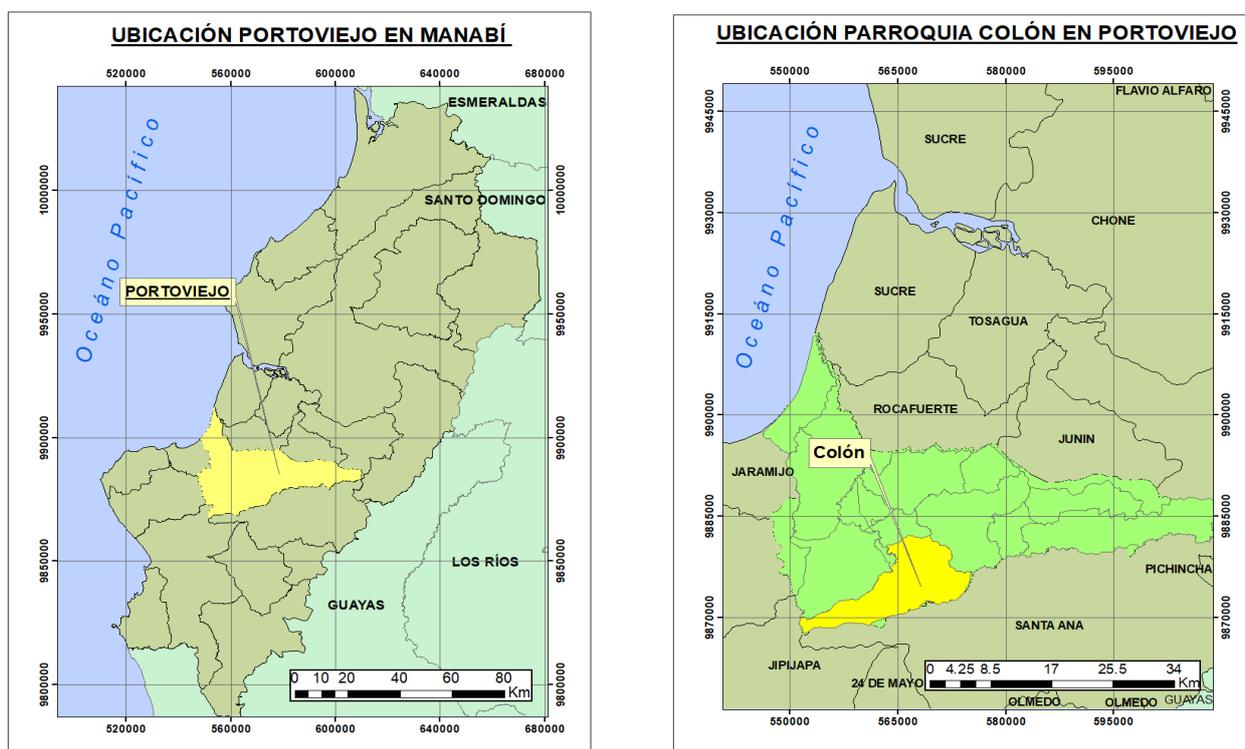
Descripción del área de estudio para el modelamiento de inundaciones

El Cantón Portoviejo tiene una extensión de 967 km², cuenta con 16 parroquias, 9 urbanas y 7 rurales. La parroquia Colón es una de las parroquias rurales de Portoviejo, tiene una gran producción de cultivos de maíz, maní, tomate, producción maderera, por lo que es considerada un área con gran fertilidad e influencia para el desarrollo industrial del cantón. Colón tiene 12 barrios o comunidades: El Naranjo, Los Ángeles, La Mocora, Centro de Colón, San Ignacio, El Cadi, Estancia Vieja, Pachinche, Mapasingue, El Pollo, Pepa de Uso.

La parroquia Colón se encuentra en la microcuenca del río, su caracterización morfométrica, hidrológica e hidrométrica se describen en el Capítulo III; en la Figura 1 se encuentran los mapas de ubicación del cantón Portoviejo y parroquia Colón.

Figura 1

Ubicación del cantón Portoviejo y parroquia Colón



Capítulo II

Marco teórico

Gestión de riesgos

El proceso de gestión de riesgos consiste en identificar, analizar y cuantificar las posibles pérdidas materiales, económicas y de vidas humanas, cuando se presente una amenaza en un determinado lugar; además de planificar y ejecutar acciones preventivas y de mitigación para proteger a la población y sus bienes que se encuentren más vulnerables frente a una amenaza (Villalba, 2016).

Riesgo

Según el “Manual de evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales” (CENEPRED, 2014) el riesgo es aquella probabilidad de que una población y sus bienes (edificaciones, tierras agrícolas, servicios básicos) sean afectadas; en consecuencia del impacto de un peligro y su condición de vulnerabilidad

De acuerdo a González (2014) citado en (Cercedo, 2019) el riesgo se presenta cuando un peligro o amenaza de origen natural, socio natural o antrópico ocurre en un período de tiempo específico y que es determinado por la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa daños o pérdidas económicas. Por lo cual el riesgo es una función del peligro y la vulnerabilidad.

Peligro o amenaza

De acuerdo al Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos Naturales (CENEPRED, 2014) , el peligro es aquella probabilidad de que un fenómeno natural se produzca en un determinado lugar, con un grado de intensidad y dentro de un rango de tiempo y frecuencia específico. Es importante mencionar que en otros documentos técnicos o manuales de evaluación de riesgos se utiliza el término amenaza en lugar de peligro.

Según Toulkeridis (2015) , la prevención constituye el conjunto de acciones más importante para salvar los bienes y la vida de los habitantes de una comunidad que se encuentra expuesta a amenazas o peligros generados por fenómenos naturales como terremotos, inundaciones o tsunamis. El objetivo de la prevención es prevenir y mitigar que amenazas naturales o de origen antrópico provoquen o generen pérdidas de vidas humanas y económicas.

Peligros o amenazas generados por fenómenos de origen natural

Un fenómeno de origen natural se convierte en un peligro o amenaza natural, en el momento que perjudica al bienestar del ser humano, sus edificaciones y sus actividades socioeconómicas (Toulkeridis, 2015); ejemplos de este tipo de amenazas son los deslizamientos de tierra, sismos, huracanes, y tsunamis. (Lavell, 2001).

Peligros o Amenazas Seudo o socio naturales

La interrelación de las prácticas sociales con el mundo natural, provocan amenazas socio naturales (Lavell, 2001). Por ejemplo, factores como los cambios de uso de suelo, la deforestación, la poca preparación en gestión de riesgos en la población o la falta de conciencia ciudadana, combinados con eventos de lluvias extremas, provoca amenazas como deslizamientos de tierra o inundaciones que afecten a la población.

Vulnerabilidad

Es la susceptibilidad de la población, infraestructura, ecosistemas y sistemas de producción de sufrir daños como consecuencia del impacto de un peligro, en un determinado lugar (CENEPRED, 2014).

Algunos hechos que provocan que aumente la vulnerabilidad de la población frente a fenómenos naturales son: el crecimiento descontrolado de la población, los procesos de urbanización, tendencias en la ocupación del territorio (CENEPRED, 2014).

De acuerdo a CENEPRED (2014), el grado de vulnerabilidad se encuentra determinado por tres factores: La exposición que hace referencia a los elementos expuestos al peligro; fragilidad, que está referido al nivel de debilidad del elemento expuesto; y por último la resiliencia que hace referencia al nivel de respuesta ante un peligro o amenaza. Ver Figura 2.

Figura 2

Factores de la vulnerabilidad, exposición, fragilidad y resiliencia



Nota. Recuperado de Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, por (CENEPRED, 2014).

Inundaciones

Una inundación se produce cuando se presentan eventos de lluvias extremas y en consecuencia existe un aumento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o del mar, lo que provoca una invasión o penetración de agua en terrenos aledaños, que en condiciones normalmente se encuentran secos. (Ramos, 2014).

Cuando una cuenca hidrográfica no se maneja de una forma adecuada se pueden producir inundaciones, tierras abajo, siendo uno de los eventos naturales que más afectan de manera contundente a las poblaciones, provocando pérdidas materiales, económicas y humanas.

Tipos de inundaciones.***Inundaciones pluviales.***

Las inundaciones pluviales, se caracterizan por la acumulación del agua sobre una zona en particular, producto de precipitaciones intensas, más no por la escorrentía que proviene de los tributarios de la parte alta de una cuenca hidrográfica (Ramos, 2014).

Inundaciones fluviales.

Una inundación fluvial es el resultado de la generación de escorrentía desde las zonas más altas de una cuenca, durante y después del evento de precipitaciones extremas, el flujo de agua aumenta el caudal del río y en consecuencia se desborda de sus límites y el agua se acumula sobre zonas aledañas al cauce del río (Cercedo, 2019). Este proceso se vuelve peligroso cuando existen asentamientos humanos en zonas inundables, las edificaciones y tierras agrícolas pueden ser afectadas, lo que significa pérdidas económicas, además de posibles pérdidas de vidas humanas. (Cercedo, 2019).

Inundaciones por ruptura de presas.

Las principales causas de que una presa colapse de forma total o parcial son: las intensas lluvias que ocasionan grandes avenidas de los ríos que alimentan la presa, sismos, acumulación de sedimentos, diseño o construcción defectuosa, falta de mantenimiento (Urquiza et al., 2017).

El rompimiento de una presa, ocasiona que una gran cantidad de agua escape hacia aguas abajo, y en consecuencia se produce el incremento del caudal y nivel del río, inundado las zonas aledañas a éste. Por lo tanto, una gran cantidad de vidas humanas, edificaciones son afectadas. Los asentamientos humanos localizados aguas abajo de los embalses, son considerados como zonas de alta amenaza de inundación (Y. Pérez, 2015).

Causas de inundaciones.***Causas Antrópicas.***

La influencia humana en el comportamiento de las inundaciones es un problema global, unas de las causas de la inundación son la pérdida de cobertura vegetal en las cuencas hidrográficas, por el incremento de los cambios de usos de suelo para uso agrícola y ganadero; sin vegetación no existe retención de la lluvia, la cual empieza a erosionar el suelo, disminuyendo la tasa de infiltración del mismo, por tanto, se incrementa el escurrimiento superficial el cual lleva consigo barro, grandes volúmenes de material y escombros, rellenándose rápidamente los lechos de los ríos, seguido de su desbordamiento, provocando inundaciones.

Causas Naturales.

En el Ecuador, las inundaciones se originan principalmente por precipitaciones intensas, las cuales se producen cuando existe una acumulación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, los cuales atrapan el calor y por ende la atmósfera y el océano aumentan su temperatura, y en consecuencia a ello se producen eventos extremos de precipitaciones (Serrano et al., 2016).

El fenómeno del niño, se presenta cuando se produce un debilitamiento de los vientos alisios, lo que provoca que las aguas cálidas que se encuentran en el este (Oceanía y Asia) se dirijan hacia el oeste. De este modo existe un calentamiento de la superficie marina del Océano Pacífico ecuatorial central y este central superior a los 0.5°C sobre la media de la temperatura de la superficie del mar (Serrano et al., 2016).

El agua caliente genera una gran cantidad de vapor de agua, y luego este se condensa en forma de lluvia, es decir se generan las condiciones propicias para un incremento de las precipitaciones en las costas de América, especialmente de Ecuador y Perú (Serrano et al., 2016).

Consecuencia de las inundaciones.

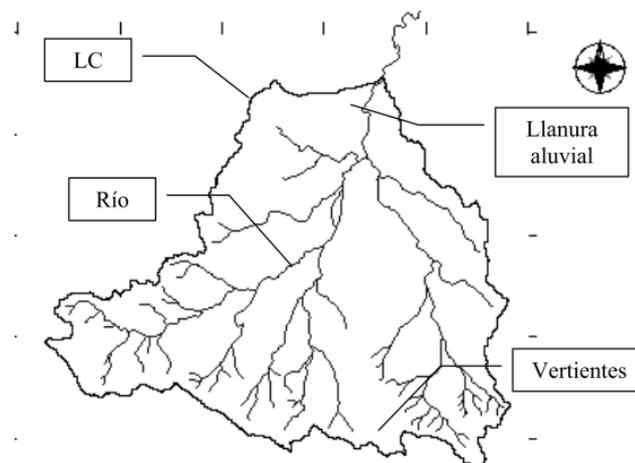
Cuando un río se desborda y provoca una inundación a causa de precipitaciones extremas las tierras agrícolas se ven afectadas por la destrucción de gran parte de sus cultivos, lo que provoca que la producción agrícola disminuya considerablemente, existiendo un desabastecimiento de los productos agrícolas, además de que los ingresos de los agricultores disminuyen.

En cuanto a los daños materiales, pueden existir daños a la infraestructura tanto pública como privada, lo que implica costos considerablemente altos para su reconstrucción o reparación de los daños causados.

Cuenca Hidrográfica

Figura 3

Delimitación de una cuenca hidrográfica



Nota. La figura presenta los elementos de una cuenca hidrográfica: río principal, vertientes o ríos tributarios y la llanura aluvial. Recuperado de Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas, por (Gaspari et al., 2013)

Una cuenca hidrográfica es una unidad geográfica y geológica, en cuyo territorio el agua proveniente de las precipitaciones, fluye en forma de escorrentía desde las partes más

altas hasta llegar a converger en un punto de desembocadura del cauce de un río (Gaspari et al., 2013). Ver Figura 3.

Para evaluar el funcionamiento de una cuenca hidrográfica, es necesario realizar una caracterización y diagnóstico de sus elementos biofísicos y socioeconómicos. Algunos elementos biofísicos son el tipo de clima, hidrología, geología, usos de suelo, biodiversidad (flora y fauna), además de su extensión territorial, organización político administrativa y parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica. Mientras que la caracterización de los elementos socioeconómicos, permite valorar el estado social, económico y productivo de la población con relación a la pobreza, acceso a servicios básicos como: salud, agua y saneamiento, energía, vialidad y transporte, entre otros (Rodríguez et al., 2008).

Además, es importante realizar un análisis periódico de las amenazas que puedan afectar a su población y que tan vulnerables son ante ellas, como por ejemplo una inundación o deslizamientos de tierra, ya que pueden afectar de forma directa o indirecta a los elementos biofísicos y socioeconómicos de la cuenca hidrográfica.

División de una Cuenca Hidrográfica

La división de una cuenca hidrográfica es de carácter jerárquico, ya que se pueden dividirse en unidades hidrológicas más pequeñas que se denominan subcuencas, en ellas se concentran los afluentes que convergen en el curso principal del río. Mientras que las microcuencas son unidades hidrológicas más pequeñas que se encuentran en el interior de cada subcuenca (Cotler et al., 2013).

Partes de una Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica tiene 3 zonas, cuenca alta, media y baja. La cuenca alta es la zona con pendiente más fuerte y donde empieza el escurrimiento del agua de la lluvia, en el momento que el suelo alcanza su umbral de escorrentía y ya no es capaz de infiltrar más agua, por lo que se produce grandes procesos erosivos (Cotler et al., 2013).

En la cuenca media la pendiente es menos fuerte y los procesos erosivos disminuyen significativamente, sin embargo, sigue siendo un área de transporte y erosión; en la cuenca baja la pendiente es baja y es el lugar donde el río principal desemboca en el mar o en un lago y prevalece el proceso de sedimentación, además en la cuenca baja es donde la mayor parte de la población se asienta, debido a que existen zonas de producción agrícola, por lo que es la zona con mayor vulnerabilidad a inundaciones (Cotler et al., 2013).

Morfometría de Cuencas Hidrográficas

El comportamiento de los caudales que fluyen por una cuenca hidrográfica tiene una gran relación con sus características físicas, para determinarlas se realiza un análisis morfométrico de parámetros: forma, relieve y drenaje, que permiten evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca (Lux, 2014). A continuación, se explican cada uno de estos parámetros.

Parámetros generales de una Cuenca Hidrográfica

Área (A).

El área de la cuenca hidrográfica, se encuentra limitada por la línea divisoria de aguas, se expresa en km^2 y es el parámetro más importante, ya que su valor tiene influencia directa sobre los demás parámetros (Lux, 2014).

Perímetro (P) (km).

El perímetro (P) de una cuenca hidrográfica es la longitud que la divisoria de aguas recorre; conjuntamente con el área permite describir la forma de la cuenca, se expresa en km (Anaya, 2012).

Longitud del cauce principal (L) (m).

La generación de escorrentía también es influenciada por la longitud del cauce principal (L), que es determinante para calcular algunos índices morfométricos. La longitud del río es medida desde el punto más distante de la cuenca hidrográfica hasta la parte más

baja o desembocadura (Zhica, 2020).

Longitud axial (La).

De acuerdo a Henaos (1998) citado en Gaspari et al. (2012), la distancia en línea recta que existe desde el punto más distante de la cuenca hidrográfica hasta su desembocadura, se denomina longitud axial (La)

Ancho de la Cuenca.

Ancho promedio (Ap) (km), expresado por el cociente entre el área de la cuenca y su longitud axial (Gaspari et al., 2012).

$$Ap = \frac{A}{La} \quad (1)$$

Donde:

A: Área de la Cuenca Hidrográfica en km²

La: Longitud Axial de la Cuenca en km

Parámetros de forma

De acuerdo a Ibáñez (2010), la forma de la cuenca influye directamente en el comportamiento de la escorrentía que fluye por una cuenca hidrográfica, de tal modo que distintas formas de cuencas hidrográficas presentan diferentes respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes.

Coefficiente de compacidad o Gravelius (kc).

El índice de compacidad (Kc) se determina a partir del cociente entre el perímetro de la cuenca hidrográfica y el perímetro de un círculo teórico que tiene un área equivalente al área de la cuenca. Además, cuando el índice de compacidad (Kc) tiende o se acerca a 1 (cuenca redonda) su peligrosidad a inundaciones es mayor, por el contrario si (kc) es mayor a 1 la peligrosidad a inundaciones disminuye (Gaspari et al., 2012).

$$kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Donde:

k_c : Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca en km

A = Área de la cuenca en km

Factor de Forma de Horton (k_f).

El factor de Horton se calcula a partir del cociente entre la superficie de la cuenca hidrográfica (A) y la longitud de la cuenca o longitud axial (L_a) elevado al cuadrado (Zhica, 2020). Este factor de forma intenta determinar qué tan cuadrada o alargada llega a ser una cuenca hidrográfica.

$$k_f = \frac{A}{L_a^2} \quad (3)$$

Donde:

R_f : Factor de forma de Horton

A = Área de la cuenca en km²

L_a : Longitud Axial de la Cuenca en km

Parámetros de relieve

En una cuenca hidrográfica, la generación de escorrentía, se debe en mayor parte por los parámetros de relieve que por los parámetros de forma.

De tal modo, que en cuencas hidrográficas que presentan pendientes fuertes o escarpadas la generación de escorrentía es mucho más rápida, en comparación con terrenos con pendientes suaves, donde el tiempo de generación de escorrentía es mucho mayor (Ibáñez et al., 2010).

Elevación media de la cuenca.

El método que se utiliza para determinar la elevación media, es el método denominado área elevación. Para lo cual se mide el área de las distintas franjas del terreno

que se encuentran delimitadas por las curvas de nivel consecutivas. Para ello se utiliza la siguiente ecuación.

$$Em = \frac{\sum_{i=1}^n ei \cdot Ai}{At} \quad (4)$$

Donde:

Em: Elevación media de la cuenca (m)

ei: Promedio de elevación de cada franja (m)

Ai: Área de cada franja (km²)

At: área total de la cuenca (km²)

Desnivel Altitudinal (DA).

El desnivel altitudinal se obtiene cuando se resta la elevación o cota mínima del valor de la cota máxima de una cuenca hidrográfica (Domingo Garay & Agüero, 2018).

$$DA = HM - hm \quad (5)$$

Donde:

DA: Desnivel Altitudinal

HM: Cota máxima

Hm: Cota mínima

Pendiente Media.

La pendiente media es la relación que existe entre el desnivel altitudinal y la longitud de la cuenca (Domingo Garay & Agüero, 2018). La velocidad del agua aumenta a medida que aumenta la pendiente, lo que provoca que la cuenca adquiera una mayor susceptibilidad a la erosión y arrastre de materiales.

$$S = \frac{DA}{La} \quad (6)$$

Donde:

S: Pendiente media de cuenca

DA: Desnivel altitudinal de la cuenca (msnm)

La: Longitud Axial de la Cuenca en km

Pendiente del cauce principal.

De acuerdo a (Breña & Jacobo, 2006) la pendiente del cauce principal se puede obtener a partir del cociente entre el desnivel altitudinal del río(cota máxima menos cota mínima del cauce principal) y la longitud horizontal del tramo del río (*L*) , esta relación se lo puede expresar de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{DA}{L} \quad (7)$$

Donde:

Sc: Pendiente media del cauce principal de la cuenca (m/m)

DA: Desnivel altitudinal del cauce principal (m.s.n.m.)

L: Longitud del cauce principal en m.

Sin embargo, la pendiente de la corriente principal obtenida a partir de esta relación, representa un valor medio, ya que cada tramo del río tiene una pendiente propia, por consiguiente, la pendiente media del cauce principal se aproxima más a la real, mientras mayor sea el número de tramos seleccionados a lo largo del cauce. Para ello el método de Taylor-Schwarz divide al tramo del río en varios subtramos de igual longitud y se lo expresa como se presenta en la ecuación (8).

$$S_c = \left(\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right)^2 \cdot 100 \quad (8)$$

Donde:

Sc: Pendiente media del cauce principal de la cuenca en (m/m)

L : Longitud del cauce principal (m)

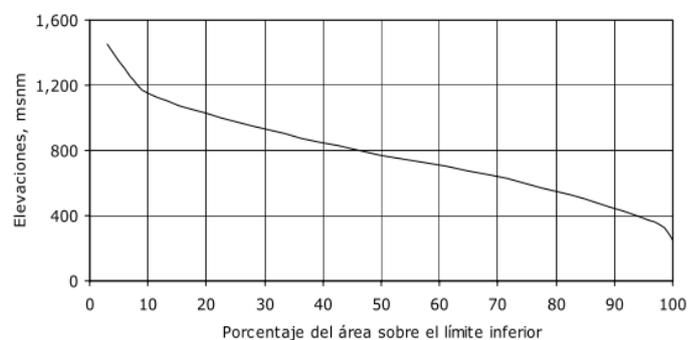
L_i : Longitud promedio de todos los cauces de orden i (m)

S_i : Pendiente de cada uno de los tramos en el que se subdivide la longitud del cauce principal (m/m)

Curva Hipsométrica.

Figura 4

Curva Hipsométrica



Nota. La figura presenta una curva hipsométrica, en el eje x: elevaciones en msnm y en el eje y: el porcentaje de área sobre el límite inferior. Recuperado de Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial, por (Breña & Jacobo, 2006).

La variación de la altitud de una cuenca hidrográfica, se la puede representar mediante una curva. En el eje de las ordenadas o eje de las y se coloca las elevaciones o cotas en metros sobre el nivel medio del mar, mientras que en el eje de las x el porcentaje del área total de la cuenca que se encuentra por arriba de un valor de cota dado (Córdova, 2016). Ver Figura 4.

Caracterización de la red de drenaje

El sistema fluvial o red de drenaje de una cuenca hidrográfica se forma por el agua que fluye en forma de escorrentía por las laderas o el subsuelo de la cuenca (Ibáñez et al., 2010).

Densidad de drenaje (D_d).

La densidad de drenaje es la relación que existe entre la longitud total de las corrientes de la cuenca hidrográfica (L_c) con respecto a su superficie (A). A mayor densidad de drenaje de una cuenca hidrográfica, ésta tendrá una respuesta más rápida frente a las precipitaciones, es decir el flujo de agua se evacuará a una velocidad mayor y en un menor tiempo. (Gaspari et al., 2013).

$$D_d = \frac{L_c}{A} \quad (9)$$

Donde:

D_d : Densidad de drenaje

L_c : Σ de la longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km

A : Área de la cuenca en km²

De acuerdo a Hernando (2011) citado en (A. Ramírez et al., 2015) cuando existen suelos susceptibles a la erosión y que son impermeables en una cuenca hidrográfica con pendientes escarpadas y poca vegetación, el valor de la densidad de drenaje será alto.

Orden de corrientes.

De acuerdo a Demetrio (2016) citado en (Zhica, 2020), en una cuenca con un mayor orden de corriente, mayor será la generación de escorrentía y en consecuencia mayor será el potencial erosivo y el transporte de sedimentos también aumentará; en comparación con otra cuenca de igual área, pero con menor orden de corrientes.

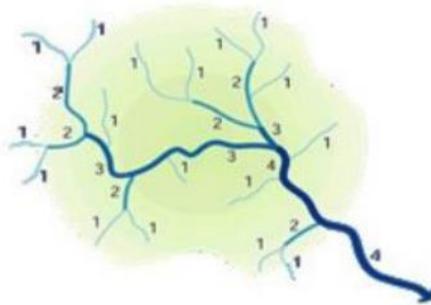
Una de las metodologías para determinar el orden de corrientes, es la de Strahler (1952), consiste en dividir la red de drenaje en varias secciones de corrientes con distinto orden. Ver Figura 5.

De acuerdo a Ramírez et al. (2015) una corriente que no tiene ningún afluente se lo considera de orden 1 o primer orden, cuando dos corrientes de orden 1 se unen forman una

corriente de segundo orden, mientras que si dos de segundo orden confluyen formarán una de tercer orden. En el caso de dos corrientes con distinto orden se junten, la corriente resultante tomará el valor de mayor orden.

Figura 5

Orden de corrientes según Strahler



Nota. Recuperado de Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del Río San Francisco, cantón Gualaceo, por (Zhica, 2020)

A partir del ordenamiento de las corrientes de drenaje, se definieron las leyes de Horton (Mesa, 2018), que se denotan a partir de la siguiente ecuación

$$R_B = \frac{N_w}{N_{w+1}} \quad (10)$$

Donde:

R_B : Razón de bifurcación

N_w : Número de cauces de orden dado

N_{w+1} : Número de cauces de orden inmediatamente superior

Según Ramírez et al. (2015) cuando los valores son altos de la razón de bifurcación el hidrograma es uniforme, mientras que si la razón de bifurcación es bajo, el hidrograma presenta fuertes picos.

Densidad de corriente.

Según Aparicio(1992), citado en (Corradine, 2017) la densidad de corriente resulta del cociente entre número total de corrientes (N_c) de la cuenca hidrográfica y su superficie (A). Los suelos que tienen un comportamiento impermeable y son susceptibles a la erosión, tienen densidades de corriente altas, mientras que las densidades de corriente bajas se presentan en terrenos donde los suelos tienen una gran resistencia a la erosión y tienen gran permeabilidad.

$$D_c = \frac{N_c}{A} \quad (11)$$

Donde:

D_c : Densidad de corriente

N_c : Número total de corrientes

A : Área de la cuenca en km^2

Coefficiente de torrencialidad.

Según Brieva (2018), el coeficiente de torrencialidad se encuentra definido por el número de cauces de primer orden por unidad (N_1) de superficie total de la cuenca hidrográfica (A). En cuanto más alto el valor del coeficiente mayor torrencialidad. Es decir, si una cuenca tiene mayor número de cauces de primer orden y el área es menor, con respecto a otra cuenca, la primera de ellas tendrá una torrencialidad mayor, lo cual significa una alta erosión y menores tiempos de llegada al pico.

$$C_t = \frac{N_1}{A} \quad (12)$$

Donde:

C_t : Coeficiente de torrencialidad

N_1 : Número de corrientes de orden uno

A: Área de la cuenca en km

Índice de sinuosidad.

De acuerdo a Schumm (1963) citado en (González, 1998) el índice de sinuosidad (desarrollo de meandros en el cauce principal del río) es la relación que existe entre la longitud del cauce principal (L) y la longitud axial del cuenca (La). Ver ecuación (13)

$$S = \frac{L}{La} \quad (13)$$

Caracterización hidrológica e hidrométrica de una cuenca hidrográfica

Precipitación media de una cuenca hidrográfica.

Conocer la precipitación media de una cuenca hidrográfica es importante para determinar los balances y modelos hidrológicos, muy necesarios en el manejo de cuencas hidrográficas. Para el cálculo de la precipitación media de una cuenca hidrográfica específica, es necesario tener los datos de precipitación lo más correctamente posible, es decir debe existir una consistencia de los registros de precipitación, que permita el cálculo de una precipitación media adecuada.

Polígonos de Thiessen.

De acuerdo a Bateman (2007), alrededor de una cuenca hidrográfica existen varias estaciones meteorológicas con sus respectivos pluviómetros y cada uno de ellos registra los valores de lluvia acumulada P_i . Mediante los polígonos de Thiessen se trata de determinar el área de influencia de cada pluviómetro. Ver Figura 6.

Con el fin de conocer la precipitación media que cae en la cuenca hidrográfica se aplica la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum P_i \cdot A_i \quad (14)$$

Donde:

\bar{P} : Precipitación media en mm en la cuenca hidrográfica

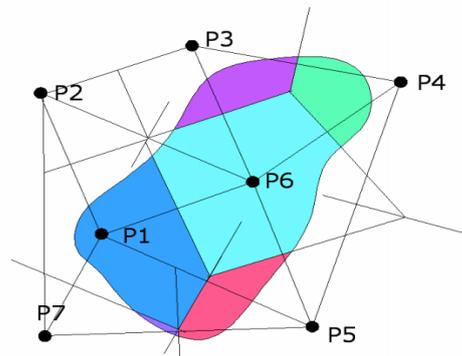
A : Área total de la cuenca hidrográfica

A_i : Áreas parciales de cada polígono

P_i : Precipitación de cada estación en cada polígono

Figura 6

Distribución de las áreas aferentes según los polígonos de Thiessen



Nota. La Figura presenta las áreas que tienen influencia cada uno de los pluviómetros.

Recuperado de Hidrología Básica y Aplicada, por (Bateman, 2007)

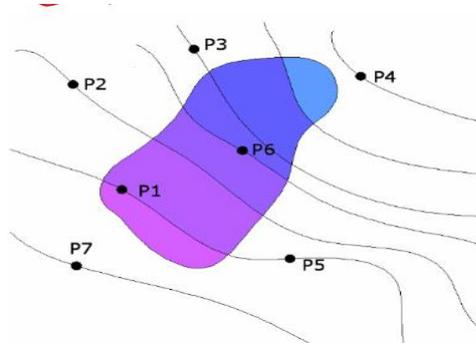
Isoyetas.

Según García (2004), las isoyetas son curvas que se trazan sobre una cuenca hidrográfica, con valores iguales de precipitación, que se calculan utilizando técnicas de interpolación como Krigging entre los pluviómetros que se encuentran alrededor o dentro de la cuenca hidrográfica. Ver Figura 7.

Para determinar la precipitación media de una cuenca hidrográfica, primero se debe determinar las áreas entre isoyetas sucesivas y multiplicarlas por la precipitación media entre isoyetas adyacentes, y luego se suman cada uno de estos productos y se multiplican por el área total de la cuenca hidrográfica. Se consideró la misma ecuación que se usó para los polígonos de Thiessen, la ecuación (14)

Figura 7

Distribución y cálculo de la precipitación por Isoyetas



Nota. La Figura presenta las isoyetas, curvas con igual valor de precipitación.

Recuperado de Hidrología Básica y Aplicada, por (Bateman, 2007)

Escorrentía.

De acuerdo a Gaspari et al. (2007) la cantidad de agua de una tormenta que no se infiltra en el suelo, y empieza a drenar o escurrir sobre la superficie del suelo, se la conoce como escorrentía. Existen factores climáticos y fisiográficos que influyen en la cantidad de escorrentía que se genera en una cuenca hidrográfica.

Algunos de los factores fisiográficos son: el uso y cubierta de suelo, debido a que una escasa vegetación sobre el terreno, producirá erosión hídrica y la generación de escorrentía será mayor y mucho más rápida. Otro factor importante es el tipo de suelo, si el terreno de la cuenca hidrográfica cuenta con suelos permeables, es decir que tienen una gran capacidad de infiltración (suelos arenosos), el proceso de escorrentía se retardará (Daza & Pérez, 2013).

Los factores climáticos como: la intensidad y duración de la tormenta y las condiciones iniciales de humedad del suelo también influyen directamente en la generación de escorrentía; sí la intensidad de la lluvia supera la intensidad de infiltración se producirá

escorrentía; una precipitación de larga duración, generará un mayor caudal de escorrentía en comparación a una precipitación de menor duración; mientras que, si el suelo presenta una humedad inicial antes de que inicie tormenta, el tiempo necesario para que el suelo alcance su umbral de escorrentía será menor(Daza & Pérez, 2013).

El caudal total de escorrentía está compuesto por: escorrentía superficial que incluye todo el flujo terrestre y la precipitación que cae directamente en la corriente; escorrentía subsuperficial, es el caudal que aporta el agua infiltrada y que se mueve lateralmente por el subsuelo hasta llegar a un canal; escorrentía subterránea, que es el componente de flujo que contribuye al canal por agua subterránea(J. Ramírez, 2010).

La contribución de escorrentía superficial y escorrentía subsuperficial, conforma lo que se considera como escorrentía directa; mientras que el flujo base es la combinación de escorrentía subsuperficial con escorrentía subterránea(J. Ramírez, 2010).

Número de curva en la escorrentía.

Uno de los parámetros más importantes que permite determinar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica es el número curva, el cual se calcula considerando las características físicas del territorio como: el uso y cobertura del suelo, y su grupo hidrológico (Diaz & Mercado, 2017).

El número de curva se representa con un número adimensional, el cual puede variar de 0 a 100. El valor más bajo, CN= 0 pertenece a terrenos con una impermeabilidad nula o muy baja y no son susceptibles a la erosión y no existe generación de escorrentía, mientras que, si los valores de CN son cercanos a 100 tienen una impermeabilidad muy alta siendo propensos a la erosión y existe generación de escorrentía, la cual se evacuará a una velocidad mayor y en menos tiempo (Havrylenko et al., 2012).

Los suelos que tienen un potencial de escorrentía similar, se los denomina grupos hidrológicos. El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos los clasifica en

función de la capacidad de infiltración con condiciones iniciales de humedad alta y su textura, ver Tabla 1.

Tabla 1

Grupos hidrológicos (Servicio de Conservación de Suelos -SCS)

Grupo hidrológico	Infiltración cuando están húmedos	Capacidad de infiltración (mm/h)	Textura
A	Rápida	>76	Arenosa Arenosa-Limosa Franco-Arenosa
B	Moderada	76-38	Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa Franco arcillosa
C	Lenta	36-13	Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy lenta	13	Arcillosa

Nota. La Figura presenta los 4 grupos hidrológicos, su capacidad de infiltración y textura.

Recuperado de Calcular Número Curva con ArcGis, por (Villegas, 2017)

El grupo hidrológico A, engloba suelos con una rápida infiltración cuando se encuentran húmedos, por lo tanto, su potencial de escorrentía es bajo, predominan los suelos arenosos y no son propensos a la erosión hídrica; el grupo B son suelos con capacidad de infiltración moderada de 76 a 38 mm/h, es decir que presentan texturas medianamente gruesas y medianamente finas y su potencial de escorrentía es un poco mayor que las del grupo A (Díaz & Mercado, 2017).

El grupo hidrológico C son suelos con texturas medianamente finas y finas y tienen una infiltración lenta de 36 a 13 mm/h y por lo tanto la su capacidad de generar escorrentía es alta y son suelos susceptibles a ser erosionados; la capacidad de infiltración de los suelos del grupo D, es muy lenta 13 mm/h con tamaño de sus partículas muy finas (arcillosas) y

tienen una alta susceptibilidad a ser erosionados por tener un gran potencial de escorrentía (Díaz & Mercado, 2017).

Para la obtención del número curva se debe seguir la metodología del número de curva del SCS, el cual es un modelo desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos.

Los insumos necesarios para generar el número curva son: mapa de cobertura y uso del suelo, mapa de tipo de suelos y el Modelo Digital de Elevaciones.

Tiempo de concentración.

El tiempo que la escorrentía superficial demora en recorrer la distancia desde el punto más alejado de la cuenca hidrográfica hasta la salida de la cuenca, se lo conoce como tiempo de concentración (Vélez & Botero, 2010). Para eventos de lluvia de larga duración, el tiempo de concentración es el tiempo requerido para que el sistema alcance la descarga máxima (J. Ramírez, 2010).

Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas, en el presente estudio se utilizaron 3 ecuaciones para calcular el tiempo de concentración.

Ecuación de Témez que se define como:

$$T_c = 0.3 \frac{L}{S_c^{0.25}} \quad (15)$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración en minutos

L : Longitud del cauce principal (km)

S_c : Pendiente promedio del cauce principal en porcentaje

Ecuación de Kirpich, que se expresa de la siguiente forma

$$T_c = \left(0.066 \frac{L}{S_c^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (16)$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración en minutos

L : Longitud del cauce principal (km)

S_c : Pendiente promedio del cauce principal en porcentaje

Finalmente, la tercera ecuación que se utilizó para el cálculo del tiempo de concentración en este estudio es, la ecuación de retardo, que se define como:

$$T_c = \frac{100 \cdot L a^{0.8} \left(\left(\frac{1000}{NC} \right) - 9 \right)^{0.7}}{1900 (S)^{0.5}} \quad (17)$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración en minutos

L_a : Longitud axial de la cuenca en pies

NC : Número curva SCS

S : Pendiente promedio de la cuenca en %

Caudales y precipitaciones máximas con métodos estadísticos y HEC-HMS.

Los parámetros fundamentales que se requieren conocer para poder controlar los daños ocasionados por los fenómenos extremos de lluvias son los caudales y precipitaciones máximas en años futuros. Cuando el caudal de un río supera los valores medios normales, durante el aumento inusual del agua en su cauce, se lo denomina caudal máximo o caudal punta (Aguilera, 2007).

Análisis de frecuencias.

Para la predicción de caudales máximos o precipitaciones máximas asociados a un período de retorno, se utiliza un método que se basa en procedimientos estadísticos, que se llama análisis de frecuencias, consiste en determinar la magnitud del evento para un

período de retorno dado, a partir de los parámetros de distribuciones de probabilidad y su factor de frecuencia (Aguilera, 2007).

Modelos de distribución de probabilidad.

De las funciones de distribución de probabilidad más usadas en hidrología, están aquellas usadas para la determinación de caudales máximos:

- Distribución Normal
- Distribución Log-Normal 2 parámetros
- Distribución log-Pearson III
- Distribución Gumbel.

Distribución de Gumbel.

De acuerdo a Cuadrat et al. (2002) la distribución de Valores Tipo I conocida como Distribución Gumbel o Doble Exponencial, tiene como función de distribución de probabilidades la siguiente expresión:

$$F(X) = e^{-e^{-\left(\frac{X-\beta}{\delta}\right)}} \quad (18)$$

Donde:

F(X): Probabilidad de que se presente un valor o igual menor que x

e : Base de los logaritmos neperianos

δ y β son parámetros de escala y origen respectivamente

$$\delta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s \quad (19)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772 * \delta \quad (20)$$

\bar{x} : Media aritmética de la muestra

\bar{x} : Desviación estándar de la muestra

Mediante las expresiones anteriores se puede calcular la frecuencia a partir del valor x , es decir con qué frecuencia o período de retorno se representa un cierto caudal o precipitación (F. Sánchez, 2016)

Para solucionar el caso inverso, ¿Qué caudal o precipitación se producirán cada n años?, se debe despejar x en la ecuación (21), dando como resultado la ecuación (22)

$$\frac{x - \beta}{\delta} = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (21)$$

$$x = (-\ln(-\ln(F(x))) * \delta + \beta) \cdot 1.13 \quad (22)$$

Período de retorno.

De acuerdo a Sánchez (2016) el período de retorno es la frecuencia o lapso de tiempo (años), que en promedio se cree que será igualado un evento extremo como: lluvias torrenciales, temperaturas máximas, etc. Sea “ p ” la probabilidad de un evento extremo $p = P(x \geq x_T)$ Esta probabilidad está relacionada con el Período de retorno T en la forma $p = \frac{1}{T}$

Por lo tanto, la probabilidad que se presente un evento con un valor menor que X está dado por la siguiente ecuación

$$P(x < X) = F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\beta}{\delta}\right)}} \quad (23)$$

Mientras que la probabilidad de que se produzca un evento con un valor mayor que x está dado por:

$$P(x \geq X) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{x-\beta}{\delta}\right)}} \quad (24)$$

Finalmente, el período de retorno es el inverso de la probabilidad

$$T(x) = \frac{1}{1 - e^{-e^{-\left(\frac{x-\beta}{\delta}\right)}}} \quad (25)$$

Un caudal máximo a un período de retorno de 50 años, significa que la probabilidad de que se produzca el año próximo será de 0,02; y las probabilidades de que se produzca el siguiente año será de 0,02 y así cada año (F. Sánchez, 2016).

Curvas IDF (Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia).

Son curvas que representan gráficamente la relación que existe entre la intensidad media de una tormenta en mm/hr, su duración en horas y su período de retorno en años. (Pizarro et al., 2003). La ecuación de la intensidad de precipitación se presenta en la ecuación (26)

$$i = \frac{P}{t} \quad (26)$$

Donde:

i: Intensidad

P: Profundidad de lluvia en mm o pulg

t: Tiempo de duración, generalmente en hr

Uno de los métodos más conocidos para construir una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), es el método propuesto por Aparicio (1997) citado en (J. Pérez & Senent, 2017) el cual relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno, en una familia de curvas, que se expresa de acuerdo a la ecuación (27).

$$i = \frac{(K T^m)}{t^n} \quad (27)$$

Donde K, m y n son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión potencial, donde T es el período de retorno en años, t la duración en minutos u horas, i la intensidad de precipitación en mm/hr.

Hietograma.

Es un gráfico de barras (bloques alternos) que representa la distribución temporal de una tormenta y se obtiene a partir de las curvas IDF. En la parte central del gráfico se coloca el valor de precipitación más alto y luego se alterna en orden descendente hacia la derecha e izquierda los demás valores (Urgilés, 2015).

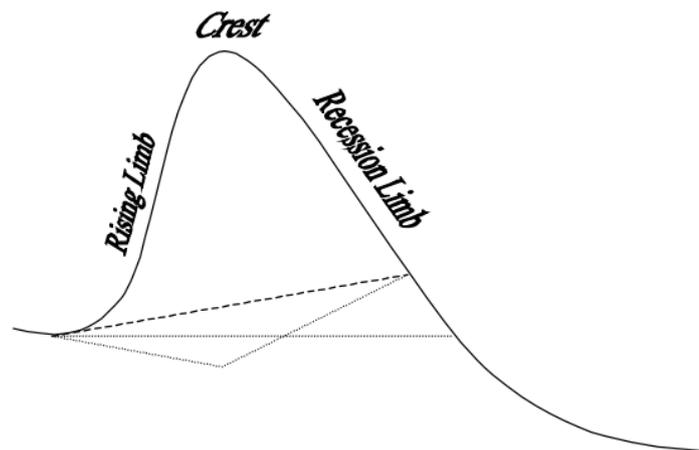
Hidrograma unitario.

De acuerdo a Sherman (1932) citado por (J. Ramírez, 2010) la escorrentía directa, que se produce por un volumen unitario de exceso de lluvia (precipitación neta) de intensidad constante se denomina hidrograma unitario. La precipitación neta se obtiene restando a la precipitación total, la precipitación que es interceptada por la vegetación, infiltrada en el suelo o evaporada (Umaña, 2014).

El hidrograma se divide en 3 componentes: la curva ascendente (Rising Limb) compuesta por escorrentía directa, la lluvia que cae directamente sobre la corriente y agua subterránea; la cresta (crest), en la que se llega al nivel de descarga máxima y toda el agua precipitada contribuye al aumento de caudal; curva en caída o Descenso (Recession Limb) compuesta por flujo subsuperficial y agua subterránea. La parte inferior de la curva de descenso, se denomina curva de agotamiento donde únicamente existe aportación de agua subterránea (J. Ramírez, 2010). Ver Figura 8.

Figura 8

Descripción esquemática del hidrograma



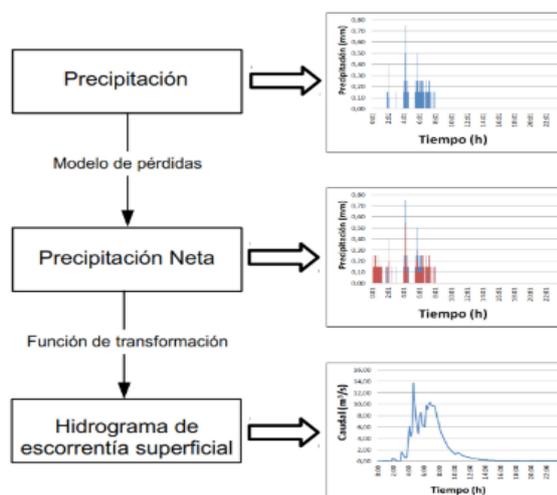
Nota. La Figura presenta los 3 componentes de un hidrograma que son: curva ascendente, la cresta y curva de descenso. Recuperado de Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics , por (J. Ramírez, 2010)

Obtención de caudales máximos con el software HEC-HMS.

HEC-HMS (Hydrologic-Engineering Center-Hydrologic – Hydrologic Modeling System) es un software que permite simular un hidrograma de escorrentía, utilizando un modelo de pérdidas de infiltración, que permite obtener la precipitación neta; y una función de transformación de precipitación a escorrentía. HEC-HMS no considerara el movimiento del agua a través del suelo(Umaña, 2014). Ver Figura 9.

Figura 9

Esquema del tratamiento de las variables en el modelo HEC-HMS



Nota. La Figura presenta el modelo de pérdidas de filtración. Recuperado de Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics , por (J. Ramírez, 2010)

En cuanto al modelo por pérdidas de infiltración, HEC-HMS tiene diversos modelos, uno de los más usados es el modelo del número de curva del SCS (Servicio de Conservación de suelos de los EE. UU), que de acuerdo a López et al. (2012), es un método que permite estimar las pérdidas por infiltración, en un evento de lluvia . El modelo se basa en la siguiente relación.

$$Pe = \frac{(CN(P + 50.8) + 5080)^2}{(CN(P - 203.2) + 20320)} \quad (28)$$

Donde:

Pe: Precipitación en exceso o neta (mm)

P: Precipitación de la tormenta (mm)

CN: Curva número

Según Umaña (2014), en el caso de que existan diferentes tipos y usos de suelo en la cuenca hidrográfica, el CN se lo puede ponderar, utilizando la siguiente ecuación.

$$CN_{Pond} = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i Ai}{\sum_{i=1}^n Ai} \quad (29)$$

Donde:

CN_{Pond} : Número curva ponderado

CN_i :: Representa el número curva para cada tipo o uso de suelo

Ai : Área de cada tipo o uso de suelo

Por otro lado, para la transformación de la precipitación neta en escorrentía superficial directa, se cuenta con algunas funciones de transformación como: el hidrograma sintético de Clark, hidrograma unitario sintético de Snyder e hidrograma unitario del SCS (Umaña, 2014).

Con este último se realizó la obtención de escorrentía superficial directa con el software HEC-HMS en el presente estudio. Para ello se debe considerar la siguiente ecuación:

$$Q_P = \frac{2.08 A}{T_p} \quad (30)$$

Donde:

Q_P : Caudal máximo (m^3/s)

A : Superficie de la cuenca en (km²)

T_p : Tiempo máximo para alcanzar el caudal máximo (horas)

Coeficiente de Rugosidad (n de Manning)

La resistencia al flujo del agua en cauces y llanuras de inundación, se debe a fuerzas que actúan sobre y dentro del flujo, que se oponen a su movimiento; y se representa con el coeficiente de rugosidad de “n” de Manning, su valor depende de una serie de factores como: rugosidad del perímetro mojado, vegetación, irregularidad, sedimentación y socavación, obstrucciones, cambio estacional, entre otros (Fernández de Córdoba et al., 2018).

A lo largo del cauce principal y en las llanuras de inundación de una cuenca hidrográfica, la composición de materiales, obstáculos, irregularidades y vegetación no es homogénea, por lo que el coeficiente de rugosidad n de Manning es diferente en cada uno de estos elementos. La n de Manning tiene una tendencia a disminuir a medida que aumenta el caudal por el cauce principal; sin embargo, cuando los caudales son máximos y el agua alcanza las llanuras de inundación, con presencia de vegetación e irregularidades considerables, la n de Manning puede aumentar (Fernández de Córdoba et al., 2018).

Método de Cowan.

Es un procedimiento para estimar el valor de n en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m^5 \quad (31)$$

El parámetro n_0 depende del material que existe en los cauces de los ríos (tamaño de los sedimentos), su valor se determina por medio de tablas o utilizando la ecuación de Strickler; el coeficiente n_1 es un parámetro en función del grado de irregularidad de la sección transversal: suave, menor, moderado o severo, sus respectivos valores se establecen mediante tablas (Imhoff & Trento, 2012).

El factor n_2 está determinado por el cambio de tamaño y forma de las secciones transversales, que puede ser: gradual. ocasionalmente alternante o frecuentemente alternante. Las obstrucciones que existen en la planicie de inundación como: depósitos de sedimentos, residuos vegetales, raíces o troncos pueden ser cuantificados utilizando el parámetro n_3 (Imhoff & Trento, 2012).

La vegetación existente como arbustos o árboles, se determina con el parámetro n_4 , utilizando fotografías o imágenes satelitales, para definir si la vegetación es baja, media, alta o muy alta (valores en tablas). Finalmente, el coeficiente m_5 considera la sinuosidad o grado de meandros del canal(Imhoff & Trento, 2012).

Método de Strickler

El método de Strickler permite calcular el parámetro o coeficiente n_0 , a partir de la granulometría de los sedimentos del lecho del río, ecuación (32), donde k representa el diámetro representativo del sedimento en metros y C depende del tipo de estudio (Ponce, 2008).

$$n_0 = C k_s^{\frac{1}{6}} \quad (32)$$

Análisis granulométrico de sedimentos

El análisis granulométrico consiste en separar una muestra de sedimentos en partículas de distintos tamaños, con el fin de determinar el contenido porcentual en peso de cada fracción de arenas, arcillas, limos y gravas de la muestra (Simeon, 2017). Para separar una muestra de sedimentos, en partículas mayores a 0.075 mm (arenas y gravas), se utilizan tamices de diferentes tamaños de malla, y así, determinar el porcentaje en peso retenido en cada malla, con respecto al total de la muestra. Mientras que para obtener el contenido porcentual en peso de partículas finas (arcillas y limos), se realiza un análisis granulométrico con hidrómetro (Simeon, 2017).

En una curva granulométrica, el porcentaje de sedimento que pasa a través de los tamices se coloca sobre el eje de las ordenadas (eje y) utilizando una escala aritmética; y las aberturas de las mallas de los distintos tamices se colocan en el eje de las abscisas (eje x) (Toirac, 2012).

Transporte de sedimentos

Los procesos geomorfológicos que modelan un paisaje están controlados por el principal agente erosivo, el agua. Estos procesos son: el arranque de material que se produce por el impacto y salpicadura de las gotas de lluvia; el transporte de partículas, debido al flujo laminar que remueve el suelo uniformemente; y la sedimentación de las partículas transportadas (J. Montoya, 2008).

El principal agente de transporte de sedimentos son los ríos, algunas ocasiones trasladan los sedimentos grandes distancias, hasta llegar a zonas en las cuales éstos se depositan, lo que ocasiona la formación de barras, abanicos aluviales y deltas (L. Montoya & Montoya, 2005). El movimiento de los sedimentos se clasifica en dos tipos: de acuerdo a su procedencia y por su modo de desplazamiento. En el primer caso, si los sedimentos (material relativamente grueso) provienen del lecho fluvial o del fondo del cauce, se denominan sedimentos de fondo o de lecho; mientras que, si los sedimentos fueron introducidos en el cauce del río, desde una fuente externa, se le conoce como sedimento lavado o carga de lavado (partículas finas) (Bravo et al., 2004).

Por el modo de desplazamiento, el movimiento de los sedimentos puede ser: transporte suspendido, los sedimentos se mantienen en suspensión, por el movimiento turbulento del agua y recorren largas distancias antes de ser depositados; transporte tractivo o por carga de fondo, los sedimentos se desplazan cortas distancias por rodamiento, arrastre o por saltos (Bravo et al., 2004).

Las velocidades bajas de sedimentación de las partículas finas como limas y arcillas, provoca que éstas se muevan principalmente por suspensión, mientras que las partículas

gruesas (arenas) se mueven como carga de fondo, debido a que sus velocidades de sedimentación son altas (Montoya & Montoya, 2005).

Las fuerzas que actúan sobre una superficie que reposa en el fondo de un cauce, son tres, y son opuestas la una de la otra. La primera de ellas es la fuerza de gravedad que actúa sobre una partícula, la cual actúa de manera vertical descendente, la segunda fuerza es el esfuerzo hidráulico, esta fuerza tentará a la partícula que se encuentra en el fondo a ser arrastrada, es decir actúa en sentido paralelo a la dirección de la corriente; por último la tercera fuerza que actúa sobre una superficie en el fondo es la fuerza ascendente la cual surge debido a las diferencias en la velocidad del flujo que crea un gradiente vertical y por efectos de la turbulencia, es decir esta fuerza actúa en un sentido vertical ascendente (Bravo et al., 2004).

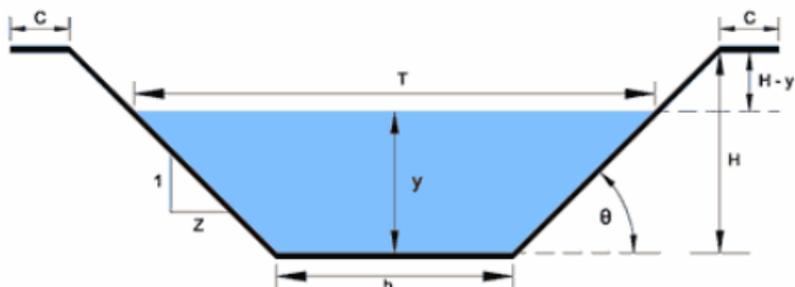
Flujo en Canales

El flujo se define como el movimiento que realiza un fluido por un canal. Los canales abiertos como los ríos y arroyos, tienen una superficie libre que está en contacto con la atmósfera, y el agua fluye gracias a la fuerza de la gravedad. En los canales cerrados como las tuberías de agua potable, acueductos, alcantarillados, drenajes. el movimiento del agua se debe a la presión hidráulica (Hamad, 2008). Las secciones más comunes en canales son: trapezoidal, rectangular, triangular, circular, entre otros (Torres & Vivas, 2018).

De acuerdo a la Figura 10: y es el tirante de agua o altura del agua y se mide de manera perpendicular al canal, b es el ancho del canal, T es la superficie libre de agua o también llamado espejo de agua, H profundidad total del canal, $H-y$ es el borde libre, C ancho de la corona, z es la proyección horizontal de las paredes verticales cuando su proyección vertical vale 1 (Torres & Vivas, 2018).

Figura 10

Sección trapezoidal de un canal



Nota. La Figura presenta los elementos geométricos de un canal de sección trapezoidal.

Recuperado de Modelación de una estructura hidráulica de confluencia de canales urbanos(Caso de estudio: Río Arzobispo, Bogotá D.C) , por (Torres & Vivas, 2018)

Además, para calcular el área hidráulica (A) en m^2 , perímetro mojado (P), radio hidráulico (R) en m, se debe considerar las siguientes ecuaciones:

$$A = (b + 2y) y \quad (33)$$

$$P = (b + 2y) \sqrt{1 + z^2} \quad (34)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (35)$$

Para obtener el caudal de escurrimiento, se utiliza la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot A}{n} \quad (36)$$

Donde:

Q : Descarga o caudal de escurrimiento (m^3/s)

A : Área hidráulica o mojada (m^2)

R : Radio hidráulico (m)

S : Pendiente media

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

Flujo permanente (estacionario) y no permanente (no estacionario)

Si los parámetros hidráulicos del canal: tirante del agua (y), velocidad (v) y área hidráulica (A) permanecen constantes con respecto al tiempo, se considera un flujo permanente (Rodríguez, 2008); como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\frac{dA}{dt} = 0; \quad \frac{dV}{dt} = 0; \quad \frac{dd}{dt} = 0 \quad (37)$$

Por el contrario, si los parámetros hidráulicos si cambian con respecto al tiempo, se trata de un flujo no permanente. Se lo expresa como indica la siguiente ecuación:

$$\frac{dA}{dt} \neq 0; \quad \frac{dV}{dt} \neq 0; \quad \frac{dd}{dt} \neq 0 \quad (38)$$

Flujo uniforme y flujo variado

Por otro lado, en el caso de que los parámetros hidráulicos del canal: tirante de agua (y), velocidad (v), área hidráulica (A), no permanezca constante con respecto al espacio será un flujo uniforme. Matemáticamente se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación

$$\frac{dA}{dl} = 0; \quad \frac{dV}{dl} = 0; \quad \frac{dd}{dl} = 0 \quad (39)$$

Mientras que, si los parámetros hidráulicos si cambian con respecto al espacio, el flujo es no uniforme o variado. Se lo expresa como indica la siguiente ecuación:

$$\frac{dA}{dl} \neq 0; \quad \frac{dV}{dl} \neq 0; \quad \frac{dd}{dl} \neq 0 \quad (40)$$

Estados de Flujo

El flujo puede tener un estado laminar, turbulento o transicional, en función de la relación que existe entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales en el movimiento del fluido. Cuando las fuerzas de inercia son más débiles con relación a las fuerzas de viscosidad, el estado del flujo es laminar y la trayectoria de sus partículas son regulares y definidas. Mientras que, si las fuerzas inerciales son más fuertes en relación con las fuerzas viscosas, se produce un flujo en estado turbulento y la trayectoria de sus partículas es irregular. Cuando se presenta una transición gradual de flujo con régimen laminar a turbulento, se considera un flujo transicional (Rodríguez, 2008).

En cuanto a la ponderación de las fuerzas viscosas con relación a la fuerza de inercia, se utiliza el número de Reynolds, el cual permite clasificar el régimen del flujo. Si el valor del número de Reynolds es menor a 2000 el flujo corresponde a un flujo laminar, si este valor es mayor a 4000 se dice que es un flujo turbulento; mientras que si el número de Reynolds toma valores entre 2000 y 4000 es un flujo transicional (Hamad, 2008). Para determinar el número de Reynolds se utiliza la siguiente ecuación.

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V R}{\mu} \quad (41)$$

Donde:

R_e : Numero de Reynolds

V : Velocidad promedio del fluido (m/s)

R : Radio hidráulico de la sección mojada (m)

μ : Viscosidad cinética del fluido (m²/s)

Flujo en régimen subcrítico, crítico y supercrítico

El régimen de un flujo, está definido por el número de Froude, el cual establece la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad que actúan en un fluido (Rodríguez, 2008). Matemáticamente se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \bar{y}}} \quad (42)$$

Donde:

F: Número de Froude

V: Velocidad promedio del fluido (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

\bar{y} : Longitud del tirante medio o profundidad hidráulica (m)

El flujo se encuentra en un régimen crítico cuando el número de Froude es igual a la unidad, es decir que las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad son iguales. El número de Froude tiene un valor menor a 1, cuando las velocidades son menores que las críticas, en consecuencia, de una disminución de la pendiente con respecto a la pendiente crítica, por lo que se presenta un flujo en régimen subcrítico, tranquilo y fluvial. Es decir, las fuerzas inerciales son menores que las de gravedad (Rodríguez, 2008).

Mientras que, un régimen supercrítico, rápido y torrencial, se produce cuando la velocidad es mayor que la velocidad crítica, a causa de un aumento de la pendiente con respecto a la pendiente crítica y el número de Froude es mayor a 1. Por lo tanto, las fuerzas inerciales son mayores que las fuerzas de gravedad (Rodríguez, 2008).

Autómatas celulares

Los Autómatas Celulares (AC) son celdas, células, o tésales, conectados localmente, y su estado es dinámico, es decir que puede ir cambiando, de acuerdo a la definición de una regla o función de transición. El estado actual de las celdas cambia constantemente en continuas iteraciones y de forma discreta (Padilla, 2014), de acuerdo a una ecuación

matemática (regla de transición) que es sensible a los estados de las células vecinas (Garay & Figueroa, 2015).

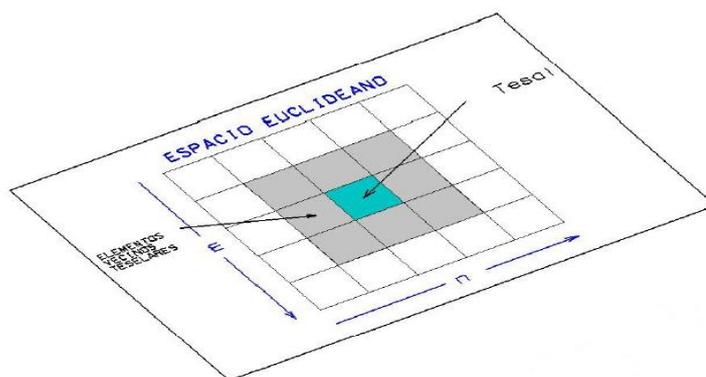
Elementos que forman a los autómatas celulares

Arreglo Regular.

De acuerdo a Reyes (2011) citado en (Pavón, 2017), el arreglo regular es un plano de 2 dimensiones o un espacio n dimensional y cada división homogénea de arreglo es llamada célula. Ver Figura 11.

Figura 11

Espacio Euclidiano de un autómata celular



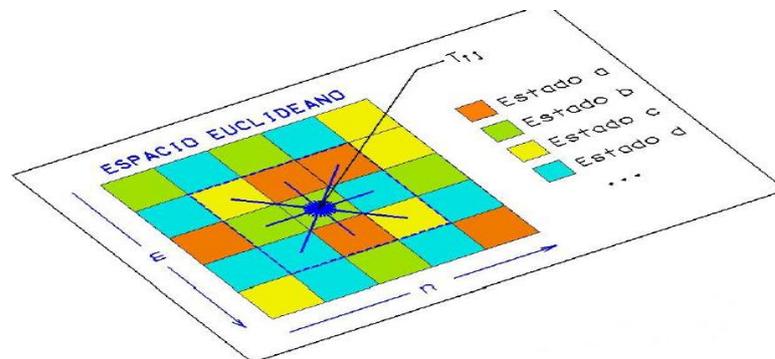
Nota. Recuperado de Autómatas Celulares: Una solución a la Geosimulación, por (Padilla, 2014).

Conjunto de estados.

Todos los valores posibles que puede adquirir una celda, constituyen el conjunto de estados de la misma. Cada celda se encuentra en un estado k , en un instante de tiempo t . (Fernández & Rangel, 2014), ver Figura 12.

Figura 12

Conjunto de estados de un autómata celular

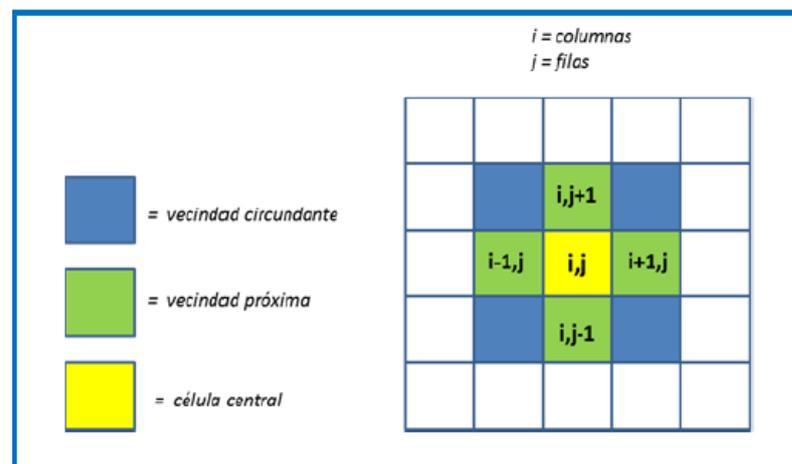


Nota. Recuperado de Autómatas Celulares: Una solución a la Geosimulación, por (Padilla, 2014).

Vecindades.

Figura 13

Vecindad en un Autómata Celular



Nota. La Figura presenta la celda central, y sus celdas vecinas próximas y circundantes.

Recuperado de Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, por (Padilla et al., 2015)

A cada celda de un autómata celular, se le debe asignar el conjunto de sus celdas vecinas, que se encuentren a una cierta distancia r . Las celdas que se encuentren más

alejadas de la distancia r , no ejercen influencia sobre la celda central (Fernández & Rangel, 2014).

En cada iteración, cada celda central, cambia su estado recopilando la información de sus celdas vecinas y de ella misma (Padilla et al., 2015). Una celda vecina que se encuentre en la diagonal (vecino circundante), tendrá una menor influencia en comparación a una celda vecina que se encuentre inmediatamente continuo (vecino próximo) a la celda central (Padilla, 2014). Ver Figura 13.

Función o regla de transición.

El comportamiento del autómata celular está determinado por la función de transición, que es una expresión algebraica o grupo de ecuaciones que se encargan de cambiar el estado actual de una celda, dependiendo de su estado anterior y de los estados anteriores de las celdas vecinas (Sancho, 2016). De acuerdo a Fernández & Rangel (2014), si una celda i se encuentra en un estado k , conjuntamente con el estado k de sus celdas vecinas, el número de posibles reglas de transición puede ser calculado como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\text{Reglas de transición posibles} = k^{k^n} \quad (43)$$

Donde:

k : Número de estados para cada celda

n : Número de vecindades

Modelación numérica de inundaciones fluviales

Para la representación simplificada de la realidad, se emplean modelos numéricos, en los que se utilizan ecuaciones matemáticas y secuencias lógicas para tratar de describir el sistema natural. Los modelos enfocados en simular el flujo del agua, fueron los primeros modelos numéricos en desarrollarse. Hoy en día, también existen modelos capaces de simular el transporte de sedimentos, dispersión de contaminantes, calidad de agua, entre otros (Bladé et al., 2014).

La representación de la topografía del cauce y de las llanuras de inundación, es la característica más importante de los modelos de flujo en ríos, los cuales pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Si se realiza un modelamiento con un mayor de dimensiones, no necesariamente se van a obtener mejores resultados. Por lo que los aspectos que más van a influir en la calidad de los resultados son: las ecuaciones que se resuelvan, la discretización espacial que se realice de la geometría, y sobretodo de la rugosidad del terreno (n de Manning) (Bladé et al., 2014).

Modelos unidimensionales

En los modelos unidimensionales, el cauce principal es considerado como una línea, dividida en varias secciones transversales, y se establece las siguientes hipótesis : el flujo de agua se mueve en sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal, el tirante y velocidad del agua son constantes en cada sección transversal(Bladé et al., 2014).

Para calcular las variables hidráulicas en canales abiertos: tirante de agua, velocidad, caudal; en flujo estacionario y no estacionario, los modelos hidrodinámicos 1D resuelven las ecuaciones de Saint Venant (leyes de la conservación de la masa y momento), las cuales se resuelven por el método de diferencias finitas y los métodos de elementos finitos(Timbe & Willems, 2011).

Los resultados que se obtienen con los modelos unidimensionales suelen ser precisos en el cauce principal, sin embargo, tienen una menor exactitud para modelar el flujo que pasa desde los márgenes del río hacia las planicies de inundación(Bladé et al., 2014). Uno de los mayores problemas de los modelos unidimensionales, es la definición de las secciones transversales cuando existen meandros fuertes con llanuras de inundación importantes, lo que ocasiona que las secciones transversales se superponen entre ellas, por lo que en estos casos es más factible utilizar un modelo bidimensional(Bladé et al., 2014).

HEC -RAS (Modelo unidimensional).

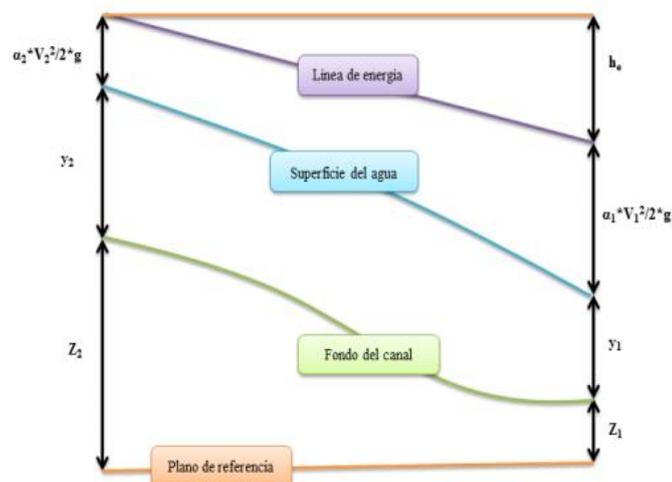
La delineación de las planicies de inundación, es la principal característica del modelo unidimensional HEC-RAS, para ello se calcula el nivel o calado del agua en cada una de las secciones transversales del cauce principal del río, además permite calcular otras variables hidráulicas como el transporte de sedimentos y contaminantes o la socavación en los elementos de apoyo de un puente (Ochoa et al., 2015).

En flujo estacionario o permanente HEC-RAS utiliza el método de paso estándar para calcular los tirantes de agua en cada sección transversal, para ello es necesario conocer los caudales de diseño, distancia entre secciones trasversales y las condiciones de contorno (Ochoa et al., 2015).

Ecuación de conservación de energía en flujo permanente (HEC-RAS 1D).

Figura 14

Representación de los términos de la representación de energía



Nota. La Figura presenta los términos de la ecuación de energía, al lado derecho se encuentra la sección transversal 1 y la sección transversal 2 a la izquierda. La línea verde representa el fondo del canal del río, la línea azul representa la superficie del agua, mientras que la línea celeste representa la energía, la cual presenta una pérdida de energía debido a pérdidas por fricción, contracción o expansión. Recuperado de Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en la Rambla del Albuñón, por (Marco, 2015)

Según Marco (2015) para calcular el nivel del agua en flujo permanente, HEC-RAS resuelve la ecuación de energía con el método de paso estándar el cual es un proceso iterativo, ver Figura 14. La ecuación de la energía se presenta en la ecuación (44).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2 \cdot g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2 \cdot g} + h_e \quad (44)$$

Donde:

Z_1, Z_2 : Cotas del fondo del cauce (punto más bajo) de las secciones 1 y 2, medidas desde un plano de referencia horizontal arbitrario

Y_1, Y_2 : Profundidad, calado o elevación vertical del agua en las secciones 1 y 2, medidas desde el fondo.

α_1, α_2 : Factor de corrección de energía cinética en las secciones 1 y 2 (Coeficientes de ponderación de velocidades)

V_1, V_2 : Velocidades medias horizontales en las secciones 1 y 2

h_e : Pérdidas de energía entre las secciones 1 y 2

Modelos bidimensionales

En dos dimensiones, la topografía del cauce y de las llanuras de inundación, son representadas por una malla formada por una serie de celdas poligonales(Bladé et al., 2014), esto permite aumentar la representación espacial, donde las elevaciones de las celdas disminuyen o aumentan su tamaño, como consecuencia de la erosión o la deposición(T Coulthard & Van De Wiel, 2012).

Las celdas cuadrangulares de las mallas bidimensionales, están ordenadas en filas y columnas, cada celda está identificada por un par de índices (i, j). Además, en los modelos 2D, el radio hidráulico ya no se define como la relación entre el área mojada y perímetro mojado, sino que se toma una columna de fluido, con una altura o calado (h) y una anchura (Δx)(Cea & Bladé, n.d.), como se presenta en la ecuación (45), es decir el radio hidráulico es igual a la altura o calado

$$R = \frac{A}{P} = \frac{h \Delta x}{\Delta x} = h \quad (45)$$

Modelo de evolución del paisaje CAESAR.

CAESAR es un modelo de evolución del paisaje bidimensional que se basa en los principios de autómatas celulares, simula el desarrollo del paisaje enrutando el agua a través de una malla regular de celdas y cambia las elevaciones de las celdas según la erosión y deposición de procesos fluviales y de taludes (Thomas Coulthard et al., 2013).

El modelo de flujo de CAESAR utiliza algoritmo de “barrido de flujo”, que consiste en distribuir la descarga desde una celda contribuyente hacia un rango de 2 a 5 celdas receptoras. En el caso de que exista una obstrucción, no se podrá identificar celdas receptoras, por lo que la descarga permanece en la celda contribuyente, para distribuirse en barridos posteriores. La profundidad y la velocidad del flujo se calculan a partir de estas descargas usando la ecuación de Manning (Thomas Coulthard et al., 2013).

De acuerdo a Coulthard & Van de Wiel (1999) citado en (Pavón, 2017), cada celda de la cuadrícula inicia con valores de descarga de agua, altura, tamaño granulométrico y área de drenaje, y en cada iteración estos valores van cambiando de acuerdo a 4 reglas o funciones de transición, que son: rutina hidrológica, hidráulica, erosión y deposición fluvial y una rutina de pendiente con movimientos de masa y arrastre.

CAESAR-Lisflood.

CAESAR-Lisflood es un Modelo de evolución del paisaje, y es la integración del modelo CAESAR con el modelo hidrodinámico Lisflood-FP, para simular la erosión y deposición en las cuencas hidrográficas.

Además, CAESAR-Lisflood puede ser ejecutado en dos modos, el primero es el modo de captación en el que se usan datos de precipitaciones mm/h, mientras que el segundo es el modo de alcance en que se ingresan valores de caudales en m³/s. Además, para ambos

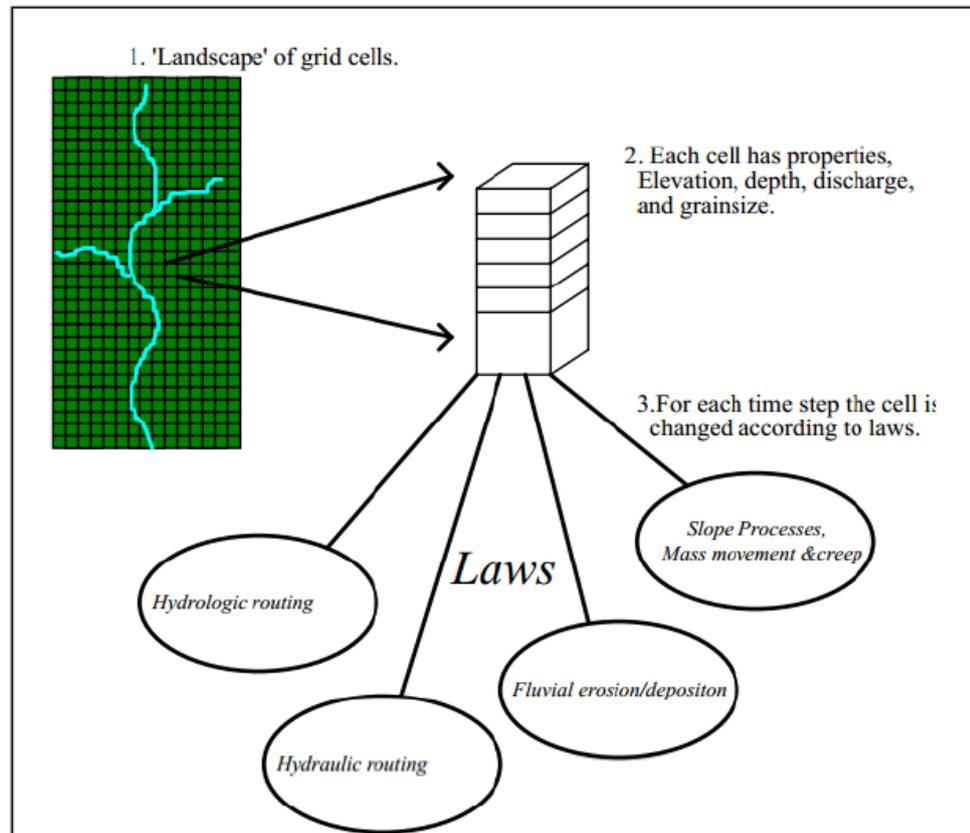
modos, el modelo requiere que se especifiquen dos condiciones iniciales, los cuales son: valores de elevación utilizando modelo digital de elevaciones (DEM) y el tamaño de sedimentos (Lowry et al., 2020).

Existen 4 componentes principales de CAESAR-Lisflood, los cuales son un modelo hidrológico, modelo de flujo; erosión y deposición fluvial; y procesos de pendiente ve Figura 15. En cuanto al modelo de flujo, este utiliza las ecuaciones del modelo Lisflood-LP, mientras que el modelo hidrológico es una adaptación de TOPMODEL. Cuando se utiliza el modo de captación, la escorrentía se genera mediante la entrada de datos de lluvia, para ello TOPMODEL contiene una función de acumulación de humedad del suelo, el suelo a su vez tiene un umbral de escorrentía, que en términos simples es la cantidad de agua o precipitación que el suelo ya no es capaz infiltrar más agua y en consecuencia se genera escorrentía superficial (Saynor et al., 2019).

La escorrentía superficial que se produce luego es enrutada utilizando el modelo de flujo Lisflood LP donde el agua se dirige a las células de Manhattan dependiendo de la pendiente local, rugosidad y una aproximación simple de la inercia, de tal modo que se generan profundidades y velocidades de flujo para todas las celdas donde existe agua superficial. Por otro lado, para calcular el transporte de sedimentos CAESAR-Lisflood se basa en las ecuaciones de Einstein (1950) y Wilcock y Crowe (Lowry et al., 2020)

Figura 15

Descripción de los valores iniciales y reglas aplicadas en el modelo CAESAR -Lisflood



Nota. Recuperado de Aplicación del Modelo Automata Celular de Evolución del Paisaje CAESAR-Lisflood para determinar zonas con amenaza de inundaciones en la microcuenca del río Cristal, por (T.J. Coulthard, 1999), adaptado por (Pavón, 2017)

Rutina hidrológica de CAESAR-Lisflood

La rutina hidrológica de CAESAR se basa en el modelo hidrológico TOPMODEL el cual es un modelo hidrológico que se fundamenta en el principio de la conservación de las masas en un sistema cerrado y se basa en que : 1. el flujo de entrada son las precipitaciones, 2. el flujo de salida está compuesto por la evapotranspiración y descarga hacia cuerpos hídricos y 3. el almacenamiento lo realiza el suelo (Huertas, 2020), este principio se describe en la siguiente ecuación:

$$0 = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Escorrentía} - \text{Almacenamiento} \quad (46)$$

Este modelo se fundamenta en el índice topográfico, el cual determina los potenciales lugares donde se encuentra la humedad, es decir describe la tendencia de una parte del terreno, representado por un pixel a acumular agua y se define como se presenta en la ecuación (47)

$$K = \frac{a}{\text{tg}(\beta)} \quad (47)$$

Donde:

K: Índice Topográfico

a = Área específica de contribución de la cuenca en m²

β = Angulo de la pendiente local del terreno

Se considera que el área total de la cuenca es un parámetro de tendencia de recibir agua y la pendiente local es un parámetro de tendencia de evacuar agua, es decir las partes más bajas y planas del terreno tienen una mayor capacidad de acumulación de agua, mientras que las partes altas presentan valores menores (Fischer et al., 2012).

En otras palabras, de acuerdo a Coulthard (1999) citado en (Pavón, 2017), cuando el ángulo de la pendiente local aumenta, el índice topográfico disminuye y viceversa. El comportamiento de TOP MODEL está controlado por dos variables: la transmisividad o tasa de movimiento (k); y por el parámetro m. La transmisividad es aquella capacidad del suelo que permite que el agua fluya; y el parámetro m parámetro controla la subida y caída del déficit de humedad del suelo.

De acuerdo a Coulthard (1999) citado en (Pavón, 2017) para cada minuto de corrida del modelo, se calcula la saturación del suelo de una celda individual (Jt). La saturación para el próximo paso de tiempo, el cual es 60 segundos o minutos, se lo puede representar como (Jt+1), pero para ello un parámetro adicional que se trasladará antes de cada cálculo se establece en las iteraciones jt+1, como se presenta en la ecuación (48)

$$j_{t+1} = \frac{m}{T} \log \left(\frac{(r-j_t) + j_t \exp\left(\frac{rT}{m}\right)}{r} \right) \quad (48)$$

Donde:

j_t : Saturación del suelo de una celda individual

j_{t+1} : Saturación del suelo para el próximo paso del tiempo

r : Intensidad de la lluvia

m : parámetro modulador

Rutina Hidráulica de CAESAR -Lisflood.

En la rutina hidráulica de CAESAR se debe tomar en consideración el umbral de escorrentía, que se define como la cantidad de precipitación a partir de la cual el terreno ya no es capaz de infiltrar más agua y este fluye sobre la superficie, este umbral dependerá de la humedad inicial del suelo, el uso del suelo, el tipo de suelo y la pendiente (Daza & Pérez, 2013).

El enrutamiento de flujo en CAESAR-Lisflood, se basa en el modelo hidrodinámico Lisflood-FP, el cual es un modelo inercial unidimensional derivado de las ecuaciones completas de aguas poco profundas que se aplica en las direcciones x e y para simular un flujo bidimensional sobre una cuadrícula ráster (Thomas Coulthard et al., 2013). De acuerdo a (Bates et al., 2010) para obtener estas ecuaciones, se parte de la ecuación de momento de las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant o de aguas poco profundas, ver ecuación (49)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] + \frac{gA}{\partial x} \partial(h+z) + \frac{gn^2 Q^2}{R^{\frac{4}{3}} A} = 0 \quad (49)$$

El primer miembro de la ecuación hace referencia a la aceleración, el segundo representa la advección, mientras que el tercer y cuarto miembro es la pendiente del agua y fricción respectivamente (Bates et al., 2010).

Donde:

Q : Descarga (m^3s^{-1})

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

R : Radio hidráulico (m)

g : aceleración debida a la gravedad (ms^{-2})

z : elevación (m)

h : Profundidad de flujo

x : ancho de la celda de cuadrícula (m)

t : tiempo (s)

n : coeficiente de Manning ($m^{1/3} s^{-1}$)

De acuerdo a (Bates et al., 2010), la advección no tiene importancia, para muchas llanuras aluviales, por lo cual se elimina este miembro de la ecuación, se asume un canal rectangular y se divide para un ancho de flujo constante, w (L), con el fin de obtener una ecuación en términos de flujo por unidad de ancho. Por lo tanto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{g A \partial(h+z)}{\partial x} + \frac{g n^2 Q^2}{R^{\frac{4}{3}} h} = 0 \quad (50)$$

Además, para caudales amplios y poco profundos, es posible aproximar el radio hidráulico R , con la profundidad de flujo h (Bates et al., 2010), entonces se puede discretizar la ecuación con respecto al intervalo de tiempo (Δt), por lo tanto, la ecuación queda:

$$q_{t+\Delta t} = \frac{q_t - g h_t \Delta t \frac{(h_t + z)}{\Delta x}}{1 + \frac{(g h_t \Delta t n^2 q_t)}{h_t^{10/3}}} \quad (51)$$

Donde:

$q_{t+\Delta t}$: Flujo de caudal en la celda

q_t : Flujo entre celdas de la iteración anterior (m^2s^{-1})

g : Aceleración debido a la gravedad (ms^{-1})

n : Coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{1/3} s^{-1}$)

h_t : profundidad de flujo en la iteración anterior

z : elevación (m)

x : ancho de la celda de cuadrícula (m)

t : tiempo (s)

Rutina de procesos de erosión y deposición de sedimentos en CAESAR.

De acuerdo a (J. Montoya, 2008), los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos se determinan en cada una de las celdas. Las profundidades y velocidades de flujo de celda calculadas se utilizan para calcular el esfuerzo cortante que luego se puede utilizar para calcular la erosión y la deposición fluvial. Esto se lleva a cabo utilizando las fórmulas de transporte de sedimentos de Einstein (1950) o Wilcock y Crowe (2003).

CAESAR -Lisflood permite hasta nueve clases de tamaño de grano para modelar y estos tamaños de grano pueden transportarse como carga de lecho o suspendidos. (Thomas Coulthard et al., 2013).

Rutina de pendiente con movimientos de masa arrastre.

En el momento que se excede un umbral crítico de pendiente, el suelo comienza a deslizarse en función de la pendiente, lo que permite que el material de los taludes se alimente al sistema fluvial (Thomas Coulthard et al., 2013).

Capítulo III

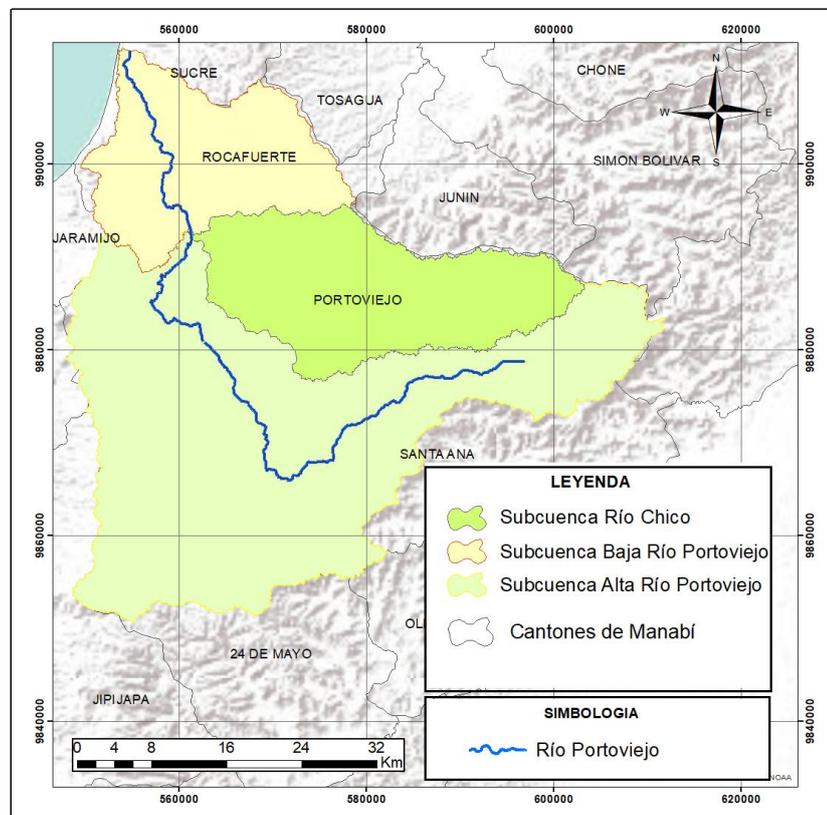
Caracterización de los parámetros morfométricos, hidrológicos e hidrométricos de la microcuenca del río Portoviejo

Descripción y delimitación de la cuenca, subcuenca y microcuenca del río Portoviejo

La cuenca del río Portoviejo se encuentra en la provincia de Manabí y comprende los cantones de Portoviejo, Santa Ana, Rocafuerte, 24 de mayo y Jipijapa. Está conformado por 3 subcuencas: la subcuenca alta del Río Portoviejo cuenta con 13 microcuencas, la subcuenca baja del río Portoviejo y la subcuenca del Río Chico se encuentran constituidas por 3 microcuencas cada una. Ver Figura 16.

Figura 16

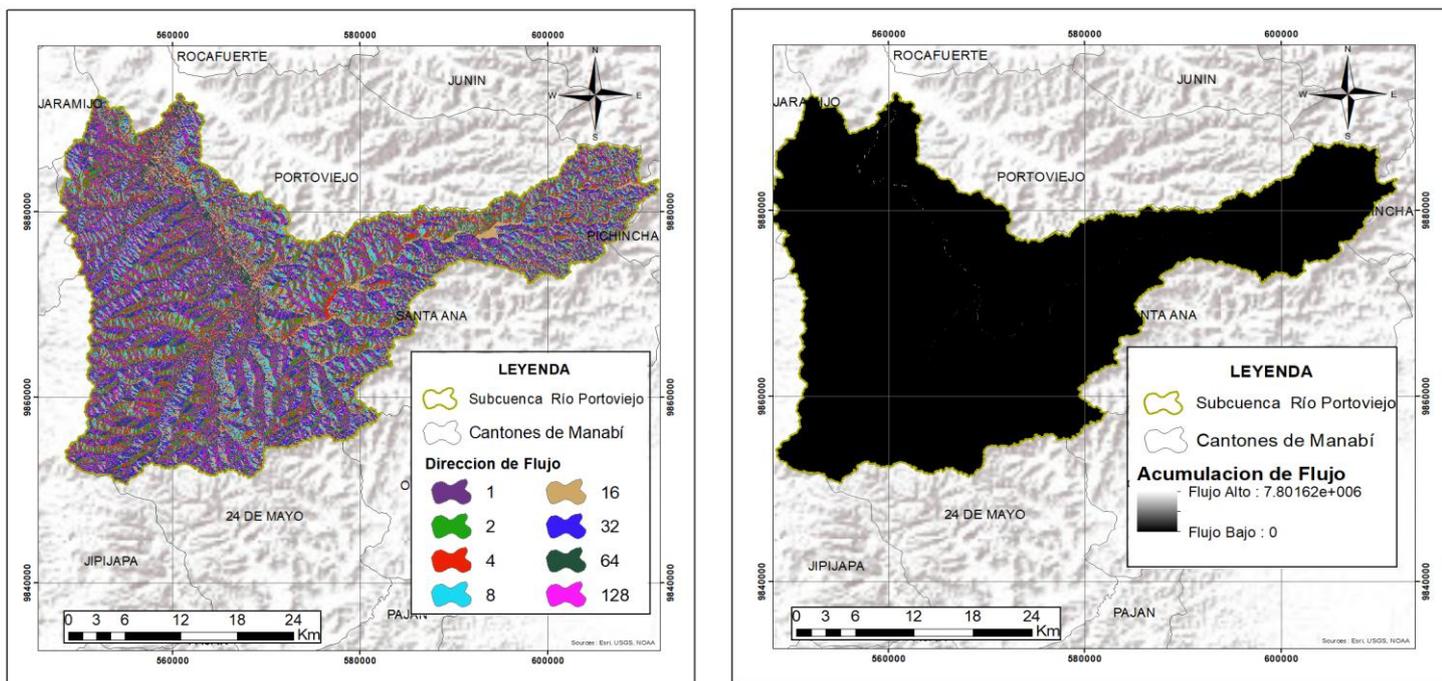
Cuenca del Río Portoviejo dividida en las 3 subcuencas que lo conforman del Río Portoviejo



A la subcuenca alta del Río Portoviejo, se la dividió en varias microcuencas, utilizando un Modelo Digital del terreno de 12.5 m ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Es decir, se delimitaron cada una de las microcuencas de la subcuenca del río Portoviejo.

Figura 17

Dirección y acumulación de flujo en la subcuenca del río Portoviejo



Se eliminaron las depresiones existentes con la herramienta "Fill", se generaron los archivos de dirección y acumulación de flujo del modelo digital del terreno, ver Figuras 17., a partir de ellos, con la herramienta "Watershed" empleando como datos de entrada la dirección de flujo y cada uno de los puntos de desfogue se obtuvieron cada una de las microcuencas que conforman el área de la subcuenca del río Portoviejo, de ellas las más principales e importantes son las microcuencas del río Portoviejo y la microcuenca de la Presa Poza Honda, como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18

División de la subcuenca del río Portoviejo

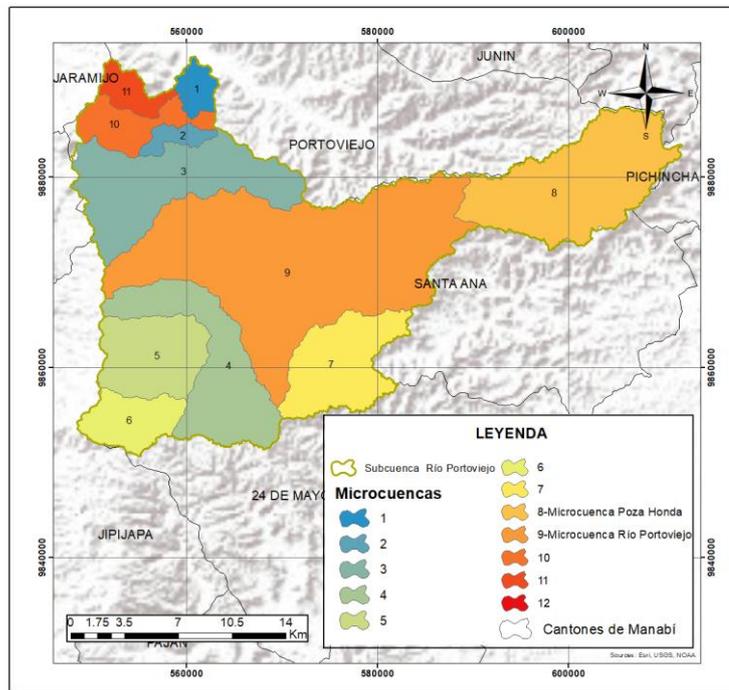
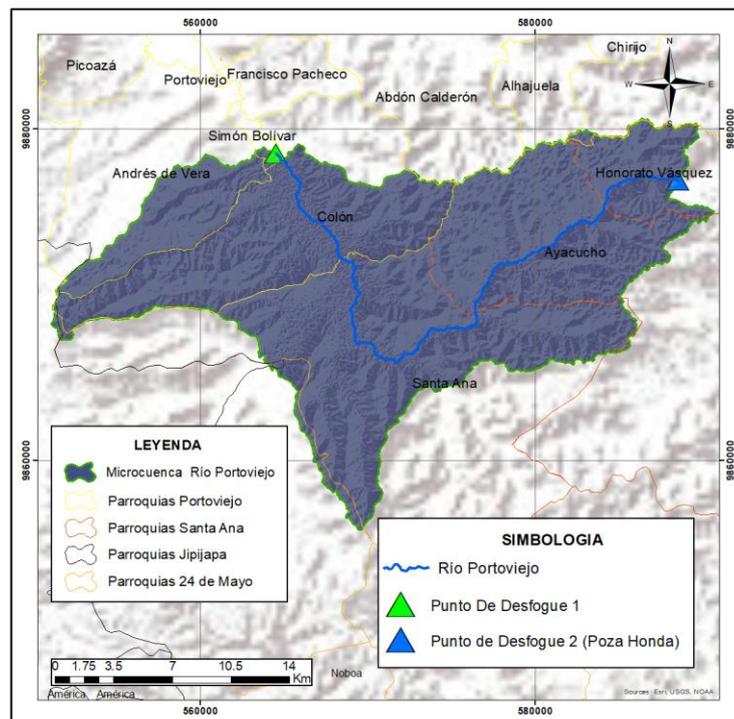


Figura 19

Delimitación microcuenca río Portoviejo



La caracterización morfométrica se realizó en la microcuenca del río Portoviejo, una de las microcuencas principales de la subcuenca del río Portoviejo, como se puede observar en la Figura 19, en la se encuentran el punto de desfogue 1 y el punto de desfogue 2 (Presa Poza Honda).

Caracterización morfométrica de la microcuenca del Río Portoviejo

Para la caracterización morfométrica de la microcuenca del Río Portoviejo es necesario conocer algunos datos característicos de la misma, los cuales se detallan en la Tabla 2. Los parámetros morfométricos se encuentran en el ANEXO A.

Tabla 2

Parámetros generales de la microcuenca del río Portoviejo

Área de la microcuenca (A)	430.97 km ²
Perímetro de la microcuenca (P)	137.98 km
Longitud del cauce principal (L)	56.7 km
Longitud axial (La)	25.29 km

Parámetros de forma de la microcuenca del Río Portoviejo

Coefficiente de compacidad o Índice de Gravelius (Kc).

Para calcular el coeficiente de compacidad de la microcuenca del Río Portoviejo se utilizó la ecuación (2).

$$k_c = 0.28 \frac{137.98}{\sqrt{430.97}} = \mathbf{1.86}$$

Se obtuvo un valor de 1.86, que de acuerdo a la Tabla 3, corresponde a una cuenca Rectangular y una tendencia baja a generar inundaciones.

Tabla 3

Clasificación del índice de compacidad de Gravelius

Kc	Clasificación	Tendencia a inundaciones
1 – 1.25	Casi redonda a oval-redonda	Alta

Kc	Clasificación	Tendencia a inundaciones
1.25 – 1.5	Oval redonda a oval oblonga	Mediana -Alta
1.5 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Mediana
> 1.75	Rectangular	Baja

Nota. Recuperado de Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador, por (Chester et al., 2017)

Factor de Forma de Horton (kf).

Aplicando la ecuación (3) para obtener el factor de forma de la microcuenca del Río Portoviejo se tiene.

$$kf = \frac{430.97}{25.29^2} = 0.67$$

El factor de Forma de la microcuenca del Río Portoviejo es de 0.67, que de acuerdo a la Tabla 4, este valor corresponde a una cuenca **Ensanchada**, por lo tanto, tiene una **tendencia alta de originar inundaciones** como consecuencia a una crecida del río Portoviejo.

Tabla 4

Clasificación del índice de Factor de Forma de Horton

kf	Clasificación	Tendencia a inundaciones
< 0.22	Muy Alargada	Baja
0.22 – 0.30	Alargada	Baja
0.31 – 0.37	Ligeramente Alargada	Media-Baja
0.38 – 0.45	Ni Alargada ni ensanchada	Media
0.46 – 0.60	Ligeramente ensanchada	Media -Alta
0.61 – 0.80	Ensanchada	Alta
0.80 – 1.20	Muy Ensanchada	Muy Alta

Nota. Recuperado de Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador, por (Chester et al., 2017)

Parámetros de relieve de la microcuenca del Río Portoviejo

Elevación media.

Para obtener la elevación media de la microcuenca del Río Portoviejo, se reclasificó en 9 clases al Modelo Digital de Elevación (DEM) con su respectiva altura mínima y máxima como se puede observar en la Tabla 5 y en la Figura 20

Figura 20

Elevaciones de la microcuenca del río Portoviejo

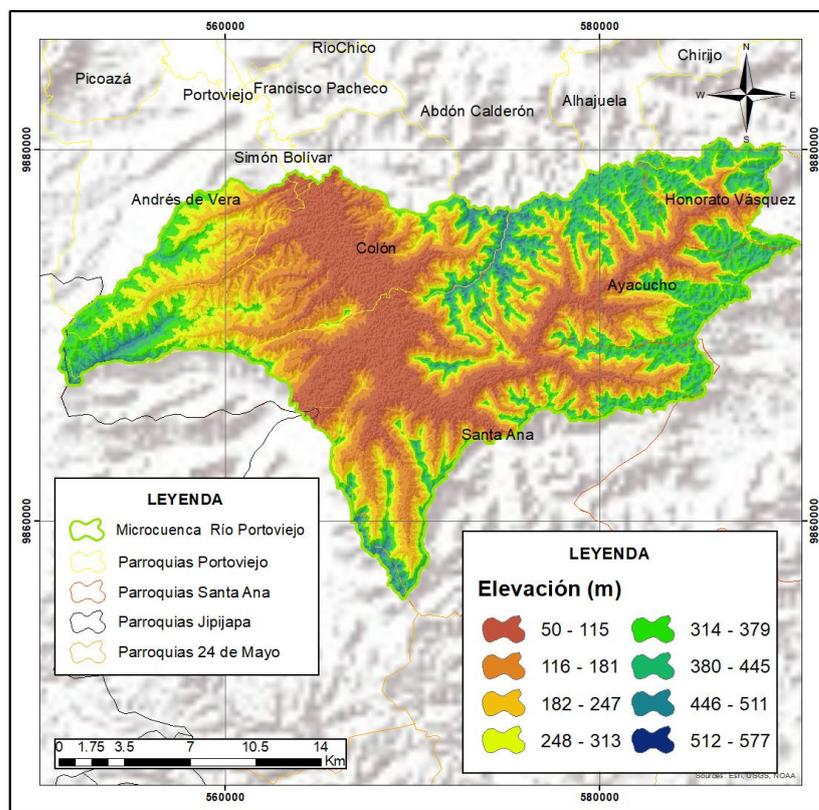


Tabla 5

Valores de altura máxima y mínima de cada una de las áreas parciales (A_i) y promedio de altura (e_i),

Clases	Área Parcial (A_i) (km^2)	Altura mínima (m)	Altura máxima (m)	Promedio (e_i) (m)	$e_i \cdot A_i$ ($m \cdot km^2$)
1	94.67	50	115	82.50	7810.15
2	89.18	116	181	148.50	13242.91

Clases	Área Parcial (Ai) (km ²)	Altura mínima (m)	Altura máxima (m)	Promedio (ei) (m)	ei·Ai (m·km ²)
3	67.59	182	247	214.50	14499.03
4	54.43	248	313	280.50	15266.30
5	62.33	314	379	346.50	21597.99
6	52.54	380	445	412.50	21671.01
7	10.20	446	511	478.50	4881.60
8	0.04	512	577	544.50	22.21
Total	430.97				98991.19

Nota. La última columna de la tabla indica la multiplicación entre las áreas parciales (Ai) y el promedio de las alturas (ei)

Se aplicó la ecuación (4), y se obtuvo un valor de **elevación media de 229.69 m.s.n.m.**

$$Em = \frac{98\ 991.19}{430.97} = 229.69\ m$$

Pendiente media.

Para el cálculo de la pendiente media de la microcuenca de Portoviejo, se obtuvo el mapa de pendiente en porcentaje, a partir del Modelo Digital del Terreno (DEM), y se procedió a reclasificar el ráster obtenido de pendientes en 7 clases, ver Figura 21. Una vez realizada la reclasificación se generó la Tabla 6, en la cual se indica los rangos inferiores y superiores de pendiente en porcentaje de cada una de las clases y el número de ocurrencia correspondiente.

Tabla 6

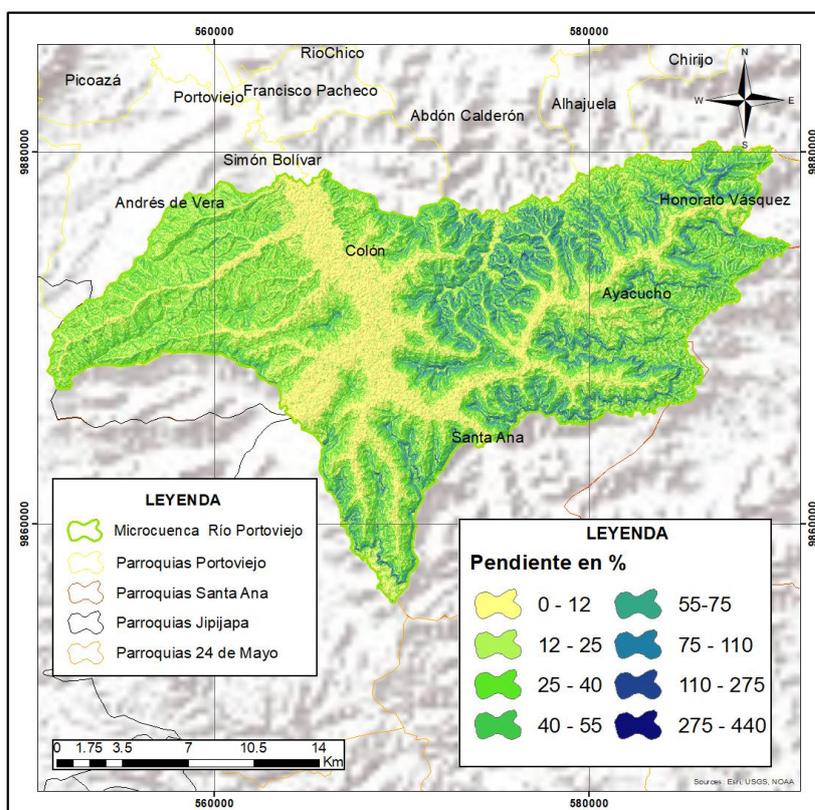
Valores de pendiente máxima y mínima (%), divididas en 8 rangos

Nº	RANGO PENDIENTE %		PROMEDIO	NÚMERO DE OCURRENCIA	PROMEDIO x OCURRENCIA
	INFERIOR	SUPERIOR			
1	0	12	6.0	604574	3627444
2	12	25	18.5	692361	12808678.5
3	25	40	32.5	708447	23024527.5
4	40	55	47.5	378980	18001550

Nº	RANGO PENDIENTE %		PROMEDIO	NÚMERO DE OCURRENCIA	PROMEDIO x OCURRENCIA
	INFERIOR	SUPERIOR			
5	55	75	65.0	236818	15393170
6	75	110	92.5	112414	10398295
7	110	275	192.5	24508	4717790
8	275	440	357.5	147	52552.5
		Total		2758249	88024007.5

Figura 21

Pendientes de la microcuenca del río Portoviejo



Se aplicó la ecuación (6), para obtener el valor de la pendiente media de la microcuenca del Río Portoviejo.

$$S = \frac{88\ 024\ 007.5}{2\ 758\ 249} = 31.91\ %$$

Se obtuvo un valor de pendiente media de 31.91 %, que, de acuerdo a la Tabla 7, corresponde a una pendiente accidentada, lo que indica que la microcuenca del río

Portoviejo tiene un relieve que favorece a la escorrentía, en consecuencia, implica una velocidad del flujo de agua en las corrientes moderada.

Tabla 7

Rango de pendientes de una cuenca hidrográfica y su descripción

Rangos de pendiente (%)	Descripción
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Mediano
12 - 35	Accidentado
35 – 50	Fuerte
50 – 75	Muy Fuerte
> 75	Escarpado

Nota. Recuperado de Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente del sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) , por (Camino et al., 2018)

Pendiente media del cauce principal.

La pendiente media del cauce principal de la microcuenca del Río Portoviejo se obtuvo a partir de la generación del perfil longitudinal del río Portoviejo, considerando que la longitud del río Portoviejo desde el punto de desfogue 1 hasta el otro punto de desfogue donde se ubica la Presa Poza Honda es de 56.7 km.

Se convirtió el archivo shapefile del río principal (.shp) en un archivo (.kmz), el cual se exportó a Google Earth con el objetivo de obtener el perfil longitudinal del río Portoviejo en el tramo mencionado, como se lo puede ver en la Figura 22.

A partir del perfil longitudinal, se estableció que en el tramo del río Portoviejo la cota mínima (aguas abajo) es de 42 m.s.n.m, mientras que la cota máxima (aguas arriba) es de 107 m.s.n.m. Además, se optó por dividir al tramo del Río Portoviejo en 7 subtramos de igual longitud (8100 m), es decir se ubicaron 8 puntos y a cada uno de ellos se le asignó su respectiva altitud o cota y a partir de ellas obtener el desnivel altitudinal en cada uno de los subtramos del Río Portoviejo como se presenta en la Tabla 8.

Figura 22

Gráfico del perfil longitudinal del cauce principal del río Portoviejo en Google Earth



Una vez obtenidos los desniveles altitudinales se calcularon las pendientes de cada tramo S_i , dividiendo el desnivel para la longitud de cada tramo L (8100 m). Ver Figura 23

Tabla 8

Valores de longitud (m) y elevación (m) de los 9 subtramos, del río Portoviejo

Puntos	Longitud (x) en m	Longitud de cada tramo L (m)	Elevación (y) en m	Desnivel (m)	Pendiente del tramo S_i	$L / (S_i)^{0.5}$
1	0		42			
2	8100	8100	50	8	0.0010	257740.42
3	16200	8100	53	3	0.0004	420888.34
4	24300	8100	62	9	0.0011	24300
5	32400	8100	71	9	0.0011	24300
6	40500	8100	72	1	0.0001	72900
7	48600	8100	78	6	0.0007	297613
8	56700	8100	107	29	0.0036	135371.90
Total		56700				2326613.67

Nota. La última columna de la tabla indica la división de la longitud del cada tramo para la raíz de la pendiente.

Figura 23

Gráfico del perfil longitudinal del cauce principal del río Portoviejo

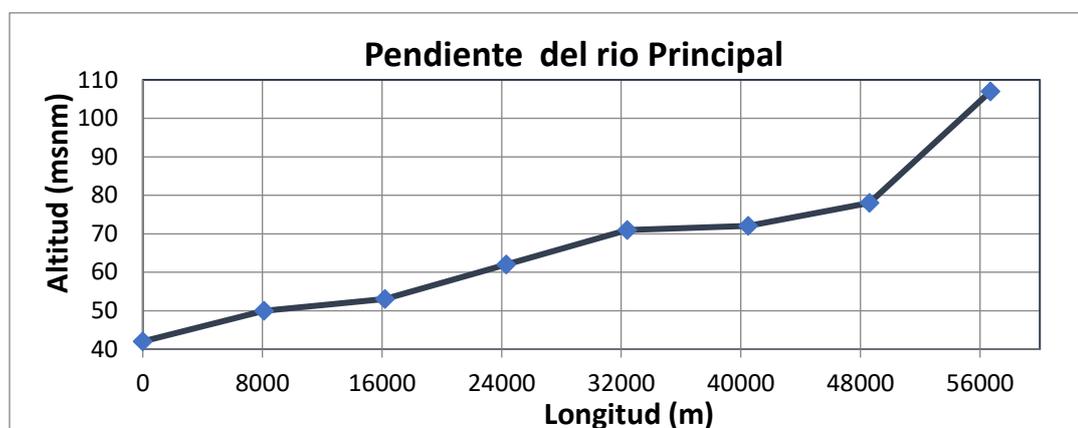


Tabla 9

Rangos de pendiente del cauce principal

Rango de pendiente	Clase de pendiente	Clase de velocidad del agua
0.01 – 0.05	Suave	Lenta
0.06 – 0.11	Moderada	Rápida
0.12 a 0.17	Fuerte	Muy Rápida

Nota. Recuperado de Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente del sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) , por (Camino et al., 2018)

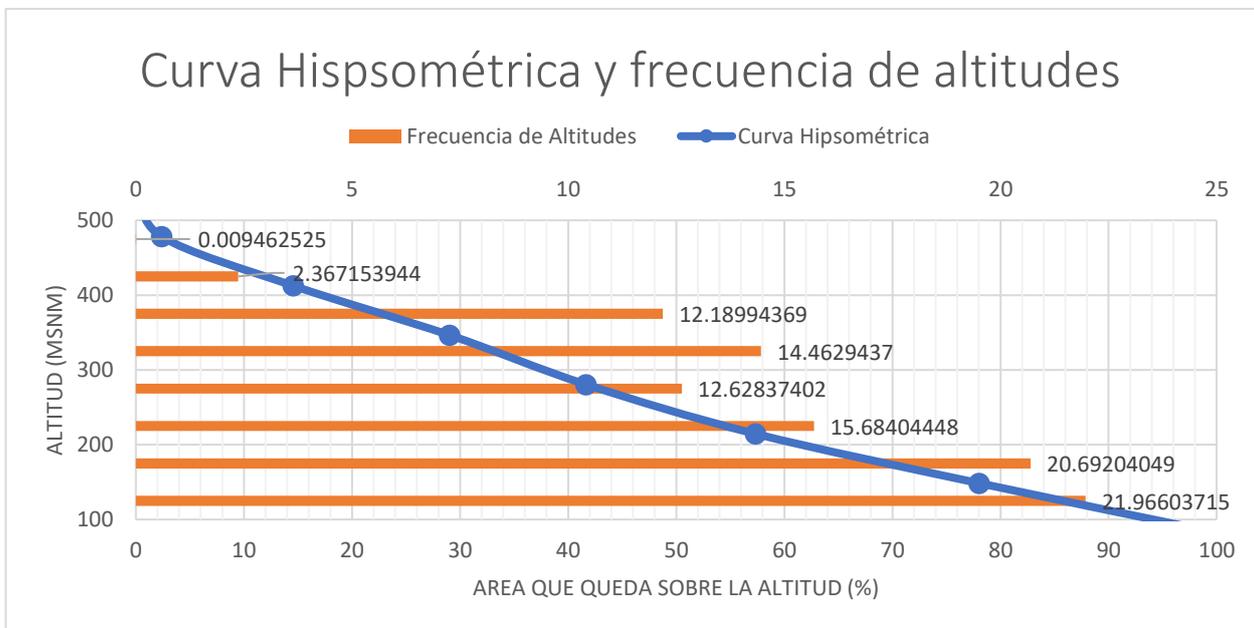
Se aplicó la ecuación (8) de Taylor y Schwars para calcular la pendiente media del cauce principal, obteniéndose un valor de 0.06 % de pendiente, que, de acuerdo a la Tabla 9, es una pendiente de cauce principal moderada y con una velocidad de flujo del agua rápida.

$$S_c = \left(\frac{56700}{2\ 326\ 613.673} \right)^2 \cdot 100 = 0.06 \%$$

Curva Hipsométrica.

Figura 24

Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca del río Portoviejo



Parámetros de drenaje de la microcuenca del Río Portoviejo

Densidad de drenaje.

Para determinar la densidad de drenaje de la microcuenca del río Portoviejo se utilizó la ecuación (9), considerando que el área de la microcuenca es de 430.97 km² y la longitud total de las corrientes de la microcuenca es de 750.09 km, por lo tanto:

$$D_d = \frac{750.09}{430.97} = 1.74$$

La densidad de drenaje es 1.74 y de acuerdo a la Tabla 10, este valor corresponde a una densidad de drenaje moderada, es decir que tiene una velocidad de respuesta moderada al influjo de precipitación. Este valor de densidad de drenaje depende de las características litológicas, de modo que, en general las altas densidades de drenaje corresponden a texturas finas y las bajas a texturas gruesas.

Tabla 10

Clasificación de la red de drenaje de las cuencas

Densidad de Drenaje (km/km ²)	Categoría
<1	Baja
1 - 2	Moderada
2 - 3	Alta
> 3	Muy Alta

Nota. Recuperado de Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente del sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) , por (Camino et al., 2018)

De acuerdo a la metodología que se realizó para calcular el número de curva, el 29 % del total de la superficie de la microcuenca de estudio se encuentra en el grupo hidrológico B (capacidad de infiltración moderada), y el 50 % se encuentra en el grupo hidrológico C (capacidad de infiltración lenta), es decir que la microcuenca cuenta con un potencial de escurrimiento moderado en el 29 % de su superficie, y en un 50 % un potencial de escurrimiento moderadamente alto. Además, el 21 % restante se encuentra en el grupo hidrológico D (velocidad de infiltración bajo y potencial de escurrimiento alto). Por lo tanto, el valor calculado de densidad de drenaje es acorde a los dos grupos hidrológicos que ocupan mayor superficie: B y C.

Orden de corrientes.

Para determinar el orden de corrientes de la microcuenca del río Portoviejo, se utilizó el método de Strahler. En el caso de la microcuenca del río Portoviejo el orden de las corrientes se lo presenta en la Tabla 11. Por lo tanto, la microcuenca del Río Portoviejo tiene el orden de corriente de salida es de 5. Ver Figura 25.

Se determinó la relación de bifurcación, utilizando la ecuación (10), y se obtuvo un promedio de razón de bifurcación de 5.34. Ver Tabla 12

Figura 25

Orden de corrientes de la microcuenca del río Portoviejo

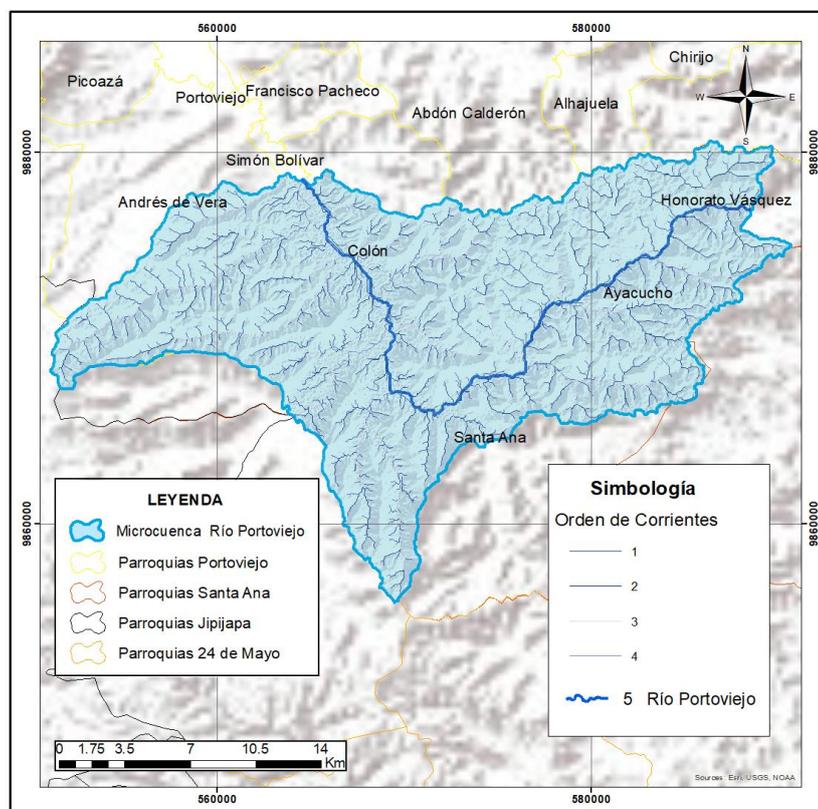


Tabla 11

Número de corrientes de la microcuenca del río Portoviejo

Orden de drenaje	Número de corrientes
1	610
2	129
3	22
4	8
5	1
Total	770

Tabla 12*Número de cursos por orden y relación de bifurcación*

ORDEN	1	2	3	4	5	PROMEDIO
Número de cursos por orden	610	129	22	8	1	
Relación de bifurcación	4.73	5.86	2.75	8		5.34

Densidad de Corriente.

Para calcular la densidad de corriente de la microcuenca del Río Portoviejo, se utilizó la ecuación (11). Para ello se consideró que en total existen 770 corrientes de drenaje, como lo indica la Tabla 11. Por lo tanto:

$$D_c = \frac{770}{430.97} = 1.79$$

El valor obtenido de 1.79 de densidad de corriente corresponde a una densidad de corriente moderada, de acuerdo a una comparación con los valores obtenidos en la tabla de índices relacionados con la red de drenaje en el estudio de “La actualización de Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Garagoa”, realizado por Corradine (2017). Cabe recalcar que en cuencas donde la densidad de corriente es baja, sus suelos son muy resistentes a la erosión y permeables, mientras que, si la densidad de corriente es alta, son suelos impermeables y no resistentes a la erosión.

Coefficiente de Torrencialidad.

El coeficiente de torrencialidad, se calculó utilizando la ecuación (12), en la cual se aplica la relación entre el número de corrientes de orden 1 (610 corrientes), ver Tabla 11 y el área de la cuenca (430.97 km), por lo tanto:

$$C_t = \frac{610}{430.97} = 1.4$$

Índice de sinuosidad.

Para calcular el índice de sinuosidad en la microcuenca del río Portoviejo, se utilizó la ecuación (13), considerando que la longitud del cauce principal es de 56.7 km y la longitud de la cuenca es de 25.29 km, y que, de acuerdo a la Tabla 13, corresponde a un canal tortuoso

$$S = \frac{56.7}{25.29} = 2.24$$

Tabla 13

Índices de sinuosidad

Tipo de canal	Índice de sinuosidad
Canal rectilíneo	1 – 1.2
Canal transicional	1.2-1.5
Canal regular	1.5-1.7
Canal Irregular	1.7-2.1
Canal tortuoso	> 2.1

Nota. Recuperado de Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador, por (Chester et al., 2017)

Caracterización hidrológica e hidrométrica de la microcuenca del río Portoviejo

Precipitación media

Para determinar la precipitación media de la microcuenca del río Portoviejo, se utilizó la información de precipitaciones mensuales proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de 9 estaciones meteorológicas que se encuentran cercanas a la microcuenca de estudio, hasta el año 2012. Cabe señalar que una parte de la base de datos de las precipitaciones mensuales fue rellenada por (Aguilar & Echeverría, 2018), debido a que existían períodos vacíos, es decir sin datos de precipitación. El relleno que realizaron de estos datos fue mediante modelos de correlación polinómica. Una vez completado todos los datos de precipitación mensuales de las estaciones, se obtuvo la precipitación total de cada año.

Además, con el propósito de completar la base de datos proporcionada por el INAMHI (precipitación hasta el año 2012), se optó por obtener datos de precipitación promedio del año 2013 en los anuarios meteorológicos del INAMHI de las estaciones disponibles. Además, se utilizó la aplicación web gratuita Climate Engine, para obtener datos de precipitación promedio desde el año 2014 hasta el año 2020. Esta aplicación fue impulsada por Google Earth Engine para poder generar mapas y gráficos de datos geoespaciales (vegetación, nieve, agua) y climáticos (temperatura, precipitación, vientos). El conjunto de datos que se utilizó a partir de Climate Engine, fue de CHIRPS DAILY (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data). El nombre y código respectivo de las estaciones meteorológicas se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14

Estaciones meteorológicas con su respectiva precipitación media no corregida

Nombre	Código	Precipitación	Años Registro
		media no corregida (mm)	
24 DE MAYO (JABONCILLO)	M447	1117.50	54
PORTOVIEJO -UTM	M005	518.47	57
SANTA ANA INAMHI	M034	959.52	43
LA LAGUNA	M448	364.95	51
SANCAN	M449	555.33	56
RIO CHICO EN ALAJUELA	M454	973.92	49
POZA HONDA	M1080	1175.91	31
LA TEODOMIRA	M1208	844.30	23
MANCHA GRANDE	M460	1139.85	44

Una vez que se obtuvieron los datos de precipitación total de los años faltantes utilizando el conjunto de datos de CHIRPS DAILY, se realizó un análisis de consistencia de todos los datos de precipitación total anual, de cada una de las estaciones meteorológicas

Para realizar el análisis consistencia de los datos de precipitación total anual, se recurrió al análisis estadístico de la consistencia en la media, utilizando la prueba estadística T de Students, con el cual se pudo analizar si los valores promedios ($\overline{X1}, \overline{X2}$), de las muestras son estadísticamente iguales o diferentes con un 95 % de confianza. Además, se realizó la consistencia mediante la prueba estadística "F" de Fisher para determinar si las desviaciones estándar (S_1, S_2) de las muestras son estadísticamente iguales o diferentes con un 95 % de nivel de significancia.

Tabla 15

Resumen estadístico de las 2 muestras de cada estación meteorológica

Nombre	Muestra 1			Muestra 2		
	Tamaño	Media (mm)	Desviación estándar (mm)	Tamaño	Media(mm)	Desviación estándar (mm)
24 DE MAYO (JABONCILLO)	24	1211.51	572.97	30	1042.29	371.17
PORTOVIEJO - UTM	35	516.90	357.10	22	520.96	183.14
SANTA ANA INAMHI	23	951.27	582.54	20	969.01	351.47
LA LAGUNA SANCAN	22	338.63	200.33	29	384.91	259.46
RIO CHICO EN ALAJUELA	22	906.40	448.03	27	1028.93	470.57
POZA HONDA LA TEODOMIRA	9	1450.67	806.888	22	1063.5	375.67
MANCHA GRANDE	15	797.92	228.89	8	908.7	345.79
	24	1102.93	725.82	20	1184.15	390.42

Para lo cual se debe determinar de cada una de las estaciones, dos muestras. La primera muestra corresponde a los datos dudosos de precipitación anuales, mientras que la segunda muestra son datos confiables de precipitación anuales. Una vez que se determinó el tamaño de las dos muestras a ser analizadas, se debe determinar la media y desviación estándar de cada una de ellas. Ver tabla 15.

Una vez calculados la media y desviación estándar de cada una de las muestras de las estaciones meteorológicas, se procedió a determinar t_c (valor de t calculado) Para ello, se calculó la desviación estándar ponderada y a partir de ella la desviación de la diferencia de los promedios, utilizando las ecuaciones (52) y (53) respectivamente.

$$S_p = \frac{(n_1 - 1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (52)$$

Donde:

S_p : Desviación estándar ponderada

n_1 : Tamaño de la muestra 1

n_2 : Tamaño de la muestra 2

s_1 : Desviación estándar de la muestra 1

s_2 : Desviación estándar de la muestra 2

$$S_d = S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (53)$$

Donde:

S_d : Desviación de la diferencia de los promedios

S_p : Desviación estándar ponderada

n_1 : Tamaño de la muestra 1

n_2 : Tamaño de la muestra 2

A partir del valor de la desviación de la diferencia de los promedios, se calculó los valores de t_c , utilizando la siguiente ecuación

$$t_c = \frac{\overline{X1} - \overline{X2}}{S_d} \quad (54)$$

Donde:

S_d : Desviación de la diferencia de los promedios

S_p : Desviación estándar ponderada

n_1 : Tamaño de la muestra 1

n_2 : Tamaño de la muestra 2

Los valores que se obtuvieron de t_c de cada una de las estaciones meteorológicas, fueron comparados con el valor crítico que se obtienen de las tablas de T Students, teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95 %. y los grados de libertad que se encuentra determinado por la siguiente ecuación:

$$GL = GL1 + GL2 = (n_1 - 1) + (n_2 - 1) \quad (55)$$

Donde:

GL : Grados de libertad para el cálculo de t crítico

$GL1$: Grados de libertad de la muestra 1

$GL2$: Grados de libertad de la muestra 2

n_1 : Tamaño de la muestra 1

n_2 : Tamaño de la muestra 2

A continuación, en la Tabla 16 se detalla el t_c (t calculado) y el t crítico obtenido a partir de las tablas de T Students de cada una de las estaciones meteorológicas.

Tabla 16

Resumen estadístico de tc (t calculado) y t crítico (t de tabla) – (Prueba t Students)

Nombre	tc (t calculado)	t crítico (t de tabla)
24 DE MAYO (JABONCILLO)	1.31	2.007
PORTOVIEJO -UTM	0.05	2.004
SANTA ANA INAMHI	0.12	2.020
LA LAGUNA	0.69	2.010
SANCAN	0.5	2.005
RIO CHICO EN ALAJUELA	0.93	2.012
POZA HONDA	1.84	2.045
LA TEODOMIRA	0.92	2.080
MANCHA GRANDE	0.45	2.018

Nota. El valor de t crítico fue obtenido a partir de las Tablas de t Students o también se lo pudo obtener a partir de un análisis de datos en Excel.

Se puede observar que los valores de tc (t calculado son menores), que los valores del t crítico, y que de acuerdo a Coaquira (2015) si $tc \leq tt$ (95 %) no existe necesidad de corregir la información y es consistente, por el contrario si $tc \geq tt$ se debe corregir la información. Por lo cual en este caso no se debería corregir los datos de precipitación promedio anual.

Sin embargo, resulta necesario realizar la prueba de F de Fisher para determinar si las desviaciones estándar de las muestras establecidas son estadísticamente iguales o diferentes con un 95 % del nivel de significancia. Por lo tanto, para obtener Fc (F calculado), se debe considerar dos ecuaciones, la primera es: si $S_1^2(X) \geq S_2^2(X)$, se utiliza la ecuación

(56)

$$F_c = \frac{S_1^2(X)}{S_2^2(X)} \quad (56)$$

Por el contrario, si $S_2^2(X) \geq S_1^2(X)$ se utilizará la ecuación (57)

$$F_c = \frac{S_2^2(X)}{S_1^2(X)} \quad (57)$$

Tabla 17

Resumen estadístico de F_c (F calculado) y F crítico (F de tabla) – (Prueba F de Fisher)

Nombre	F_c (F calculado)	F crítico (F de tabla)
24 DE MAYO (JABONCILLO)	2.3830	1.9103
PORTOVIEJO -UTM	3.80	1.989
SANTA ANA INAMHI	2.7472	2.1331
LA LAGUNA	1.6775	1.9462
SANCAN	3.9437	1.8851
RIO CHICO EN ALAJUELA	1.1031	1.9776
POZA HONDA	4.6132	2.4205
LA TEODOMIRA	2.2823	3.5292
MANCHA GRANDE	3.4561	2.1233

Nota. El valor de F crítico fue obtenido a partir de las Tablas de F de Fisher o también se lo pudo obtener a partir de un análisis de datos en Excel.

Los valores que se obtuvieron de F_c de cada una de las estaciones meteorológicas, fueron comparados con el valor crítico que se obtienen de las tablas de F de Fisher, teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95 %. y los grados de libertad. Como se lo presenta en la Tabla 17.

De acuerdo a Coaquira (2015) si $F_c \leq F_t$ (95 %) no existe necesidad de corregir la información, es decir $S_1^2(X) = S_2^2(X)$, por el contrario si $F_c \geq F_t$ (95 %) la información no es consistente debido a que $S_1^2(X) \neq S_2^2(X)$. Es decir, en el caso de las estaciones meteorológicas analizadas en la Tabla 17, existente inconsistencia de las precipitaciones

promedio anuales en 6 estaciones meteorológicas: 24 de mayo (Jaboncillo), Portoviejo-UTM, Santa Ana INAMHI, Sancán, Poza Honda y Mancha grande. Por otro lado, existe consistencia de los datos de precipitación promedio anual en 3 estaciones meteorológicas las cuales son: La Laguna, Rio Chico en Alajuela y Teodomira.

Se corrigieron los datos de precipitación promedio anuales de las estaciones meteorológicas que presentan inconsistencia en la desviación estándar, comprobado a partir del análisis estadístico F de Fisher. Cabe recalcar que se corrigieron los datos de la muestra 1 de cada una de las estaciones, es decir los datos dudosos, estos se los puede identificar fácilmente en un histograma en el cual se puede observar que existen saltos bastantes amplios entre los valores de precipitación promedio anual. Para la corrección de estos datos se utilizó la siguiente ecuación.

$$X'(t) = \frac{X_t - X_1}{S_1(X)} \cdot S_2(X) + \bar{X}_2 \quad (58)$$

Donde:

$X'(t)$: Valor corregido de saltos

X_t : Valor a ser corregido

$S_2(X)$: Desviación estándar de la muestra 2

\bar{X}_2 : Valor promedio de la muestra 2

Una vez que se aplicó la corrección a los valores dudosos de las precipitaciones promedio anuales, se aplicó nuevamente los análisis estadísticos de t de Students y de F de Fisher, y se comprobó que $t_c \leq t_t$ (95 %) y que $F_c \leq F_t$ (95 %). Por lo tanto, la base de datos de la precipitación promedio anual de cada estación tiene consistencia, como consecuencia de la corrección respectiva.

Se calculó la precipitación promedio de cada estación, es decir se sumó cada una de las precipitaciones promedio de cada año de las estaciones y se dividió para el número de años que tenga cada una de ellas. A partir de ello se calculó la precipitación media de la

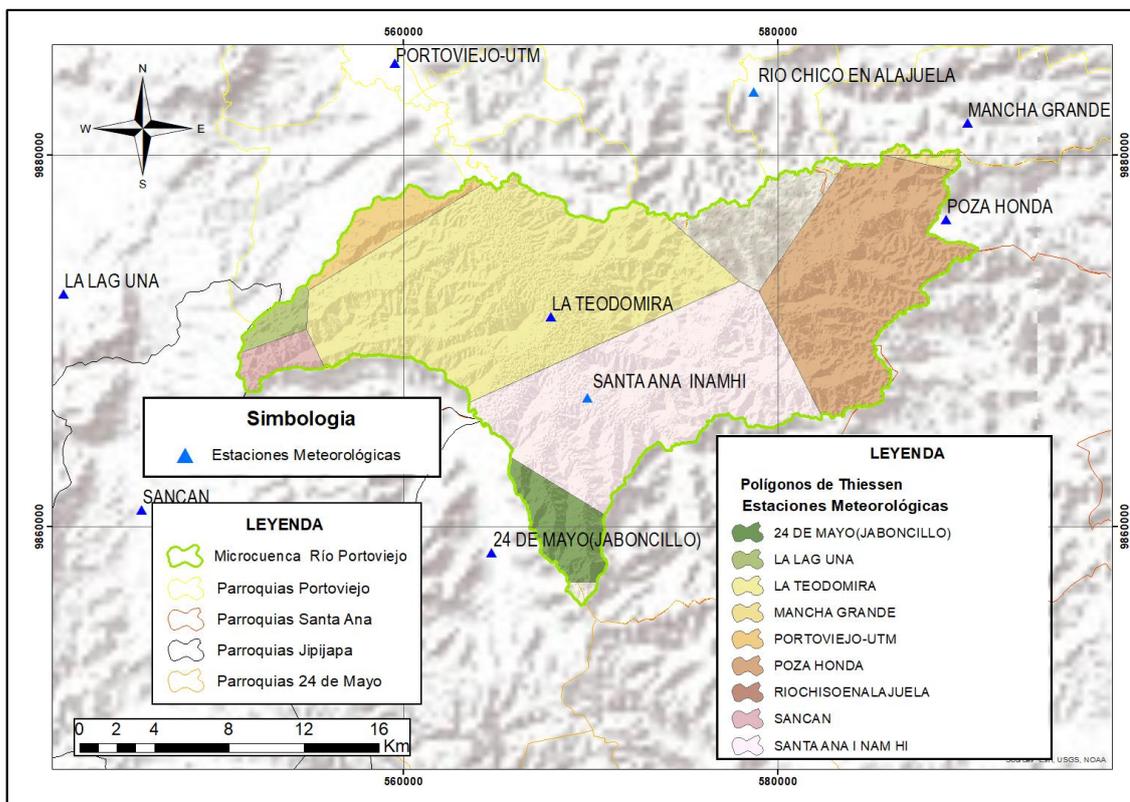
microcuenca de estudio utilizando dos métodos. El primer método es el método de Polígonos de Thiessen, mientras que el segundo método es el método de las isoyetas. A continuación, se explican cada uno de ellos.

Precipitación media por Método de los Polígonos de Thiessen.

La precipitación media calculada de la microcuenca del Río Portoviejo por medio de la generación de los polígonos de Thiessen, se exportó las 9 estaciones meteorológicas a ArcGis y se aplicó la función Create Thiessen Polygons, la cual permite asignar un área de la cuenca a cada una de las estaciones, es decir cada una de estas áreas tendrá el valor de precipitación media de acuerdo a la precipitación media de la estación meteorológica que le corresponda. Como lo indica la Tabla 18 y la Figura 26

Figura 26

Polígonos de Thiessen en la microcuenca del río Portoviejo



Se calculó la precipitación media de la microcuenca de estudio utilizando la ecuación

(14)

$$\bar{P} = \frac{393\,841.80}{430.97} = 913.84 \text{ mm}$$

Tabla 18

Precipitación media en cada área obtenida por el método Polígonos de Thiessen

Nombre	Código	Precipitación media (mm)	Área (km ²)	Precipitación Ponderada
24 DE MAYO (JABONCILLO)	M447	1042.29	18.20	18969.89
PORTOVIEJO - UTM	M005	520.96	13.64	7104.87
SANTA ANA INAMHI	M034	967.39	110.44	106840.13
LA LAGUNA	M448	364.95	5.95	2171.14
SANCAN	M449	531.07	7.92	4204.73
RIO CHICO EN ALAJUELA	M454	973.92	27.39	26674.71
POZA HONDA	M1080	1063.50	87.53	93093.34
LA TEODOMIRA	M1208	844.30	156.13	131821.30
MANCHA GRANDE	M460	1184.15	2.50	2961.68
TOTAL		832.50	430.97	393841.80

Precipitación media por Método de las Isoyetas.

Se realizó una interpolación IDW (Inverse distance weighting), a partir de los valores conocidos de precipitación media corregida de cada estación meteorológica, con el fin de obtener de precipitación media en puntos del área de estudio donde no se la conoce. Se trazaron curvas sobre el ráster generado, con intervalos de 50 mm de precipitación cada uno. Ver Figura 27.

Para el cálculo de la precipitación media, se consideró las áreas y precipitación media entre cada una de las curvas generadas anteriormente, ver Tabla 19.

Figura 27

Isoyetas de la microcuenca del río Portoviejo

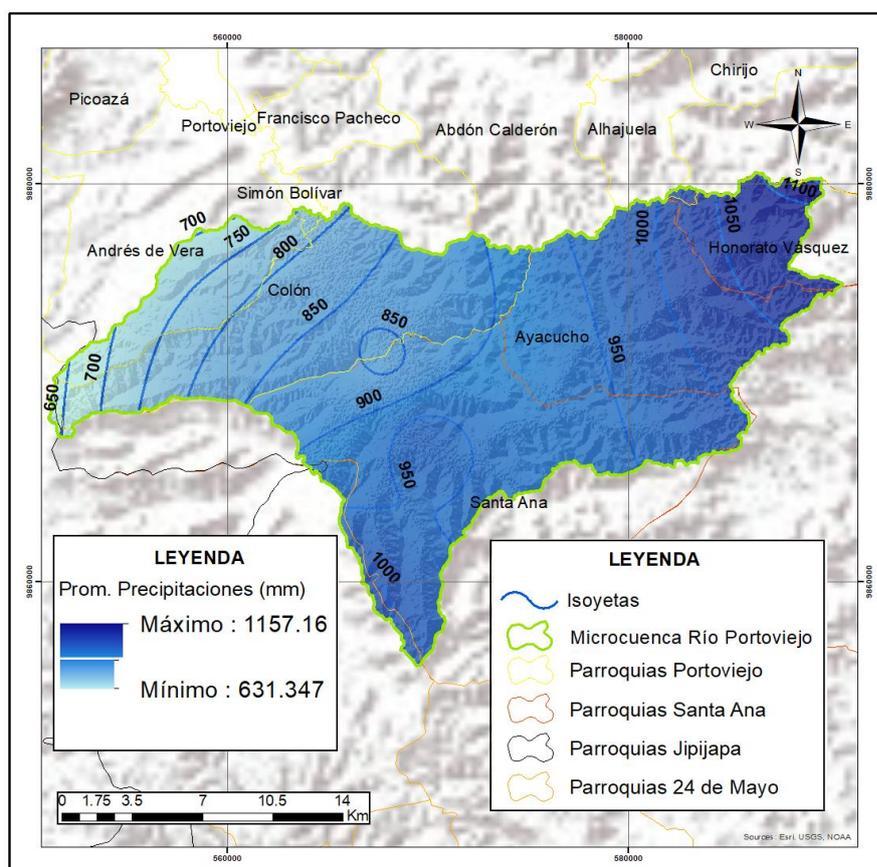


Tabla 19

Precipitación media en cada área obtenida por el método de Isoyetas

Intervalos	Precipitación media	Área (km ²)	Precipitación Ponderada
1	1006.15	1.99	2005.92
2	964.93	40.85	39416.57
3	642.54	1.79	1147.49
4	847.41	4.11	3483.73
5	675.14	7.47	5040.09
6	870.26	66.15	57566.68

Intervalos	Precipitación media	Área (km ²)	Precipitación Ponderada
7	931.03	102.26	95210.70
8	697.02	0.09	65.46
9	727.12	22.58	16421.35
10	698.14	0.03	24.12
11	748.07	0.03	25.85
12	828.14	37.28	30870.67
13	775.20	27.17	21058.36
14	974.16	56.63	55167.13
15	1024.27	34.96	35810.34
16	1153.47	0.05	62.68
17	1117.74	2.31	2582.29
18	1065.81	25.21	26864.67
Total		430.97	392824.08

Finalmente, aplicando la ecuación (14)

$$\bar{P} = \frac{392\,824.08}{430.97} = 911.48 \text{ mm}$$

Tiempo de concentración

Tiempo de concentración con la ecuación de Temez.

Para el cálculo del tiempo de concentración se tomaron en consideración tres formas de determinar este parámetro. Se utilizó la ecuación de Temez, ecuación (15), para ello se debe conocer la longitud del cauce principal que es de 56.7 km y la pendiente media de la cuenca calculada anteriormente que es de 31.91 % que es una pendiente empinada.

Aplicando la ecuación de Temez se obtiene:

$$tc = 0.3 \cdot \left(\frac{56.7}{31.91^{0.25}} \right)^{0.76}$$

$$tc = 3.34 \text{ horas}$$

Tiempo de concentración con la ecuación de Kirpich.

Se utilizó la ecuación de Kirpich, ecuación (16), para ello es necesario conocer la longitud del cauce principal que es de 56.7 km y la pendiente media del cauce principal calculada anteriormente que es 0.06 % que corresponde a una pendiente moderada con rápida velocidad de flujo del agua.

Aplicando la ecuación de Kirpich se obtiene

$$tc = 0.066 \cdot \left(\frac{56.7}{0.06^{0.5}} \right)^{0.77}$$

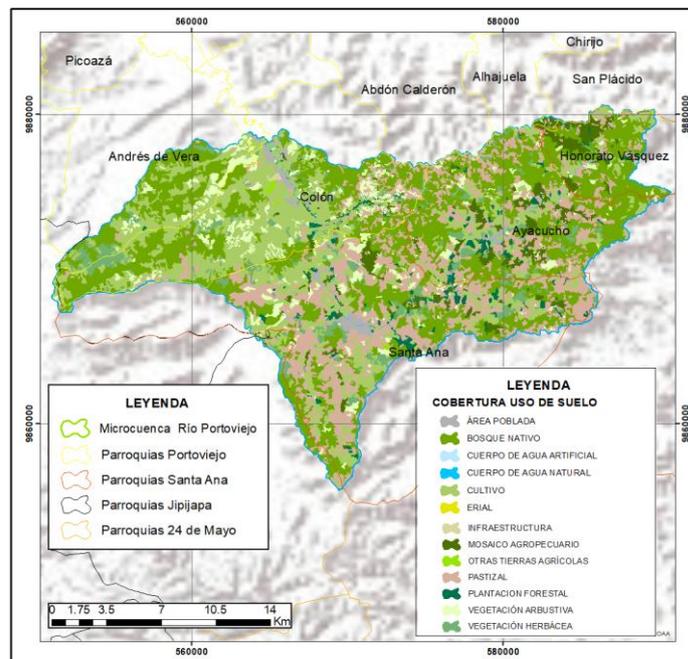
$$tc = 4.36 \text{ horas}$$

Tiempo de concentración con la ecuación de retardo.

Así mismo, se calculó el tiempo de concentración utilizando la ecuación (17) en la cual es necesario conocer la longitud axial de la cuenca, el número curva y la pendiente media de la cuenca.

Figura 28

Uso y cobertura del suelo de la microcuenca del río Portoviejo



Para determinar el número curva, se siguió la metodología recomendada por (Villegas, 2017), para ello fue necesario usar el shape de cobertura y uso de la tierra (sistemas productivos) de la microcuenca del río Portoviejo del año 2019, Además, del shape de Geopodología Nacional, con la finalidad de obtener la información de las diferentes texturas de suelo de la microcuenca del río Portoviejo. Estos shapes fueron proporcionados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG).

En cuanto al shape de cobertura y uso de tierra de la microcuenca del río Portoviejo, se presentan distintos tipos de uso de suelo: área poblada, bosque nativo, cuerpo de agua artificial, cuerpo de agua natural, cultivo, erial, edificaciones, mosaico agropecuario, tierras agrícolas, pastizal, vegetación arbustiva y vegetación herbácea. Ver Figura 28.

A todos estos tipos de uso de suelo, se los clasificó de acuerdo como se lo presenta en la Tabla 20.

Tabla 20

Clasificación de los usos del suelo

Clasificación original		Reclasificación	
Descripción	Número	Descripción	
Agua a cielo abierto			
Humedales leñosos	1	Agua	
Humedales herbáceos emergentes			
Poblados en espacios abiertos			
Poblados de baja, mediana y alta densidad	2	Residencial	
Bosques secos, verdes y mixtos	3	Bosque	
Tierra fértil	4	Agricultura	
Arbustos/matorrales			

Clasificación original		Reclasificación
Descripción	Número	Descripción
Pastizales / herbáceas		
Pasto		
Heno		
Cultivos		

Nota. Recuperado de Calcular el número curva en ArcGis, por (Villegas, 2017)

Figura 29

Clasificación del uso de suelo de la microcuenca del río Portoviejo

niv2	Landuse
AREA POBLADA	2
BOSQUE NATIVO	3
CUERPO DE AGUA ARTIFICIAL	1
CUERPO DE AGUA NATURAL	1
CULTIVO	4
ERIAL	4
INFRAESTRUCTURA	2
MOSAICO AGROPECUARIO	4
OTRAS TIERRAS AGRICOLAS	4
PASTIZAL	4
PLANTACION FORESTAL	3
VEGETACION ARBUSTIVA	4
VEGETACION HERBACEA	4

A los diferentes tipos de cobertura y uso de la tierra, se les asignó el valor de reclasificación del 1 al 4 en el campo Landuse, como se presenta en la Figura 29

En la microcuenca del río Portoviejo, las clases texturales (txs) que existen en el suelo son: arcilla pesada, arcillosa, franco, franco arcilloso arenoso, franco arcilloso, franco arcilloso limoso, franco arenoso y franco limoso, se asignaron a cada una de ellas el grupo hidrológico (Tipo Suelo), de acuerdo a la Tabla 1, como se presenta en la Figura 30.

Figura 30

Clasificación del tipo de suelo (Grupo Hidrológico) en la microcuenca del río Portoviejo

txs	TipoSuelo
ARCILLA PESADA	D
ARCILLOSO	D
FRANCO	B
FRANCO ARCILLO-ARENOSO	B
FRANCO ARCILLOSO	C
FRANCO ARCILLOSO LIMOSO	C
FRANCO ARENOSO	B
FRANCO LIMOSO	B

De acuerdo a Villegas (2017), se generó un shape de intersección entre los shapes de uso de suelo y clases texturales del suelo clasificados anteriormente. En el nuevo shape (CN_Poly) se añadieron en la tabla de atributos 4 campos más. En el campo SoilCode se colocó el código de cada tipo de suelo, y en los campos Pcta, Pctb, Pctc y Pctd, se asignaron un valor de 100 dependiendo al grupo hidrológico y los demás con un 0. En otras palabras, si se trata de un grupo hidrológico B, se le asigna un valor de 100 a todas las filas de Pctb, mientras que en los otros 3 campos es 0.

Se generó una tabla que contiene los valores de número de curva, de acuerdo al grupo hidrológico (A, B, C, D), y también del uso de suelo (agua, residencial, bosque y agricultura) como se puede ver en la Figura 31. Esta tabla se generó de acuerdo a la recomendación de (Villegas, 2017) y se la llamó CNLookup

Figura 31

Tabla CNLookup que contiene el número curva y los usos de suelo de acuerdo a la metodología de (Villegas, 2017)

CNLookup								
	OID	Field1	Descriptio	A	B	C	D	Luvalue
	0	0	Water	100	100	100	100	1
	1	0	Medium residencial	57	72	81	86	2
	2	0	Forest	30	58	71	78	3
	3	0	Agricultural	67	77	83	87	4

Finalmente, con la herramienta HEC-GeoHMS, se eligió la opción de “Generate CN Grid”, y como datos de entrada se colocaron: el DEM de la microcuenca del río Portoviejo, el shape CN_Poly, y la tabla CNlookup. Con ello se logró calcular el Número curva de cada una de las clases de uso de suelo y clases texturales que existe en la microcuenca del río Portoviejo. Como se presenta en la Tabla 21

Tabla 21

Valores de curva número para cada grupo hidrológico y uso de suelo

Uso de Suelo	Grupo Hidrológico	CN	Área (km ²)	CN·A·29 %	CN·A·51 %	CN·A·20 %
1	B	10	0.01	0.22	0.39	0.15
1	C	10	0.92	26.80	46.78	18.52
2	B	72	1.48	31.01	54.13	21.43
2	C	81	5.88	138.65	242.05	95.82
2	D	86	0.12	3.05	5.32	2.11
3	B	58	39.50	666.63	1163.80	460.72
3	C	71	84.05	1736.33	3031.28	1200.00
3	D	78	32.54	738.60	1289.45	510.46
4	B	77	84.41	1891.05	3301.39	1306.93
4	C	83	128.06	3092.65	5399.14	2137.37
4	D	87	53.99	1366.69	2385.96	944.54
TOTAL			430.97	9691.66	16919.70	6698.05

Nota. Las 3 últimas columnas de la tabla surgen de multiplicar el número de curva por su área correspondiente y el porcentaje que existe de los grupos hidrológicos B, C y D respectivamente.

Cabe mencionar, que el área del grupo hidrológico B es de 125.40 km², del grupo hidrológico C es de 218.91 km², mientras que del grupo hidrológico D es de 86.66 km², lo que significa que representan el 29 %, 50 % y 21 % del área total de la microcuenca del río Portoviejo respectivamente. Por lo cual para el cálculo de la curva número de la

microcuenca se optó por multiplicar los valores de curva número por el área y por el porcentaje que representan cada grupo hidrológico, como se presenta en la Tabla 21, y sumar cada uno de esos productos y dividirlos para el área de la microcuenca. Es decir, se utilizó la ecuación (29) de curva número ponderada, pero tomando en cuenta los porcentajes mencionados.

$$CN_{Pond} = \frac{33\,309.41}{430.97} = 77.28$$

Por tanto, al ya contar con el valor de la curva número de 77.28, longitud axial de la cuenca de 82 972.44 pies, y una pendiente promedio de la cuenca de 31.91 %, se puede aplicar la ecuación de retardo, ecuación (17), para obtener el valor del tiempo de concentración.

$$t_c = \frac{100 \cdot 82972.44^{0.8} \cdot \left(\left(\frac{1000}{77.28} \right) - 9 \right)^{0.7}}{1900 \cdot (31.91 \cdot 100)^{0.5}} = 3.49 \text{ horas}$$

Precipitaciones y caudales máximos por métodos estadísticos y HEC-HMS

Obtención de las Curvas IDF (Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia).

Para la obtención de las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, fue necesario conseguir datos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Portoviejo-UTM (M005), los cuales fueron proporcionados por el INAMHI desde el año 1964 hasta el año 2013. Para completar la base de datos desde el año 2014 hasta el año 2020 se utilizó datos de precipitaciones diarias máximas mediante la aplicación web gratuita Climate Engine, en la cual se descargó el conjunto de datos de precipitaciones diarias de los años mencionados de CHRIPS DAILY (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data), ver Tabla 22.

Tabla 22

Precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Portoviejo UTM(M005)

Año	Precipitación Máx. 24 Hr	Año	Precipitación Máx. 24 Hr	Año	Precipitación Máx. 24 Hr	Año	Precipitación Máx. 24 Hr
1964	38.6	1979	46.2	1994	66.5	2009	26.5
1965	27.4	1980	17.8	1995	60.1	2010	52.3
1966	47.4	1981	34	1996	40.8	2011	37
1967	56.4	1982	48.9	1997	131.2	2012	59.3
1968	36	1983	120.5	1998	86.7	2013	107.6
1969	55.5	1984	47.3	1999	69.4	2014	77.1544
1970	64	1985	40	2000	41.3	2015	72.2567
1971	38.2	1986	54.7	2001	147.9	2016	68.7635
1972	88.1	1987	65.6	2002	50.8	2017	128.7404
1973	63.1	1988	18.3	2003	38.4	2018	67.3494
1974	33.1	1989	131.4	2004	57.9	2019	38.7285
1975	48.7	1990	37.8	2005	79.7	2020	58.1075
1976	62.6	1991	20.9	2006	56.7		
1977	62.9	1992	69.7	2007	46.8		
1978	26.4	1993	25.3	2008	53.3		

Nota. Los valores de precipitaciones máximas en 24 horas otorgadas por el por el Instituto Nacional Meteorología e Hidrología INAMHI son desde 1964 hasta el año 2013, desde el 2014 al 2020 se obtuvieron a partir de CHRIPS DAILY

Además, se realizó un análisis estadístico para comprobar si existen valores dudosos dentro de los 57 datos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación meteorológica Portoviejo-UTM. Para ello se utilizó el método del Water Resources Council (1981), en el que se consideran tres casos. De acuerdo a Fuentes (2016), si la asimetría de la estación es mayor que +0.4, se considera primero las pruebas para detectar datos dudosos altos; si la asimetría de la estación es menor que -0.4 se consideran pruebas para detectar datos dudosos bajos; mientras que si la asimetría de la estación se encuentra entre ± 0.4 deben

aplicarse pruebas para detectar datos dudosos bajos y altos. La ecuación que se utiliza para detectar datos dudosos altos es:

$$X_H = \bar{X} + K_n \cdot S_x \quad (59)$$

Mientras que para detectar datos dudosos bajos la ecuación es:

$$X_L = \bar{X} - K_n \cdot S_x \quad (60)$$

Donde:

X_H : Banda superior de los algoritmos de los valores de precipitaciones

X_L : Banda inferior de los algoritmos de los valores de precipitaciones

\bar{X} : Media aritmética de los logaritmos de los valores de las precipitaciones

$\overline{K_n}$: Coeficiente que depende del tamaño de la muestra

S_x : Desviación estándar de los algoritmos de los valores de las precipitaciones

Para determinar la precipitación máxima aceptada (PH) se utiliza la ecuación (61), mientras que para calcular la precipitación mínima aceptada (PL) se utiliza la ecuación (62)

$$PH = 10^{X_H} \quad (61)$$

$$PL = 10^{X_L} \quad (62)$$

Para el análisis de los datos dudosos de las precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Portoviejo-UTM, se determinó los siguientes parámetros, ver Tabla 23

Tabla 23

Parámetros estadísticos de la base de datos de precipitaciones máximas en 24 horas

Parámetros estadísticos	P24hr	Log(P24hr)
Número de datos (N)	57	57
Sumatoria	3239.87	97.17

Parámetros estadísticos	P24hr	Log(P24hr)
Valor máximo	147.90	2.17
Valor mínimo	17.80	1.25
Media	56.84	1.705
Varianza	848.870	0.044
Desviación estándar	29.135	0.209
Coefficiente de variación	0.513	0.123
Coefficiente de asimetría	1.465	0.0613

Como se puede observar el coeficiente de asimetría en valores logarítmicos es de 0.0613, es decir se encuentra entre ± 0.4 , por consiguiente, se debe considerar la prueba para detectar datos dudosos altos y bajos. Se calculó X_H , X_L , PH y PL. Ver Tabla 24

Tabla 24

Valores de precipitación máxima y mínima aceptada

X_H Umbral de datos dudosos altos	X_L Umbral de datos dudosos bajos	PH Precipitación máxima aceptada (mm)	PL Precipitación mínima aceptada (mm)
2.26	1.15	181.28	14.16

Se puede apreciar que el valor de PH (precipitación máxima aceptada) es de 181.28 mm y el valor máximo de la base de datos es de 147.90 mm, mientras que el valor de PL (precipitación mínima aceptada) es de 14.16 mm y el valor mínimo de la base de datos es de 17.80 mm. En conclusión, no existen datos dudosos altos ni bajos en la muestra de precipitaciones máximas en 24 horas.

Una vez que se determinó que no existen datos dudosos en la muestra, se procedió a calcular las precipitaciones diarias máximas probables utilizando distribución de Gumbel.

Es necesario calcular, la media, la desviación estándar. Estos datos ya se los tiene en la Tabla 24. Entonces la media de la muestra es de 56.84 mm, mientras que la desviación estándar es de 29.14 mm

Además, si se aplica la ecuación (19) y la ecuación (20), se obtienen los valores de α y μ , los cuales son de 22.72 mm y 43.73 mm respectivamente

Por lo tanto, aplicando la ecuación (22), se obtiene las precipitaciones diarias máximas probables (x) a diferentes períodos de retorno, como se lo puede observar en la Tabla 25

Tabla 25

Precipitación máxima probable aplicando la distribución de Gumbel

Período de retorno	Variable reducida	Precipitación máxima probable (x)
Años	(YT)	mm
	$-\ln(-\ln(F(X)))$	$x = (-\ln(-\ln(F(X))) \cdot \alpha + \mu) \cdot 1.13$
2	0.37	58.92
5	1.50	87.92
10	2.25	107.18
25	3.20	131.52
50	3.90	149.57
100	4.60	167.50
500	6.21	208.92

Entonces si la probabilidad de que se presente un valor inferior a x está definida por $F(X)$, ecuación (23). La probabilidad de que se presente un valor mayor a x está definida por $1 - F(X)$, ecuación (24), entonces de acuerdo a la Tabla 26

Tabla 26

Probabilidades de que se supere o no se supere la precipitación máxima probable

Período de retorno	F(X) Probabilidad de que se presente un valor inferior a x	1-F(X) Probabilidad de que se presente un valor mayor a x
Años		
2	0.5	0.5
5	0.8	0.2
10	0.9	0.1
25	0.96	0.04

Período de retorno Años	F(X) Probabilidad de que se presente un valor inferior a x	1-F(X) Probabilidad de que se presente un valor mayor a x
50	0.98	0.02
100	0.99	0.01
500	0.998	0.02

Si se toma como ejemplo, el período de retorno de 50 años, se observa que la precipitación máxima probable es de 149.57 mm, y que la probabilidad de que se presente un valor mayor a esta precipitación máxima probable en el primer año es de 0.02, y en el siguiente año también será de 0.02 y así sucesivamente con todos los años, hasta completar 50 años.

El siguiente paso fue calcular las precipitaciones máximas en 24 horas en diferentes tiempos de duración, los cuales tienen un coeficiente determinado, como se lo puede observar en la Tabla 27

Tabla 27

Coefficientes de duración

Duración (h)	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Coefficiente	0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1

Los coeficientes de duración, se multiplicaron por las precipitaciones máximas probables en 24 horas, de los diferentes tiempos de retorno, como se presenta en la Tabla 28.

A partir de la precipitación máxima y el tiempo de duración, se calculó la intensidad para cada período de retorno, utilizando la ecuación (26). Ver Tabla 29

Tabla 28*Precipitación máxima probable (mm) a distintos tiempos de duración (hr)*

Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración							
Duración	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	58.82	87.92	107.18	131.52	149.57	167.50	208.92
18 hr	53.53	80.00	97.53	105.21	136.11	152.42	190.11
12 hr	47.06	70.33	85.74	105.21	119.66	134.00	167.13
8 hr	40.00	59.78	72.88	89.43	101.71	113.90	142.06
6 hr	35.88	53.63	65.38	80.23	91.24	102.17	127.44
5 hr	33.53	50.11	61.09	74.97	85.26	95.47	119.08
4 hr	30.59	45.72	55.73	68.39	77.78	87.10	108.64
3 hr	27.06	40.44	49.30	60.50	68.80	77.05	96.10
2 hr	22.94	34.29	41.80	51.29	58.33	65.32	81.48
1 hr	17.65	26.37	32.15	39.46	44.87	50.25	62.67

Tabla 29*Intensidad de la lluvia (mm/hr) a diferentes períodos de retorno*

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Período de Retorno						
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 hr	1440	2.45	3.66	4.47	5.48	6.23	6.98	8.70
18 hr	1080	2.97	4.44	5.42	5.85	7.56	8.47	10.56
12 hr	720	3.92	5.86	7.15	8.77	9.97	11.17	13.93
8 hr	480	5.00	7.47	9.11	11.18	12.71	14.24	17.76
6 hr	360	5.98	8.94	10.90	13.37	15.21	17.03	21.24
5 hr	300	6.71	10.02	12.22	14.99	17.05	19.09	23.82
4 hr	240	7.65	11.43	13.93	17.10	19.44	21.77	27.16
3 hr	180	9.02	13.48	16.43	20.17	22.93	25.68	32.03
2 hr	120	11.47	17.14	20.90	25.65	29.17	32.66	40.74

1 hr	60	17.65	26.37	32.15	39.46	44.87	50.25	62.67
-------------	----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Para la construcción de las curvas IDF, se tomó en consideración la ecuación (27), en la cual resultó ser necesario calcular las constantes K, m y n.

Si se realiza un cambio de variable al numerador de la ecuación (27), se tiene que:

$$d = K \cdot T^m \quad (63)$$

Por lo cual la ecuación quedaría expresada como se presenta en la ecuación (64)

$$I = d \cdot t^{-n} \quad (64)$$

Para el cálculo de n y d se utilizó la ecuación (56), a la cual se le aplicó la regresión potencial, ver Figura 32. En la Tabla 30, se presentan los resultados obtenidos una vez aplicado la regresión potencial para un período de retorno de 25 años, además del gráfico de regresión potencial con su respectiva ecuación y valor de R². Cabe resaltar que x representa la duración en minutos mientras que y, son las intensidades (mm/hr)

Tabla 30

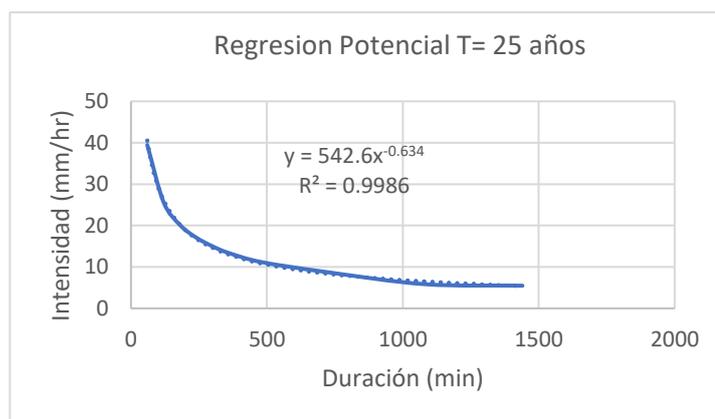
Aplicación de regresión potencial para el cálculo de las variables de d y n

Período de retorno para T = 25 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x · ln y	(lnx) ²
1	1440	5.48	7.27	1.70	12.37	52.89
2	1080	5.85	6.98	1.77	12.33	48.79
3	720	8.77	6.58	2.17	14.28	0.0949
4	480	11.18	6.17	2.41	14.90	38.12
5	360	13.37	5.89	2.59	15.26	34.65
6	300	14.99	5.70	2.71	15.44	32.53
7	240	17.10	5.48	2.84	15.56	30.04
8	180	20.17	5.19	3.00	15.60	26.97
9	120	25.65	4.79	3.24	15.53	22.92
10	60	39.46	4.09	3.68	15.05	16.76

Período de retorno para T = 25 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x·ln y	(lnx)^2
10	4980	162.00	58.16	26.12	146.34	346.94
Ln (d) =	6.2964	d =	542.6048	n =	-0.6336	

Figura 32

Gráfico de la primera regresión potencial con su respectiva ecuación y valor de R^2



Igualmente se realizó este análisis de regresión potencial para los demás períodos de retorno, y se obtuvieron valores de d y n de cada uno de ellos, y finalmente se sacó un promedio, ver Tabla 31

Tabla 31

Valores promedio de los términos de regresión d y n – Portoviejo UTM (M005)

Resumen de aplicación de regresión potencial		
Período de Retorno (años)	Término cte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	222.373	-0.616
5	332.368	-0.616
10	405.194	-0.616
25	542.605	-0.634
50	565.472	-0.616
100	633.230	-0.616
500	789.809	-0.616

Resumen de aplicación de regresión potencial		
Período de Retorno (años)	Término cte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
Promedio	498.721	-0.619

Una vez calculados los valores de d, se pudo aplicar nuevamente una regresión potencial, pero esta vez a la ecuación (63), con el objetivo de obtener los valores de K y m. A continuación, en la Tabla 32 se indican los resultados obtenidos. Cabe mencionar que x ahora representa los períodos de retorno (2 años, 5 años, 10 años, etc.) y que y, ahora representa los valores de d anteriormente calculados.

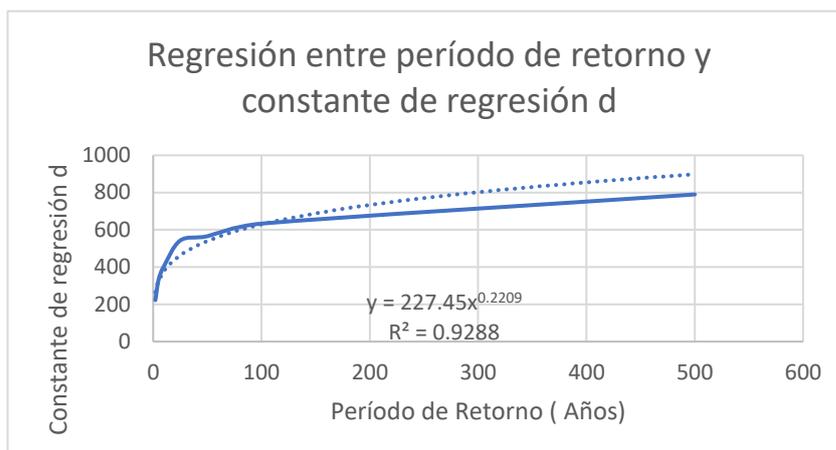
Tabla 32

Regresión potencial para calcular los valores de K y m

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	222.3733	0.6931	5.4044	3.7460	0.4805
2	5	332.3677	1.6094	5.8062	9.3448	2.5903
3	10	405.1935	2.3026	6.0044	13.8256	5.3019
4	25	542.6048	3.2189	6.2964	20.2673	10.3612
5	50	565.4716	3.9120	6.3377	24.7931	15.3039
6	100	633.2300	4.6052	6.4508	29.7072	21.2076
7	500	789.8094	6.2146	6.6718	41.4626	38.6214
7	692	3491.0502	22.5558	42.9716	143.1465	93.8667
<i>Ln (K) =</i>	5.4269	<i>K =</i>	227.4469	<i>m =</i>	0.2209	

Figura 33

Gráfico de la segunda regresión potencial con su respectiva ecuación y valor de R²



Con los valores ya calculados de K, m y n, se reemplaza estos valores en la ecuación

(27)

$$I = \frac{227.45 \cdot T^{0.22}}{t^{0.619}}$$

Obteniéndose los siguientes resultados que se presentan en la Tabla 33, y a partir de allí se construyó la Curva de Intensidad -Duración-Frecuencia ver Figura 34.

Tabla 33

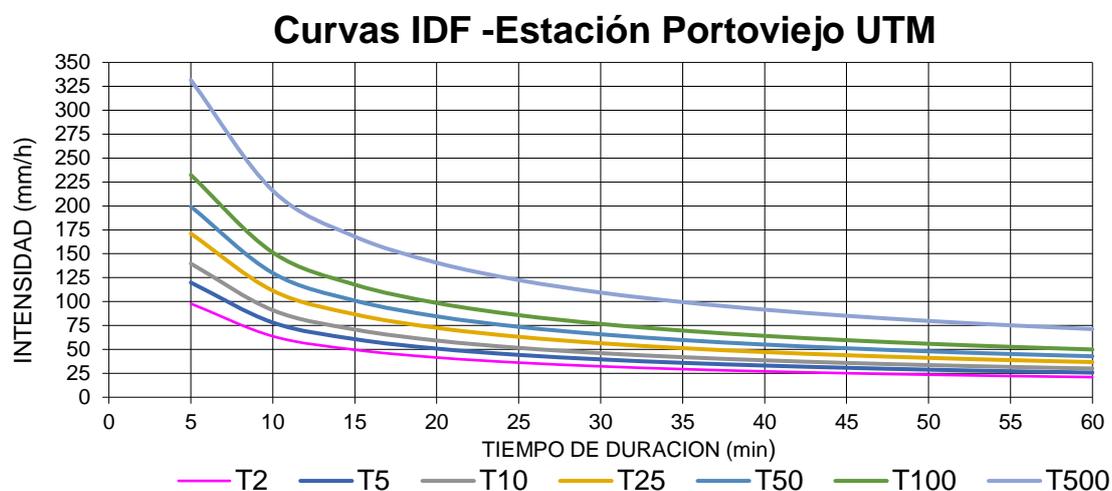
Intensidades de la lluvia (mm/hr) de acuerdo a tiempos de duración – Portoviejo UTM

(M005)

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia	Duración en minutos											
años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	97.91	63.76	49.61	41.52	36.16	32.31	29.37	27.04	25.14	23.55	22.20	21.04
5	119.88	78.06	60.74	50.83	44.28	39.55	35.95	33.10	30.78	28.83	27.18	25.76
10	139.72	90.98	70.79	59.25	51.61	46.10	41.90	38.58	35.87	33.60	31.68	30.02
25	171.07	111.40	86.68	72.54	63.18	56.44	51.31	47.24	43.92	41.15	38.79	36.76
50	199.38	129.83	101.02	84.55	73.64	65.78	59.80	55.05	51.18	47.95	45.21	42.84
100	232.37	151.32	117.74	98.54	85.83	76.67	69.69	64.17	59.66	55.89	52.69	49.93
500	331.59	215.93	168.01	140.61	122.47	109.41	99.45	91.56	85.13	79.75	75.19	71.24

Figura 34

Curva IDF de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005)



Todos los cálculos que se realizaron para obtener las curvas IDF de las estaciones meteorológicas: Portoviejo UTM (M005), SANCAN (M449), 24 de mayo (M447) y La Teodomira (M1208), se encuentran en el ANEXO B.

Obtención de hietogramas a partir de curvas IDF.

A partir de la curva IDF generada de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005), se obtiene el hietograma a diferentes períodos de retorno, ver Figura 35. Para lo cual se necesita el valor del tiempo de concentración, que se lo puede utilizar como un valor aproximado al tiempo de duración de la tormenta. Los tiempos de concentración de 3.34 y 3.49 horas calculados anteriormente con la ecuación de Témez y con la ecuación de retardo respectivamente, pueden ser aproximados a 3 horas y se lo considera como la duración de la tormenta para generar los hietogramas.

Por tanto, al existir una duración de tormenta de 3 horas, el intervalo de tiempo será cada 5 minutos, hasta llegar a los 180 minutos, como se puede observar en la Tabla 34.

Tabla 34

Valores de intensidad de precipitación según Duración de la misma – Portoviejo UTM (M005)

Duración (minutos)	Período de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
5	97.91	119.88	139.72	171.07	199.38	232.37	331.59
10	63.76	78.06	90.98	111.40	129.83	151.32	215.93
15	49.61	60.74	70.79	86.68	101.02	117.74	168.01
20	41.52	50.83	59.25	72.54	84.55	98.54	140.61
25	36.16	44.28	51.61	63.18	73.64	85.83	122.47
30	32.31	39.55	46.10	56.44	65.78	76.67	109.41
35	29.37	35.95	41.90	51.31	59.80	69.69	99.45
40	27.04	33.10	38.58	47.24	55.05	64.17	91.56
45	25.14	30.78	35.87	43.92	51.18	59.66	85.13
50	23.55	28.83	33.60	41.15	47.95	55.89	79.75
55	22.20	27.18	31.68	38.79	45.21	52.69	75.19
60	21.04	25.76	30.02	36.76	42.84	49.93	71.24
65	20.02	24.51	28.57	34.98	40.77	47.51	67.80
70	19.12	23.41	27.29	33.41	38.94	45.38	64.76
75	18.32	22.43	26.15	32.01	37.31	43.49	62.06
80	17.61	21.56	25.12	30.76	35.85	41.78	59.63
85	16.96	20.76	24.20	29.63	34.53	40.25	57.43
90	16.37	20.04	23.36	28.60	33.33	38.85	55.43
95	15.83	19.38	22.59	27.66	32.23	37.57	53.61
100	15.34	18.78	21.88	26.79	31.23	36.39	51.93
105	14.88	18.22	21.23	26.00	30.30	35.31	50.39
110	14.46	17.70	20.63	25.26	29.44	34.31	48.96
115	14.06	17.22	20.07	24.57	28.64	33.38	47.63
120	13.70	16.77	19.55	23.93	27.90	32.51	46.39
125	13.36	16.35	19.06	23.34	27.20	31.70	45.24
130	13.04	15.96	18.60	22.78	26.55	30.94	44.15
135	12.74	15.59	18.17	22.25	25.93	30.23	43.13
140	12.45	15.25	17.77	21.76	25.36	29.55	42.17
145	12.19	14.92	17.39	21.29	24.81	28.92	41.27
150	11.93	14.61	17.03	20.85	24.30	28.32	40.41
155	11.69	14.32	16.68	20.43	23.81	27.75	39.60
160	11.46	14.04	16.36	20.03	23.35	27.21	38.83

Duración (minutos)	Período de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
165	11.25	13.77	16.05	19.65	22.91	26.70	38.10
170	11.04	13.52	15.76	19.29	22.49	26.21	37.40
175	10.85	13.28	15.48	18.95	22.09	25.74	36.73
180	10.66	13.05	15.21	18.62	21.70	25.30	36.10

Finalmente, se realizaron los hietogramas para cada período de tiempo. A

continuación, se presenta la Tabla 35, que resume las variables para obtener el hietograma de 25 años de tiempo de retorno.

En el ANEXO B se encuentran todas las variables y cálculos que se realizaron para obtener los hietogramas a diferentes períodos de retorno de las estaciones meteorológicas: Portoviejo UTM (M005), SANCAN (M449), 24 de mayo (M447) y La Teodomira (M1208).

Tabla 35

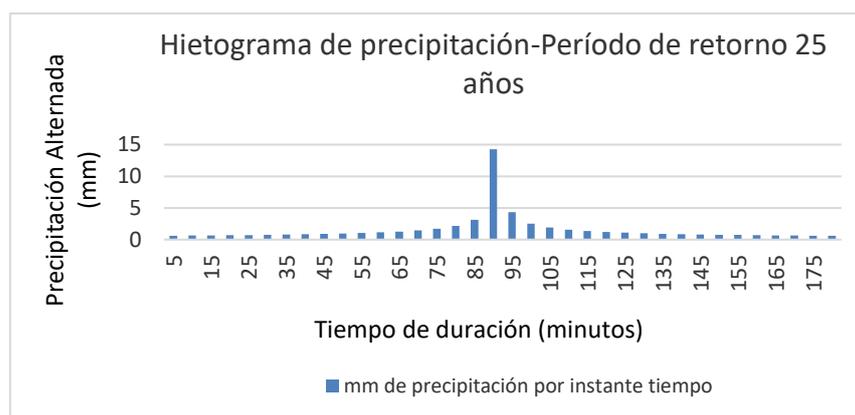
Variables para obtener la precipitación alternada (hietograma) – Portoviejo UTM(M005)

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	171.07	14.26	14.26	171.07	0.61	7.29
10	111.40	18.57	4.31	51.73	0.63	7.56
15	86.68	21.67	3.10	37.23	0.66	7.87
20	72.54	24.18	2.51	30.13	0.68	8.20
25	63.18	26.33	2.15	25.76	0.72	8.58
30	56.44	28.22	1.89	22.73	0.75	9.01
35	51.31	29.93	1.71	20.49	0.79	9.50
40	47.24	31.49	1.56	18.75	0.84	10.06
45	43.92	32.94	1.45	17.35	0.89	10.72
50	41.15	34.29	1.35	16.20	0.96	11.51
55	38.79	35.56	1.27	15.22	1.04	12.46
60	36.76	36.76	1.20	14.39	1.14	13.66
65	34.98	37.89	1.14	13.66	1.27	15.22
70	33.41	38.98	1.09	13.03	1.45	17.35
75	32.01	40.02	1.04	12.46	1.71	20.49
80	30.76	41.01	1.00	11.96	2.15	25.76
85	29.63	41.97	0.96	11.51	3.10	37.23

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
90	28.60	42.90	0.92	11.09	14.26	171.07
95	27.66	43.79	0.89	10.72	4.31	51.73
100	26.79	44.66	0.86	10.37	2.51	30.13
105	26.00	45.49	0.84	10.06	1.89	22.73
110	25.26	46.31	0.81	9.77	1.56	18.75
115	24.57	47.10	0.79	9.50	1.35	16.20
120	23.93	47.87	0.77	9.24	1.20	14.39
125	23.34	48.62	0.75	9.01	1.09	13.03
130	22.78	49.35	0.73	8.79	1.00	11.96
135	22.25	50.07	0.72	8.58	0.92	11.09
140	21.76	50.77	0.70	8.39	0.86	10.37
145	21.29	51.45	0.68	8.20	0.81	9.77
150	20.85	52.12	0.67	8.03	0.77	9.24
155	20.43	52.77	0.66	7.87	0.73	8.79
160	20.03	53.42	0.64	7.71	0.70	8.39
165	19.65	54.05	0.63	7.56	0.67	8.03
170	19.29	54.67	0.62	7.42	0.64	7.71
175	18.95	55.27	0.61	7.29	0.62	7.42
180	18.62	55.87	0.60	7.16	0.60	7.16

Figura 35

Hietograma de precipitación a un período de 25 años – Portoviejo UTM (M005)



Nota. La Figura presenta el hietograma de precipitación a un período de retorno de 25 años, de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005), ver ANEXO B.

Para realizar el gráfico del hietograma, se debe ubicar en el eje de las abscisas (x) los minutos de duración de la tormenta, es decir desde los 5 minutos que inicia hasta los 180 minutos en el que finaliza la tormenta, y en el eje de ordenadas (y) la precipitación alternada en mm. Como se puede apreciar en la Figura 35. Los hietogramas a diferentes períodos de retorno se presentan en el ANEXO B.

Caudales máximos a partir de hietogramas.

Con la obtención de los hietogramas, se pudo calcular los caudales máximos a diferentes períodos de retorno, ver ANEXO B; para ello se utilizó el software HEC-HMS, en el cual se realizó los siguientes pasos.

Basin Model.

Se utilizó el componente “Basin Model” (Modelo de la cuenca), en el que se importaron los archivos shapefile de la microcuenca delimitada y la red de drenaje, además, se creó un punto de aforo del caudal, con la herramienta Subbasin Creation Tool, ver Figura 36.

Figura 36

Importación de los archivos shapefile de la microcuenca del río Portoviejo, su red de drenaje y el punto de aforo de interés



En la pestaña de “Subbasin” se colocó la superficie de la microcuenca del río Portoviejo, que es de 430.97 km², se usó el modelo del número curva del SCS con el objetivo de calcular las pérdidas de infiltración. Para la transformación de precipitación neta a escorrentía, se empleó el modelo del hidrograma unitario del SCS.

Además, en la pestaña Loss, se colocó el número curva (Curve Number) anteriormente calculado con un valor de 77.28. En la pestaña Transform, se puso el valor del tiempo de retardo (t_{lag}) que es de 108 minutos, calculado de acuerdo a la ecuación (57), considerando que el tiempo de concentración, con el que se realizaron los hietogramas fue de 3 horas, es decir 180 minutos. Ver Tabla 36

$$t_{lag} = 0.6 t_c \quad (65)$$

$$t_{lag} = 0.6 \cdot 180 \text{ min} = 108 \text{ min}$$

Tabla 36

Parámetros utilizados para calcular los hidrogramas en HEC-HMS

Parámetros	Valor
Tiempo de concentración (min)	180
Tiempo de retardo t_{lag} (min)	108
Número Curva	77.28

Time Series Data Manager.

El siguiente paso fue crear un medidor de precipitación (Precipitation Gage), utilizando el componente de “Time Series Data Manager”, al cual se le dio el nombre de “Pluviógrafo”, que contiene los datos de precipitación alternada de cada uno de los hietogramas a diferentes períodos de retorno, que se calcularon anteriormente. Las unidades que se utilizaron fueron milímetros incrementales, a intervalos de 5 minutos.

En la pestaña “Time Window” se colocó el día y la hora de inicio de la tormenta, así como también el día y la hora de fin de la misma, considerando que el tiempo de duración de la tormenta es de 3 horas. Además, en la pestaña “Table” se colocó los valores de precipitación alternada (mm) de cada uno de los hietogramas generados a diferentes períodos de retorno.

Meteorologic Model Manager.

Una vez ingresados los datos de precipitación alternada (mm) en la tabla, se creó un modelo meteorológico “Meteorologic Model”, el cual calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Existen algunos métodos disponibles del modelo hidrológico para calcular la precipitación promedio, en este caso se usó el método de Specified Hyetograph (Hietograma especificado), lo que requiere tomar los valores de los hietogramas generados a diferentes tiempos de retorno, para generar el modelo meteorológico. Para ello en la pestaña “Specified Hyetograph” se colocó el nombre del medidor de precipitación (Precipitation Gage) creado anteriormente, Pluviógrafo,

Se creó el último componente “Control Specifications Manager” (Especificaciones de control), que sirve para fijar el tiempo de duración de cada corrida de una simulación, para lo cual se estableció una fecha de inicio, fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación. En este caso se realizó con 8 horas la corrida de simulación, con un intervalo de 30 minutos

Finalmente se corrió la simulación para cada uno de los períodos de retorno establecidos anteriormente. En la Figura 37 se presenta la gráfica del hidrograma obtenido a partir de la simulación con HEC-HMS, utilizando los hietogramas de la estación Portoviejo UTM (M005), y en la Tabla 37 los caudales máximos obtenidos a distintos períodos de retorno, ver ANEXO B.

Tabla 37

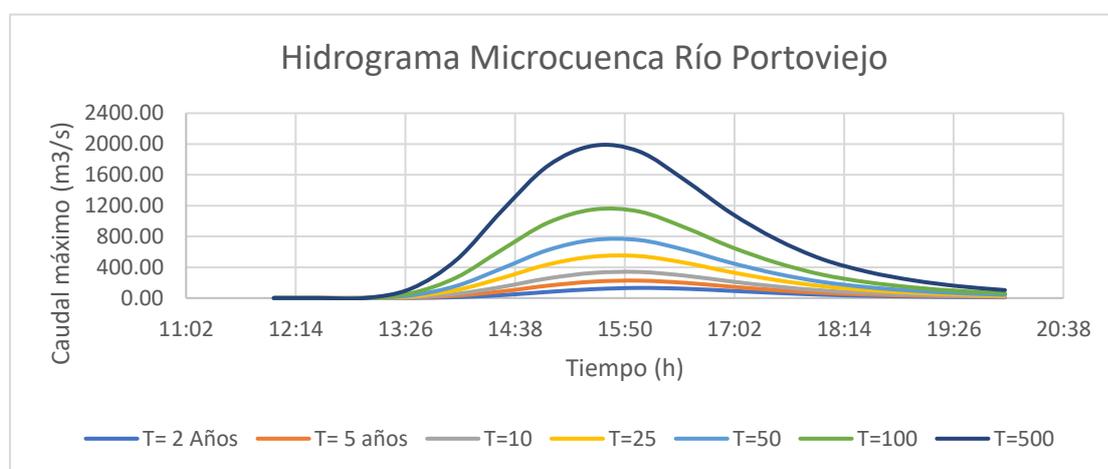
Valores de caudales en m³/s con un tiempo de duración de 8 horas con intervalos de 30 minutos y caudales máximos -Distintos períodos de retorno

Duración	T= 2 Años	T= 5 años	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99
13:30	1.25	5.02	10.30	21.70	34.71	62.40	121.60
14:00	11.80	30.86	54.95	104.12	158.22	267.82	497.21
14:30	38.15	87.10	145.82	261.79	386.51	630.83	1138.67
15:00	80.02	161.39	255.86	435.89	624.46	978.84	1717.83
15:30	115.68	213.53	327.11	538.30	755.40	1150.49	1978.70
16:00	131.98	226.40	338.94	544.57	753.04	1123.02	1902.39
16:30	121.36	197.74	290.77	458.07	625.50	915.53	1530.18
17:00	94.17	148.10	215.90	337.14	457.89	665.07	1105.67
17:30	66.55	102.80	149.61	233.24	316.51	459.17	762.80
18:00	43.64	67.93	98.95	154.41	209.62	304.27	505.64
18:30	29.29	45.63	66.48	103.76	140.89	204.60	340.10
19:00	19.86	30.85	44.92	70.05	95.07	137.94	229.16
19:30	13.24	20.59	30.00	46.80	63.53	92.21	153.23
20:00	8.92	13.87	20.20	31.52	42.79	62.12	103.25
Máximo	131.98	226.40	338.94	544.57	755.40	1150.49	1978.70

En el ANEXO B se encuentran los caudales máximos a diferentes períodos de retorno de las estaciones meteorológicas: Portoviejo UTM (M005), SANCAN (M449), 24 de mayo (M447) y La Teodomira (M1208).

Figura 37

Hidrograma de la microcuenca del río Portoviejo a distintos períodos de retorno



Nota. La Figura presenta los caudales máximos a diferentes períodos de retorno de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005).

Caudales máximos a partir del modelo de distribución de Gumbel

Mediante métodos estadísticos se puede calcular de otra forma los caudales máximos, tal es el modelo de distribución de Gumbel, que se presentan en el ANEXO B.

Para ello se calculó las variables probabilísticas (media, desviación estándar α y μ), que se encuentran en la Tabla 38, de los datos de caudales de la estación hidrológica Portoviejo en Santa Ana (H0267), proporcionados por el INAMHI, ver Tabla 39.

Tabla 38

Variables probabilísticas de caudales máximos

Variabes probabilísticas	m³/s
Media	197.68
Desviación Estándar	185.85
α	144.90
μ	114.05

Tabla 39

Caudales máximos estación hidrológica Portoviejo en Santa Ana (H0267)

Año	Caudal máximo (m³/s)	Año	Caudal máximo (m³/s)
1962	3.42	1975	471.96
1963	54.56	1976	790.90
1964	181.66	1977	198.03
1965	351.10	1978	98.46
1966	157.03	1979	123.25
1967	117.53	1980	117.44
1968	29.84	1981	167.71
1969	187.76	2008	17.44
1970	163.68	2009	115.49
1973	487.55	2010	309.61
1974	71.01	2011	133.61

Nota. Los caudales máximos de los años que se presentan en la tabla fueron otorgados por el Instituto Nacional Meteorología e Hidrología (INAMHI)

Aplicando la ecuación (22), se obtienen los caudales máximos probables a diferentes períodos de retorno (x), como se puede observar en la Tabla 40.

Tabla 40

Caudales máximos obtenidos a partir del modelo de distribución de Gumbel

Período de retorno	Variable reducida	Caudal máximo probable (x)
Años	(YT) -ln(-ln(F(X)))	m ³ /s x= (-ln(-ln(F(X))) · α+ μ) · 1.13
2	0.37	188.88
5	1.50	374.47
10	2.25	497.35
25	3.20	652.60
50	3.90	767.78
100	4.60	882.11
500	6.21	1146.30

Capítulo IV

Modelamiento de inundaciones con Caesar Lisflood en la parroquia Colón del cantón

Portoviejo

Información y Datos

Para realizar el modelamiento de inundaciones con CAESAR-Lisflood, se utilizó un Modelo Digital de Elevación de 12 m. ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de exploración Aeroespacial (JAXA), datos de precipitaciones y caudales a diferentes períodos de retorno (históricos y máximos probables), y los tamaños de las fracciones granulométricas los cuales se obtuvieron a partir de un análisis granulométrico de 5 puntos de los sedimentos de fondo del río Portoviejo para caracterizar la granulometría del tramo de estudio del río Portoviejo. Para el modelamiento únicamente se utilizó las fracciones granulométricas del punto 5 (Aledaño a la parroquia Colón-Zona de modelamiento de inundación)

Caracterización granulométrica del cauce del río Portoviejo

Para la caracterización granulométrica del río Portoviejo, se realizó el muestreo de los sedimentos de fondo en 5 puntos del tramo de la microcuenca del Río Portoviejo utilizando un barreno. Para determinar los puntos de muestreo, al tramo del río se lo dividió en 3 subtramos o zonas: alta, media y baja. En cuanto, a la zona baja, esta se encuentra entre los 42 hasta los 63 m s.n.m. y comprende la parroquia Colón del cantón Portoviejo (42 a los 53 m s.n.m.) y parte de la parroquia Santa Ana del cantón Santa Ana (54 a los 63 m s.n.m), tomándose una muestra en cada parroquia mencionada.

La zona media que se encuentra entre los 65 a los 84 m s.n.m comprende la segunda parte de la parroquia Santa Ana y la parroquia Ayacucho ambas pertenecientes al cantón Santa Ana. De los puntos de muestreo en la zona media, uno fue en la comunidad la Piedra perteneciente a la parroquia Ayacucho y otro en la comunidad Río Caña Ayacucho.

En la parte alta que va desde 85 hasta los 110 m s.n.m, la muestra de sedimento se tomó en un punto intermedio entre la presa Poza Honda y la parroquia Honorato Vásquez, a una altura de 98 metros sobre el nivel del mar. En la Tabla 41 y en la Figura 38 se especifican los puntos de muestreo tomados en campo. Cabe recalcar que se tomó aproximadamente 2 kg por muestra.

Tabla 41

Lugares de la toma de muestras con sus respectivas coordenadas

Número de muestra y lugar	Coordenadas		Altura (m.s.n.m)
	x (m)	y (m)	
1. Entre presa Poza Honda y Honorato Vásquez-P1	587492	9876877	98
2. Comunidad Río Cañas Ayacucho-P2	583507	9874251	84
3. Comunidad La Piedra Ayacucho-P3	577166	9870915	75
4. Santa Ana-P4	570699	9866348	56
5. Colón-P5	565900	9876887	48

Nota. En la Tabla se muestran los 5 lugares de toma de muestra en el cauce principal del río Portoviejo, ver ANEXO C.

Figura 38

Ubicación de los puntos de muestreo

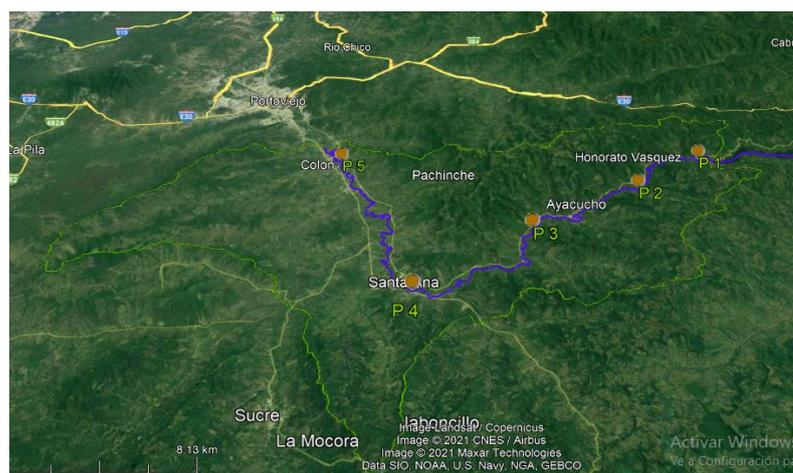


Figura 39

Toma de muestras en el punto 1 (Entre Presa Poza Honda y Honorato Vásquez)

**Figura 40**

Toma de muestras en el punto 4 (Santa Ana)



Una vez tomadas las muestras de los sedimentos de fondo en cada uno de los puntos mencionados, y guardadas en una funda ziploc se procedió a realizar en el Laboratorio de suelos, pavimentos y hormigones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, el análisis granulométrico y contenido de humedad de las 5 muestras de suelo, en base a la norma ASTM D-422 y la Norma ASTM D-2216 respectivamente.

- Se realizó un cuarteo de cada una de las muestras y se colocó una porción representativa de éstas en una tara previamente pesada. Ver Figura 41

Figura 41

Muestras pesadas antes de ingresarlas al horno



- Se pesaron cada una de las taras con la muestra y luego se las puso a secarse en el horno a una temperatura de 110 ° C.
- Después de secarse, se pesó cada una de las muestras.
- Se midió el contenido de humedad de las 5 muestras de sedimentos, en base a la información que se encuentra en la Tabla 43 y la ecuación (66) que corresponde a la Norma ASTM D-2216.

Las fotografías de la toma de muestras de sedimentos y su análisis granulométrico en el laboratorio, se encuentran en el ANEXO C.

Tabla 42

Variables para calcular el porcentaje de humedad de las 5 muestras de sedimentos

	M_c (g)	M_{cws} (g)	M_{cs}	M_s (g)	M_w (g)
P1	40.8	553.2	367.84	327.04	185.36
P2	81.87	585.76	466.94	385.07	118.82
P3	46.66	546.84	405.13	358.47	141.71
P4	169.73	679.07	547.14	377.41	131.93
P5	106.12	741.24	519.42	413.3	221.82

$$w = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_c} \cdot 100 = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (66)$$

Donde:

w: Contenido de humedad %

M_{CWS} : peso de la tara y muestra húmeda (g)

M_{CS} : peso de la tara y muestra seca (g)

M_c : peso de la tara (g)

M_w : peso del agua

M_s : peso del suelo seco (g)

Por lo tanto, el porcentaje de humedad de cada muestra resultó, de acuerdo a la

Tabla 43.

Tabla 43

Porcentaje de humedad en cada una de las muestras

Muestra	% Humedad (w)
P1	0.57
P2	0.31
P3	0.40
P4	0.35
P5	0.53

• Se

lavarón

cada una

de las muestras secas con agua y se los pasó por el tamiz No. 200 con el fin de eliminar las partículas finas. Ver Figura 42. El material retenido fue secado en el horno durante 24 horas a 110 ° C.

Figura 42

Lavado de las muestras por el tamiz No. 200



- Una vez secadas las muestras se pesó cada de ellas para obtener la cantidad en gramos de partículas finas, ver Tabla 44.
- Cada una de las muestras se las pasó por los tamices predeterminados por la Norma ASTM D-422, ver Figura 43
- Se pesó el material retenido por cada tamiz.

Tabla 44

Peso de las muestras secas antes del lavado (M_{s1}) y después del lavado (M_{s2})

Muestra	M_{s1} (g)	M_{s2} (g)	M_{Finos}	% partículas finas
P1	327.04	200.36	126.68	38.74
P2	385.07	344.37	40.7	10.47
P3	358.47	191.65	166.82	46.54
P4	377.41	269.69	107.72	28.54
P5	413.3	233.71	179.59	43.45

Se realizaron las curvas granulométricas de cada una de las muestras de sedimento. Para ello se calculó el porcentaje de peso retenido, porcentaje de peso retenido acumulado y porcentaje pasante de las 5 muestras, ver ANEXO C.

Figura 43

Tamizado de las muestras de sedimentos del río Portoviejo



En la Tabla 45 se indica estos cálculos realizados correspondientes al punto 5 (Aledaño a la parroquia Colón-Zona de modelamiento de inundación), y su respectiva curva granulométrica se observa en la Figura 44.

Tabla 45

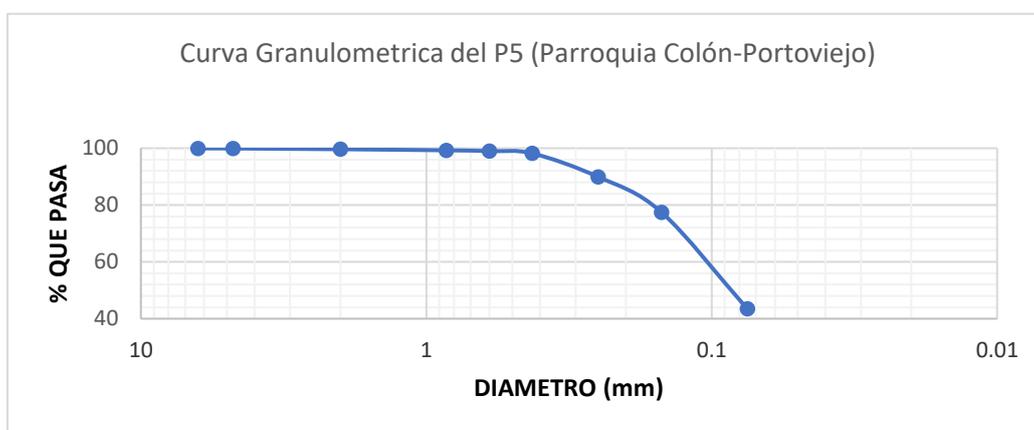
Variables calculadas para curva granulométrica

MALLA	Abertura mm	Peso retenido (g)	% Peso Retenido (g)	% Peso retenido acumulado	% Pasante
1/4"	6.3	0.34	0.082	0.082	99.918
No. 4	4.75	0.04	0.010	0.092	99.908
No. 10	2	1.11	0.269	0.361	99.639
No. 20	0.85	1.57	0.380	0.740	99.260
No. 30	0.6	1.15	0.278	1.019	98.981
No. 40	0.425	3.32	0.803	1.822	98.178
No. 60	0.25	34.11	8.253	10.075	89.925
No. 100	0.15	51.43	12.444	22.519	77.481
No. 200	0.075	140.64	34.029	56.547	43.453

MALLA	Abertura mm	Peso retenido (g)	% Peso Retenido (g)	% Peso retenido acumulado	% Pasante
Menor a N. 200		179.59	43.453	100.000	0
TOTAL		413.30	100		

Figura 44

Curva granulométrica del punto de muestreo P5-Parroquia Colón -Portoviejo



Cálculo del n de Manning en el cauce del río

A partir de las curvas granulométricas se determinó los diámetros característicos D50 Y D90 en mm de los 5 puntos de muestreo de sedimentos del río Portoviejo, cabe mencionar que el D50 y D90 se refiere a que el 50 % o 90 % de las partículas de la muestra respectivamente es menor a un determinado tamaño en mm.

A partir de los diámetros característicos en metros, se calculó n_0 , primer parámetro de la ecuación (31), método de Cowan, para determinar el coeficiente de Manning.

Según Gutiérrez (2009), existen diversos valores para C de la ecuación (32) para calcular n_0 de acuerdo al diámetro característico, que en este caso son D50 y D90. Por lo que se considera la ecuación (67) para D50 propuesto por Garde & Raju (1978), y la ecuación (68) para D90 propuesto por Meyer & Muller (1948), ver Tabla 46.

$$n_0 = 0.047 D_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (67)$$

$$n_0 = 0.038 D_{90}^{\frac{1}{6}} \quad (68)$$

Tabla 46

Cálculo de parámetro n_0 a partir de los diámetros característicos D50 Y D90

Lugar de la Muestra	D50 (mm)	D50 (m)	D90 (mm)	D90 (m)	n_0 (D50)	n_0 (D90)
P5	0.0857	0.0001	0.2512	0.0003	0.0099	0.0095
P4	0.1745	0.0002	0.8916	0.0009	0.0111	0.0118
P3	0.0809	0.0001	0.2025	0.0002	0.0098	0.0092
P2	0.2944	0.0003	0.5236	0.0005	0.0121	0.0108
P1	0.1281	0.0001	0.3427	0.0003	0.0106	0.0101

Una vez calculado el parámetro n_0 de cada uno de los puntos de muestra, se determinó los demás parámetros de la ecuación de Cowan, ecuación (31), de acuerdo a la Tabla 51 de la tesis “Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, Cantón Portoviejo Manabí” (Aguilar & Echeverría, 2018). Para n_1 se tomó en cuenta que la irregularidad es moderada, por lo tanto, el valor de n_1 es de 0.01.

En cuanto al parámetro n_2 , de acuerdo a Aguilar & Echeverría (2018) las variaciones de las secciones transversales del río Portoviejo son ocasionalmente alternantes, por lo que n_2 toma un valor de 0.005 .

Para los parámetros n_3 y n_4 , se consideraron a las fotografías que se tomaron en el proceso de toma de muestras de sedimentos que se encuentran en el ANEXO C. En cuanto al parámetro n_3 , en el punto 3 (Comunidad La Piedra) se puede observar un tronco de un árbol como una obstrucción, en el punto 1 (Entre Poza Honda y Honorato Vásquez) se puede observar que existe como obstáculos palos de madera que forman parte de la estructura de

un puente peatonal, por lo que se consideró un valor de 0.02 (Obstrucciones apreciables). En los puntos 2, 4 y 5 no se observaron obstrucciones.

Para el parámetro n_4 , de acuerdo al ANEXO C, en los puntos 1,2,3 y 5 se puede observar que existe una vegetación moderada en la planicie de inundación, que corresponde a un valor de 0.025. Mientras que en el punto 4 (Santa Ana) existe una escasa vegetación (0.01); para el parámetro m se consideró el valor de 1 para todos los puntos de muestreo, de acuerdo a Arcement y Schneider citado en (Imhoff & Trento, 2012) debido a que el flujo encauzado en los meandros es escaso, cuando existe flujo en planicie, es decir el grado de los efectos por los meandros es bajo.

Tabla 47

Parámetros de la ecuación de Cowan y n de Manning

Parámetros de Cowan	P5	P4	P3	P2	P1
n_0 (D90)	0.0095	0.0118	0.0098	0.0108	0.0101
$n1$	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
$n2$	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050
$n3$	0.0000	0.0000	0.0200	0.0000	0.0200
$n4$	0.0250	0.0100	0.0250	0.0250	0.0250
m	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
n de Manning	0.0495	0.0368	0.0692	0.0508	0.070

En la Tabla 47 se especifican los valores de los parámetros anteriormente analizados. Cabe mencionar que el parámetro m se consideró el valor de 1 para todos los puntos de muestreo, de acuerdo a Arcement y Schneider citado en (Imhoff & Trento, 2012), debido a que puede existir escaso flujo encauzado en los meandros cuando existe flujo en planicie.

En el presente proyecto, el valor de n de Manning del punto 5 (parroquia Colón) obtenido a partir de la ecuaciones de Cowan y de Strickler (D90) es de 0.0495.

Mientras que (Aguilar & Echeverría, 2018) estimaron los parámetros de la ecuación de Cowan mediante los valores establecidos en tablas (incluido el valor de n_0), para obtener un valor de n de Manning de 0.049 entre los 60-40 m s.n.m (aguas abajo y zona aledaña a la parroquia Colón). Por lo tanto, se obtuvieron valores similares de n de Manning utilizando ambos métodos.

Preparación del DEM para CAESAR Lisflood

Debido a que una pequeña parte de la parroquia Colón se encuentra fuera de la microcuenca del río Portoviejo delimitada anteriormente, se decidió utilizar el DEM que ocupa el área de la subcuenca del río Portoviejo, ver Figura 45.

Figura 45

Subcuenca del río Portoviejo Delimitada

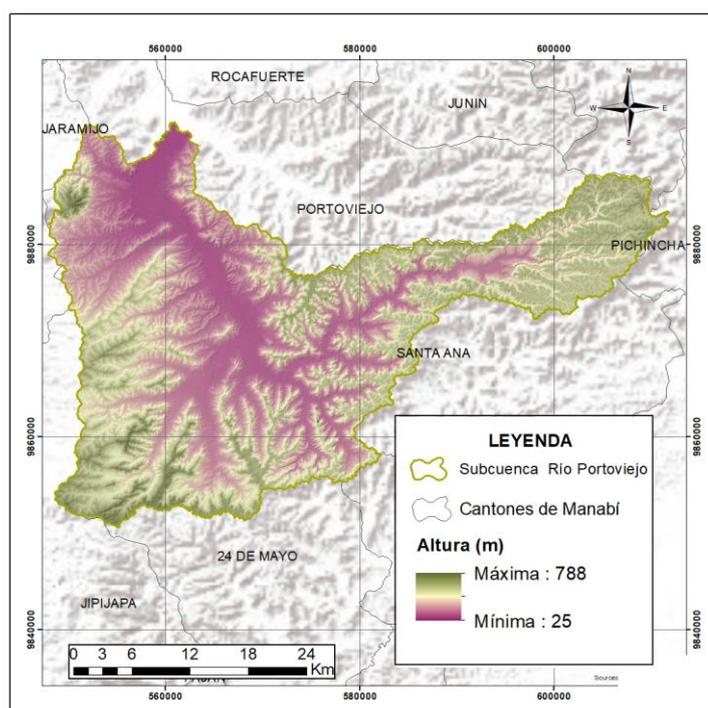
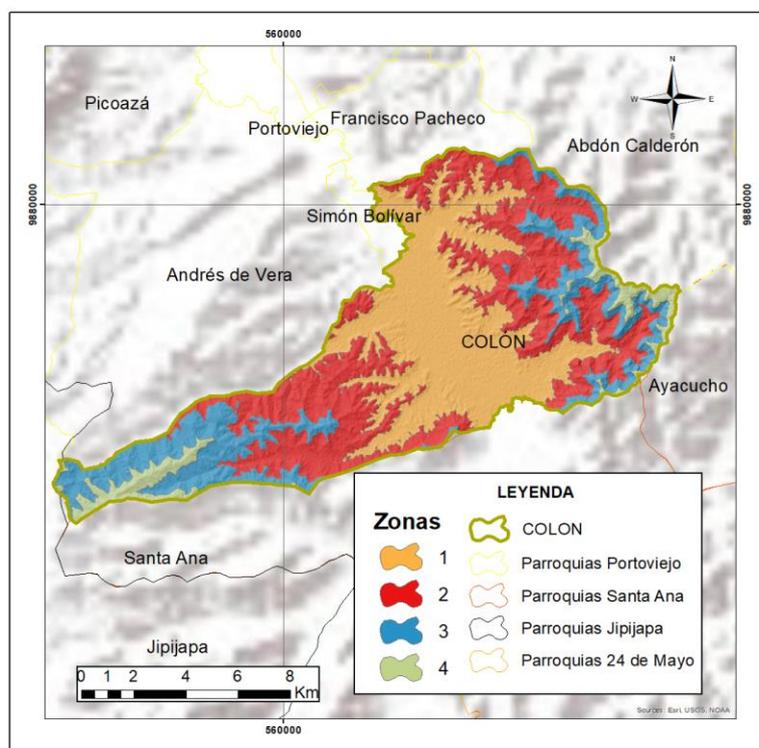


Figura 46

Modelo Digital del Terreno reclasificado en función de la altitud – Parroquia Colón



En el DEM de 12.5 m, que corresponde a la zona 1 de la parroquia Colón existen un total de 921 311 celdas; por lo que se decidió reducirlo a una resolución de 24.5 m, con un número total de celdas de 241 017 celdas, es decir con 499 columnas y 483 de celdas por lo que fue factible utilizar la resolución de 24.5 m para el proceso de simulación en CAESAR-Lisflood.

Depuración de los valores NoData del DEM en la parroquia Colón

El modelo CAESAR-Lisflood no permite que se enrute el flujo por celdas donde no existan datos (No Data), es decir aquellas que presenten un valor de -9999. Por consiguiente, se decidió eliminar estas celdas, utilizando la herramienta “Clipping” del Software PCI Geomática, dicha herramienta si funcionó para eliminar celdas sin datos (NoData, y se obtuvo un DEM, sin espacios vacíos (No Data).

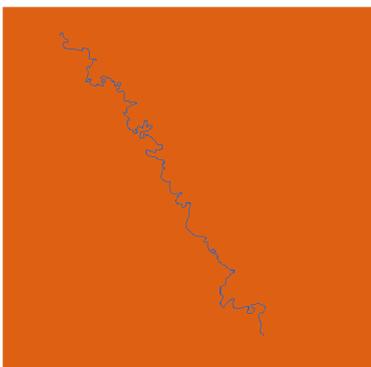
Quema del canal principal de la subcuenca del río Portoviejo

Para que la escorrentía superficial que fluye por la red de drenaje se encauce en el río se debe realizar una quema del cauce principal en el DEM , es decir se generó una capa de acumulación de flujo, que destaca la red de drenaje de la subcuenca del río Portoviejo, para ello se utilizó la metodología propuesta por (Wesseling et al., 1997) con el software QGIS. Se rasterizó el cauce principal con la herramienta Rasterize (Vector To Raster); se reclasificó el río ráster, donde el valor de 1 representa el cauce principal del río, mientras que el valor de 0 significa que por ahí no pasa el río y se lo nombró "RIORECLASS", ver Figura 47.

Una vez reclasificado el ráster del cauce principal, se obtuvo un modelo digital del terreno estandarizado, utilizando la ecuación (69), teniendo en cuenta que la mayor altura del área de estudio es 438, mientras que la menor altura es de 42 m s.n.m., ver Figura 48.

Figura 47

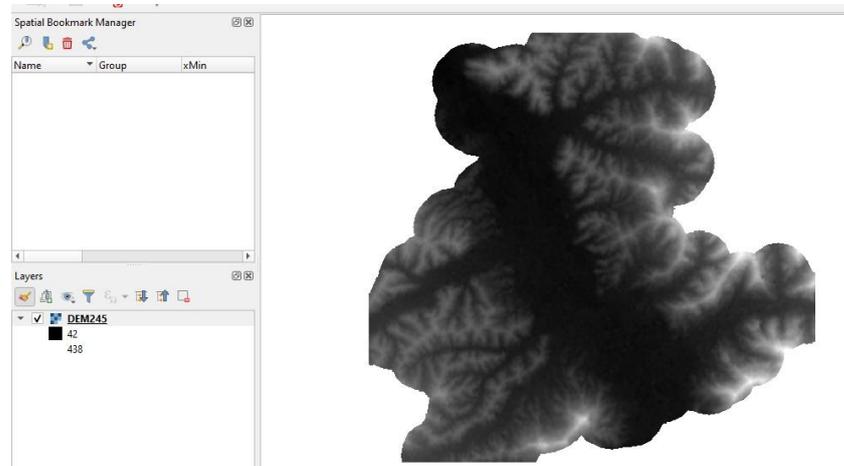
Río Portoviejo rasterizado



Ac
Ve

Figura 48

Modelo Digital del Terreno estandarizado



$$\text{stddem} = \frac{\text{DEM} - 42}{438 - 42} \quad (69)$$

Para quemar el río se utilizó la ecuación (70)

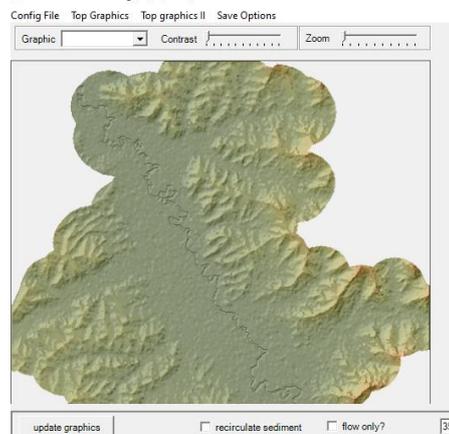
$$\text{stdemburned} = \text{stddem} - \text{RIORECLASS} \quad (70)$$

Para obtener el Modelo Digital del Terreno con el río quemado ver Figura 49, se utiliza la ecuación (71)

$$\text{DEMBurned} = \text{stdemburned} - \text{DEM} \quad (71)$$

Figura 49

Modelo Digital del terreno quemado o resaltado el río Portoviejo en CAESAR-Lisflood



Finalmente, el DEMBurned, se transformó a formato ASCII con el nombre de “DEMFINALQ.txt” para que sea compatible con el modelo de CAESAR Lisflood; ver ANEXO D.

Creación del DEM de lecho de río y transformación a formato ASCII

De acuerdo a Pavón (2017), también se necesita generar un DEM de lecho rocoso, para determinar el límite de erosión y se debe aplicar la ecuación (72) utilizando la herramienta Raster Calculator, para obtener un DEM con 2 metros menos.

$$DEM_{lecho} = DEM_{Burned} - 2 \quad (72)$$

Finalmente, se transformó el archivo ráster resultante a formato ASCII, con el nombre de “LechorocosoFQ.txt”, ver ANEXO D.

Preparación de archivos hidrometeorológicos

Archivos de precipitación .txt

Se generaron 5 archivos de precipitación en formato .txt, uno para cada período de retorno (10,25,50,100 y 500 años), en los que se encuentran los datos de precipitaciones diarias desde el año 1965 al 2012 de la estación Portoviejo UTM (M005) proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) a los cuales se los dividió para 24 horas para obtener precipitaciones en unidades de mm/h, y con el objetivo de que en el modelamiento con CAESAR Lisflood -Catchment Mode se obtengan las áreas y alturas de inundaciones a diferentes períodos de retorno, se decidió reemplazar algunos de los valores históricos de precipitaciones de los meses más lluviosos que son : enero, febrero, marzo y abril, por valores de precipitaciones máximas probables a los diferentes períodos de retorno, calculadas anteriormente por el método de Gumbel, ver Figura 50, todos los archivos .txt de precipitaciones se encuentran en el ANEXO D.

En la base de datos de la estación Portoviejo UTM (M005) de precipitaciones diarias existían datos vacíos, por lo que se decidió rellenarlos utilizando el método de regresión

lineal, usando estaciones que se encuentren a menos de 50 km, de acuerdo a la norma de la Guía de prácticas meteorológicas de la World Meteorological Organization.

Figura 50

Archivo .txt que contiene los valores de precipitaciones históricas y máximas probables

(Período de retorno 25 años)

```

PMP2515D.txt: Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver
0
0.025
0
0
0
0
0
0
0
0
0.133333333
0.370833333
0.770833333
0.245833333
0.041666667
0.054166667
0.016666667
0.066666667
0.025
0
0
0.041666667
0
0.133333333
0.0375
  
```

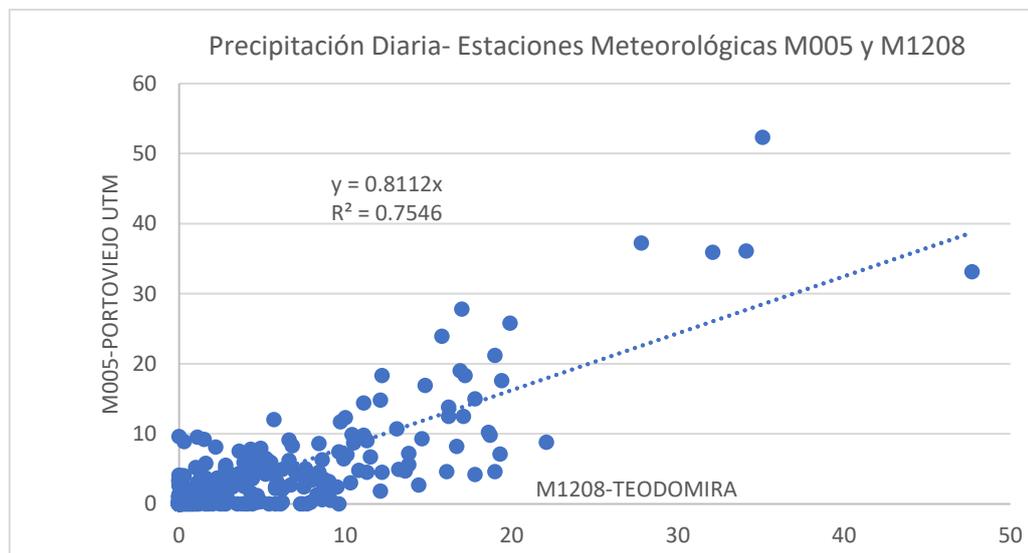
Algunos datos de la estación Portoviejo UTM (M005) fueron rellenados con la estación Teodomira (M1208), existiendo una distancia entre ellas de 15.88 km, mientras que otros datos estación Portoviejo UTM(M005), se los rellenó utilizando la estación Sancán (M449), que se encuentra a 28.05 km.

Antes de rellenar los datos se realizó un análisis del coeficiente de correlación R^2 entre las estaciones meteorológicas involucradas, y que de acuerdo (Aguilar & Echeverría, 2018), en hidrología se admiten aceptables las series que se encuentran entre $-0.7 \leq R \leq 0.7$.

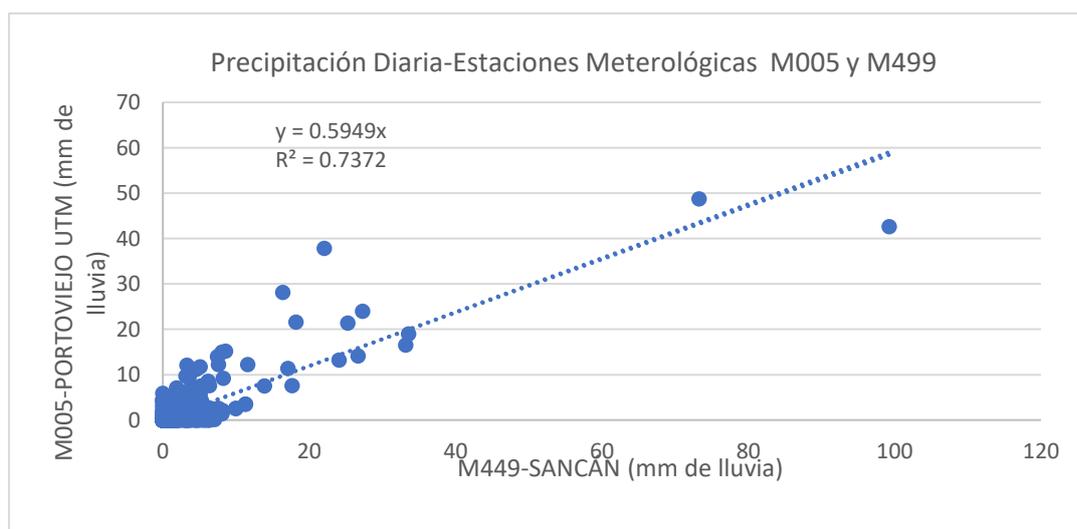
Por lo tanto, como se puede observar en la Figuras 51 y 52, el coeficiente R^2 el coeficiente de correlación de los datos de precipitación diaria entre la estación M005 y M1208 es de 0.75, mientras que entre la estación M449 y la estación M005 el coeficiente de correlación resultó ser de 0.73, por lo que fue factible rellenar los datos vacíos de precipitación diaria de la estación M005 con estas dos estaciones meteorológicas.

Figura 51

Curva de tendencia entre las estaciones meteorológicas Portoviejo UTM (M005) y Teodomira (M1208)

**Figura 52**

Curva de tendencia entre las estaciones meteorológicas Portoviejo UTM (M005) Y Sancán (M449)



Archivo de descarga.txt

Se crearon 5 archivos en formato .txt, uno para cada período de retorno (10, 25, 50, 100, 500 años), que contienen los valores de descarga. En la primera columna se encuentran los números de paso de tiempo o iteraciones.

En la segunda columna se encuentran los valores de caudales diarios en m^3/s desde el año 1962 al 2012, los cuales fueron obtenidos de las estaciones hidrológicas H267 (Portoviejo en Santa Ana) y HA2D (Portoviejo en Picoazá) proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología) en base de datos de Excel y de los anuarios hidrológicos; del mismo modo se decidió reemplazar los valores de caudales diarios históricos de los meses con mayores probabilidades de crecidas, por los valores de caudales máximos probables a distintos períodos de retorno calculados anteriormente con el software HEC-HMS, con el objetivo de realizar el modelamiento en CAESAR Lisflood en su modo de alcance (Reach Mode) y obtener áreas y alturas de inundación a los diferentes períodos de retorno, ver Figura 53.

Finalmente, desde la tercera columna a la 14 corresponden a los valores de los tamaños granulométricos de los sedimentos. Sin embargo, en el presente proyecto solo se trabajó el archivo .txt con los datos de caudales diarios históricos y máximos probables, por lo que los valores que corresponden a los tamaños granulométricos se colocaron con 0. Esto es debido a que estos valores corresponden a las fracciones granulométricas en cada paso de tiempo y esta información no se tiene disponible. Por tanto, al contar con las fracciones granulométricas obtenidas a partir de la curva granulométrica en el punto 5 (Aledaño a la parroquia Colón), estos datos se introdujeron en la pestaña sedimentos que se especifica más adelante. Los 5 archivos .txt de descarga se encuentran en el ANEXO D.

Además, se realizó un análisis del coeficiente de correlación R^2 , entre las estaciones hidrológicas H267 y HA2D, como se puede observar en la Figura 54, teniendo un coeficiente

de correlación de 0.84, por lo que es factible usar los datos diarios de caudales diarios de las dos estaciones hidrológicas.

Figura 53

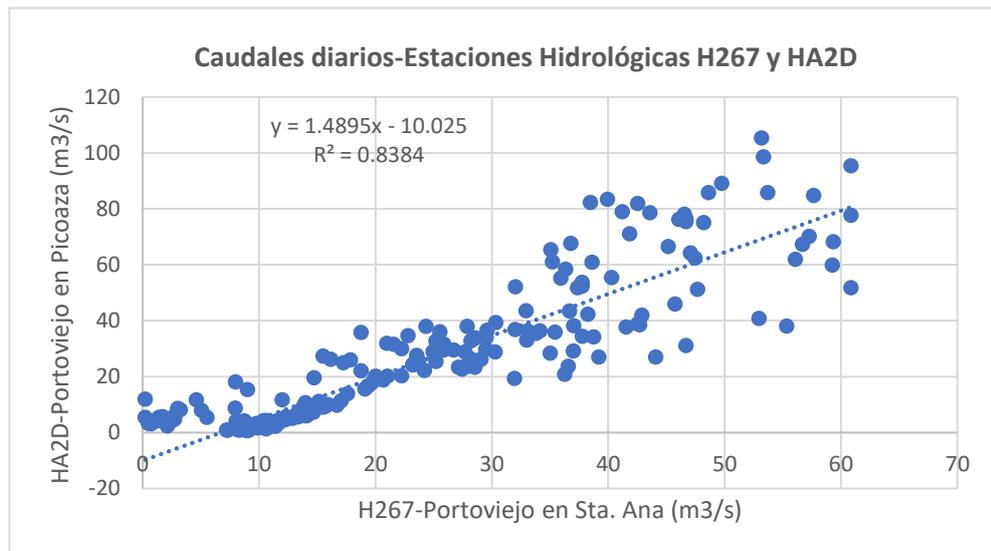
Archivo .txt que contiene los valores de caudales en m³/ históricos y máximos probables (Período de retorno 25 años)

Caudales25.txt: Bloc de notas

	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
174	5.17	0	0	0	0
175	1.59	0	0	0	0
176	2.33	0	0	0	0
177	3.07	0	0	0	0
178	2.60	0	0	0	0
179	2.33	0	0	0	0
180	1.73	0	0	0	0
181	1.34	0	0	0	0
182	0.92	0	0	0	0
183	0.92	0	0	0	0
184	0.92	0	0	0	0
185	1.67	0	0	0	0
186	1.19	0	0	0	0
187	11.72	0	0	0	0
188	13.41	0	0	0	0
189	5.01	0	0	0	0
190	544.57	0	0	0	0
191	53.21	0	0	0	0
192	4.10	0	0	0	0
193	4.43	0	0	0	0
194	3.69	0	0	0	0

Figura 54

Curva de tendencia entre las estaciones Hidrológicas H267 (Portoviejo en Santa Ana) y HA2D (Portoviejo en Picoazá)



Introducción de información en CAESAR Lisflood

A continuación, se detalla la información que se introdujo en cada una de las pestañas en CAESAR-Lisflood.

Files (Archivos)

En esta pestaña se cargaron los archivos del DEM con el cauce principal quemado (DEM Data File) y su respectivo DEM en lecho rocoso (Bedrock data File), ambos en formato ASCII, los cuales fueron sometidos a un proceso de resamplado, es decir se redujo la resolución del DEM de 12.5 m a una resolución de 24.5 m, ver Tabla 48.

Tabla 48

Modelo Digital de Elevación y su respectivo DEM en lecho rocoso

Archivo requerido	Nombre del Archivo
DEM Data File	“DEMFINALQ.txt”
Bedrock data File	“LechorocosoFQ.txt”

Además, se configuró el tiempo de guardado (Save File Every mins) de los archivos que se generen de profundidad del agua (waterdepth), 10080 minutos, decir cada 7 días, valor recomendado por (Pavón, 2017).

También se configuró el almacenamiento de animación de imágenes (Generate Google Earth Animation), generados del modelo con una secuencia y un tiempo determinado. Para cada imagen de animación se estableció de igual manera un tiempo de 10080 minutos, es decir cada 7 días de la corrida del modelo se generaron cada una de las imágenes de animación del modelo.

Numérica

En esta pestaña se configuró: el paso de tiempo mínimo (Min Time Step) y el paso de tiempo máximo (Max time Step), con valores de 0 y 3600 segundos (1 hora) respectivamente. Además, el inicio del tiempo de ejecución del modelo (run start time) se

estableció con un valor de 0 horas, mientras el tiempo de ejecución máximo (max run duration) se estableció un valor de 350 000 horas, con el objetivo de que todos los datos de lluvia y caudales se han corridos completamente.

Sedimentos

En la pestaña de sedimentos se introdujeron los valores de los tamaños de los granos y su proporción en porcentaje que se obtuvieron a partir del análisis granulométrico en el punto 5 del río Portoviejo (punto aledaño a la parroquia Colón), ver Tabla 49. En cuanto a los tamaños de los granos para el modelamiento no se tomaron en cuenta al tamaño de los granos menores a 0.075 mm, es decir a partículas finas que de acuerdo al análisis granulométrico realizado corresponde a 179.59 gramos. Por lo tanto, el tamaño de los granos solamente se consideró a partir de 0.075 mm hasta 6.3 mm de tamaño de malla, que corresponde a una masa de 233.71 gramos.

Tabla 49

Tamaño de las partículas y su proporción o porcentaje retenido

Tamaño en m	% retenido (proporción)
0.000075	0.601771
0.000150	0.220059
0.000250	0.145950
0.000425	0.014206
0.000600	0.004921
0.000850	0.006718
0.002000	0.004749
0.004750	0.000171
0.006300	0.001455
Total	1.000000

El modelo de transporte de sedimentos que se seleccionó es el modelo de Wilcock and Crowe en el que se considera: el esfuerzo cortante de 5 Pa (Max Velocity used to calc

Tau from vel) que se define como aquella fuerza necesaria para iniciar el movimiento de las partículas de sedimentos, un límite máximo de erosión de 0.02 recomendado para la resolución del DEM (24.5 m).

Hidrología

Para el modo de captación “Catchment Mode”, se cargaron los archivos de precipitación .txt (RainFull Data File) en los que se encuentran las precipitaciones históricas juntamente con las precipitaciones máximas probables a diferentes períodos de retorno en unidades de mm/hr, por lo que se utilizó un paso de tiempo de 60 minutos (RainFull data file time step). El parámetro m, parámetro que controla de manera exponencial la subida y caída del déficit de humedad del suelo, se puso un valor recomendado por el Prof. Coulthard, autor de CAESAR-Lisflood.

Para el modo de alcance o “Reach Mode”, se cargaron los archivos en formato .txt que contiene los valores de caudales máximos diarios históricos juntamente con los caudales máximos probables en m^3/s para cada período de retorno.

Para subir este archivo es importante establecer las coordenadas X (Columna) e Y (Fila) del punto de entrada del agua, para obtenerlas se utilizó el software RasterEdit, en el que se observó las coordenadas X e Y del punto de entrada del agua son 343 y 435 respectivamente, es decir en este punto el agua va iniciar a llenarse cuando empiece la simulación en el modo de alcance, con los datos de caudales en m^3/s . Al tratarse de valores de caudales diarios se utilizó un paso de tiempo (data time step) de 1440 minutos es decir un día.

Vegetación

En la pestaña vegetación, se llenaron 3 parámetros, cuyos valores son recomendados por el Prof. Coulthard, autor de CAESAR-Lisflood. El primer parámetro es “Vegetation crit shear” que de acuerdo a Pavón (2017) es un coeficiente que indica la resistencia de la vegetación al ser arrastrada por el agua, un valor bajo de este parámetro

indica que la vegetación es arrastrada fácilmente es decir tiene un poca resistencia, mientras que si el valor es alto la vegetación tiene una mayor resistencia. El valor recomendado por el Prof. Coulthard es de 189 debido a que en la zona de estudio la vegetación es variada.

El segundo parámetro es Grass maturity o la tasa de crecimiento que de acuerdo a Pavón (2017) es la tasa o velocidad de crecimiento cuando la vegetación alcanza la madurez, debido a que no existe estudios sobre esta tasa de crecimiento en la vegetación en la subcuenca del río Portoviejo, se decidió tomar un valor de tasa de crecimiento de la vegetación de 5 años, valor recomendado por el Prof. Coulthard. El último parámetro es la proporción de erosión que puede ocurrir cuando la vegetación alcanza su madurez, debido a que se desconoce este comportamiento de la vegetación, se tomó el valor recomendado por el autor de CAESAR-Lisflood de 0.1, esto significa que cuando la vegetación llegue a su madurez se producirá un 10 % de erosión.

Procesos de Pendiente

En cuanto a los parámetros de los procesos de pendiente, se tomaron los valores recomendados por el autor de CAESAR-Lisflood. El primero de ellos es la velocidad de fluencia o tasa de fluencia, que de acuerdo a Pavón (2017) permite que se produzca la erosión en pendientes, el valor recomendado por el Prof. Coulthard es de 0.0025.

El segundo parámetro de pendiente es "Slope failure threshold" que de acuerdo a Pavón (2017), indica el ángulo expresado en grados por encima del cual pueden ocurrir deslizamientos, el valor que recomienda el Prof. Coulthard es de 45 °. Finalmente, el tercer parámetro es la tasa de erosión del suelo, de acuerdo a Pavón (2017) no existe algún valor sugerido por lo que se tomó una tasa de erosión del suelo de 0.

Modelo de flujo

Se configuró el caudal mínimo para calcular la profundidad (Min Q for Depth calc) que se define como el umbral para que CAESAR-Lisflood calcule una profundidad de agua. De acuerdo a la recomendación por el Prof. Coulthard, se define por:

$$\text{Min } Q = 0.1 \text{ Tamaño de celda} \quad (73)$$

El DEM que se utilizó es de 24.5 m por lo que el caudal mínimo (Min Q) es de 0.245 m³/s. Además, también se definió un caudal máximo para que CAESAR-Lisflood establezca un límite de profundidad, se recomienda un valor grande, por lo que se estableció un valor de 1000 m³/s

Se estableció la profundidad en la que CAESAR-Lisflood empieza a producir erosión (Water Depth threshold which erosion will happen), el valor recomendado por el Prof. Coulthard es de 0.01 m, es decir que a partir de una profundidad de flujo de 1 cm el modelo ya empezará a calcular la erosión. Se determinó la pendiente de las celdas (Slope for Edge cells), que está relacionado con la pendiente en porcentaje del cauce principal del río Portoviejo que una pendiente moderada de 0.06 %.

Además, se determinó la tasa de evaporación a partir del método de Thornthwaite. Para ello, se calculó la temperatura mensual a partir de datos de la temperatura media de la estación meteorológica Portoviejo UTM (M005) desde el año 1990 al 2012. Ver Tabla 50.

De acuerdo a la metodología de Thornthwaite citado en (J. Sánchez, 2016), se emplea la ecuación (74) para calcular un índice de calor mensual (i), donde t son las temperaturas medias mensuales, y la ecuación (75) para calcular un índice de calor anual (I), que resulta de la suma de los índices de calor mensual.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (74)$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} i \quad (75)$$

A partir del índice de calor anual (I) y las temperaturas medias anuales (t), se calcula la evapotranspiración sin corregir, que se define como se presenta en la siguiente ecuación:

$$ETP_{sincorr.} = 16 \left(\frac{10 t}{I} \right)^a \quad (76)$$

Donde a se define de acuerdo a la ecuación (77):

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} + 0.017925 I + 0.49239 \quad (77)$$

Finalmente se calcula la Evapotranspiración Potencial corregida, utilizando la ecuación (78)

$$ETP_c = ETP_{sincorr.} \frac{N d}{12 \cdot 30} \quad (78)$$

Donde:

N: Número máximo de horas de sol, en función del mes y la latitud

d: Número de días del mes

Los valores de N, fueron obtenidos a partir de la Tabla Ap. 4 que se encuentra en el informe "Concepto de Evapotranspiración" realizado por (J. Sánchez, 2016). Para la zona de estudio se tuvo que realizar una interpolación lineal y obtener N en función del mes y la latitud de Colón Portoviejo, ver Tabla 50.

Tabla 50

Variables para calcular la evapotranspiración (ETP)

Mes	Temperatura Media	Índice de calor	ETP SIN CORREGIR	N	ETP (cm/mes)	ETP (m/día)
Enero	26.35	12.38	13.19	12.15	13.79	0.0044
Febrero	26.36	12.39	13.20	12.15	12.47	0.0045
Marzo	26.82	12.72	14.02	12.10	14.61	0.0047
Abril	26.88	12.76	14.13	12.08	14.22	0.0047
Mayo	26.36	12.39	13.20	12.05	13.71	0.0044

Mes	Temperatura Media	Índice de calor	ETP SIN CORREGIR	N	ETP (cm/mes)	ETP (m/dia)
Junio	25.36	11.69	11.54	12.03	11.58	0.0039
Julio	24.87	11.35	10.79	12.03	11.18	0.0036
Agosto	24.79	11.29	10.67	12.05	11.07	0.0036
Septiembre	24.98	11.42	10.95	12.08	11.03	0.0037
Octubre	25.00	11.43	10.98	12.12	11.46	0.0037
Noviembre	25.30	11.64	11.45	12.15	11.59	0.0039
Diciembre	25.97	12.11	12.54	12.17	13.14	0.0042

De acuerdo a la Tabla 50, el valor de Evapotranspiración Potencial media es de 0.049 m/dia.

El número de Froude es otro parámetro que se consideró, (Aguilar & Echeverría, 2018) obtuvieron valores de número de Froude entre 0.1 a 0.8, que son menores a 1 es decir se trata de un flujo en régimen subcrítico. Para el modelamiento en CAESAR Lisflood se consideró un número de Froude de 0.7. El valor de n de Manning que se obtuvo a partir del método de Cowan y Strickler (D90) es de 0.0495

Capítulo V

Resultados y análisis de las zonas de inundación obtenidas mediante el modelo Autómata Celular Caesar- Lisflood y comparación con los resultados de HEC-RAS

Una vez corrido el modelo bidimensional de evolución del paisaje CAESAR-Lisflood en sus dos modos (Catchment Mode y Reach Mode), se obtuvieron las áreas de inundación y alturas de agua que podrían afectar a la parroquia Colón del cantón Portoviejo en el caso de que se presenten precipitaciones máximas o caudales máximos a diferentes períodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años), además se realizó un análisis de las áreas de afectación a las edificaciones por el flujo de agua. Estos resultados se compararon con los que obtuvieron (Aguilar & Echeverría, 2018) en su tesis : “Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, cantón Portoviejo-Manabí” en la cual se utilizó el modelo unidimensional HEC-RAS. Los mapas de zonas de inundación que realizaron (Aguilar & Echeverría, 2018) se encuentran en el capítulo VIII: ANEXOS Y MAPAS.

Para realizar la comparación se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) que es una técnica estadística con la cual se puede comparar los valores medios que toma una variable dependiente, de acuerdo a la variación de variables independientes, también denominados factores (Ordaz et al., 2017). Es decir, permite determinar si el cambio de estas variables independientes, tienen un efecto estadísticamente significativo en la variable dependiente. En el presente estudio de investigación, las variables dependientes son las áreas y alturas de inundación, mientras que la variable independiente es el tipo de modelo o grupos (CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Catchment Mode y Reach Mode y HEC RAS)

Para realizar el análisis de la varianza (ANOVA) de un factor, se utilizó la suma total de los cuadrados (SCT), como se presenta en la siguiente ecuación

$$SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = SCD + SCE \quad (79)$$

Donde:

y_i : Valores reales de la variable dependiente (áreas de inundación, alturas del agua)

\bar{y} : Promedio de la variable dependiente

SCD : Suma total de cuadrados dentro de cada uno de los grupos

SCE : Suma total de cuadrados entre cada grupo

La suma total de Cuadrados Dentro de cada uno de los grupos (SCD) se define de acuerdo a la ecuación (80)

$$SCD = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (80)$$

Donde:

y_i : Valores reales de la variable dependiente (áreas de inundación, alturas del agua)

\hat{y}_i : Promedio de cada grupo de la variable dependiente

La suma total de cuadrados entre cada grupo (SCE), matemáticamente se expresa de acuerdo a la ecuación (81).

$$SCE = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (81)$$

De acuerdo a Amat (2016) los grados de libertad de SCT, es igual al número total de observaciones menos uno, es decir (N-1). Los grados de libertad de SCE se define como (k-1) donde k es el número de niveles del factor. Mientras que los grados de libertad de SCD es igual a (N-k). A partir de relación entre la suma de cuadrados y su respectivo grado de libertad, se obtiene los cuadrados medios para cada suma de cuadrados

El F_c (F calculado) se obtiene a partir del cociente entre los cuadrados medios de SCE Y de los cuadrados medios de SCD, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{\text{Cuadrados medios entre grupos}}{\text{Cuadrados medios dentro de grupos}} \quad (82)$$

Se establecen dos hipótesis, la hipótesis nula (H_0), donde se asume que todas las medias son iguales en cada uno de los grupos; y una hipótesis alternativa (H_1) en la que se asume que al menos dos medias difieren de forma significativa. Si F_c es menor que F de Fisher (F de Tabla) se acepta H_0 , mientras que si es mayor se rechaza H_0 .

Áreas y alturas de inundación

Se realizaron los mapas de inundación utilizando el modo de alcance (Reach Mode) y modo de captación (Catchment Mode) para cada período (10, 25, 50, 100 y 500 años) los cuales se encuentran en el ANEXO E.

Áreas y alturas de inundación utilizando el modo de alcance (Reach Mode) de CAESAR-Lisflood

En las Figuras 55, 56 y 57 se presentan los mapas de inundación con sus respectivas alturas de agua (mínima y máxima) a períodos de retorno 10, 50 y 500 años respectivamente.

En la Tabla 51 se presentan los valores de las áreas que se inundarían a los diferentes períodos de retorno, a partir del modo de alcance (Reach Mode) del modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en el que se introdujeron los valores históricos de caudales diarios juntamente con los caudales máximos calculados con el software HEC-HMS. Es importante mencionar que para obtener el área de la zona afectada se restó el valor del área inundada menos el valor del área del río que es de 0.55 km².

Figura 55

Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 10 años Reach Mode CAESAR Lisflood

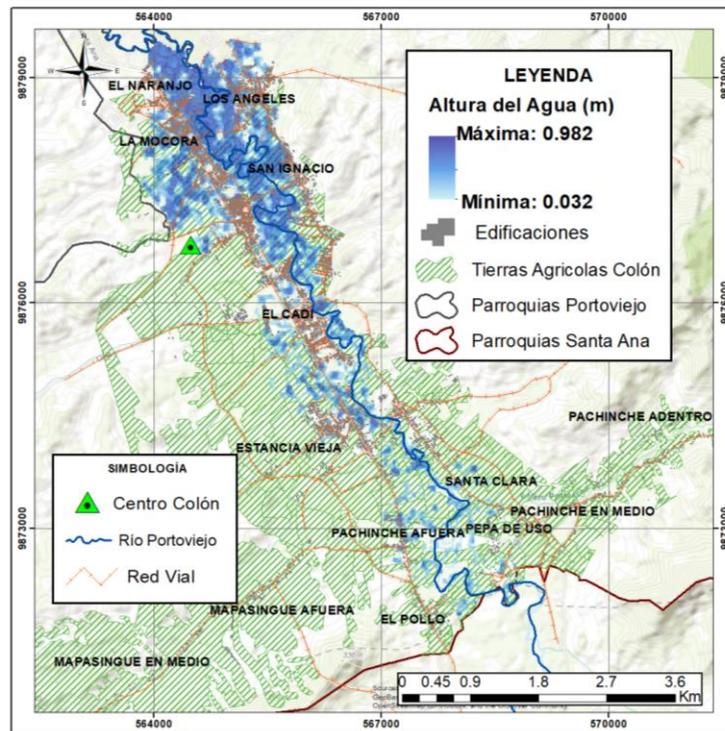


Figura 56

Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 50 años Reach Mode CAESAR Lisflood

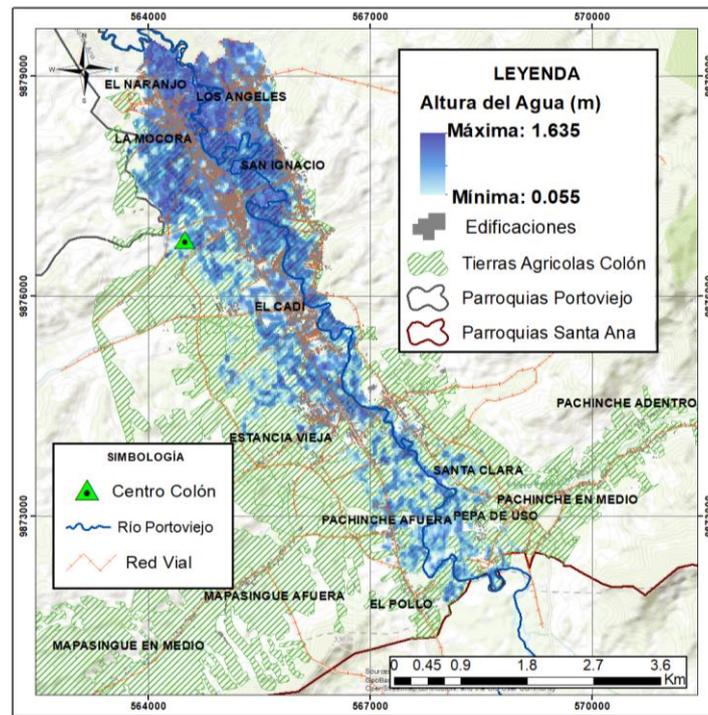
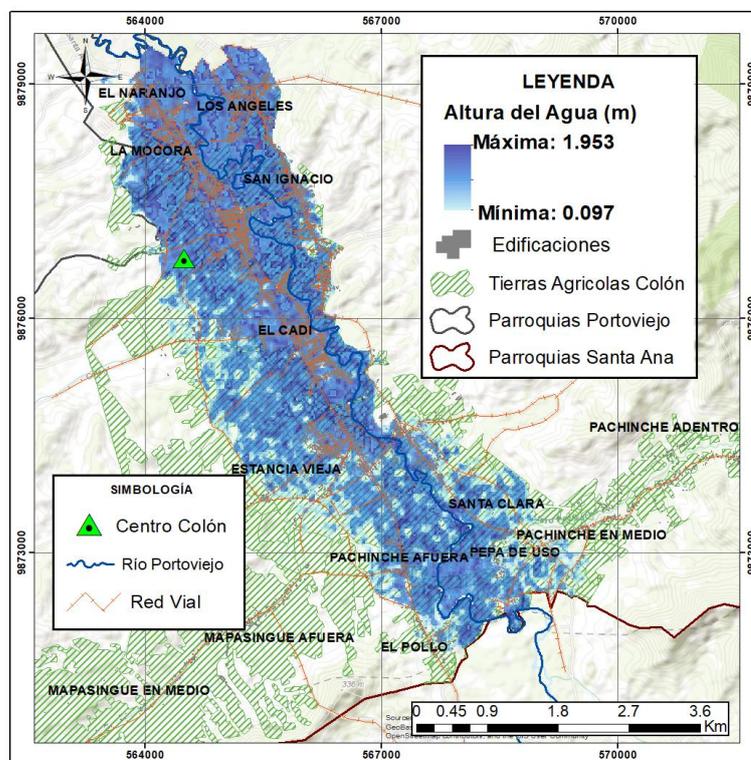


Figura 57

Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 500 Años Reach Mode CAESAR-Lisflood



En la Tabla 51 se presentan los valores de las áreas que se inundarían a los diferentes períodos de retorno, a partir del modo de alcance (Reach Mode) del modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en el que se introdujeron los valores históricos de caudales diarios juntamente con los caudales máximos calculados con el software HEC-HMS. Es importante mencionar que para obtener el área de la zona afectada se restó el valor del área inundada menos el valor del área del río que es de 0.55 km².

Tabla 51

Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el Modelo Bidimensional CAESAR-Lisflood-Reach Mode

Período de retorno(años)	Área Inundada (km ²)	Área del río (km ²)	Área Afectada (km ²)
10	6.08	0.55	5.53

25	8.82	0.55	8.27
50	10.32	0.55	9.77
100	13.03	0.55	12.48
500	16.04	0.55	15.49

Tabla 52

Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el modelo Unidimensional HEC-RAS

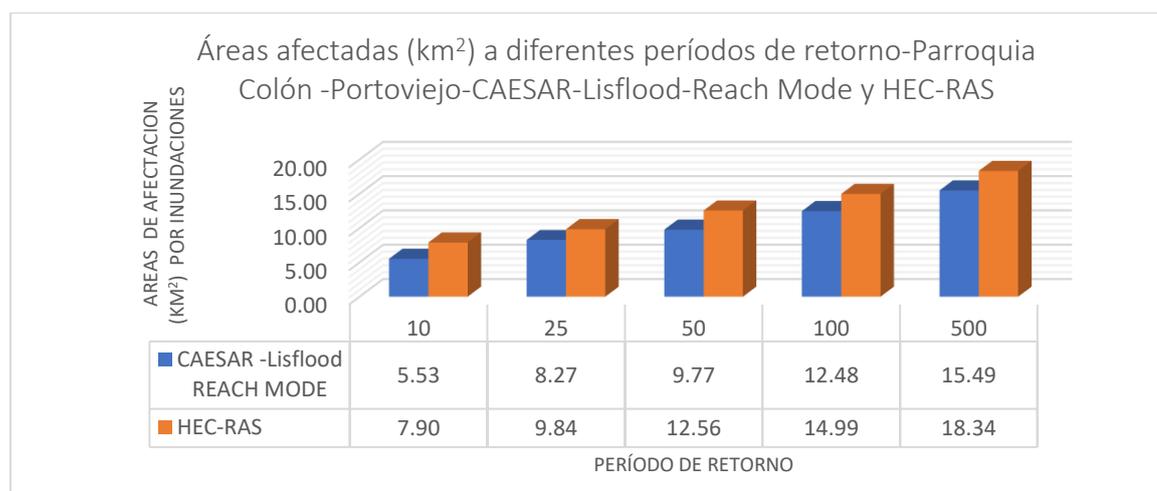
Período de retorno(años)	Área Inundada (km ²)	Área del río (km ²)	Área Afectada (km ²)
10	8.45	0.55	7.90
25	10.39	0.55	9.84
50	13.11	0.55	12.56
100	15.54	0.55	14.99
500	18.89	0.55	18.34

Nota. Recuperado de Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón,

Cantón Portoviejo -Manabí , por (Aguilar & Echeverría, 2018)

Figura 58

Comparación de las áreas afectadas (km²) obtenidas a partir de CAESAR – Lisflood - Reach Mode y HEC-RAS



Los valores de las áreas inundables y afectadas que obtuvieron (Aguilar &

Echeverría, 2018) utilizando el modelo unidimensional HEC-RAS se presentan en la Tabla 52.

En la Figura 58 se presenta un gráfico de barras donde se puede apreciar de una mejor manera la diferencia de áreas afectadas utilizando el Modo de Alcance (Reach Mode) de CAESAR-Lisflood y HEC-RAS.

Al comparar las áreas de afectación que se determinaron con el modo de alcance (Reach Mode) del modelo bidimensional CAESAR-Lisflood, con las que obtuvieron (Aguilar & Echeverría, 2018), quienes realizaron el modelamiento de inundación con el modelo unidimensional HEC-RAS, se puede observar que a partir del modelo de autómatas celulares CAESAR-Lisflood se determinaron áreas de afectación un poco más pequeñas. Así, por ejemplo, para un período de retorno de 10 años en el modo de alcance (Reach Mode) de CAESAR-Lisflood, 5.53 km² resultó ser el área de inundación, mientras que con el modelo HEC-RAS es de 7.90 km². Del mismo modo, para un período de retorno de 100 años, la diferencia de áreas de inundación obtenidas entre los dos modelos es de 2.51 km², con una menor área a partir del modo de Alcance (Reach Mode) de CAESAR Lisflood.

Las alturas máximas y mínimas, correspondientes a cada período de retorno, obtenidas con CAESAR Lisflood (Reach Mode) y HEC-RAS, se encuentran en la Tabla 53.

Tabla 53

Alturas máximas y mínimas de agua (CAESAR-Lisflood-Reach Mode y HEC-RAS)

Período de retorno	CAESAR-Lisflood- Reach Mode		HEC-RAS	
	Altura mínima	Altura máxima	Altura mínima	Altura máxima
10	0.032	0.982	0.11	1.06
25	0.038	1.335	0.14	1.44
50	0.055	1.635	0.18	1.64
100	0.050	1.792	0.24	2.05
500	0.097	1.953	0.62	2.44

Áreas y alturas de inundación utilizando el modo de alcance (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood

Se determinaron las áreas afectadas por inundación, utilizando el modo de captación (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood. Para ello se utilizó la serie de datos que contiene los valores precipitaciones históricas de la estación Portoviejo UTM (M005), juntamente con los valores de precipitaciones máximas obtenidas a partir de la distribución de Gumbel. En la Tabla 54 se presentan el área inundada y área afectada por las precipitaciones máximas, tomando en consideración que el río tiene un área de influencia de 0.55 km².

En la Tabla 55 se presentan las alturas máximas y mínimas obtenidas con el modo de captación (Catchment Mode) y HEC-RAS. Además, se realizaron los respectivos mapas de inundación a partir del modo de captación (Catchment Mode) del modelo bidimensional CAESAR-Lisflood, en los que se presenta el área de zona inundada y la variación de alturas de agua por cada período de retorno.

Tabla 54

Áreas de las zonas inundadas y afectadas a diferentes períodos de retorno, utilizando el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood-Catchment Mode

Período de retorno(años)	Área Inundada (km²)	Área del río (km²)	Zona Afectada (km²)
10	8.53	0.55	7.98
25	10.77	0.55	10.22
50	12.17	0.55	11.62
100	14.10	0.55	13.55
500	15.32	0.55	14.77

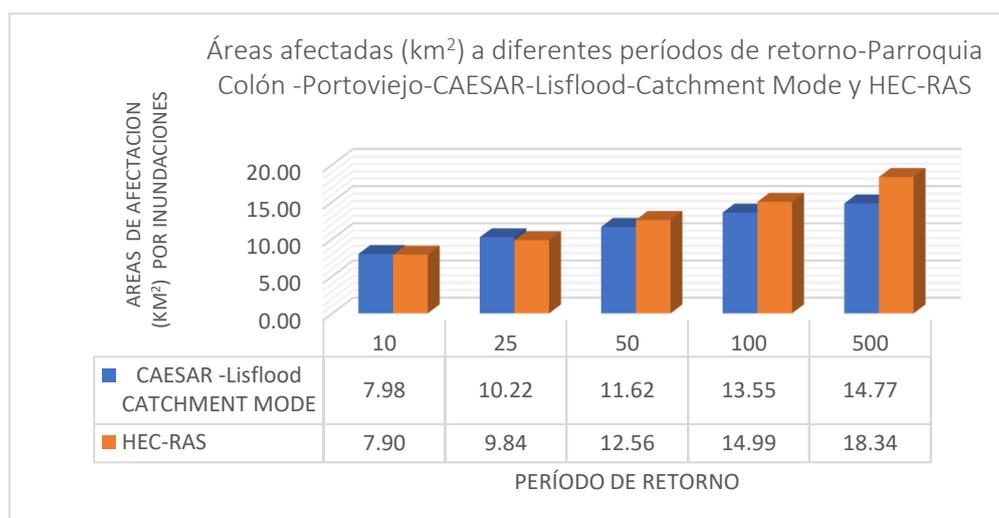
Tabla 55

Alturas máximas y mínimas de agua (CAESAR-Lisflood-Catchment Mode y HEC-RAS)

Período de retorno	CAESAR-Lisflood- Catchment Mode		HEC-RAS	
	Altura mínima	Altura máxima	Altura mínima	Altura máxima
10	0.956	0.035	1.06	0.11
25	1.253	0.046	1.44	0.14
50	1.586	0.050	1.64	0.18
100	1.654	0.054	2.05	0.24
500	1.885	0.092	2.44	0.62

Figura 59

Comparación de las áreas afectadas (km²) obtenidos a partir de CAESAR-Lisflood-Catchment Mode y HEC-RAS



De acuerdo a la Figura 59, a períodos de retorno de 10 y 25 años, las áreas obtenidas utilizando el modo de captación (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood son ligeramente más grandes, que las obtenidas con HEC-RAS, sin embargo, las diferencias se acortan a comparación con el modo de alcance (Reach Mode). Para tiempo de retorno de 10 años se obtuvieron áreas de 7.98 km² y 7.90 km² respectivamente, es decir existe una diferencia de 0.98 km², mientras que la diferencia de HEC-RAS con el modo de alcance (Reach Mode) a un período de retorno de 10 años era de 2.37 km². En las Figuras 60, 61 y 62 se presentan los

mapas de inundación con sus respectivas alturas de agua (mínima y máxima) a períodos de retorno 10, 50 y 500 años respectivamente.

Figura 60

Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 10 Años Catchment Mode CAESAR-

Lisflood

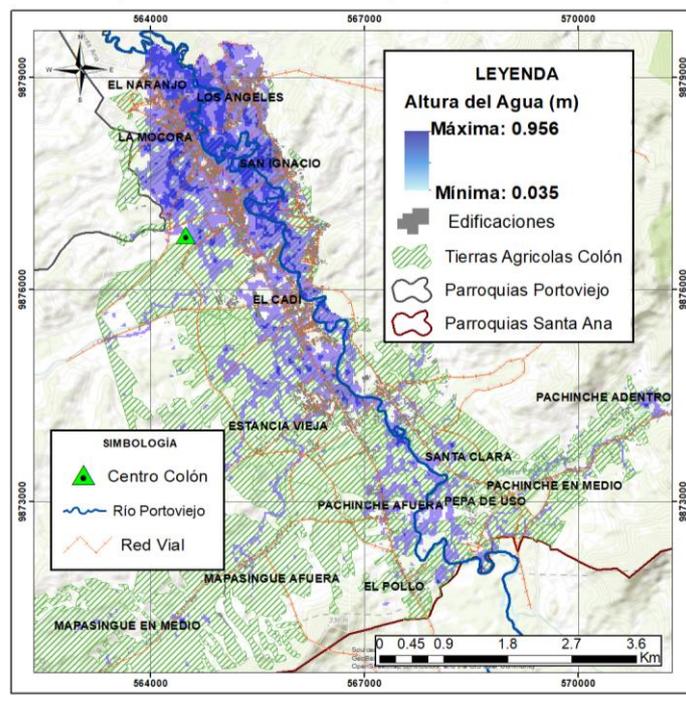


Figura 61

Zonas posibles de inundación en la parroquia Colón-PR 50 años Catchment Mode CAESAR-

Lisflood

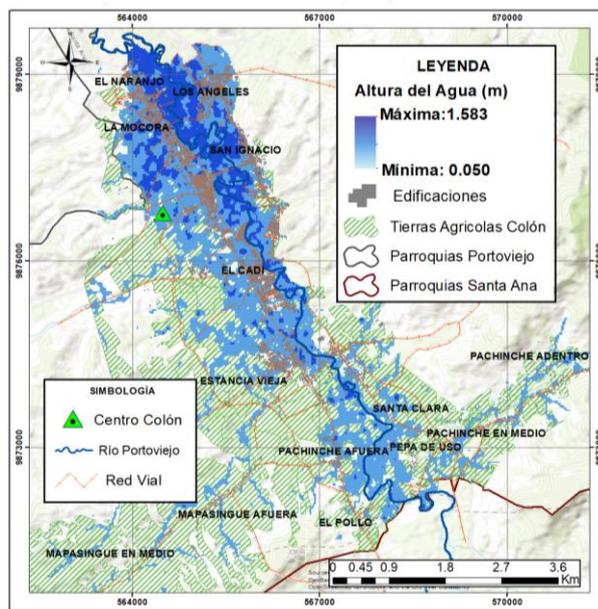
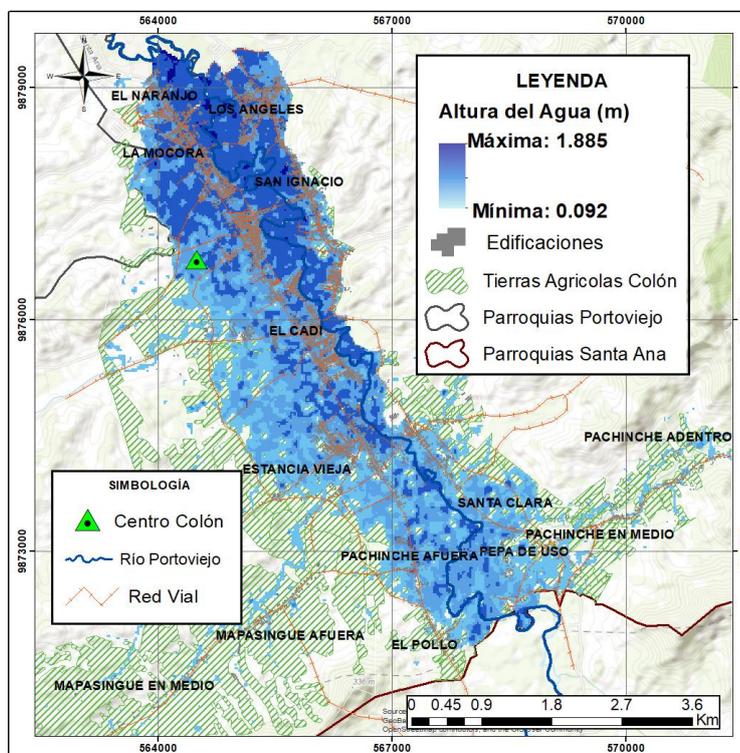


Figura 62

Zonas posibles de inundación en parroquia Colón-PR 500 años Catchment Mode CAESAR-

Lisflood



Análisis de diferencias significativas entre las áreas de afectación (ANOVA)

Para determinar si existe diferencias significativas entre las áreas de afectación que se obtuvieron con el Modelo CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Reach Mode y Catchment Mode y las que obtuvieron (Aguilar & Echeverría, 2018) con HEC-RAS, se realizó una prueba ANOVA (Análisis de la varianza) de 1 factor con un nivel de significancia del 95%. Se establecieron la hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1).

H_0 : No existe diferencia significativa entre las áreas de afectación en la parroquia Colón al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS

H_1 : Existe diferencia significativa entre las áreas de afectación en la parroquia Colón al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS

Se determinó, la suma, promedio y varianza de las áreas de afectación por modelos CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS, ver Tabla 56.

Además, se calculó la suma de los cuadrados, grados de libertad y promedio de los cuadrados para cada uno de los factores o variables independientes. Finalmente se calculó F_c (F calculado) y F crítico (F de tabla), con un nivel de significancia del 95%. ver Tabla 57

Tabla 56

Suma, promedio y varianza de áreas de afectación

Grupo (Modelo)	Suma (km ²)	Promedio (km ²)	Varianza
CAESAR Lisflood- Reach Mode	51.54	10.31	14.72
HEC-RAS	63.63	12.73	17.07
CAESAR Lisflood- Catchment Mode	58.15	11.63	7.21

De acuerdo a la Tabla 57, el F crítico (F de Tabla) es mayor que F_c (F calculado), por lo tanto, se acepta H_0 , es decir que no existe diferencia significativa entre las áreas de afectación si se utiliza el modelo CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Catchment Mode, Reach Mode; o HEC-RAS.

Tabla 57

Análisis de la varianza (ANOVA) para áreas de afectación

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F Calculado	Valor crítico para F
Entre grupos	14.66	2	7.33	0.56	3.89
Dentro de los grupos	156.01	12	13.00		
Total	170.67	14			

Análisis de diferencias significativas entre las alturas máximas de flujo (ANOVA)

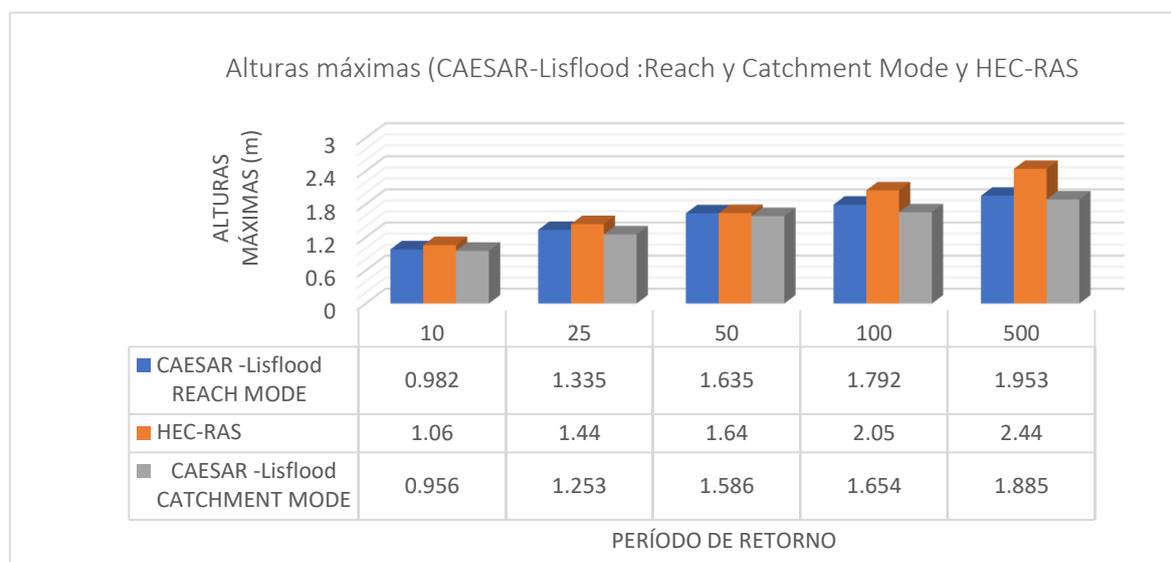
Tabla 58

Alturas máximas de flujo en metros (CAESAR Lisflood: Reach Mode, Catchment Mode; y HEC-RAS)

PR	CAESAR -Lisflood REACH MODE	HEC-RAS	CAESAR -Lisflood CATCHMENT MODE
10	0.982	1.06	0.956
25	1.335	1.44	1.253
50	1.635	1.64	1.586
100	1.792	2.05	1.654
500	1.953	2.44	1.885

Figura 63

Alturas máximas de flujo en metros (CAESAR Lisflood: Reach Mode, Catchment Mode; y HEC-RAS)



Se realizó una prueba de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia

del 95%, para determinar si existen o no diferencias significativas en las alturas o profundidades de flujo al utilizar los dos modos de CAESAR-Lisflood: Reach Mode y

Catchment Mode; y el modelo unidimensional HEC-RAS. Se establecieron las hipótesis:

H_0 : No existe diferencia significativa entre las alturas o profundidades del agua al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS

H_1 : Existe diferencia significativa entre las alturas o profundidades del agua al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS

Tabla 59

Suma, promedio y varianza de alturas o profundidades máximas de flujo

Grupo (Modelo)	Suma (m)	Promedio (m)	Varianza
CAESAR Lisflood- Reach Mode	7.70	1.54	0.15
HEC-RAS	8.63	1.73	0.29
CAESAR Lisflood- Catchment Mode	7.33	1.47	0.13

Tabla 60

Análisis de la varianza (ANOVA) para alturas o profundidades máximas de flujo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F Calculado	Valor crítico para F
Entre grupos	0.18	2	0.09	0.47	3.89
Dentro de los grupos	2.27	12	0.19		
Total	2.45	14			

Como se puede observar en la Tabla 60 el F Crítico es de 3.89 y es mayor que el F_c (F calculado), por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0), es decir que todas las medias de alturas máximas son iguales en cada uno de los grupos o modelos y no existen diferencias significativas

Porcentaje de áreas de afectación por barrios de la parroquia Colón, CAESAR Lisflood (Reach y Catchment Mode)

Se determinó que porcentaje de área de inundación total afectaría a los 12 barrios de la parroquia Colón utilizando el modo de alcance (Reach Mode), como se presenta en la Tabla 61 y la Figura 64; y con el modo de Captación (Catchment Mode) como se presenta en la Tabla 62 y Figura 65.

Tabla 61*Barrios o comunidades por inundaciones a diferentes períodos de retorno-CAESAR Lisflood-**Reach Mode*

Barrio	Área total (km)	% de Área Afectada por Período de Retorno				
		10	25	50	100	500
El Naranjo	0.80	49.50	60.52	62.29	69.04	74.79
Los Ángeles	1.23	79.08	93.79	97.16	98.91	99.15
La Mocora	1.15	65.36	73.96	77.08	81.16	84.63
Centro de Colón	5.01	25.77	38.86	43.56	50.06	55.54
San Ignacio	0.82	52.81	63.37	69.45	76.59	84.03
El Cadi	2.16	45.80	69.16	78.49	89.74	94.48
Estancia Vieja	14.91	3.82	6.72	10.94	18.62	27.11
Pachinche	14.03	3.86	6.11	8.58	12.25	17.19
Mapasingue	20.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Santa Clara	1.04	12.33	21.38	28.08	50.21	75.41
El Pollo	1.30	3.44	6.77	8.21	12.50	24.73
Pepa de Uso	0.15	2.77	5.90	7.41	17.09	80.01
Total	62.63					

Tabla 62*Barrios o comunidades afectadas por inundaciones a diferentes períodos de retorno-**Catchment Mode*

Barrio	Área total (km)	% de Área Afectada por Período de Retorno				
		10	25	50	100	500
El Naranjo	0.80	56.87	51.48	62.64	69.13	72.71
Los Ángeles	1.23	89.03	91.26	97.97	98.83	99.26
La Mocora	1.15	68.13	74.75	77.47	81.07	83.75
Centro de Colón	5.01	36.13	44.34	48.34	52.56	66.35
San Ignacio	0.82	58.31	64.42	68.43	76.87	82.43
El Cadi	2.16	57.60	70.00	77.74	89.93	97.46
Estancia Vieja	14.91	8.26	11.29	13.73	20.79	29.62

Pachinche	14.03	7.31	12.22	13.74	14.46	17.85
Mapasingue	20.02	0.73	2.28	2.55	1.34	1.67
Santa Clara	1.04	14.62	23.96	30.30	52.22	67.86
El Pollo	1.30	5.06	9.89	11.80	14.10	21.31
Pepa de Uso	0.15	0.07	5.26	5.83	17.11	66.79
Total	62.63					

De acuerdo a las Figuras 64 y 65 los barrios más afectados ante una posible inundación son: Los Ángeles de Colón, La Mocora, El Cadi, San Ignacio, El Naranjo y el Centro de Colón. Mientras que los barrios menos afectados son: Mapasingue, Pachinche y el Pollo.

Figura 64

Porcentaje de áreas afectadas en los barrios de la parroquia Colón a períodos de retorno de 10, 50 y 500 años – CAESAR -Lisflood- Reach Mode

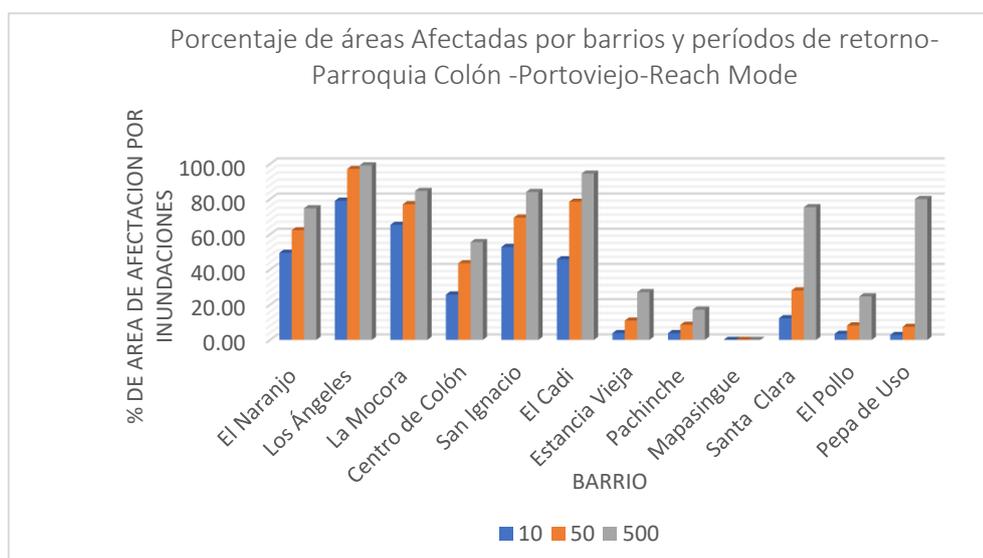
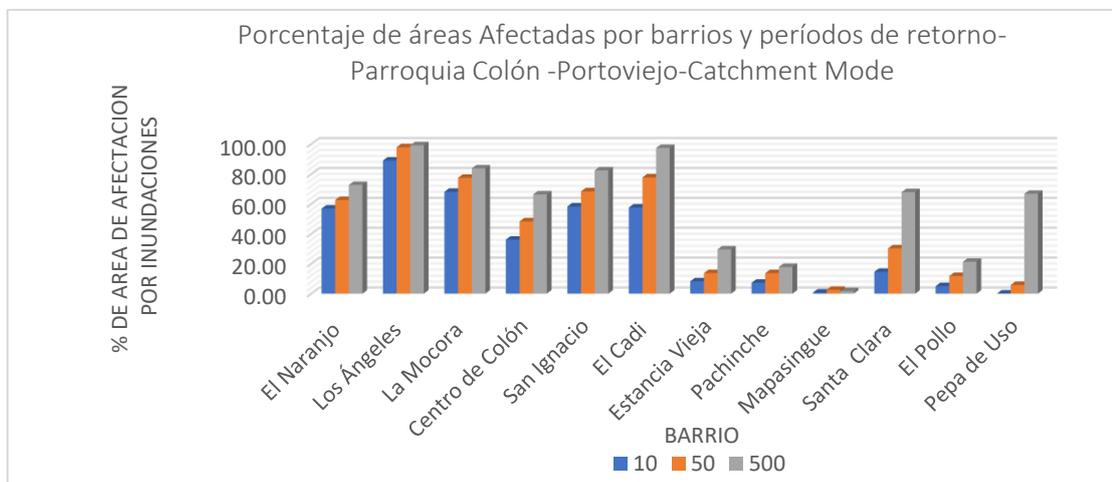


Figura 65

Porcentaje de áreas afectadas en los barrios de la parroquia Colón a períodos de retorno de 10 50 y 500 años -CAESAR-Lisflood-Catchment Mode



Análisis de afectación a edificaciones, utilizando el Modelo CAESAR-Lisflood: Reach y Catchment Mode, y su comparación con HEC-RAS

Se analizó el área de afectación sobre las edificaciones de la parroquia Colón con el modo de alcance (Reach Mode) y modo de captación (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood y HEC-RAS, a distintos períodos de retorno, que incluye: viviendas, centros de salud, iglesias, escuelas, colegios, entre otros; con un área aproximadamente de 3.87 km². La información de las edificaciones de la parroquia Colón del cantón Portoviejo, fue proporcionada por el GAD Municipal de Portoviejo.

En la Tabla 63 y Tabla 64 se indica el área de edificaciones en km² y ha y su respectivo porcentaje que podrían ser afectadas a períodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años, utilizando el Modelo Bidimensional CAESAR-Lisflood en su modo de Alcance (Reach Mode) y modo de Captación (Catchment Mode) respectivamente. Mientras que en la Tabla 65 se encuentran los valores de áreas de edificaciones posiblemente afectadas obtenidos a partir del modelo unidimensional HEC-RAS. En las Figura 65 y 66 se presenta un

gráfico de barras comparativo del porcentaje de áreas de afectación a edificaciones en la parroquia Colón entre los dos modos de CAESAR-Lisflood y HEC-RAS.

Tabla 63

Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno

utilizando el modo Reach -CAESAR-Lisflood

Período de retorno (Años)	Área Afectada (km²)	Edificaciones Afectadas (km²)	Edificaciones Afectadas (ha)	% Edificaciones afectadas
10	5.53	1.2994	129.94	33.58
25	8.26	2.1562	215.62	55.72
50	9.77	2.4865	248.65	64.25
100	12.48	2.9218	292.18	75.50
500	15.49	3.1745	317.45	82.03

Tabla 64

Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno

utilizando el modo Catchment-CAESAR-Lisflood

Período de retorno (Años)	Área Afectada (km²)	Edificaciones Afectada (km²)	Edificaciones Afectada (ha)	% Edificaciones afectada
10	5.53	1.79	178.85	46.21
25	8.27	2.49	249.04	64.13
50	9.77	2.75	275.27	71.13
100	12.48	3.24	323.70	83.64
500	15.49	3.27	327.13	84.53

Tabla 65

Edificaciones afectadas por una eventual inundación a distintos períodos de retorno utilizando el Modelo Unidimensional HEC-RAS.

Período de retorno (Años)	Área Afectada (km²)	Edificaciones Afectadas (km²)	Edificaciones Afectadas (ha)	% Edificaciones afectada
10	7.90	1.82	181.64	46.94
25	9.84	2.21	220.59	57
50	12.56	2.59	258.77	66.87
100	14.99	2.85	285.21	73.7
500	18.34	3.14	314.26	81.21

Nota. Recuperado de Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, Cantón Portoviejo -Manabí, por (Aguilar & Echeverría, 2018)

Con el fin de analizar las diferencias significativas entre los porcentajes de las áreas de edificaciones, que se obtuvieron a partir del modo de alcance (Reach Mode) y modo de captación (Catchment Mode) de CAESAR-Lisflood; y del modelo HEC-RAS. Se realizó una prueba ANOVA (Análisis de varianza) con un 95 % de confianza ($\alpha = 0.05$). Se establecieron la hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1).

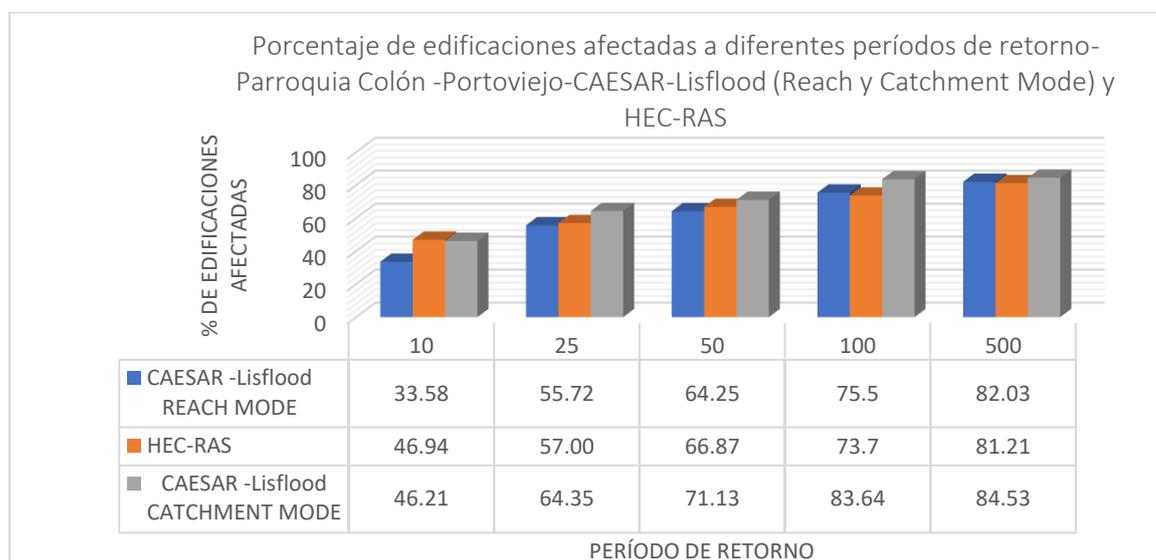
H_0 : No existe diferencia significativa entre las áreas de afectación a edificaciones al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS.

H_1 : Existe diferencia significativa entre las alturas o profundidades del agua al utilizar los modelos: CAESAR Lisflood (Catchment Mode y Reach Mode) y HEC-RAS.

Se calculó el promedio y varianza de cada uno de los grupos o modelos, ver Tabla 66. Las sumas de cuadrados, promedio de los cuadrados y la prueba F de Fisher se presenta en la Tabla 67.

Figura 66

Comparación del porcentaje de edificaciones afectadas, obtenidas a partir de CAESAR-Lisflood-Reach y Catchment Mode; y HEC-RAS

**Tabla 66**

Suma, promedio y varianza de porcentaje de afectación a edificaciones

Grupo (Modelo)	Suma (km ²)	Promedio (km ²)	Varianza
CAESAR Lisflood-Reach Mode	311.08	62.22	358.85
HEC-RAS	325.72	65.14	183
CAESAR Lisflood-Catchment Mode	349.86	69.97	249.06

Tabla 67

Análisis de la varianza (ANOVA) para porcentaje de afectación a viviendas

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F Calculado	Valor crítico para F
Entre grupos	153.47	2	76.73	0.29	3.89
Dentro de los grupos	3163.68	12	263.63		
Total	3317.14	14			

De acuerdo a la Tabla 67, en el análisis de la varianza (ANOVA) se obtuvo un valor de F_c (F calculado) de 0.29 que es menor con respecto al valor de F crítico (F de Fisher), por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0) lo que significa que las medias de los porcentajes de afectación a edificaciones obtenidas con HEC-RAS y CAESAR Lisflood en sus dos modos: Catchment Mode y Reach Mode son iguales, es decir no existen diferencias significativas.

Cuantificación de edificaciones afectadas de la parroquia Colón-Portoviejo

Debido a que la cantidad de edificaciones es bastante amplia, se decidió realizar el análisis de las edificaciones que se presenta en las Tablas 68 y 69.

Tabla 68

Cuantificación de las edificaciones afectadas por una eventual inundación, períodos de retorno de 10, 25 y 50 años

Edificaciones	PERÍODOS DE RETORNO					
	10 años		25 años		50 años	
	Catchment	Reach	Catchment	Reach	Catchment	Reach
Centros de Salud	2	3	5	4	5	5
Jardín de Infantes	8	8	10	10	12	12
Escuela y Colegios (Instituciones Educativas)	14	11	16	13	17	15
Viviendas	4282	3144	5377	4972	5881	5716
Iglesias y Capillas	13	11	21	21	21	21
Emergencias Bomberos y Policías	2	2	2	2	2	2

De acuerdo a las Tablas 68 y 69 se observa que hay un aumento progresivo de la afectación de edificaciones, cuanto más grande sea el período de retorno y por ende los caudales o precipitaciones máximas también, y la afectación edificaciones será mayor.

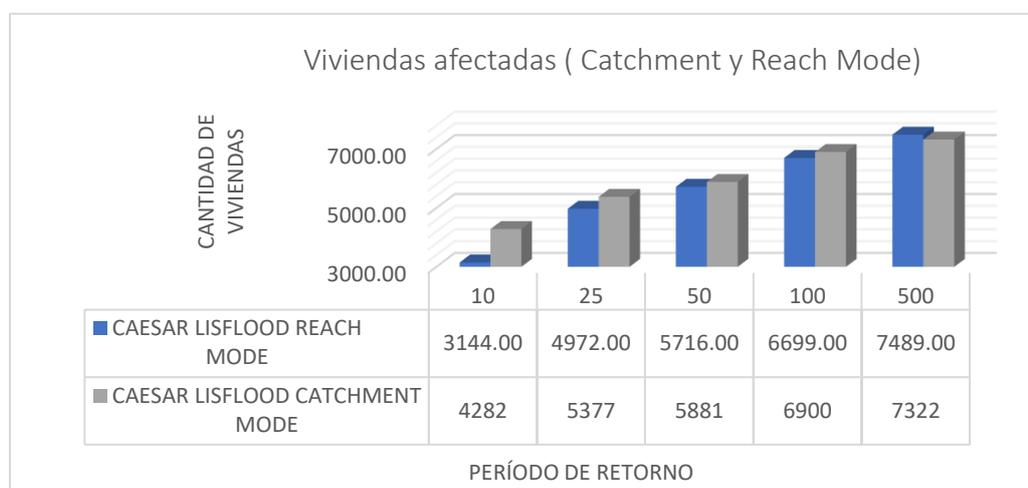
Tabla 69

Cuantificación de las edificaciones afectadas por una eventual inundación, períodos de retorno de 100 y 500 años

Edificaciones	PERÍODOS DE RETORNO				Total, Colón
	100 años		500 años		
	Catchment	Reach	Catchment	Reach	
Centros de Salud	6	6	6	6	7
Jardín de Infantes	12	12	12	12	12
Escuela y Colegios (Instituciones Educativas)	18	16	18	16	20
Viviendas	6900	6699	7322	7489	8873
Iglesias y Capillas	21	21	22	21	24
Emergencias Bomberos y Policías	3	3	4	5	5

Figura 67

Cantidad de viviendas afectadas, CAESAR Lisflood: Catchment y Reach Mode

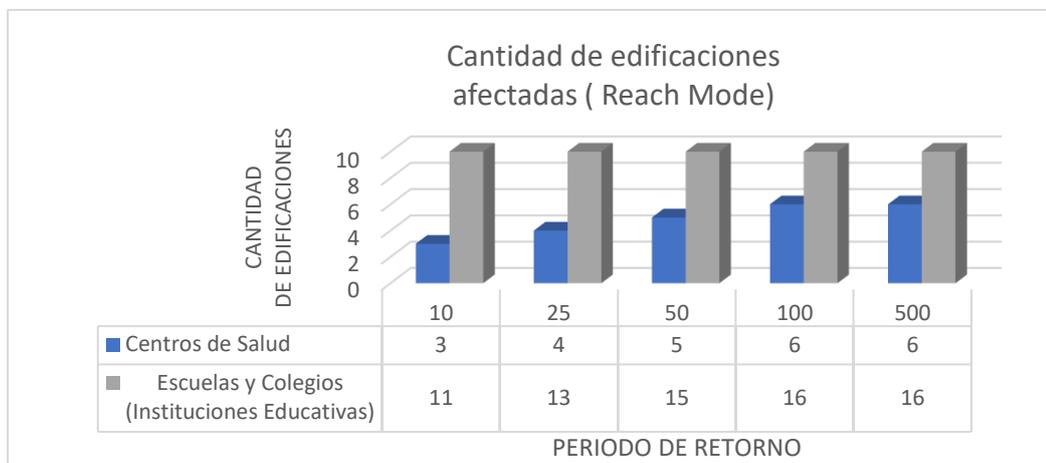


En la Figura 67 se presenta la cantidad de viviendas afectadas utilizando el modelo CAESAR-Lisflood en sus dos modos, mientras que en la Figura 68 y 69 se presenta la cantidad de centros de salud, escuelas y colegios afectados.

Figura 68

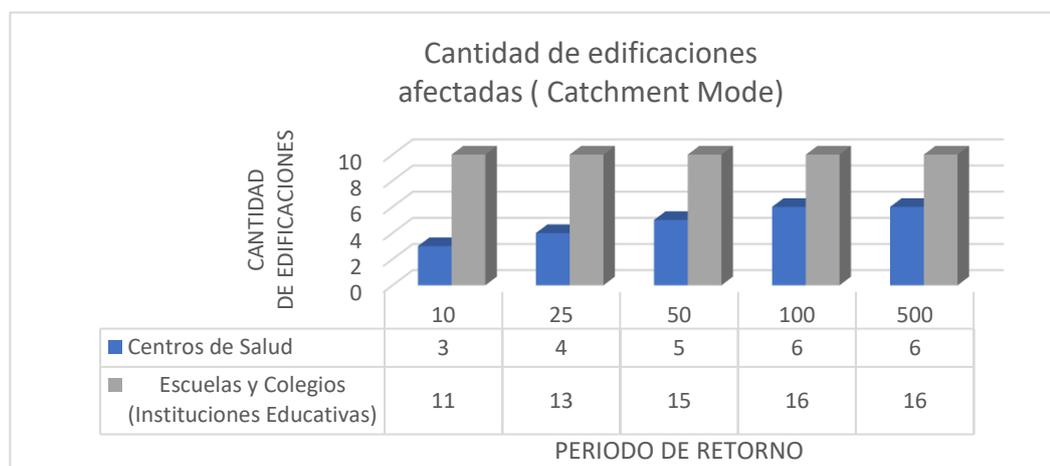
Cantidad de edificaciones afectadas (Centros de Salud, Escuelas y Colegios), CAESAR-Lisflood

Reach Mode

**Figura 69**

Cantidad de edificaciones afectadas (Centros de Salud, Escuelas, Colegios), CAESAR-Lisflood

Catchment Mode



De acuerdo a los resultados del modo Reach, a un período de 10 años podrían ser afectados 11 edificios educacionales, mientras que, a un período de retorno de 100 años, 16. considerando el hecho de que en la parroquia Colón existen 20 edificios educacionales; en un período de 10 años, 9 edificios educacionales no serían afectados, y a un período de

retorno de 100 años, 4 no serían afectados. Del mismo modo, existe un comportamiento de crecimiento de afectación similar con el modo de Captación (Catchment).

Algunas de las instituciones educativas que podrían ser afectadas en todos los períodos de retorno (10,25,50,100 y 500 años) de acuerdo al modo de alcance (Reach Mode), se presentan en la Tabla 70

Tabla 70

Instituciones Educativas que pueden ser afectadas en todos los períodos de retorno, Reach Mode

Institución Educativa	Barrio
Centro de Educación Básica Portoviejo No.25	Los Ángeles de Colón
Centro Educativo de Educación Básica Machala No. 30	Estancia Vieja
Escuela Particular Mixta Liceo Americano Escuela Portoviejo	San Ignacio Los Ángeles de Colón

Por otro lado, entre las instituciones educativas que no serían afectadas en ningún período de retorno. Se presentan en la Tabla 71

Tabla 71

Instituciones educativas que no serían afectadas en ningún período de retorno, CAESAR-Lisflood Reach Mode

Institución Educativa	Barrio
Colegio Horacio Guillen Hidrovo	Estancia Vieja
Escuela José Giler Delgado	Pachinche
Escuela Fiscal Carlos Zambrano Orejuela	Pachinche

Con respecto al daño hacia los centros de salud, se puede observar que, de igual forma, a mayor período de retorno, mayor número de edificaciones de centros de salud serían afectados. Si se toma como ejemplo al período de retorno de 10 años y de 500 años,

serían afectados 2 y 6 centros de salud respectivamente en el modo de Captación (Catchment Mode), considerando que en todo el territorio de la parroquia Colón existen 7 centros de salud.

Los centros de salud que serían afectados en todos los períodos de retorno (10,25,50,100 y 500 años), se presentan en la Tabla 72

Tabla 72

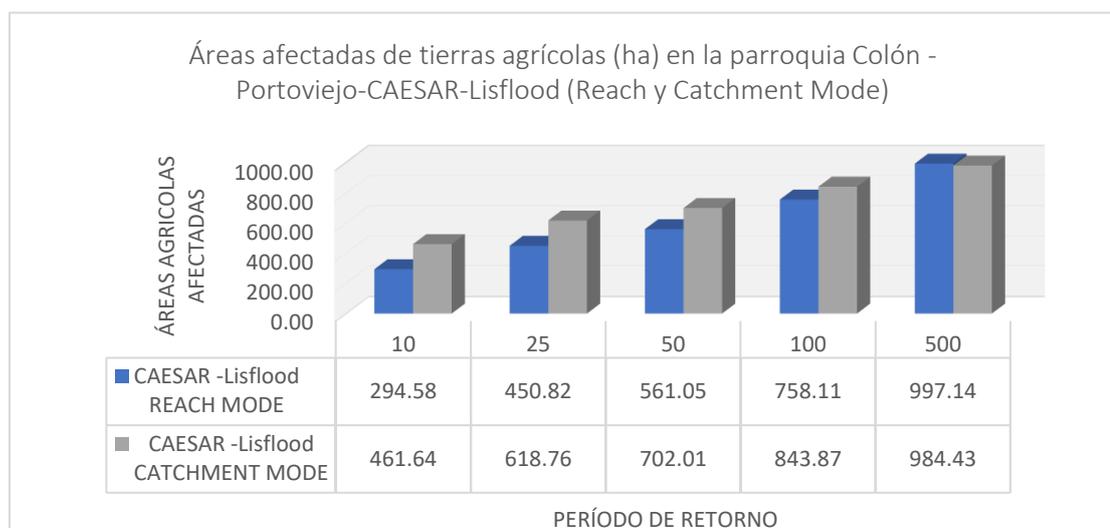
Centros de salud afectados en todos los períodos de retorno, CAESAR-Lisflood Catchment Mode

Centro de Salud	Barrio
El Naranja	El Naranja
Subcentro los Ángeles	Los Ángeles de Colón

El Centro de Salud “Dispensario de Salud el Cadi” no sería afectado por las inundaciones a ningún período de retorno, el cual pertenece al barrio El Cadi de la parroquia Colón.

Análisis de afectación a tierras agrícolas de la parroquia Colón-Portoviejo
Figura 70

Áreas de tierras agrícolas afectadas en la parroquia Colón



La parroquia Colón del cantón Portoviejo cuenta con 2491 ha de tierras agrícolas, en la Figura 70 se presenta un diagrama de barras que indica la cantidad de ha de tierras agrícolas afectadas en cada período retorno, utilizando CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Reach y Catchment Mode

A un período de retorno de 50 años, podría afectarse 561.05 ha (Reach Mode) o 702.01 ha (Catchment Mode) de tierras agrícolas lo que significa pérdidas del 22.5 % y 28.18 % respectivamente. Mientras que a un período de retorno de 500 años las pérdidas son mayores de 997.14 y 984.43 ha, es decir pérdidas del 40 % y 39.5 % respectivamente. Esta afectación a tierras agrícolas repercute directamente al agricultor con pérdidas económicas e indirectamente a los habitantes de la parroquia Colón, ya que el abastecimiento de los productos agrícolas que se producen y son de consumo local, disminuye considerablemente.

Análisis del peligro a inundaciones en la parroquia Colón-Portoviejo

(Aguilar & Echeverría, 2018) consideraron a este apartado como un “análisis de riesgo de las inundaciones”, lo cual es erróneo, debido a que el riesgo está en función del peligro y la vulnerabilidad. Por lo tanto, lo correcto es determinar el peligro de inundaciones y juntamente con la vulnerabilidad, establecer el nivel de riesgo a inundaciones.

Para evaluar el peligro a inundaciones en la parroquia Colón del cantón Portoviejo, se consideró los criterios para la determinación del nivel o grado de peligrosidad, que se encuentran en el Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales (INDECI, 2011), en el que se menciona que el peligro de inundación se encuentra en función de la probabilidad de ocurrencia e intensidad de la misma.

La intensidad depende de 3 factores: la profundidad y velocidad del agua, y duración de las inundaciones. Existe una tabla recomendada por (INDECI, 2011) en el que se presentan los rangos para cada nivel de intensidad, ver Figura 71.

En el presente proyecto solamente se consideró la profundidad o altura del agua en metros, debido a que fue el parámetro que se calculó con el modelo CAESAR-Lisflood.

Además no se consideró la clasificación recomendada por (INDECI, 2011) sino que se realizó el análisis de intensidades, de acuerdo a la clasificación que consideraron (Aguilar & Echeverría, 2018) , con el fin de comparar los resultados que se obtuvieron con el modelo CAESAR-Lisflood con la que ellos obtuvieron con HEC-RAS.

Es decir, se tomaron en cuenta tres tipos de intensidad según la altura o profundidad del agua que se podrían generar en el caso de que se generen caudales o precipitaciones máximas, ver Tabla 73.

Figura 71

Rangos para cada nivel de intensidad para inundaciones

Niveles de intensidad	Profundidad del flujo (H) (m) (inundaciones estáticas)	Profundidad x velocidad. del flujo (m ² /s) (inundaciones dinámicas)
Muy alta	$H > 1.5 \text{ m}$	$H*V > 1.5 \text{ m}$
Alta	$0.5 \text{ m} < H < 1.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < H*V < 1.5 \text{ m}$
Media	$0.25 \text{ m} < H < 0.5 \text{ m}$	$0.25 \text{ m} < H*V < 0.5 \text{ m}$
Baja	$< 0.25 \text{ m}$	$H*V < 0.25 \text{ m}$

Nota. Recuperado de Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales, por (INDECI, 2011)

Tabla 73

Niveles de intensidad de acuerdo a la profundidad o altura del agua

Nivel de intensidad	Profundidad o altura del agua (H)
Alta	$H > 1.2$
Media	$0.6 < H < 1.2$
Baja	$H < 0.6$

Nota. Recuperado de Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, Cantón Portoviejo -Manabí , por (Aguilar & Echeverría, 2018)

Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia, viene dada por el período de retorno (T), para un período de retorno de 50 años, la probabilidad de ocurrencia de que se

produzca una inundación con un caudal determinado es $1/T$, es decir 0.02 para cada año hasta llegar a los 50 años.

Mientras que, para un período de retorno de 500 años, la probabilidad de ocurrencia es de 0.002 para cada año. Por lo tanto, a mayor período de retorno menor probabilidad de ocurrencia y viceversa. En la Tabla 74 se presenta la clasificación de la probabilidad de ocurrencia de acuerdo a los períodos de retorno.

Tabla 74

Clasificación de la probabilidad o frecuencia de inundaciones de acuerdo al período de retorno

Período de retorno (Años)	Clasificación Probabilidad
1 <Pr < 5	Muy Alta
5 <Pr < 15	Alta
15 <Pr < 50	Media
50 <Pr < 200 o más	Baja

Nota. Recuperado de Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales, por (INDECI, 2011)

Tabla 75

Peligro de inundaciones en función del nivel de intensidad y probabilidad de ocurrencia o frecuencia

Intensidad	Alta (H > 1.2)	Alto	Alto	Alto
	Media (0.6 < H < 1.2)	Alto	Medio	Bajo
	Baja (H < 0.6)	Medio	Bajo	Bajo
		Alta 5 <Pr < 15	Media 15 <Pr < 50	Baja 50 <Pr < 200 o más
Frecuencia				

Nota. Recuperado de Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre, por (Hamad, 2008)

De acuerdo a la Tabla 74, la probabilidad de ocurrencia es alta para período de 10 años; para 25 y 50 años es media; mientras que para 100 y 500 años es baja.

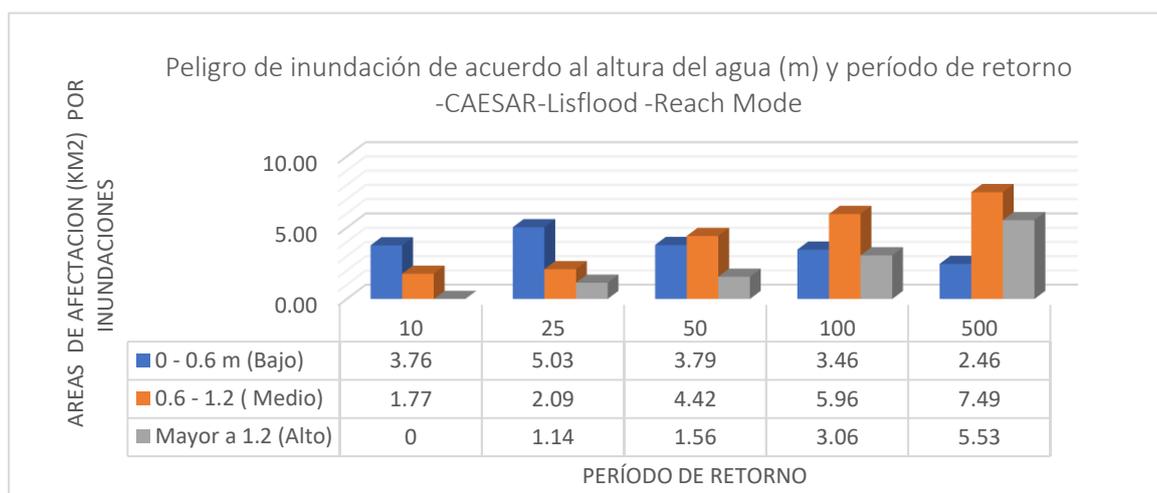
Para clasificar el peligro en función del nivel de intensidad y la probabilidad de ocurrencia, se consideró la clasificación propuesta por (Hamad, 2008), Ver Tabla 75

Análisis del peligro de inundaciones, CAESAR Lisflood -Reach Mode

Se realizó una clasificación de las zonas de inundación obtenidas para cada período de retorno, en el modo de alcance (Reach Mode), de acuerdo a los tres tipos de intensidad mencionados anteriormente, ver Figura 72.

Figura 72

Peligro de inundación de acuerdo a la altura del agua (m) -CAESAR -Lisflood-Reach Mode



Se puede observar que el área con profundidades o alturas del agua menores a 0.6 m disminuye a partir del período de retorno de 50 años hasta el período de retorno de 500 años. Por ejemplo, para un período de 25 años el área que ocupa el agua con profundidades menores a 0.6 m es de 5.03 m, luego disminuye a 3.79, 3.46 y 2.46 m para períodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente, esto es debido a que el área que disminuye, se desplaza y ocupa otro lugar a una profundidad mayor cuando el período de retorno es mayor.

Las áreas que contienen alturas del agua entre 0.6 a 1.2 m o mayores a 1.2 m, van aumentando conforme aumenta el período de retorno, debido al aumento del caudal máximo. Es decir, a mayor caudal máximo, mayor altura o profundidad del agua. Por lo tanto, a mayor altura del agua, mayor intensidad; mientras que, a mayor período de retorno, menor probabilidad de ocurrencia de que se produzcan ciertas alturas o profundidades del agua. Para un período de retorno de 100 años, la probabilidad de ocurrencia es baja para que el agua ocupe un área de 3.06 km²; con alturas de flujo de agua mayores a 1.2 m (nivel intensidad alto). Por lo tanto, se encuentra en un nivel de peligro alto.

El flujo de agua que cubre una superficie de 2.09 km² con alturas entre 0.6 a 1.2 m (nivel de intensidad medio) tiene una probabilidad de ocurrencia media (período de retorno), por lo tanto, el nivel de peligro en este caso es medio. El flujo de agua que se encuentra en un nivel peligrosidad bajo, cubre una superficie de 2.46 km², debido a que tiene una probabilidad de ocurrencia baja (500 años) y alturas de agua menores a 0.6 m (nivel de intensidad bajo)

Figura 73

Peligro de inundación en la parroquia Colón -REACH MODE-CAESAR Lisflood -PR 10 años

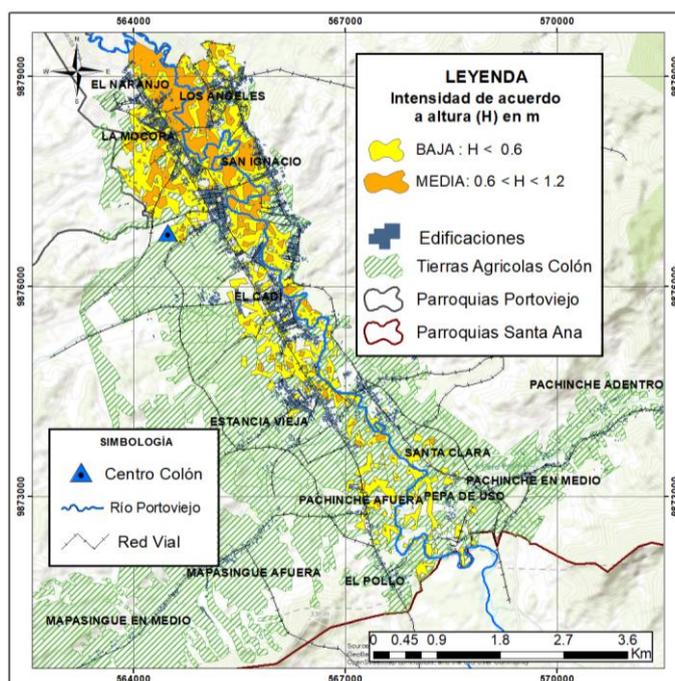


Figura 74

Peligro de inundación en la parroquia Colón-REACH MODE-CAESAR-Lisflood-PR 50 años

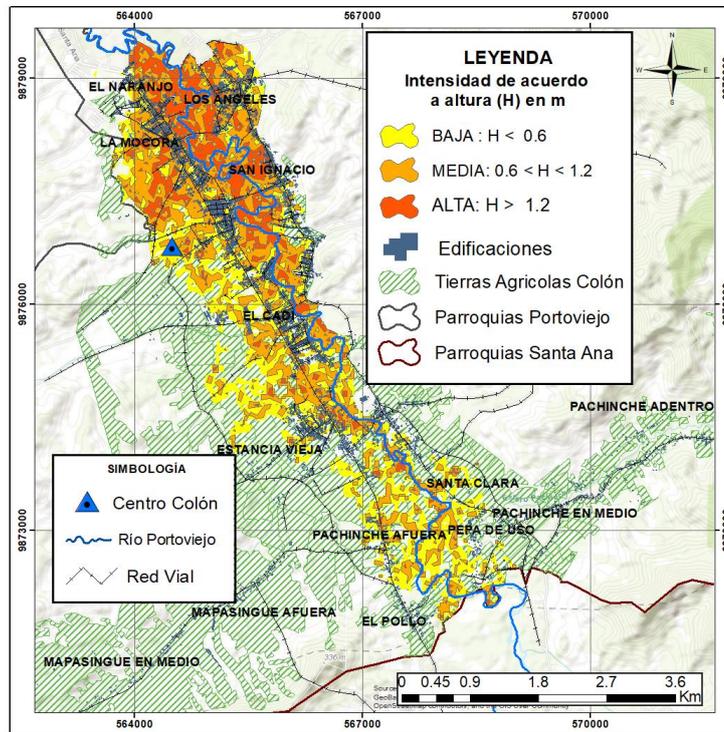
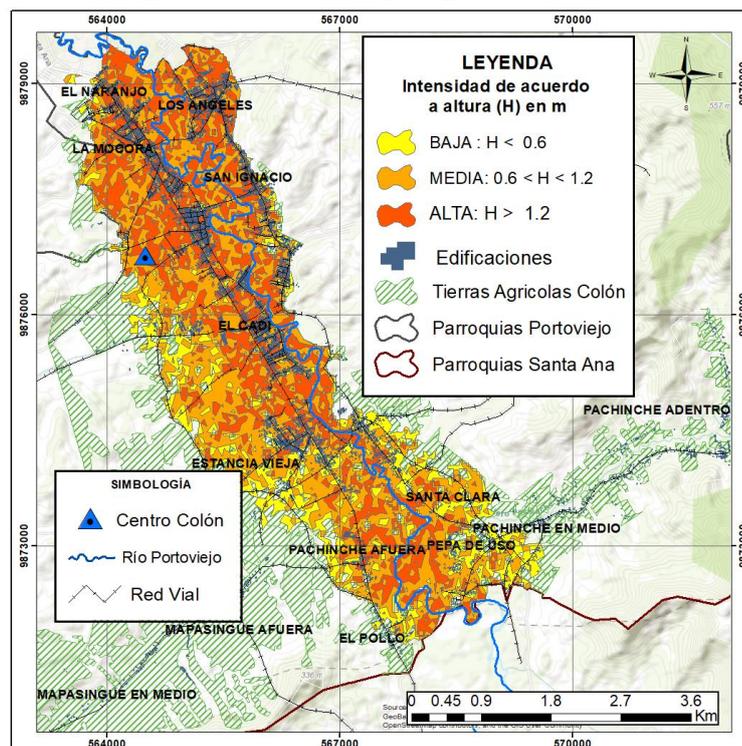


Figura 75

Peligro de Inundación en la parroquia Colón-REACH MODE-CAESAR Lisflood-PR 500 años



En las Figuras 73, 74 y 75 se encuentran los mapas correspondientes a los períodos de retorno de 10, 50 y 500. Juntamente a ellos se encuentran los mapas de períodos de retorno de 100 y 25 años en el ANEXO E.

Análisis de peligro a inundaciones, CAESAR-Lisflood, Catchment Mode

A partir de las zonas afectadas de inundación obtenidas con el modo de Captación (Catchment Mode), de CAESAR Lisflood, se procedió a clasificar a las áreas de acuerdo al tipo de intensidad, es decir en función de la altura o profundidad de flujo.

De acuerdo a la Figura 76, se puede observar un aumento de las áreas que ocupan el agua con alturas entre 0.6 a 1.2 metros de altura y mayores a 1.2 metros. Por ejemplo, a un período de 10 años, el área que ocupa alturas de agua mayores a 1.2 metros es de 0.97 km², mientras que para un período de retorno de 500 años ya corresponde a un área de 4.65 km², este hecho es debido al aumento de precipitaciones máximas, a medida que aumenta los períodos de retorno.

El área de 2.61 km² que ocupa el flujo de agua con alturas mayores a 1.2 metros (nivel de intensidad alta), y período de retorno de 100 años (probabilidad de ocurrencia baja), se encuentra en un nivel de peligro alto.

El flujo de agua que se encuentra en un nivel peligrosidad medio, cubre una superficie de 4.42 km², debido a que tiene una probabilidad de ocurrencia media (50 años) y alturas de agua entre 0.6 a 1.2 m.

En las Figuras 77, 78 y 79 se presentan los mapas correspondientes a períodos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente, los mismos que se encuentran en el ANEXO E.

Figura 76

Peligro de inundación de acuerdo a la altura del agua (m) -CAESAR -Lisflood-Reach Mode

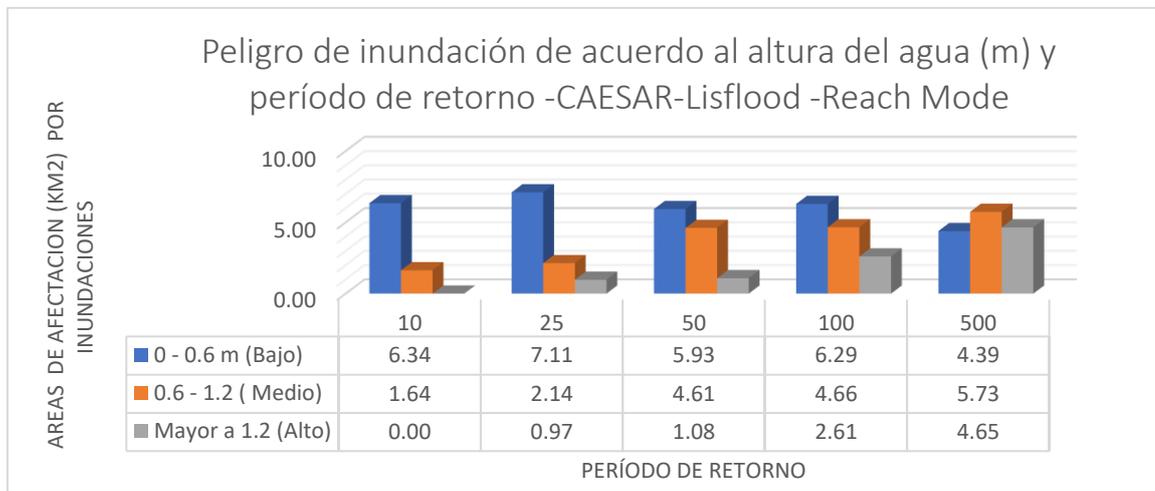


Figura 77

Peligro de inundación en la parroquia Colón-CATCHMENT MODE-CAESAR-Lisflood-PR 10 años

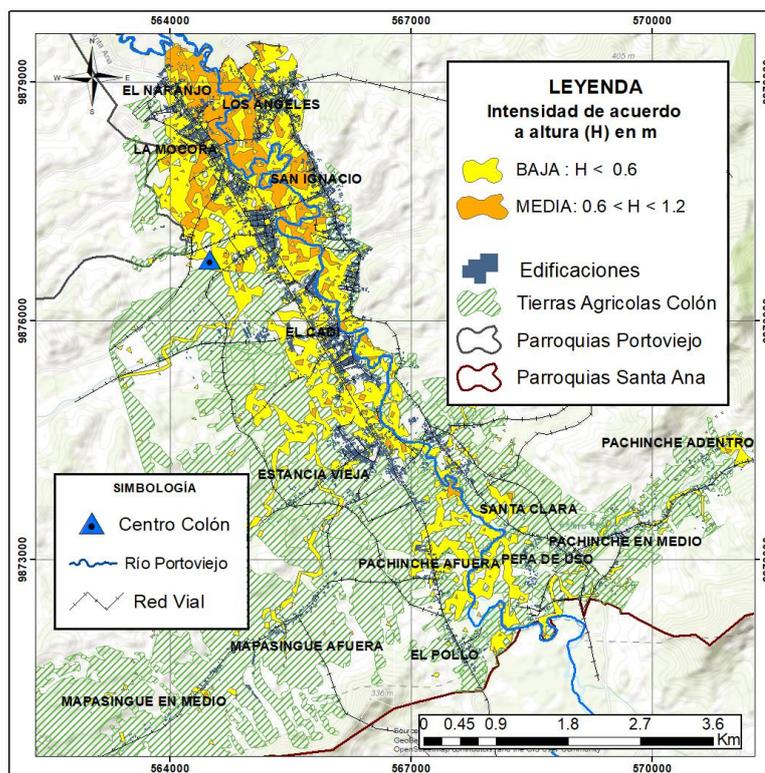


Figura 78

Peligro de inundación en la parroquia Colón-CATCHMENT MODE-CAESAR -Lisflood -PR 50 años

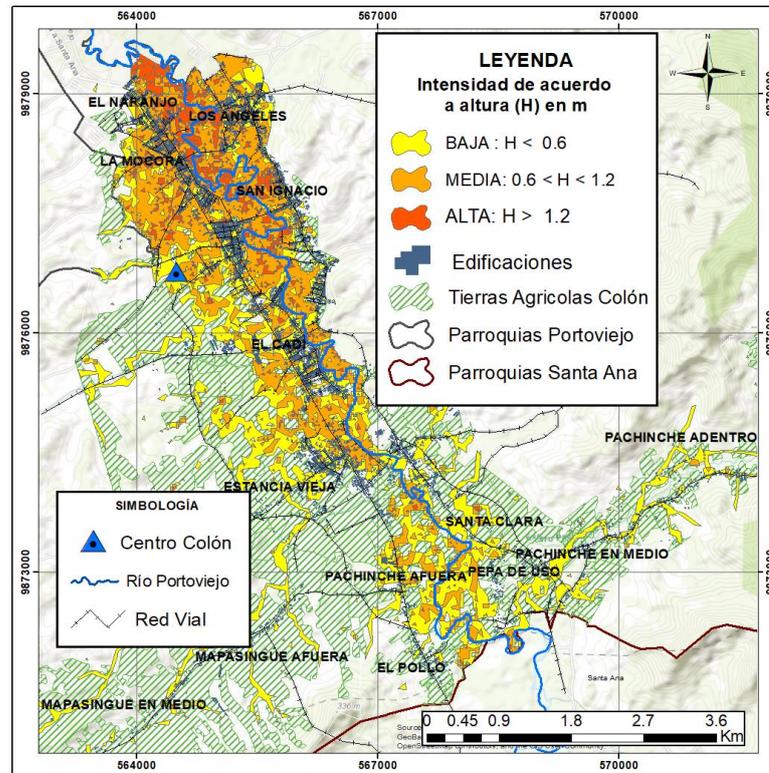
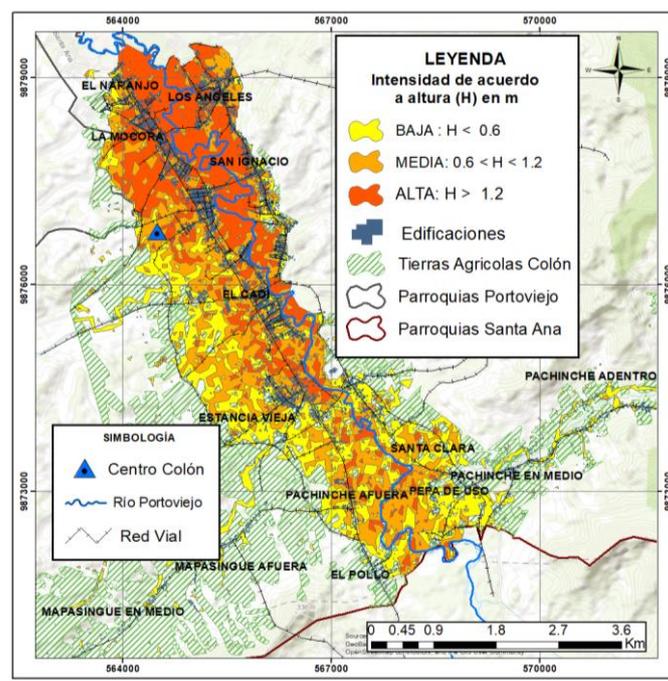


Figura 79

Peligro de inundación en la parroquia Colón -CATCHMENT MODE -CAESAR Lisflood -PR 500 años

años



Análisis del peligro de inundaciones a edificaciones de la parroquia Colón

Para el análisis de peligro de inundaciones a edificaciones, se consideró la intensidad de inundación y la probabilidad de ocurrencia. Se determinó el porcentaje de áreas de edificaciones que sería afectado a una intensidad de inundación baja, media y alta, es decir a alturas o profundidades de aguas menores a 0.6 m, entre 0.6 a 1.2 m y mayores a 1.2 m respectivamente, a distintos períodos de ocurrencia.

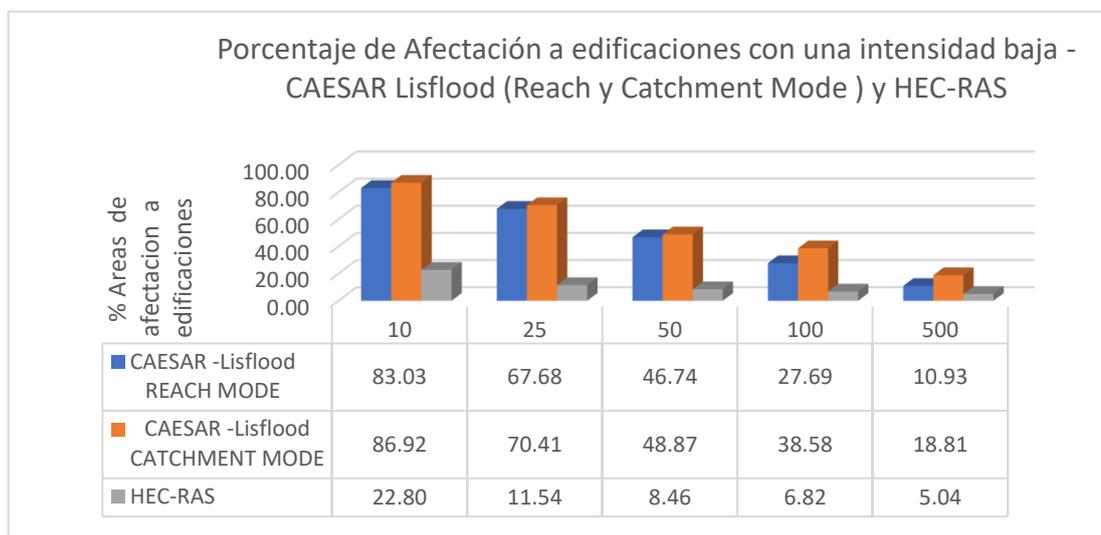
Además, los porcentajes de las áreas de edificaciones afectadas obtenidas con el modelo CAESAR-Lisflood, fueron comparadas con los porcentajes que obtuvieron (Aguilar & Echeverría, 2018)

Como se puede observar en la Figura 80, las áreas de afectación hacia las edificaciones con alturas menores a 0.6 m, van disminuyendo conforme el período de retorno es mayor, debido al aumento de caudales máximos o precipitaciones máximas. Por ejemplo, a partir del modo de Alcance (Reach Mode) a un período de retorno de 25 años, las edificaciones tienen un área de afectación de 107.89 ha lo que representa el 83.03 % del área total que se afectaría con alturas menores a 0.6 m (129.94 ha). Mientras que a un período de retorno de 100 años el porcentaje de afectación con una intensidad baja es de 27.69 %, es decir 80.90 ha de un total de 292.18 ha. En comparación con el modo de Captación (Catchment Mode), se tiene un comportamiento y porcentajes similares, a excepción del caso de un período de retorno de 100 años.

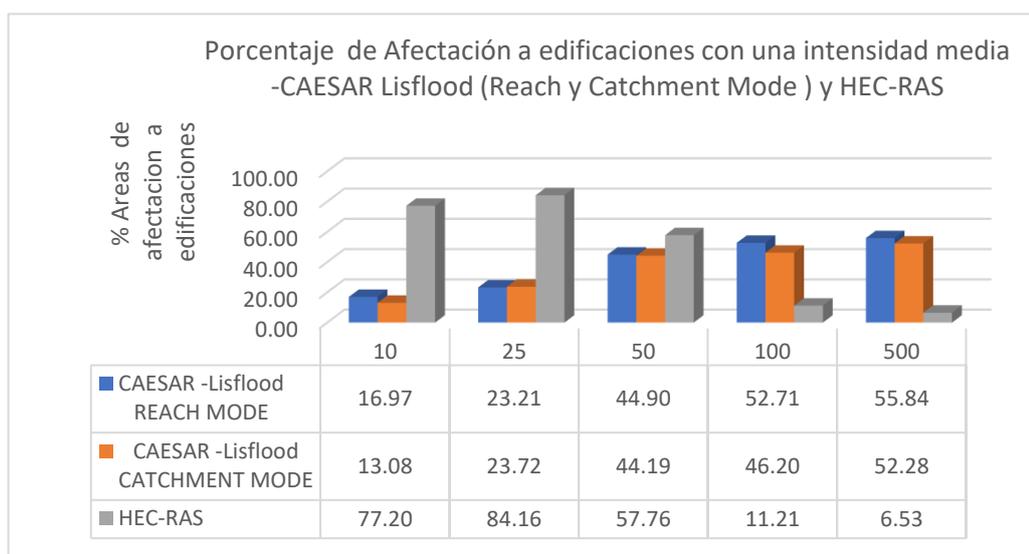
Las áreas de afectación a la infraestructura con intensidad baja, obtenidas a partir de HEC-RAS, igualmente disminuyen, sin embargo, los porcentajes indican: un 22.80 % para un período de retorno de 10 años y a un período de retorno de 100 años de 6.82, es decir son porcentajes más bajos de áreas que serían afectadas con alturas de agua menores a 0.6 m.

Figura 80

Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad baja (Alturas del agua menores a 0.6 m)

**Figura 81**

Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad media (Alturas del agua entre 0.6 a 1.2 m)



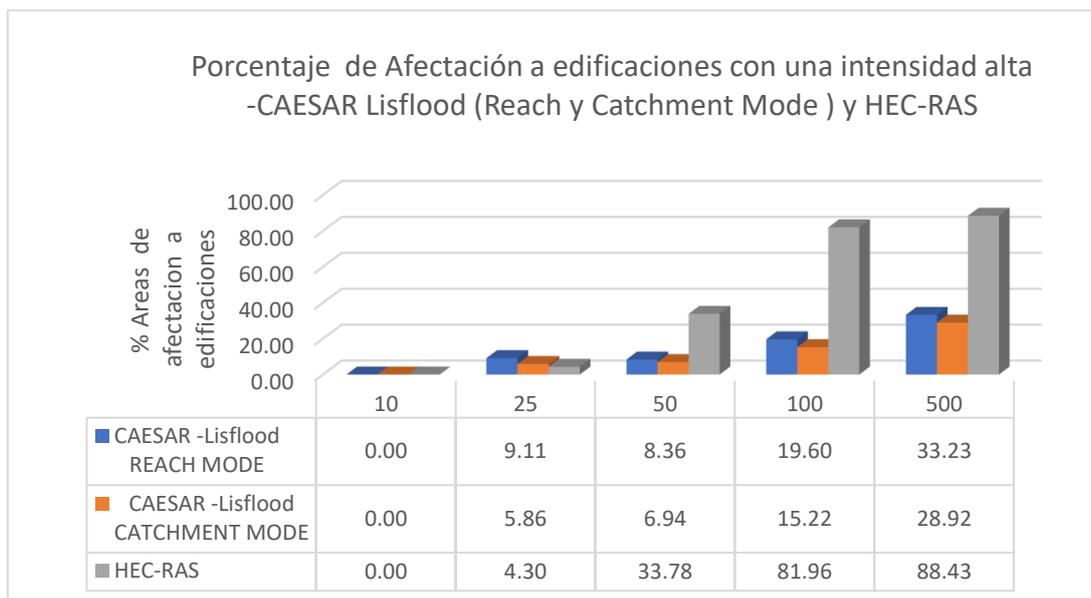
De acuerdo a la Figura 81, en el modo de Captación (Catchment Mode) y de Alcance (Reach Mode), los porcentajes de las áreas con alturas de agua entre 0.6 a 1.2 m de agua que afectarían a las edificaciones, van aumentando, conforme aumenta el período de retorno (aumento de caudales o precipitaciones máximas).

En Catchment Mode a un período de 10 años el área de afectación a edificaciones con niveles del agua entre 0.6 a 1.2 m es de 23.29 ha lo que representa el 13.08 %, de un total 178.85 ha que serían afectadas a un período de retorno de 10 años. A su vez, para un período de 500 años el porcentaje de afectación de edificaciones con niveles de agua entre 0.6 a 1.2 m es de 52.28 % lo que representa 171.02 ha, de un área total de afectación de 327.13 ha, a un período de retorno de 100 años

Por otro lado, los resultados obtenidos con HEC-RAS, de las áreas de afectación con una intensidad media, aumenta de 77.20 % a 84.16 % a períodos de retorno de 10 y 25 años respectivamente, sin embargo, a partir del período de retorno de 50 años, el porcentaje de afectación va disminuyendo.

Figura 82

Porcentaje de áreas de afectación a edificaciones a una intensidad alta (Alturas del agua mayores a 1.2 m)



En la Figura 82, se evidencia que no existe una intensidad alta (alturas o profundidades del agua mayores a 1.2 metros) para el período de retorno de 10 años. Por el contrario, a períodos de retorno de 25, 50, 100 y 500 años, si existe daños hacia la infraestructura con este tipo de intensidad, y que tanto con el modelo CAESAR-Lisflood en sus dos Modos: Captación (Catchment Mode) y Alcance (Reach Mode), como con el modelo HEC-RAS existe un aumento progresivo del porcentaje de las áreas ocupadas por alturas del agua mayores a 1.2 metros.

Sin embargo, con el Modelo HEC-RAS existe un aumento más drástico del porcentaje de áreas de edificaciones afectadas con un tipo de intensidad alto. Por ejemplo, para un período de 25 años, el modelo HEC-RAS determinó un porcentaje de área de afectación de 4.30 % y a un período de retorno de 500 años la afectación es de 88.43 %. Mientras que si se analiza el aumento con el Modo de Captación de CAESAR-Lisflood, a un período de retorno de 25 años el porcentaje del área de edificaciones afectadas es 9.11 %, y a 500 años de período de retorno es de 33.23 %.

Análisis del nivel de peligro a edificaciones en la parroquia Colón

En la Tablas 76 y Tabla 77 se indica la cantidad de instituciones educativas (escuelas y colegios), centros de salud y viviendas, con un nivel de peligro de inundación alto y medio respectivamente. Se debe considerar que en la parroquia Colón del cantón Portoviejo existen un total de 20 instituciones educativas, 7 centros de salud y 8873 viviendas

Tabla 76

Afectación a edificaciones con peligrosidad alta

CANTIDAD DE EDIFICACIONES AFECTADAS CON PELIGROSIDAD ALTA							
PR	Intensidad	Instituciones educativas		Centros de Salud		Viviendas	
		Reach	Catchment	Reach	Catchment	Reach	Catchment
10	Media	3	4	0	0	548	540
25	Alta	2	2	0	0	260	312
50	Alta	3	4	0	0	379	356
100	Alta	3	8	0	0	800	1200
500	Alta	10	13	1	0	3659	2366

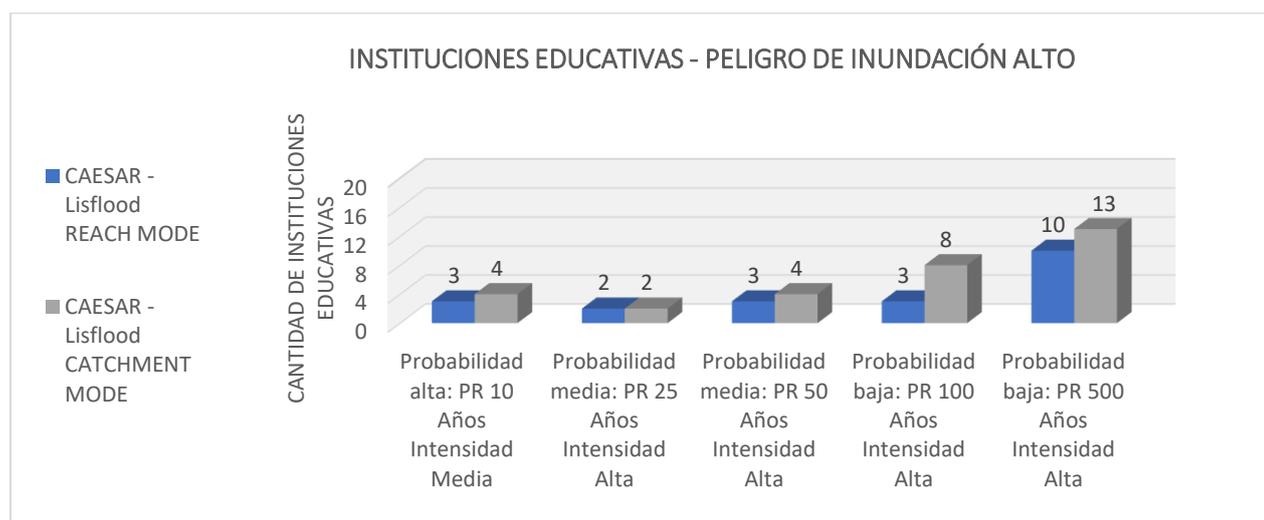
Tabla 77

Afectación a edificaciones con peligrosidad media

CANTIDAD DE EDFICACIONES AFECTADAS CON PELIGROSIDAD MEDIA							
PR	Intensidad	Instituciones educativas		Centros de Salud		Viviendas	
		Reach	Catchment	Reach	Catcment	Reach	Catcment
10	Baja	9	14	3	2	2786	3938
25	Media	4	4	3	2	1261	1383
50	Media	5	8	3	3	2322	2974

Figura 83

Instituciones educativas con peligro de inundación alto



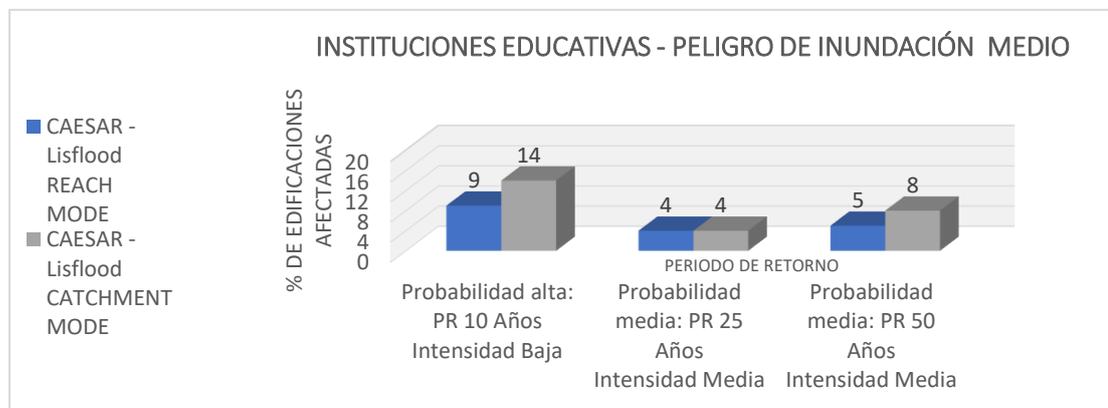
En la Figura 83 se presenta la cantidad de instituciones educativas que podrían ser afectadas con un nivel de peligro de inundación alto. A partir del modo de Captación

(Catchment Mode) se obtuvo un mayor número de instituciones educativas afectadas en comparación con el modo de Alcance (Reach Mode), a excepción del caso del período de retorno 25 años (probabilidad media e intensidad alta) donde se indica que 2 instituciones educativas podrían ser afectadas utilizando ambos modos, lo que representa el 10 % del total de instituciones educativas. A un período de retorno de 100 años (probabilidad baja) y una intensidad alta, podrían afectarse 8 instituciones educativas lo que significa el 40 % de las 20 instituciones educativas que existe la parroquia Colón.

Algunas de las instituciones educativas que podrían ser afectadas con un nivel de peligrosidad alto son: Escuela Particular Mixta Liceo Americano, Centro Educativo de Educación Básica Machala No. 30 y Cristóbal Colón, ubicadas en los barrios de San Ignacio, Estancia Vieja y Centro de Colón respectivamente.

Figura 84

Instituciones educativas con peligro de inundación medio

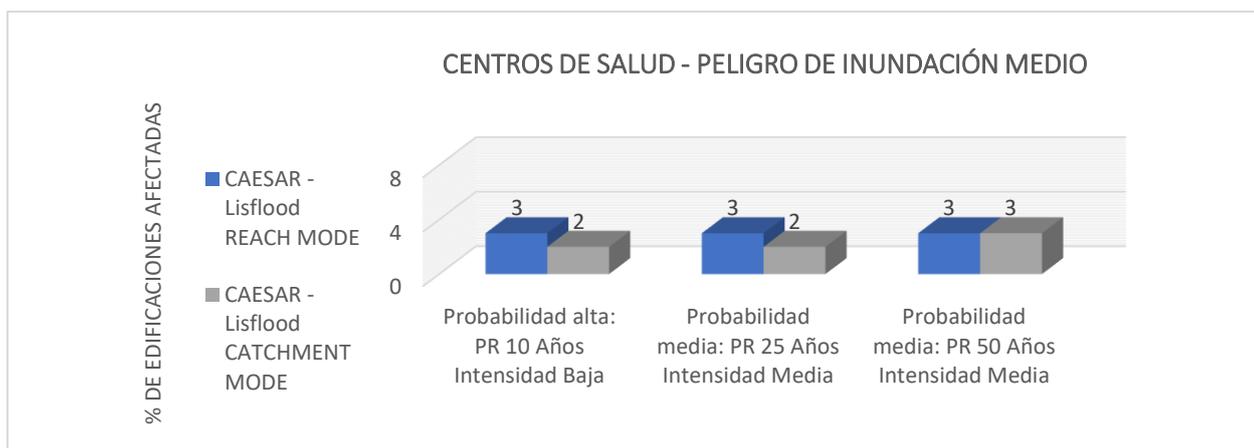


En la Figura 84 se indica la cantidad de instituciones educativas que se encuentran bajo un peligro de inundación medio. Para un período de 25 años (probabilidad media) e intensidad media (profundidades de flujo entre 0.6 a 1.2 m), podrían afectarse el 25 % y 40% de instituciones educativas de acuerdo a los resultados obtenidos con Reach y Catchment Mode respectivamente. Además, 14 instituciones educativas podrían ser afectadas con una

probabilidad de ocurrencia alta (10 años) e intensidad media, lo que representa el 70 % del total de instituciones educativas.

Figura 85

Centros de salud con peligro de inundación medio



En la Figura 85 se presentan los centros de Salud que podrían ser afectados con un peligro de inundación medio. Los resultados obtenidos con el modo de Alcance (Reach Mode) indican que podrían ser afectados 3 centros de salud a períodos de retorno de 10, 25 y 50 años y una intensidad media, lo que representa el 42.85 % de 7 centros de salud que existen en la parroquia Colón. Los 3 centros de salud mencionados son: El Naranja, Estancia Vieja y Subcentro los Ángeles

En la parroquia Colón existen un total 8873 viviendas. En la Figura 86 se presenta la cantidad de viviendas con peligro de inundación alto. A partir del modo de Alcance (Reach Mode) para un período de 10 años (probabilidad alta) e intensidad media, 548 viviendas podrían ser afectadas, es decir el 6 % del total de viviendas. Mientras que, 3659 viviendas se afectarían con una probabilidad baja (500 años) y una intensidad alta, lo que representa el 41.23 % del total. La mayor parte de viviendas que tienen una peligrosidad alta se encuentran en los barrios San Ignacio, Los Ángeles y la Mocora.

Figura 86

Viviendas con peligro de inundación alto



Figura 87

Viviendas con peligro de inundación medio



De acuerdo a la Figura 87, a partir del Modo de Captación (Catchment Mode), con una probabilidad alta (período de retorno 10 años) y una intensidad media, 2786 viviendas se encuentran en un peligro de inundación medio, lo que significa el 31 % del total de viviendas. La mayor parte de viviendas que tienen una peligrosidad media se encuentran en los barrios Centro de Colón, Los Ángeles y la Mocora.

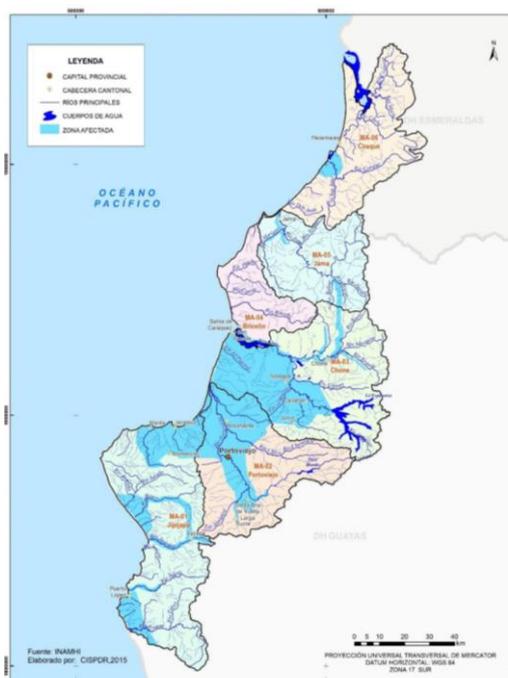
Comparación con inundaciones históricas

Las zonas de inundación en la parroquia Colón del Cantón Portoviejo, que se obtuvieron con el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Reach Mode y Catchment Mode, se compararon con el mapa de “zonas afectadas por las inundaciones del Niño 1997-1998” (Figura 4.3.9) del documento “Plan Hidráulico Regional de Demarcación Hidrográfica Manabí” (CISPDR, 2016). Ver Figura 88

Se realizó una georreferenciación al mapa de la Figura 88 con el fin de determinar el área de inundación en la parroquia Colón del cantón Portoviejo, y se obtuvo 67.69 km² de zonas de afectación, este valor es mucho mayor a las áreas obtenidas con el Modelo CAESAR Lisflood, en su modo Reach y Catchment, ver Tablas 51 y 54 respectivamente; y con HEC-RAS, ver Tabla 52.

Figura 88

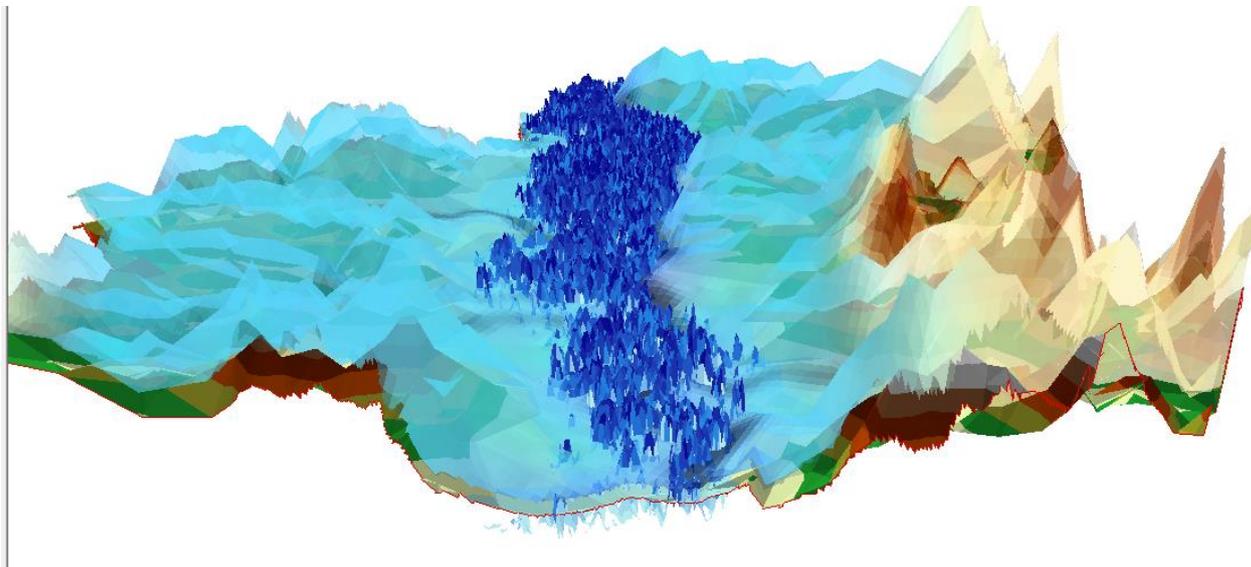
Zonas de Manabí afectadas por las inundaciones del Niño 1997-1998



Nota. Recuperado del Plan Hidráulico Regional de demarcación Hidrográfica Manabí, por (CISPDR, 2016).

Figura 89

Zonas de inundación histórica 1997-1998 y zonas de inundación a un período de retorno de 500 años en la parroquia Colón



En la Figura 89, se observa que el área de inundación histórica de 1997-1998 Fenómeno del Niño (color celeste) ocupa una mayor área en comparación con la de período de retorno de 500 años (color azul), obtenida con el Modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en su modo Reach. La mancha de inundación histórica del Niño inclusive ocupa zonas más elevadas, es decir el flujo de agua se encuentra presente en zonas con mayor pendiente que las zonas planas de la parroquia Colón.

Propuesta de actividades para la prevención y mitigación de inundaciones en la subcuenca del río Portoviejo

Prevención de erosión

Uno de los más grandes problemas de la subcuenca del río Portoviejo, es la erosión del suelo en sus laderas, perdiendo su capacidad de infiltración, lo que ocasiona que el flujo superficial aumente y contribuya al caudal del río principal, y en consecuencia el río se desborda de sus límites, inundando las zonas aledañas.

Para prevenir la erosión de los suelos en las laderas se han aplicado algunas técnicas de estabilización de taludes como por ejemplo los muros de hormigón o gaviones, sin embargo, estas estructuras no han soportado la fuerza del flujo del agua y se han destruido, sin solucionar el problema de las inundaciones.

(Chávez et al., 2008) utilizaron lechadas de cemento (mezcla de cemento con agua) en barrenos perforados reforzados con varillas de acero, clavadas a 12 metros en laderas cercanas al cauce del río Portoviejo, teniendo resultados favorables, es decir se impidió el proceso erosivo y se conservó la geometría de los taludes. (Chávez et al., 2008) no especifican en que lugares del río Portoviejo se instalaron estas estructuras de cemento y acero, por lo tanto, es necesario realizar una visita de campo e inspeccionar las zonas críticas faltantes, es decir aquellos taludes susceptibles a ser erosionados y que no han sido colocados los barrenos y finalmente evaluar el comportamiento de los taludes en épocas de lluvias extremas.

Otra alternativa para prevenir la erosión de la subcuenca del río Portoviejo es la bioingeniería que consiste en colocar especies vegetales endémicas en los taludes para mejorar su estabilidad. (Giler et al., 2020) recomienda anclar en la parte media del talud, especies leñosas, ya que sus raíces permiten obtener una mayor estabilidad en el talud, mientras que en la parte de abajo del talud se pueden colocar especies no leñosas (arbustos) que intercepten el agua de la lluvia a través de sus hojas. Además, con el paso del tiempo la vegetación aumenta su densidad por lo que se recupera el área natural que anteriormente fue deforestada y por lo tanto el área propensa a la erosión va disminuyendo.

Dragado del río Portoviejo

Consiste en remover sedimentos y rocas que se han depositado en el cauce del río, producto de la erosión del suelo de los taludes. En el año 2017 se realizó el dragado del río Portoviejo, sin embargo, es importante realizarlo de una forma periódica. El proceso consiste en retirar los sedimentos con dragas, transportarlos y darles una disposición final.

Con el proceso de dragado se disminuye considerablemente el riesgo a inundaciones en la cuenca baja del río Portoviejo, gracias al aumento de la profundidad del río.

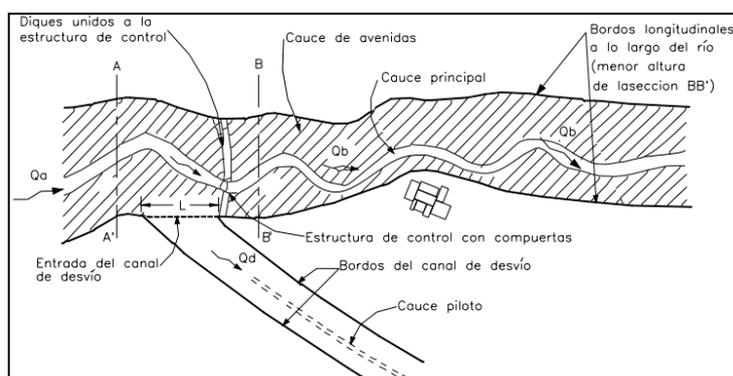
Muros de encauzamiento y canales de alivio

De acuerdo a Salas (1999), los muros o diques de encauzamiento permiten controlar el posible desborde del máximo nivel del agua, encauzando el flujo del río entre determinados límites, pueden ser de concreto en masa o armado o gaviones. Los beneficios de los muros de encauzamiento son: la reducción de la velocidad de flujo y el aumento de la resistencia de los márgenes del canal

Además, se puede combinar los muros de contención, con la técnica de canales de alivio, que consiste en desviar parte del flujo del agua que fluye por el río principal, hacia otro cauce, lo que permite reducir el caudal y la altura del agua. Ver Figura 90. Sin embargo, los muros o diques de encauzamiento podrían ser destruidos por el agua, debido a que estas estructuras son construidas para un período de retorno o un caudal de diseño, y al superarlo la estructura colapsa y se produce inundación. Por lo tanto, si es que el caudal máximo del evento supera el caudal de diseño de las estructuras, es más factible utilizar únicamente la técnica de canales de alivio.

Figura 90

Muros de contención y canales de alivio



Nota. Recuperado de Obras de protección contra inundaciones, por (Salas, 1999)

Regulación del uso del suelo y reubicación

Es necesario realizar una regularización del suelo urbanizable y no urbanizable de acuerdo a las condiciones de peligro de inundaciones. Los asentamientos humanos que se encuentren en zonas urbanas de peligro alta o media, es necesario reubicarlos en zonas rurales seguras, donde la peligrosidad a inundaciones sea baja o nula. Para la reubicación de los asentamientos humanos a zonas rurales, se debe definir qué áreas del suelo rural son aptas para la expansión urbana es decir deben ser zonas que no sean fértiles, con el fin de no afectar a la soberanía alimentaria. Además, se debe definir las zonas rurales de producción que tengan aptitud para la agricultura y que por ningún motivo en ellas se construyan edificaciones. Las áreas que necesiten ser reforestadas y conservadas, se denominan suelos rurales de protección.

Para realizar la reubicación de las personas a zonas seguras, es necesario que las autoridades destinen recursos económicos para la construcción de nuevas viviendas, infraestructura, servicios básicos, acceso vial, además de la logística de transporte de las personas afectadas.

Sistemas de filtración en zonas urbanas

El suelo de las zonas urbanas es impermeable y las áreas verdes son limitadas, lo que ocasiona que el agua de la lluvia no se infiltre y fluya rápidamente en las calles de las ciudades, por lo que es necesario aplicar sistemas de filtración. Para lograr la permeabilidad del suelo de las zonas urbanas se puede utilizar concreto permeable el cual se prepara a partir de la mezcla de agregados, cemento y agua, con poca cantidad de arena. El agua que se recolecta se puede someterla a un tratamiento y posteriormente reutilizara, como por ejemplo para lavado de autos u otros usos.

Programas de capacitación a la población frente al riesgo de inundaciones

La comunidad de Portoviejo debe tener una participación activa en los procesos de gestión de riesgos. Para lo cual se deben realizar programas de capacitación a las

comunidades, que promueven el conocimiento de la comunidad de las distintas amenazas que existen en el territorio, cuáles son sus causas y consecuencias, con lo que se logra que las personas tengan una mayor conciencia sobre cómo prevenir que una amenaza provoque daños a sus viviendas o tierras agrícolas. Lo que permite desarrollar una eficiente organización comunitaria para la prevención y mitigación del riesgo

Por ejemplo, si la comunidad conoce que la basura que se deposita en las laderas de la subcuenca hidrográfica del río Portoviejo, puede provocar un aumento del caudal del río, y que pueden obstruir los alcantarillados, las personas tomarán acciones para gestionar de una mejor manera su basura.

Además, para involucrar a las personas como actores comunitarios en los procesos de gestión de riesgos se pueden formar grupos comunitarios de contingencia y brigadas, para realizar actividades como: simulacros programados, instalar y mantener albergues, ubicar y organizar las zonas de seguridad, adquirir técnicas de búsqueda, rescate y evacuación, realizar planos de vías de evacuación, participar en la capacitación de salud y primeros auxilios, entre otros.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Los parámetros morfométricos de forma, relieve y drenaje, permitieron evaluar el comportamiento hidrológico de la microcuenca del río Portoviejo con una tendencia media o moderada a que se presenten inundaciones. Es decir, la microcuenca del río Portoviejo por tener una forma ensanchada y rectangular, pendiente media accidentada, pendiente moderada del cauce principal y densidades de drenaje y de corriente moderados; la escorrentía se evacuará por las corrientes a una velocidad media o moderada y existirán procesos erosivos considerables, lo que implica que el flujo superficial que se genera durante una tormenta, está influenciado de manera significativa por los parámetros morfométricos, principalmente por los parámetros de relieve. Por lo tanto, considerar a los parámetros morfométricos para la evaluación de inundaciones es muy importante.

La precipitación media de la microcuenca del río Portoviejo, es de 913.84 y 911.48 mm de acuerdo a los resultados obtenidos por el método de Polígonos de Thiessen y el método de Isoyetas respectivamente. Los registros de precipitación media de cada una de las estaciones meteorológicas, son estadísticamente consistentes con un 95 % de confianza, por lo que los valores calculados de la precipitación media de la microcuenca del río Portoviejo, son confiables. Los registros de precipitaciones de los pluviómetros de las estaciones meteorológicas: La Teodomira y Santa Ana, tienen una mayor influencia en la precipitación media de la microcuenca del río Portoviejo, sin embargo, estas dos estaciones cuentan con pocos años de registro de precipitaciones mensuales y diarias

Los caudales y precipitaciones máximas probables fueron insumos importantes para simular los flujos de inundación con el modelo autómatas celular CAESAR-Lisflood; para obtener curvas de intensidad de precipitación, hietogramas e hidrogramas precisos, fue

necesario utilizar datos de precipitaciones máximas diarias históricas estadísticamente consistentes a un 90% de confianza, de la estación Portoviejo UTM (M005) la cual tiene una menor área de influencia sobre la microcuenca del río Portoviejo, pero con muchos años de registro y se encuentra cercana al área de estudio (Parroquia Colón).

En el análisis granulométrico por tamizado, se determinó el % de peso retenido y % pasante en los diferentes tamaños de malla, de las 5 muestras de sedimentos del cauce principal del río Portoviejo. En la muestra del punto 5, en la malla No. 200 (0.075 mm) se retuvieron 140.64 gramos; en la malla No. 100, 51.43 gramos; y en la malla No 60., 34.11 gramos, lo que representa el 34.02, 12.44 y 8.25 % de la muestra total respectivamente. Lo que significa que, en la muestra de sedimentos del punto 5, el 54.71 % son partículas arenosas muy finas, finas o medias; el 43.45 % son partículas finas (limos y arcillas) y el resto son partículas arenosas gruesas o gravas. El porcentaje pasante en cada malla permitió construir la curva granulométrica y los diámetros característicos D50 Y D90, mismos que se utilizaron para calcular el valor de n de Manning de 0.0495, parámetro importante para el modelamiento en CAESAR-Lisflood.

A partir de las áreas de las zonas de inundación a distintos períodos de retorno, que se obtuvieron con el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood en sus dos modos: Catchment y Reach Mode, se determinaron los barrios que más se afectarían en una posible inundación, los cuales son: Los Ángeles de Colón, La Mocora, el Cadi, San Ignacio, El Naranjo y el Centro de Colón, en ellos se encuentran la mayor parte de edificaciones por lo que las autoridades deberían tomar acciones correctivas para prevenir los daños en estos barrios que son más vulnerables, una opción podría ser el traslado de los asentamientos humanos hacia zonas seguras.

A partir de análisis de la varianza de un factor (ANOVA), se determinó que no existen diferencias significativas entre las áreas de afectación, alturas o profundidades de flujo y el

porcentaje de áreas de edificaciones afectadas (variables dependientes), utilizando tres tipos de métodos: CAESAR Lisflood en sus dos modos: Catchment y Reach Mode; y HEC-RAS (variables independientes). Es decir, en este caso las variables independientes no tienen un efecto estadísticamente significativo en las variables dependientes, por lo que se aceptaron las hipótesis nulas, por lo tanto, las medias de las variables dependientes son estadísticamente iguales. En otras palabras, las áreas de afectación, profundidades de flujo y porcentaje de áreas de edificaciones afectadas no cambian significativamente, al modelarse con CAESAR-Lisflood o HEC-RAS.

A pesar de no existir diferencias significativas entre las áreas y alturas de inundación; el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood considera la erosión y deposición de sedimentos de acuerdo a la cantidad de agua en cada una de las celdas, es decir modela al paisaje de una forma cercana a la realidad; mientras que HEC-RAS unidimensional no considera estos procesos y discretiza al río como una línea que se divide en secciones transversales; por lo tanto se puede deducir que las áreas y alturas de flujo de agua en las llanuras de inundación de la parroquia Colón obtenidas con el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood son más confiables debido a que considera los procesos geomorfológicos que modelan el paisaje.

Las zonas con peligrosidad de inundaciones altas o medias, son las más prioritarias para tomar acciones preventivas para evitar que sus infraestructuras como instituciones educativas, centros de salud, viviendas, tengan daños estructurales por la velocidad y altura del agua; y comprometan el bienestar de los pobladores de la parroquia Colón del cantón Portoviejo.

Recomendaciones

Se recomienda solicitar al INAMHI los datos de precipitaciones mensuales faltantes (2014-2021), para completar la base de datos, calcular nuevamente la precipitación media de la microcuenca; y compararla con la obtenida a partir de la base de datos híbrida

(estaciones meteorológicas y satelitales de CHIRPS DAILY).

En el presente proyecto se calculó las precipitaciones máximas probables utilizando la función de distribución de Gumbel, por lo que sería importante utilizar otro tipo de función de probabilidad y comparar los resultados. Una función de distribución de probabilidad que se podría usar es la distribución log de Pearson III, misma que utilizaron (Aguilar & Echeverría, 2018) para calcular los caudales máximos probables.

El método racional se podría utilizar para obtener los caudales máximos probables en la microcuenca del río Portoviejo y compararlos con los obtenidos en el presente proyecto con el software HEC-HMS y distribución de Gumbel; para ello es necesario conocer el coeficiente de escorrentía, la intensidad de la lluvia y el área de la cuenca.

El muestreo de los sedimentos de fondo de un río, se lo debe realizar en meses de época seca, debido a que las lluvias aumentan el caudal y velocidad del flujo de agua y arrastran hacia arriba los sedimentos y no permiten tomar una muestra significativa de sedimentos

Se podría utilizar los dos modos combinados de CAESAR-Lisflood: Reach y Catchment Mode para simular el flujo de agua en la parroquia Colón del cantón Portoviejo; además HEC-RAS actualmente cuenta con una versión bidimensional por lo que sería importante determinar las zonas de inundación utilizando esta versión; y comparar con los resultados obtenidos en el presente proyecto.

En el cantón Portoviejo existen algunas parroquias que históricamente han sido afectadas por las inundaciones; por lo tanto, es importante que en futuras investigaciones se realice el modelamiento con el modelo bidimensional CAESAR-Lisflood de las parroquias Andrés de Vera, Portoviejo, Simón Bolívar, entre otras; o en otras cuencas hidrográficas del Ecuador donde las inundaciones sean frecuentes y no se cuente con estudios de peligrosidad

por inundaciones.

Es importante realizar en una futura investigación, un análisis prospectivo de cambio de uso del suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del río Portoviejo utilizando autómatas celulares conjuntamente con cadenas de Márkov.

Los Gobiernos autónomos descentralizados del cantón Portoviejo y de la parroquia Colón deberán tomar en cuenta la delimitación de las áreas posibles de inundación, y la propuesta de actividades para disminuir el peligro y vulnerabilidad a inundaciones

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, R., & Echeverría, S. (2018). *Análisis de vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Colón, Cantón Portoviejo-Manabí*. Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.
- Aguilera, M. (2007). *Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule*. Universidad de Talca.
- Amat, J. (2016). ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. In *Ciencia de Datos*.
https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova#Idea_intuitiva_del_ANOVA
- Anaya, O. (2012). *Caracterización morfológica de la cuenca hidrográfica Chinchao, distrito de Chinchao, provincia Huánuco, región Huánuco*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
- Bates, P., Horritt, M., & Fewtrell, T. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 73–74. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bravo, M., Osterkamp, W., & Lopes, V. (2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 377–386.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. In *Universidad Autónoma Metropolitana*.
- Brieva, C. (2018). Caracterización y análisis multidisciplinario de la información hidrológica en cuencas. In *Programa Nacional Agua - Pnagua*.
https://inta.gob.ar/sites/default/files/caracterizacion_de_cuencas_0.pdf
- Burgos, B., Cartaya, S., & Mero, D. (2019). Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Santa Ana de Vuelta Larga, provincia de Manabí, Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 98. <https://doi.org/10.14350/rig.59767>

- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., Del Río, J., Lopez, A., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) Mariana. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 117–150.
- Cea, L., & Bladé, E. (n.d.). *Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable*. 1–30.
- CENEPRED. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. In *Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres*. (Vol. 2). http://www.sigpad.gov.co/sigpad/paginas_detalle.aspx?idp=112
- Cercedo, F. (2019). *Evaluación de riesgo originado por inundaciones fluviales en el centro poblado de Sausal-districto de Luyando 2019*.
- Chávez, M., Blanco, R., & Watson, R. (2008). Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador. *Minería y Geología*, 24(3), 1–9.
- Chester, S., Sandra, B., Eduardo, C., & David, M. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador. *CONFIBSIG*, 399–412.
- CISPDR. (2016). *Plan hidráulico regional de demarcación hidrográfica Manabí*.
- Coaquira, R. (2015). *Análisis de precipitaciones para determinar caudales máximos en la microcuenca MILLI MILLI - MOHO*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Cordova, M. (2016). *Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas*. https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26
- Corradine, M. (2017). *Actualización POMCA río Garagoa. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica*. <http://www.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2015/11/3.5.-Morfometría-1.pdf>
- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R., & Ríos, E. (2013). *Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y Perspectivas para su manejo y gestión* (1a ed). Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.
- Coulthard, T., & Van De Wiel, M. (2012). Modelling river history and evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 2123–2142. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0597>

- Coulthard, Thomas, Neal, J., Bates, P., Ramirez, J., de Almeida, G., & Hancock, G. (2013). Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: Implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1897–1906. <https://doi.org/10.1002/esp.3478>
- Cuadrat, J., Vicente, S., & Saz, M. (2002). Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. *VII Reunión Nacional de Climatología. Grupo de Clima de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 1(1), 83–92. http://digital.csic.es/bitstream/10261/9859/1/BegueríaS_2002.pdf
- Daza, M., & Pérez, P. (2013). Estudio para determinar la variación del coeficiente de escorrentía y su impacto en la capacidad de la red de alcantarillado en los colectores de las calles Arirumba e Imbabura [Universidad de Cuenca]. In *Universidad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4540>
- Díaz, Á., & Mercado, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452–470. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>
- Fernández de Córdova, C., León, A., Rodríguez, Y., Martínez, P., & Meneses, D. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17–31.
- Fernández, S., & Rangel, J. (2014). Autómatas celulares y su aplicación en computación. *VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*, 17–21. <https://doi.org/10.13140/2.1.2167.2964>
- Fischer, G., Ramírez, F., & Davenport, T. (2012). *Avances en la inducción floral en feijoa*.
- Fuentes, K. (2016). *Distribución de las precipitaciones máximas Diarias en la región de los Ríos*. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2192>
- Garay, Daniel, & Figueroa, W. (2015). *Diseño de un modelo basado en autómatas celulares para el cambio de uso de suelo en Bogotá* [Universidad Católica de Colombia]. <http://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2789>
- Garay, Domingo, & Agüero, J. (2018). *Delimitación Hidrográfica y Caracterización*

Morfométrica de la Cuenca del Río Anzulón. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

García, J. (2004). *Modelo de pérdidas para determinar Precipitación Efectiva usando Sistemas de Información Geográfica*. Universidad de Piura.

Gaspari, F., Gabriela, S., & Marlats, R. (2007). Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 39(1), 21–28.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Basteiro, S. (2013). *Elementos Metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas* (1a ed.).
<https://doi.org/10.35537/10915/87641>

Gaspari, F., Vagaría, A., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augmdomus*, 4, 143–158.

Giler, A., Donoso, S., Arteaga, R., & Zaldumbide, D. (2020). Manejo sostenible de inundaciones , cuencas hidrográficas y riberas en la provincia de Manabí. *Revista La Técnica*, 55–72.

González, J. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. *Norba. Revista de Geografía*, 155–184.
<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf>

Gutierrez, J. (2009). *Cálculo del coeficiente de rugosidad de manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico* [Universidad de la Salle].
repositorio.lasalle.edu.co/bitstream/10185/15265/2/T40.09_G985c.pdf

Hamad, K. (2008). Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre. In *Escuela politécnica nacional*. Escuela politécnica nacional.

Havrylenko, B., Damiano, F., & Pizarro, M. (2012). Estimación del número de curva en la cuenca del río Arrecifes, Buenos Aires. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 12(16), 2012.

Huertas, N. (2020). (PDF) *TOPMODEL MODELACIÓN HIDROLÓGICA (TMH) Software para el*

cálculo de infiltración y escorrentía en una cuenca hidrográfica.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28717.72165/1>

Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas.

Universidad Politécnica de Valencia.

Imhoff, M., & Trento, A. (2012). Determinación de la rugosidad superficial y anchos de

inundación en la planicie del río Salado (Santa Fe) para la crecida de 2003. *Cuadernos de Curiham*, 18, 51–61.

INDECI. (2011). Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales. In *Cuaderno*

Técnico N° 02.

Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. *Scripta Nova–*

Revista, 1–22.

López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., & Gimena, F. (2012).

Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y Proyectos*, 12, 15–30.

<https://doi.org/10.4067/s0718-28132012000200002>

Lowry, J., Coulthard, T., Saynor, M., & Hancock, G. (2020). A comparison of landform

evolution model predictions with multi-year observations from a rehabilitated landform. *Department of Agriculture, Water and the Environment.*

Lux, B. (2014). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Maestría En*

Energía y Ambiente, 8.

<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%0Abásicos%0Ade%0AMorfometría%0ACuencas%0AHidrográficas.pdf%0Ahttp://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1>

[/Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.pdf](#)

Marco, F. (2015). *Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en la Rambla del*

Albujón. Universidad Politécnica de Cartagena.

Mesa, O. (2018). Cuatro modelos de redes de drenaje. *Revista de La Academia Colombiana*

de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 42(165), 379.

<https://doi.org/10.18257/raccefyn.641>

Montoya, J. (2008). *Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito*

de sedimentos. Universidad Politécnica de Valencia.

- Montoya, L., & Montoya, R. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(7), 101–109.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Patalano, A., & Labaque, M. (2015). Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales. *Maskana*, 83–95.
- Ordaz, J., Melgar, M., & Rubio, C. (2017). Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para Finanzas. *Universidad Pablo de Olavide*, 1–237.
https://www.upo.es/export/portal/com/bin/portal/upo/profesores/jaordsan/profesor/1311101268463_mxtodos_estadisticos_y_economxtricos_en_la_empresa_y_para_finanzas.pdf
- Padilla, O. (2014). Autómatas celulares: Una solución a la geosimulación. *ResearchGate*.
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2055>
- Pavón, A. M. (2017). *Aplicación del modelo autómata celular de Evolución del paisaje Caesar - Lisflood para determinar zonas con amenaza de inundaciones en la microcuenca del río Cristal*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Pérez, J., & Senent, J. (2017). Curvas intensidad-duración-frecuencia de tormentas de corta duración en la cuenca del río Segura, España. *Agrociencia*, 51(6), 607–616.
- Pérez, Y. (2015). *Riesgo de inundación por rotura en la cortina de la presa Yateras*. Superior Minero Metalúrgico.
- Pizarro, R., Flores, J. P., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2003). Módulo 2: Curvas intensidad duración frecuencia. *EIAS*.
http://eias.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/b_modulo_IDF.pdf
- Ponce, E. (2008). *Comportamiento hidráulico y sedimentológico de la bocatoma independiente de aguas andinas en el río Maipo*.
- Ramírez, A., Cruz, A., Sánchez, P., Monterroso, A., & Ismael, R. (2015). La caracterización morfométrica de la subcuenca del Río Moctezuma, Sonora: ejemplo de aplicación de los sistemas de información geográfica. *Revista de Geografía Agrícola*, 55, 27–43.
<https://doi.org/10.5154/r.rga.2015.55.003>

- Ramírez, J. (2010). Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. *Inland Flood Hazards*, 293–333. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511529412.012>
- Ramos, V. (2014). *Inundaciones* (1ª ed.). Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Rodríguez, L., Baca, P., Pastora, R., García, J., Pérez, R., López, N., & Zapata, A. (2008). *Microcuenca Río "La Gloria", Caracterización y Diagnóstico*.
- Rodriguez, P. (2008). *Hidráulica de Canales*.
- Salas, M. (1999). *Obras de protección contra inundaciones*.
- Sánchez, F. (2016). *Cálculos Estadísticos en Hidrología*. <http://hidrologia.usal.es>
- Sánchez, J. (2016). *Evapotranspiración*.
- Sancho, F. (2016). *Autómatas Celulares*. <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=66>
- Saynor, M. J., Lowry, J. B. C., & Boyden, J. M. (2019). Assessment of rip lines using CAESAR-Lisflood on a trial landform at the Ranger Uranium Mine. *Land Degradation and Development*, 30(5), 504–514. <https://doi.org/10.1002/ldr.3242>
- Serrano, S., Reisancho, A., Lizano, R., Borbor, M., & Stewart, A. (2016). Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno del niño. Caso de estudio: Machala. *La Granja: Revista de Ciencias de La Vida*, 24(2), 53–68. <https://doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.05>
- Simeon, J. (2017). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 (75 um) en agregado mineral por lavado*. 1(01), 15.
- Timbe, L. M., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *Maskana*, 2(1), 91–98. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.07>
- Toirac, J. (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la República Dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón. *Ciencia y Sociedad*, 37(3), 293–334. <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i3.pp293-334>
- Torres, J., & Vivas, J. (2018). *Modelación de una estructura hidráulica de confluencia de canales urbanos. (caso estudio: río Arzobispo, Bogotá D.C.)*. Universidad Católica de Colombia.

- Toulkeridis, T. (2015). *Amenazas de origen natural y gestión de riesgo en el Ecuador* (1a ed). Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
<http://www.espe.edu.ec>
- Umaña, B. (2014). Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS. *Ico Tec*, 1–91. <http://hdl.handle.net/2238/6148>
- Urgilés, M. (2015). Análisis Espacio - Temporal De Precipitaciones de Intensidades : Obtención de Histogramas De Diseño En La Cuenca Alta Del Río Paute. *Universidad de Cuenca*, 75.
- Urquiza, Y., Galbán, L., Nuria, N., & Chuy, T. (2017). El impacto de fenómenos geoambientales en cortinas de presas de tierra en Cuba. *Ciencia En Su PC*, 1, 56–69.
- Vélez, J., & Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis , Manizales. *Dyna*, 165, 58–71.
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640>
- Villalba, M. A. (2016). *Propuesta para la implementación de un sistema de respuesta de emergencias en la Editora Nacional*. Universidad Internacional del Ecuador.
- Villegas, P. (2017). *Calcular número de curva con Arcgis*. Agua y SIG.
<https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arcgis/>
- Wesseling, C., Van Deursen, W., & De Wit, M. (1997). Large scale catchment delineation: a case study for the river Rhine basin. *Proc. JEC-GI 97*, 16–18.
https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902102805350309
- Zhica, J. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo*.

ANEXOS