



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**

Javier Alejandro López Guerrero

Asesorado por el Ing. M.Sc. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JAVIER ALEJANDRO LÓPEZ GUERRERO

ASESORADO POR EL ING. M.SC. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 2 de mayo de 2019.

Javier Alejandro López Guerrero

Guatemala, 9 de noviembre de 2020

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Javier Alejandro López Guerrero, el cual contó con mi asesoría en todas las fases.

Considero que este trabajo de graduación está bien desarrollado y representa un aporte para el desarrollo de la hidrología a nivel nacional, en tal sentido, habiendo cumplido con los objetivos en calidad de asesor doy mi aprobación al mismo solicitando darle trámite respectivo.

Atentamente,



Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
M. Sc. Hidrología y Recursos Hidráulicos
Colegiado No. 2,504
Asesor

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504



Guatemala, 09 de noviembre de 2,020

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar Polanco:

Le informo que he revisado la trabajo graduación, **MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **JAVIER ALEJANDRO LÓPEZ GUERRERO**, **CUI:2138804150101**, **Registro Académico: 201114286**, quien contó con la asesoría del **ING. M.SC. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE**, considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Revisor del Departamento de Hidráulica

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/mrrm.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

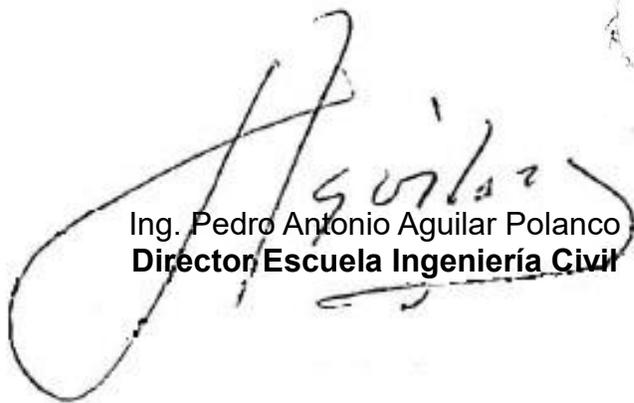
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 23 de noviembre de 2020
DEIC-TG-EIC-018-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ingeniero Juan Carlos Fuentes Montepeque y del revisor del Departamento de Hidráulica, Ingeniero Rafael Enrique Morales Ochoa, al trabajo de graduación del estudiante Javier Alejandro López Guerrero, **MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

VID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil



Interesado
Asesor
Jefe del Departamento de Hidráulica

Más de 140 años de Trabajo y Mejora Continua



DTG. 416.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MODELACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZANDO EL SOFTWARE RS MINERVE EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VILLALOBOS ENFOCADO A LA GESTIÓN DE RIESGO**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Alejandro López Guerrero**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Alba Guerrero y Moisés López. Una mujer brillante de la zona 5 y un hombre libre de Purulhá rompieron las duras cadenas de la adversidad, por coincidencia o destino, unieron esfuerzos y formaron una familia. La vida me bendijo con dos grandes ejemplos a seguir. El listón está alto, pero no me rendiré hasta poder alcanzarlo. Este es el primer paso. Gracias por las enseñanzas, correcciones y su apoyo incondicional. Todo lo que soy, es gracias a ustedes.

Mi esposa

Gabriela Rodas, por tomar mi mano y caminar juntos en nuestro eterno verano. Verano de amor y de alegría, verano que, sin usted, sería una tontería.

Mis hijos

Samantha Gabriela, Daniel Alejandro y Emma Camila López, gracias a ustedes amados míos, pude cumplir mi sueño más anhelado, una familia. Me enseñaron una forma distinta de amar. Espero que les sirva mi ejemplo para su superación.

Mis hermanos

Cada uno de ustedes me han enseñado virtudes y valores, las cuales destacan en Alejandra Lucía, tu perseverancia y resiliencia; en Alba Sofía, su laboriosidad y disciplina; y en Luis Emilio, tu responsabilidad y puntualidad. Gracias a ustedes sé lo que es un hogar.

Mi suegra

Nancy González, por tratarme como a su hijo, por todo el amor que tiene hacia mi familia y a mi persona. Gracias por ser mi segunda mamá.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por la vida, por su misericordia y permitirme cumplir un sueño.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi segunda casa durante varios años y permitirme cumplir la meta de ser un profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas y facilidades para así, adquirir el conocimiento necesario para ejercer y ayudar a la sociedad guatemalteca.
Mis amigos de la Facultad	Gracias por acompañarme en mi etapa universitaria. Tantos recuerdos que quedarán en la memoria.
Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque	Por compartir sus conocimientos, por su dedicación y paciencia.
Ing. Otto García y al INDE	Por brindarme acceso a data importante de tan prestigiosa institución y así culminar mi trabajo de graduación.

**Ing. Arturo Samayoa e
Inga. Glenda García**

Por la confianza y oportunidad que me brindaron en tan renombrado departamento.

INSIVUMEH

Por proporcionarme información relevante para la investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Ciclo hidrológico	1
1.2. Hidrografía de Guatemala	4
1.2.1. Vertiente del océano Pacífico	5
1.2.2. Vertiente del golfo de Honduras o mar Caribe.....	6
1.2.3. Vertiente del golfo de México.....	7
1.3. Modelos hidrológicos.....	7
1.3.1. Clasificación de los modelos hidrológicos	10
1.3.2. Elementos de un modelo hidrológico.....	12
1.4. Exactitud y precisión.....	13
1.5. Indicadores de eficiencia	13
1.5.1. Coeficiente de Nash	14
1.5.2. Coeficiente de Nash In.....	15
1.5.3. Coeficiente de correlación de Pearson	15
1.5.4. Indicador de eficiencia Kling-Gupta	16
1.5.5. Puntaje de sesgo	17
1.5.6. Error cuadrático medio relativo de la raíz (RRMSE)	17

1.5.7.	Sesgo de volumen relativo (RVB)	18
1.5.8.	Error de pico normalizado (NPE).....	19
1.5.9.	Puntuación de habilidad de Peirce (PSS).....	19
1.5.10.	Precisión general (OA)	20
1.6.	Calibración y validación.....	20
1.7.	Modelos lluvia – escorrentía.....	21
1.7.1.	Modelo hidrológico GR4J	21
1.7.2.	Modelo hidrológico SOCONT	23
1.7.3.	Modelo hidrológico HBV	26
1.7.4.	Modelo hidrológico SAC-SMA.....	28
1.8.	Software RS MINERVE.....	31
1.9.	Análisis de eventos extremos.....	32
1.9.1.	Probabilidad	32
1.9.2.	Periodo de retorno (Tr).....	32
1.9.3.	Tiempo de concentración	33
1.9.4.	Crecidas	33
1.9.5.	Distribuciones teóricas de frecuencias para eventos extremos	34
1.10.	Componentes básicos de riesgo	34
1.10.1.	Riesgo identificado	34
1.10.2.	Amenaza	35
1.10.3.	Vulnerabilidad.....	35
1.10.4.	Desastre	35
1.10.5.	Inundación.....	36
2.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	37
2.1.	Ubicación geográfica.....	37
2.2.	Delimitación de la subcuenca del río Villalobos	38

2.3.	Determinación de parámetros morfométricos de la subcuenca del río Villalobos	39
2.3.1.	Área de drenaje	40
2.3.2.	Tipo y uso de suelo.....	40
2.3.3.	Pendiente media (S)	42
2.3.4.	Histograma de frecuencias altimétricas	45
2.3.5.	Curva hipsométrica	45
2.3.6.	Índice de compacidad (K)	47
2.3.7.	Factor de forma	48
2.3.8.	Pendiente media del cauce principal	48
2.3.9.	Orden de las corrientes	49
2.3.10.	Densidad de drenaje.....	50
3.	RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS	53
3.1.	Red de monitoreo hidrometeorológico.....	53
3.2.	Régimen de lluvias	56
3.2.1.	Lluvia anual.....	57
3.2.2.	Lluvia mensual.....	58
3.2.3.	Lluvia diaria.....	61
3.2.4.	Lluvia diaria máxima anual	62
3.3.	Prueba de hipótesis.....	64
3.3.1.	Independencia	64
3.3.1.1.	Prueba de Anderson.....	64
3.3.2.	Homogeneidad	65
3.3.2.1.	Prueba <i>t Student</i>	66
3.4.	Análisis de frecuencia.....	66
3.4.1.	Ajuste de las series de valores extremos	67
3.5.	Estimación de eventos de diseño	70

4.	MODELACIÓN HIDROLÓGICA EMPLEANDO EL SOFTWARE RS MINERVE.....	71
4.1.	Base de datos de la plataforma RS MINERVE	74
4.2.	Incorporación de los elementos hidrológicos	76
5.	RESULTADOS.....	79
5.1.	Modelo hidrológico GR4J.....	79
5.2.	Modelo hidrológico SOCONT.....	81
5.3.	Modelo hidrológico HBV.....	84
5.4.	Modelo hidrológico SAC-SMA.....	86
6.	MEDIDAS PREVENTIVAS, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS	89
6.1.	Zonas de inundaciones	89
6.2.	Uso del suelo	91
6.3.	Obras de defensa.....	91
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	APÉNDICES.....	103
	ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico	2
2.	Mapa base de cuencas hidrográficas.....	4
3.	Relación conceptual entre la disponibilidad de los datos, la complejidad del modelo y el rendimiento de la predicción	9
4.	Representación gráfica de un modelo agrupado, distribuido y semidistribuido	12
5.	Representación del modelo GR4J	22
6.	Representación del modelo SOCONT	24
7.	Representación del modelo HBV	26
8.	Representación del modelo SAC-SMA	29
9.	Ubicación geográfica y delimitación de la subcuenca del río Villalobos.....	39
10.	Mapa de geología de la subcuenca del río Villalobos.	42
11.	Mapa de pendientes de la subcuenca del río Villalobos.....	44
12.	Histograma de frecuencias altimétricas.....	45
13.	Curva hipsométrica de la subcuenca del río Villalobos	46
14.	Cuenca hidrológica delimitada por el parteaguas y su red hídrica	50
15.	Estaciones meteorológicas en estudio, subcuenca del río Villalobos ..	54
16.	Precipitación anual (1980-2019) de las estaciones Guatemala Sur, Compuertas Amatitlán, INSIVUMEH y Suiza contenta.....	57
17.	Precipitación mensual de las estaciones meteorológicas en estudio ...	59
18.	Distribución típica de la precipitación media mensual de la subcuenca del río Villalobos.....	60

19.	Precipitación media diaria de la subcuenca del río Villalobos.....	61
20.	Precipitación diaria máxima anual de la subcuenca del río Villalobos	63
21.	Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Guatemala Sur.....	68
22.	Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Compuertas Amatitlán	68
23.	Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación INSIVUMEH.....	69
24.	Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Suiza Contenta	69
25.	División de la subcuenca del río Villalobos en microcuencas	72
26.	Creación de base de datos en la plataforma RS MINERVE	75
27.	Representación gráfica de los modelos hidrológicos y variables de entrada	76
28.	Incorporación de los elementos hidrológicos en la subcuenca del río Villalobos	77
29.	Caudales medios diarios simulados y observados del modelo GR4J...	80
30.	Caudales medios diarios simulados y observados del modelo SOCONT	83
31.	Caudales medios diarios simulados y observados del modelo HBV.....	86
32.	Caudales medios diarios simulados y observados del modelo SAC- SMA	88
33.	Mapa de inundaciones en la subcuenca del río Villalobos.....	90

TABLAS

I.	Vertientes de la República de Guatemala	5
II.	Cuencas de la vertiente del océano Pacífico	6
III.	Rango de valores y valor ideal de los indicadores de eficiencia	14
IV.	Parámetros del modelo GR4J	23
V.	Parámetros del modelo SOCONT	25
VI.	Parámetros del modelo HBV	27
VII.	Parámetros del modelo SAC-SMA	30
VIII.	Departamentos y municipios dentro de la subcuenca del río Villalobos.....	38
IX.	Fracción del área de las microcuencas del río Villalobos ocupadas para los usos indicados.....	41
X.	Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Villalobos.....	51
XI.	Coordenadas de las estaciones meteorológicas empleadas para el estudio de la subcuenca del río Villalobos	55
XII.	Datos faltantes de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia de la subcuenca del río Villalobos	56
XIII.	Parámetros estadísticos de la precipitación media anual de la subcuenca del río Villalobos.....	58
XIV.	Parámetros estadísticos de la precipitación media mensual.....	60
XV.	Parámetros estadísticos de la serie de precipitación media diaria.....	62
XVI.	Parámetros estadísticos de la serie de precipitación diaria máxima anual	63
XVII.	Parámetros obtenidos de la prueba de independencia de Anderson...	65
XVIII.	Parámetros obtenidos en la prueba <i>t Student</i>	66
XIX.	Eventos de diseño correspondientes a lluvias diarias máximas anuales	70

XX.	Área y centroides de las microcuencas de la subcuenca del río Villalobos	71
XXI.	Estaciones meteorológicas para el estudio de la subcuenca del río Villalobos	73
XXII.	Porcentaje de datos faltantes en las estaciones meteorológicas del año 2003 hasta el 2019	74
XXIII.	Parámetros del modelo GR4J.....	80
XXIV.	Indicadores de eficiencia del modelo GR4J.....	81
XXV.	Parámetros del modelo SOCONT.....	82
XXVI.	Indicadores de eficiencia del modelo SOCONT	83
XXVII.	Parámetros del modelo HBV	84
XXVIII.	Indicadores de eficiencia del modelo HBV.....	85
XXIX.	Parámetros del modelo SAC-SMA.....	87
XXX.	Indicadores de eficiencia del modelo SAC-SMA.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HGR3Max	Altura máxima del depósito de infiltración
X1	Capacidad del primer reservorio
X3	Capacidad del segundo reservorio
FC	Capacidad máxima de almacenamiento del suelo
Kperc	Coeficiente de almacenamiento de la percolación
KI	Coeficiente de almacenamiento del flujo base
Kr	Coeficiente de almacenamiento del flujo cerca de la superficie.
bp	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida
X2	Coeficiente de intercambio de agua
KGR3	Coeficiente de liberación del depósito de infiltración
K	Coeficiente de <i>Strickler</i>
CV	Coeficiente de variación
Sini	Contenido inicial de agua en el primer reservorio
SPh	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal
Pctim	Fracción de área impermeable permanente
Pfree	Fracción de percolación que va directamente al almacenamiento de agua n la zona inferior.
°C	Grados <i>Celsius</i>
Hini	Humedad inicial
km²	Kilómetros cuadrados
L	Longitud del plano
m	Metros

m²	Metros cuadrados
m³/s	Metros cúbicos sobre segundo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm/°C/d	Milímetros grado día
HrIni	Nivel de agua de escorrentía inicial aguas abajo de la superficie.
SLIni	Nivel de agua inicial en el reservorio inferior
SUIni	Nivel de agua inicial en el reservorio superior
Rini	Nivel de agua inicial en el segundo reservorio
HIni	Nivel inicial del agua aguas abajo de la superficie
HGR3Ini	Nivel inicial en depósito de infiltración
Rexp	Parámetro de forma de la curva de percolación
Beta	Parámetro del modelo (coeficiente de forma)
J0	Pendiente de escorrentía
Tr	Periodo de retorno
PWP	Punto de marchitez permanente del suelo
Side	Relación de percolación profunda desde la zona inferior libre.
Zperc	Relación de tasas de filtración máximas y mínimas
A_e	Superficie de escorrentía
A_i	Superficie de infiltración
A	Superficie de la cuenca
Uzk	Tasa de agotamiento entre flujos desde la parte superior.
Tcp1	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida
X4	Tiempo base de los hidrogramas unitario
Tc	Tiempo de concentración

GLOSARIO

Amenaza	Actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental.
Año hidrológico	Periodo de 12 meses continuos, iniciando en el mes en el que se considera empieza la época de lluvias. En el caso de Guatemala, inicia el 1 de mayo y finaliza el 30 de abril.
Avenida	Aumento considerable del caudal de un río con relación a su caudal medio.
Balance hídrico	Balance de la entrada, salida y contenido de agua en una unidad hidrológica.
Cauce	Conducto abierto, de origen natural o artificial, por donde fluye un río, un canal o cualquier corriente de agua.
Caudal medio diario	Es la tasa promedio de descarga en m^3/s para un período de 24 horas.
Cuenca hidrográfica	Unidad territorial en la cual todas las aguas fluyen hacia un mismo río, lago o mar definida por el parteaguas.

Escorrentía	Se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de una cuenca.
Evaporación	Es el fenómeno físico en el que el agua se convierte de estado líquido a gaseoso.
Evapotranspiración	Proceso por el que el agua es transferida a la atmósfera desde el suelo por evaporación y desde la vegetación por transpiración.
Función objetivo	Función constituida por uno o varios indicadores de eficiencia definidos que permite comparar el error de las series de caudales simulados respecto a los caudales.
Gestión de riesgo	Conjunto de actividades de intervención dirigidas a reducir o atenuar el riesgo.
GR4J	<i>Génie Rural à 4 paramètres Journalier.</i>
HBV	<i>Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning.</i>
Hidrograma	Expresión gráfica de la variación del caudal a lo largo del tiempo.

Hidrología	Ciencia que se dedica al estudio de las aguas terrestres, incluyendo su presencia, distribución y circulación a través del ciclo hidrológico.
Hietograma	Expresión gráfica que muestra la distribución de la precipitación.
Infiltración	Movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo.
Inundación	Invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal por lluvias abundantes en la cuenca correspondiente.
Limnómetro	Regla graduada que permite efectuar la lectura de la altura o nivel de la superficie del agua.
Percolación	Es el proceso de filtración del agua en las capas profundas del terreno.
Pluviómetro	Aparato destinado a medir la cantidad de agua caída, expresada a través de la cantidad de litros o milímetros caídos por metro cuadrado.
Precipitación	Componente del ciclo hidrológico que se define como la caída de agua sobre la superficie terrestre en cualquiera de sus formas, principalmente en su estado líquido.

Probabilidad	Concepto estadístico básico que expresa la frecuencia relativa de ocurrencia en un evento.
Riesgo	Probabilidad de una amenaza para que se convierta en un desastre. La vulnerabilidad o las amenazas por sí mismas no representan peligro, al unirse se convierten en un riesgo.
SAC-SMA	<i>Sacramento-Soil Moisture Account.</i>
SOCONT	<i>Soil Contribution.</i>
Transpiración	Fenómeno biológico por el cual las plantas a través de los poros transfieren el agua hacia la atmósfera.
Vulnerabilidad	Condición de fragilidad, determinada por factores socioculturales y ambientales, asociados al desarrollo que predispone a un individuo o sociedad a sufrir daños en caso del impacto de una amenaza, afectando su capacidad de recuperación.
Zona de inundación	Superficie que bordea un río y que está sujeta a invasiones por el desbordamiento de las aguas.

RESUMEN

La modelación hidrológica de la subcuenca del río Villalobos consiste en la simulación de los procesos que intervienen la precipitación y la escorrentía por medio de distintos tipos de modelos y grados de complejidad con el objetivo de representar el flujo existente, con un enfoque en la gestión de riesgos. En el capítulo 1 se definen los conceptos básicos y relevantes que serán fundamentales en la modelación hidrológica. en el capítulo 2 se analizan y determinan las características morfológicas de la subcuenca del río Villalobos, con el objetivo de obtener los parámetros de entrada que servirán en la modelación. En el capítulo 3 se analizan el régimen de lluvia y la variabilidad a partir del año 1980 hasta el año 2019, mediante el procesamiento de datos de 4 estaciones meteorológicas, como resultado muestra el incremento de la tendencia tanto en la precipitación anual y, como en la precipitación máxima anual.

Para el presente análisis se emplearon pruebas estadísticas que muestren la independencia y homogeneidad de las series de tiempo de precipitación, previo al análisis de frecuencia y estimación de lluvias de diseño. El capítulo 4 muestra la implementación de los modelos hidrológicos GR4J, SOCONT, HBV y por último SAC-SMA, desde la división de la subcuenca del río Villalobos en microcuencas, las variables meteorológicas de entrada, creación de base de datos, entre otras, en la plataforma RS MINERVE.

El capítulo 5 muestra los resultados de los modelos previamente mencionados posterior a la calibración y validación de los mismos, siendo los modelos HVB y SAC-SMA los que presentan mejores indicadores de eficiencia. Por último, el capítulo 6 muestra el mapa de inundaciones en la subcuenca del río Villalobos y obras de protección con enfoque a la gestión de riesgo.

OBJETIVOS

General

Aplicar el *software* RS MINERVE para la modelación hidrológica del río Villalobos enfocado a la gestión de riesgo.

Específicos

1. Determinar las características geomorfológicas de la subcuenca del río Villalobos.
2. Analizar series temporales de estaciones hidrometereológicas de la subcuenca del río Villalobos con fines de modelación hidrológica.
3. Identificar cuál de los modelos hidrológicos presenta mejores resultados mediante los indicadores de eficiencia correspondientes.
4. Proponer lineamientos de manejo enfocado a la gestión de riesgo por inundaciones.

INTRODUCCIÓN

La importancia vital del recurso hídrico, de su correcto aprovechamiento, de su adecuado manejo, es esencial para la vida, salud, el desarrollo, entre otros. La mayor parte de la actividad, no solo humana, sino de cualquier ser viviente, tiene relación con el agua, con el paso del tiempo se ha explotado, contaminado, y si a ello se le agrega el crecimiento exponencial de la población y el cambio climático, repercute en la disponibilidad, la calidad y propiedades del recurso hídrico. Por ello es necesario tener un concepto básico de todas las cuencas hidrográficas del país, para hacer una caracterización y diagnóstico que permita establecer los lineamientos a seguir para su protección, restauración y que sirva, además, de base a los investigadores, planificadores para considerar su uso, disponibilidad y gestión de riesgos, en proyectos actuales y futuros.

Guatemala ha sufrido en las últimas décadas eventos extremos asociados con la variabilidad climática, varias vidas se han perdido, adicional la cantidad de infraestructuras que han sufrido a causa de deslizamientos, crecidas, inundaciones, entre otros, reflejando así falta de planificación, toma de decisiones y deficiencia en la gestión de riesgo, tales como la tormenta tropical Agatha en 2010, el huracán Stan en 2005, el huracán Mitch en 1998, entre otros.

La modelación hidrológica es la base para la gestión integral e involucra una compleja interacción de procesos. Para que esta sea satisfactoria, se debe de tener en cuenta factores como la variabilidad espacial con datos hidrometeorológicos con estaciones meteorológicas e hidrométricas, las cuales sirvan de variables de entrada y de salida y representen las condiciones de la cuenca en estudio, la caracterización de la misma, entre otras. Es entonces de

gran importancia que se realicen investigaciones en cuencas continuamente monitoreadas y aforadas y que existan diversidad de estaciones hidrometereológicas para un estudio más preciso y exacto. La presente investigación tiene por finalidad desarrollar un modelo hidrológico que simule el comportamiento de la subcuenca del río Villalobos con un enfoque en la gestión de riesgo.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Ciclo hidrológico

Un ciclo hace referencia a una serie de eventos que se repiten regularmente con cierta frecuencia; e hidrológico, a todo lo referente al agua, su existencia, distribución y su influencia sobre el medio ambiente. El ciclo hidrológico es el conjunto de variaciones que lleva a cabo el agua en el medio ambiente, tanto en su estado sólido, líquido y gaseoso, como en su forma, tanto superficial, subterránea, vapor de agua, entre otras.

Un ciclo, por su naturaleza intrínseca, no tiene un inicio ni un final; su inicio es aleatorio, tal es el caso del ciclo hidrológico. Para efectos didácticos, se tomará la evaporación como el primer proceso del ciclo hidrológico. Una porción del agua en su estado líquido presente en los océanos, ríos, lagos, y demás, se transforma por efectos de la radiación solar en estado gaseoso, llevando a cabo la evaporación. Como resultado de este proceso se produce el vapor de agua, este a su vez es trasladado por el aire. Este vapor de aire, cumpliendo ciertas condiciones, forma las nubes, que pueden producir precipitaciones, cambiando el estado gaseoso del agua a estado líquido nuevamente, formando parte del proceso de condensación. El agua en la precipitación se esparce en varias maneras. Una parte del agua se dispersa sobre la superficie, formando la escorrentía superficial, otra parte puede infiltrarse en la superficie, llegando a alcanzar el agua subterránea, o bien puede ser retenida temporalmente por la superficie. La escorrentía superficial y el agua subterránea por acción de la gravedad, se desplaza hacia las zonas más bajas, hasta incorporarse a los

océanos, y la restante, por medio de la evaporación y transpiración regresa a la atmósfera.

La figura 1 muestra en forma simplificada los procesos que ocurren en el ciclo hidrológico.

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: Organización Meteorológica Mundial (OMM). *Guía de prácticas hidrológicas*. Volumen I. p. 27.

La descripción anteriormente mencionada del ciclo hidrológico es considerablemente resumida y simplificada. Parte del agua que recorre los canales naturales tiene probabilidades de ser una fuente de la escorrentía superficial que se distribuye en ciertos canales naturales o bien filtrarse hacia el agua subterránea. Parte de la precipitación puede permanecer sobre la superficie del terreno en forma de nieve hasta cuando la fusión de esta le permita fluir hacia las corrientes o en el agua subterránea. El ciclo hidrológico es un medio apropiado y de suma importancia para describir y delimitar el alcance del campo de la hidrología, la cual se limita desde la precipitación del agua sobre la

superficie hasta el retorno de la misma, ya sea a la atmósfera o a los océanos. “El ciclo hidrológico sirve para destacar cuatro fases básicas de interés que son la precipitación, la evaporación y transpiración conocida como evapotranspiración, la escorrentía superficial y el agua subterránea.”¹

“El ciclo hidrológico puede parecer un mecanismo continuo mediante el cual el agua se mueve permanentemente a una tasa constante, esta impresión debe ser descartada. El movimiento del agua durante las diferentes fases del ciclo es errático tanto temporal como espacialmente.”²

Algunas veces la naturaleza parece trabajar demasiado para producir lluvias torrenciales que hacen crecer los ríos en exceso. En otras ocasiones la maquinaria del ciclo parece detenerse completamente y con ella la precipitación y la escorrentía. En zonas adyacentes las variaciones en el ciclo pueden llegar a ser bastantes diferentes. Estos extremos de crecientes y sequías son precisamente los que a menudo tienen mayor interés en los estudios hidrológicos, puesto que muchos proyectos de ingeniería se diseñan para la protección contra los efectos perjudiciales de los extremos.³

El ciclo hidrológico es, en definitiva, irregular y en muchas ocasiones se ve alterado por la ubicación geográfica, dependiendo de esta, así será la disponibilidad del recurso hídrico y su distribución, existiendo periodos de sequía, o estiaje, históricamente en Guatemala se da en los meses de noviembre hasta el mes de abril, y los períodos donde la precipitación ocurre de una manera continua, en los meses de mayo hasta octubre. Y si a ello se le suma los efectos producidos por el cambio climático, o bien por depresiones tropicales, da como consecuencia la irregularidad y alteración del ciclo hidrológico anteriormente mencionado.

¹ LINSLEY, Ray. *Hidrología para ingenieros*. p. 1.

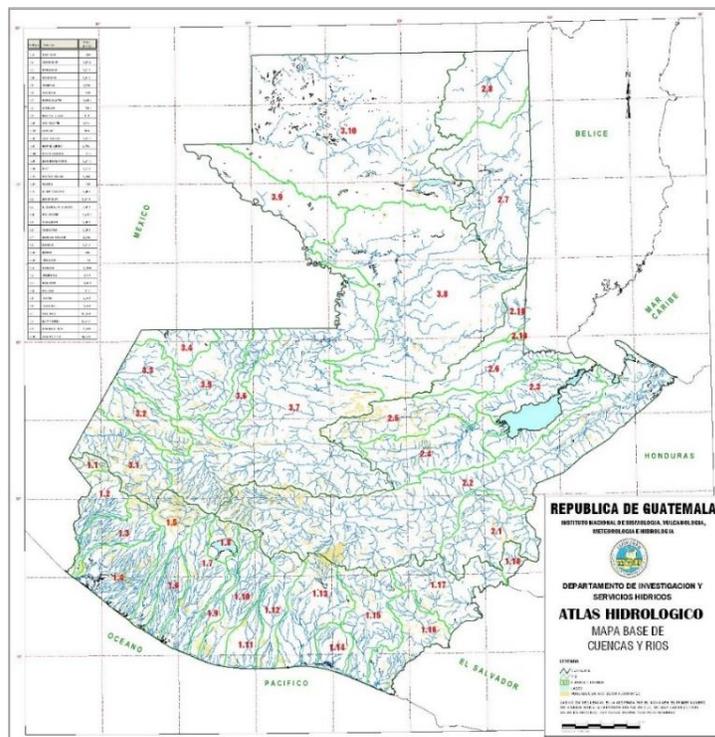
² *Ibíd.*

³ *Ibíd.* p. 2.

1.2. Hidrografía de Guatemala

La República de Guatemala, de acuerdo con el Atlas Hidrológico del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, se encuentra dividido en 3 regiones o vertientes hidrológicas, las cuales son: la vertiente del Pacífico, la vertiente del golfo de Honduras o mar Caribe y la vertiente del golfo de México, esta división toma en consideración donde desembocan los ríos que las conforman. Así mismo, el territorio guatemalteco se encuentra dividido en 38 cuencas, 18 pertenecientes a la vertiente del Pacífico, 10 a la vertiente del golfo de Honduras o mar Caribe y las 10 cuencas restantes pertenecientes a la vertiente del golfo de México.

Figura 2. Mapa base de cuencas hidrográficas



Fuente. INSIVUMEH. *Atlas hidrológico. Mapa base de cuencas y ríos.* p. 17.

Tabla I. **Vertientes de la República de Guatemala**

Vertiente del océano Pacífico				Vertiente del golfo de Honduras		Vertiente del golfo de México	
No.	Nombre	No.	Nombre	No.	Nombre	No.	Nombre
1,01	Coatán	1,11	Acomé	2,01	Grande de Zacapa	3,01	Cuilco
1,02	Suchiate	1,12	Achiguate	2,02	Motagua	3,02	Selegua
1,03	Naranjo	1,13	María Linda	2,03	Izabal – Río Dulce	3,03	Nentón
1,04	Ocosito	1,14	Paso Hondo	2,04	Polochic	3,04	Pojom
1,05	Samalá	1,15	Los Esclavos	2,05	Cahabón	3,05	Ixcán
1,06	Sis – Ixcán	1,16	Paz	2,06	Sarstún	3,06	Xaclbal
1,07	Nahualate	1,17	Ostúa – Güija	2,07	Mopán – Belice	3,07	Salinas
1,08	Atitlán	1,18	Olopa	2,08	Hondo	3,08	Pasión
1,09	Madre Vieja			2,09	Moho	3,09	Usumacinta
1,1	Coyolate			2,1	Temans	3,1	San Pedro

Fuente: elaboración propia.

1.2.1. **Vertiente del océano Pacífico**

Como se menciona anteriormente, la vertiente del océano Pacífico cuenta con 18 cuencas hidrográficas, las cuales se muestran en la tabla I, la mayor parte de las cuencas hidrográficas se encuentran en la vertiente del Pacífico. El área total que comprende la vertiente del Pacífico es aproximadamente 24 045,18 km² cubriendo el 22,2 % del territorio guatemalteco, siendo la cuenca del río María Linda la mayor en términos de superficie con aproximadamente 2 518 km² como puede apreciarse en la tabla II. Cuenta con el 51 % de la población guatemalteca.

Los ríos que corresponden a la vertiente del océano Pacífico tienen longitudes cortas (110 km promedio) y se originan a una altura media de 3 000 msnm. Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10 % y el 20 % cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, creando grandes zonas susceptibles a inundación en esta área. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, así como tiempos de propagación muy cortos.

Por otro lado, todos los ríos de la vertiente del océano Pacífico transportan grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que la cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente. Debido a este arrastre de material los ríos tienen cursos inestables causando daños e inundaciones en la planicie costera.⁴

Tabla II. **Cuencas de la vertiente del océano Pacífico**

Área de las cuencas de la vertiente del océano Pacífico					
No.	Nombre de la Cuenca	Área (km²)	No.	Nombre de la cuenca	Área (km²)
1,01	Coatán	269,74	1,11	Acomé	893,49
1,02	Suchiate	1 039,95	1,12	Achiguate	1 237,57
1,03	Naranja	1 202,33	1,13	María Linda	2 517,99
1,04	Ocosito	2 002,47	1,14	Paso Hondo	771,81
1,05	Samalá	1 622,59	1,15	Los Esclavos	2 323,96
1,06	Sis – Iacán	1 028,58	1,16	Paz	1 712,26
1,07	Nahualate	1 930,59	1,17	Ostúa – Güija	2 176,04
1,08	Atitlán	544,68	1,18	Olopa	318,66
1,09	Madre Vieja	776,13			
1,10	Coyolate	1 676,24			

Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Vertiente del golfo de Honduras o mar Caribe

La vertiente del golfo de Honduras incluye 10 cuencas de los ríos que desembocan en el golfo de Honduras y abarcan el 33,5 % del territorio del país con 36 228,8 km² con 31 % de la población. Cuenta con ríos extensos y

⁴ INSIVUMEH. *División hidrológica de Guatemala*. p. 1.

profundos, incluyendo a los ríos con mayor longitud de todo el territorio guatemalteco, siendo el río Motagua con 486,55 km el más extenso de todos. Esta vertiente, por sus condiciones orográficas, es una de las zonas más secas del istmo centroamericano.

Las pendientes de los ríos en la vertiente del golfo de Honduras son más suaves y su desarrollo es menos brusco, ya que en la parte montañosa los ríos hacen su recorrido en grandes barrancas o cañones. Las crecidas son de mayor duración y los tiempos de propagación son también mayores. Los caudales son más constantes durante todo el año. Parte del área dentro de esta vertiente tiene muy baja pluviosidad, 500 mm/anales, mientras que, en la zona de Puerto Barrios y Morales, la pluviosidad alcanza hasta 3 500 mm/anales.⁵

1.2.3. Vertiente del golfo de México

La vertiente del golfo de México es la vertiente que cuenta con el área geográfica más extensa, siendo esta aproximadamente 47 970,05 km² y abarca 44,3 % del territorio nacional con el 18 % de la población, siendo esta la menor densidad de la población de las 3 vertientes. Cuenta con las cuencas más extensas y caudalosas y por lo tanto mayor disponibilidad hídrica.

Se caracteriza por tener ríos caudalosos, anchos, con pendientes suaves y crecidas de larga duración. Entre los ríos más importantes están el río la Pasión, el río Chixoy y el río Usumacinta y la precipitación media es de 2 500 mm/anales.

1.3. Modelos hidrológicos

Un modelo es la reproducción a escala de un sistema, concepción mental, relación empírica o serie de ecuaciones matemáticas y estadísticas que representan un sistema. Aunque los modelos son representaciones imperfectas, son herramientas valiosas que permiten estudiar una gama de condiciones y formular

⁵ INSIVUMEH. *División hidrológica de Guatemala*. p. 1.

respuestas que no se pueden obtener de forma práctica, ya sea midiendo u observando el sistema real.⁶

La modelización o modelación hidrológica consiste en la representación y simulación de los procesos de precipitación y escorrentía por medio de distintos tipos de modelos y grados de complejidad con la finalidad de representar el flujo existente o futuro de una cuenca.

Como resultado de la modelación se puede obtener un mejor conocimiento de los procesos que influyen en la relación precipitación-escorrentía, se pueden aumentar la información de una cuenca de estudio, obteniendo, ya sea en el espacio, puntos no aforados, o bien en el tiempo, a través del completado de datos. Se puede utilizar como método de prevención de desastres, por medio de la predicción de caudales y escenarios futuros, entre otros.

La base del estudio de la Hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y subsuperficiales, y esta comprensión implica “medir”. Si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones han evolucionado en el tiempo, también es cierto que otras componentes del ciclo hidrológico no han corrido la misma suerte pues se presentan bajo el suelo.

La infiltración, la percolación profunda, el flujo subsuperficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico. Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan:

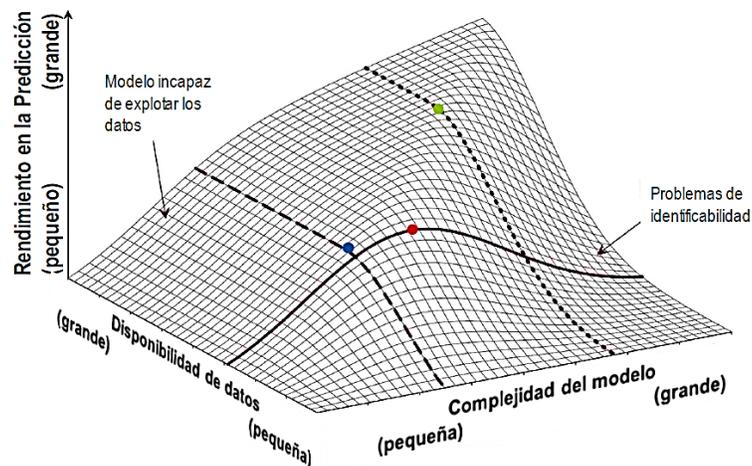
- Como herramienta para la gestión y planeamiento.
- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.

⁶ FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*, CREALP. p. 13.

- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, entre otros.⁷

Uno de los factores que influyen en el rendimiento y funcionamiento del modelo hidrológico es la disponibilidad de datos. Como se puede observar en la figura No. 3, una disponibilidad de datos insuficiente sumado a un modelo complejo presentará problemas de identificabilidad, con un rendimiento de predicción deficiente. Mientras que una alta disponibilidad de datos con un modelo poco complejo no será capaz de explorar todos los datos, presentando al igual, un rendimiento de predicción deficiente. Por lo cual, a mayor cantidad y disponibilidad de datos se recomienda emplear modelos altamente complejos, y para poca disponibilidad de datos se recomienda emplear modelos poco complejos.

Figura 3. **Relación conceptual entre la disponibilidad de los datos, la complejidad del modelo y el rendimiento de la predicción**



Fuente: GRAYSON, R.B. y BLÖSCHL, G. *Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modelling*. p. 404.

⁷ CABRERA. Juan. *Modelos hidrológicos*. p. 1.

1.3.1. Clasificación de los modelos hidrológicos

Existen tres características básicas y útiles para la clasificación de los modelos hidrológicos, de acuerdo a la conceptualización de los procesos, pueden clasificarse en empíricos, conceptuales y teóricos, de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos, pueden ser determinísticos y estocásticos y de acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados, distribuidos y semidistribuidos.

De acuerdo a Dingman, los modelos hidrológicos se dividen en modelos físicos, analógicos y matemáticos o abstractos.

En cambio, *Chow* en el año de 1988 indica que los modelos hidrológicos se dividen en físicos y abstractos. Los modelos físicos se subdividen en modelos análogos y modelos a escala, mientras que los abstractos se subdividen en modelos determinísticos y modelos estocásticos. Los modelos determinísticos producen la misma salida para determinada entrada, mientras que los modelos estocásticos, para un conjunto de entradas, produce resultados con cierta aleatoriedad o incertidumbre.

En el año 2000, *Williems* divide los modelos matemáticos en empíricos conocidos como caja negra o *black box*, conceptuales, denominados como caja gris o *grey-box* y teóricos, llamados también como modelos de caja blanca o *White-box*. Los modelos empíricos son modelos sin base física representados por procesos simplificados basados tanto en observaciones mediciones o experiencia práctica, como en principios o teorías, un ejemplo de estos son los modelos *ARMA*. Los modelos conceptuales son una representación simplificada de los procesos que se produce en el sistema hidrológico, en este modelo los

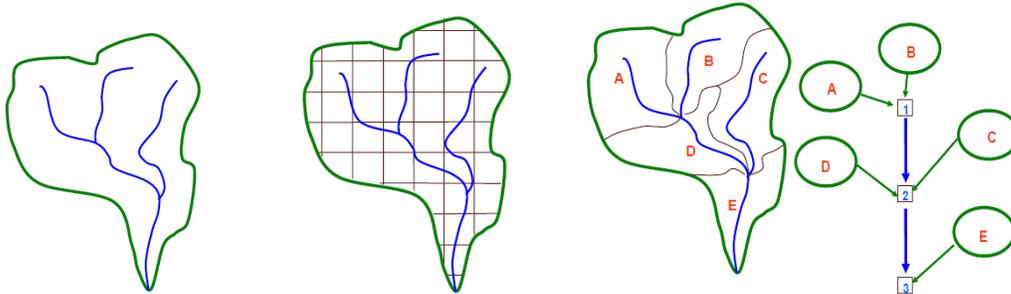
parámetros deberán calibrarse, un ejemplo de los modelos conceptuales es el modelo hidrológico HBV, que se encuentra dentro de la plataforma *RS MINERVE*.

Por último, los modelos teóricos tratan de representar los procesos más relevantes bajo una perspectiva física, considerando el significado de las fases, en este modelo los parámetros pueden medirse. Un ejemplo de estos modelos son las ecuaciones de *Saint-Venant*, utilizados para la simulación del flujo.

En el año 2009, se realiza una pequeña modificación a lo propuesto por Williems. Los modelos matemáticos se subdividen en empíricos, conceptuales, como lo propuso Williems, y se modifica el modelo teórico por el determinístico. Los modelos conceptuales se subdividen a su vez en modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos. En el modelo hidrológico agregado la cuenca es una unidad, los parámetros y la precipitación es constante en el espacio, por lo que se encuentra sujeto a problemas de escala espacial, y no puede incorporar, por ejemplo, estructuras hidráulicas. El modelo hidrológico distribuido, se divide en mallas o grillas y considera una variabilidad espacial, tanto en parámetros como en la precipitación por lo cual no cuenta con la problemática presentada por los modelos agregados, existe además una interacción en los procesos que ocurren en el mismo, y al igual que el modelo agregado, presenta dificultades al momento de incorporar estructuras hidráulicas.

Por último, el modelo hidrológico semidistribuido realiza una división en nodos, subcuencas y cauces, presenta variabilidad espacial de parámetros y precipitación para cada subcuenca, y, a diferencia de los modelos agrupados y distribuidos, presenta facilidad para incorporar estructuras hidráulicas.

Figura 4. **Representación gráfica de un modelo agrupado, distribuido y semidistribuido**



Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 23.

1.3.2. Elementos de un modelo hidrológico

A continuación, se presentan los elementos que constituyen los modelos hidrológicos.

- Variables de entrada: conocidas como variables independientes, son series espacio-temporales, usualmente de precipitación, temperatura y evapotranspiración.
- Variables de salida: conocidas como variables dependientes, son los datos que genera el modelo en función a las variables de entrada, por lo general son datos de caudal o de descarga.
- Variables de estado: son series espacio-temporales que permiten la caracterización del estado del sistema modelizado y establecen las condiciones iniciales, por ejemplo, el grado de saturación de los tanques de infiltración, la humedad del suelo, entre otros.
- Parámetros: son valores que se asumen constantes en el modelo, por ejemplo, la velocidad de infiltración.

1.4. Exactitud y precisión

La exactitud y la precisión son conceptos importantes en la modelación hidrológica. Un modelo exacto puede no proporcionar los mismos resultados que los datos observados, pero siempre se encontrarán dentro de un rango definido alrededor del valor observado

La precisión es la medida de la similitud de unas simulaciones con otras respecto a la observación. La precisión mide la repetitividad del experimento, la similitud entre los valores simulados. Un modelo preciso arroja similares resultados, pero estos no son necesariamente cercanos a la medida observada.

1.5. Indicadores de eficiencia

Para determinar el funcionamiento y la aplicabilidad de un modelo hidrológico se emplean indicadores estadísticos de eficiencia que describen el ajuste más adecuado de los datos simulados con los datos observados. Los indicadores más usados y citados son el coeficiente de Nash, el coeficiente de correlación de Pearson, el error cuadrático medio relativo de la raíz, entre otros. El objeto comparador en la plataforma del *software RS MINERVE* dispone de 10 indicadores de eficiencia los cuales se muestran a continuación en la tabla III.

Tabla III. Rango de valores y valor ideal de los indicadores de eficiencia

Indicador	Peso	Rango	Valor ideal
<i>Nash</i>	W ₁	-∞ a 1	1
<i>Nash-In</i>	W ₂	-∞ a 1	1
Coeficiente de Correlación de <i>Pearson</i>	W ₃	-1 a 1	1
Eficiencia <i>Kling - Gupta</i>	W ₄	-∞ a 1	1
Puntaje de sesgo	W ₅	-∞ a 1	1
Error cuadrático medio relativo de la raíz	W ₆	0 a ∞	0
Sesgo de volumen relativo	W ₇	-∞ a ∞	0
Error de pico normalizado	W ₈	-∞ a ∞	0
Puntuación de habilidad de Peirce	W ₉	-1 a 1	1
Precisión general	W ₁₀	0 a 1	1

Fuente: CREALP. *RS MINERVE – Technical manual*. p. 65.

1.5.1. Coeficiente de Nash

“El coeficiente de Nash evalúa la predicción de los modelos hidrológicos. Es el coeficiente más aplicado y se define por la siguiente ecuación.”⁸ Mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - X_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})^2}$$

Siendo $X_{sim,t}$ la variable simulada en un tiempo t ; $X_{ref,t}$ la variable observada en un tiempo t ; y por último \bar{X}_{ref} es el promedio de la variable

⁸ CREALP. *RS MINERVE – Technical manual*. p. 60.

observada para el período considerado. Como se observa en la tabla No. III el rango de valores se encuentra de $-\infty$ al 1, siendo 1 el valor óptimo.

1.5.2. Coeficiente de Nash ln

Es un coeficiente muy similar a Nash, la diferencia es que tiene en cuenta el logaritmo de los caudales dándole de esta manera una mayor importancia relativa a los caudales pequeños. “El coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores de flujo de logaritmo denominado *Nash ln* se utiliza para evaluar el rendimiento de modelos hidrológicos para valores bajos y se define por la siguiente ecuación.”⁹

$$Nash - ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(X_{sim,t} - X_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(X_{ref,t} - \bar{X}_{ref}))^2}$$

Siendo $X_{sim,t}$ la variable simulada en un tiempo t ; $X_{ref,t}$ la variable observada en un tiempo t ; y por último \bar{X}_{ref} es el promedio de la variable observada para el período considerado. Como se observa en la tabla No. III el rango de valores se encuentra de $-\infty$ al 1, siendo el valor 1 el que representa el mejor resultado del modelo.

1.5.3. Coeficiente de correlación de Pearson

“El coeficiente de correlación de Pearson muestra la covarianza de los valores simulados y observados sin ser penalizado por el sesgo. Está definido por la siguiente ecuación.”¹⁰ El coeficiente expresa la dependencia lineal entre

⁹ CREALP. *RS MINERVE – Technical manual*. p. 60

¹⁰ *Ibíd.*

los valores simulados y los valores observados y se recomienda cuando se espera una relación lineal entre estos valores.

$$Pearson = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - \bar{X}_{sim}) * (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - \bar{X}_{sim})^2 * \sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})^2}}$$

Siendo $X_{sim,t}$ la variable simulada en un tiempo t ; $X_{ref,t}$ la variable observada en un tiempo t ; \bar{X}_{ref} es el promedio de la variable observada para el período considerado. La variable simulada y observada puede ser ingresada empleando valores de caudal o de altura y por último \bar{X}_{sim} que representa el promedio de la variable simulada. Como se observa en la tabla No. III el rango de valores se encuentra de -1 a 1, siendo 1 el valor óptimo.

1.5.4. Indicador de eficiencia Kling-Gupta

El indicador de eficiencia de *Kling-Gupta* proporciona y facilita el análisis global basado en diferentes componentes, tales como la correlación, el sesgo, la variabilidad, para problemas de modelado hidrológico. En el año de 2012 Kling propuso una versión revisada de este indicador para garantizar que el sesgo y las relaciones de variabilidad no se encuentren correlacionadas de forma cruzada y se define por las siguientes ecuaciones.¹¹

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$$

¹¹ FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 14.

Siendo KGE' el indicador; r el coeficiente de correlación entre los valores simulados y los valores de referencia u observados; β la relación de sesgo; γ la relación de variabilidad; μ representa la descarga media; CV representa el coeficiente de variación, σ es la desviación estándar de descarga. El sufijo s indica valor de descarga simulado y el o indica el valor de descarga observado. El rango de valores está de 0 a 1, siendo 1 el valor óptimo como puede apreciarse en la tabla No. III.

1.5.5. Puntaje de sesgo

El puntaje de sesgo o mejor conocido como BS por sus siglas en ingles *Bias Score*, es un coeficiente que estima la simetría entre el promedio de la simulación y el promedio de la observación. Proporciona un indicador no lineal que depende de los caudales medios simulados y observados.

Se encuentra definida por la siguiente ecuación. El rango de valores se encuentra de $-\infty$ a 1, siendo el valor 1 el que representa el resultado óptimo. \bar{X}_{sim} que representa el promedio de la variable simulada y \bar{X}_{ref} es el promedio de la variable observada para el período considerado.

$$BS = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{X}_{sim}}{\bar{X}_{ref}}, \frac{\bar{X}_{ref}}{\bar{X}_{sim}} \right) - 1 \right]^2$$

1.5.6. Error cuadrático medio relativo de la raíz (RRMSE)

El indicador del error cuadrático medio relativo de la raíz o conocido por sus siglas en ingles RRMSE que significa *Relative Root Mean Square Error* mide el error cuadrático medio relativo y cuantifica la magnitud de la desviación de los

valores simulados respecto a los observados y está definido por la siguiente ecuación.

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - X_{ref,t})^2}{n}}}{\bar{X}_{ref}}$$

El rango de valores se encuentra de 0 a $+\infty$ siendo el valor mínimo el que representa el resultado óptimo. Siendo $X_{sim,t}$ la variable simulada en un tiempo t ; $X_{ref,t}$ la variable observada en un tiempo t ; \bar{X}_{ref} es el promedio de la variable observada para el período considerado y n el número de valores.

1.5.7. Sesgo de volumen relativo (RVB)

El indicador de sesgo de volumen relativo conocido como RVB por sus siglas en inglés *Relative Volume Bias*, corresponde al error relativo entre las descargas observadas y simuladas durante el período de estudio. Se describe por la siguiente ecuación.

$$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - X_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{ref,t})}$$

Siendo RVB el sesgo de volumen relativo entre lo pronosticado y o observado en un tiempo considerado. X corresponde a la variable de descarga. El rango de valores se encuentra de -1 a $+\infty$, un valor cercano a cero indica un buen rendimiento, mientras que los valores negativos indican que el promedio de la variable simulada es menor que el promedio de la variable observada, lo que significa que es un modelo deficiente, y si los valores son positivos significa que

es un modelo excedente, siendo $X_{sim,t}$ la variable simulada en un tiempo t ; $X_{ref,t}$ la variable observada en un tiempo t .

1.5.8. Error de pico normalizado (NPE)

El error de pico normalizado NPE conocido por sus siglas en inglés *normalized Peak Error* indica el error relativo entre los valores máximos simulados y observados, y se define por la siguiente ecuación.

$$NPE = \frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}}$$

1.5.9. Puntuación de habilidad de Peirce (PSS)

El indicador de puntuación de habilidad de *Peirce* PSS conocido por sus siglas en inglés *Peirce Skill Score* indica el rendimiento de un modelo para reproducir el exceso o rebasamiento de un límite o umbral. Está basado en una tabla de contingencia que define el número de casos donde la simulación y la observación exceden o no el límite, y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$PSS = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)}$$

Siendo a el número de casos cuando la simulación y la observación exceden el límite definido en el evento o comparador, b el número de casos cuando la simulación excede el límite, pero la observación no, c el número de casos cuando la observación excede el límite mientras la simulación no lo hace y d el número de casos cuando ni la simulación y observación exceden el límite

y se encuentran por debajo del mismo. El rango de valores se encuentra de -1 a 1, siendo el 1 el valor ideal.

1.5.10. Precisión general (OA)

El indicador de precisión general, mejor conocido como OA por sus siglas en inglés *Overall Accuracy* muestra el rendimiento del modelo para reproducir el desbordamiento de un umbral o límite, y está basado en la misma tabla de contingencia que el indicador de puntuación de habilidad de *Peirce*, y se encuentra definido por la siguiente ecuación.

$$OA = \frac{a + d}{a + b + c + d}$$

Siendo a el número de casos cuando la simulación y la observación exceden el límite definido en el evento o comparador, b el número de casos cuando la simulación excede el límite, pero la observación no, c el número de casos cuando la observación excede el límite mientras la simulación no lo hace y d el número de casos cuando ni la simulación y observación exceden el límite y se encuentran por debajo del mismo. El rango de valores se encuentra definido de 0 a 1, siendo 1 el valor que representa el rendimiento óptimo.

1.6. Calibración y validación

La calibración es la operación que consiste en encontrar los valores de los parámetros hidrológicos que minimizan el error de la modelación. Y la validación es la etapa, posterior a la calibración, que consiste en evaluar la calidad del modelo sobre un conjunto de datos que no ha sido empleado en la fase de calibración.

1.7. Modelos lluvia – escorrentía

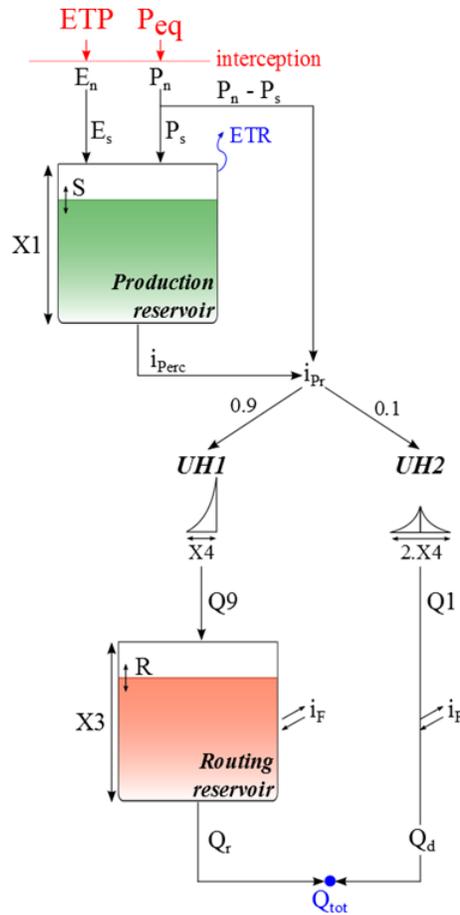
Para la modelación hidrológica en la subcuenca del río Villalobos se emplearon 4 modelos de lluvia-escorrentía, los cuales se encuentran en el *software* RS MINERVE y se describen a continuación.

1.7.1. Modelo hidrológico GR4J

El modelo GR4J denominado así por sus siglas en francés *Génie Rural à 4 paramètres Journalier* fue propuesto en Francia por el investigador Perrin. Es un modelo hidrológico determinístico, conceptual y de tipo agrupado, considerado como un modelo empírico por la simplificación de su naturaleza.

Las variables de entrada de este modelo son la precipitación media diaria y la evapotranspiración potencial media diaria y con ello generar series de caudales. Cuenta con dos reservorios, el primero de ellos, relaciona la evapotranspiración y la precipitación proporcionando el volumen de lluvia precipitada neta. La altura se define por el primer parámetro X1 el cual varía con cada iteración tomando un valor máximo de altura S. La salida de este reservorio son un volumen percolado y lluvia neta, la adición de las anteriores se dividen dentro de 0,9 y 0,1; e ingresados luego a los hidrogramas unitarios UH1 y UH2, respectivamente. El tiempo base de los hidrogramas unitarios están en función del parámetro X4. La salida del hidrograma UH1 se deposita en el segundo reservorio, y se encuentra definido por el parámetro X3. El segundo reservorio representa el proceso de infiltración y se relaciona con el parámetro X2. La salida del hidrograma unitario UH2 se ajusta al igual que el segundo reservorio aun proceso de infiltración. Y el resultado de ambos caudales se unen para dar la salida del modelo.

Figura 5. Representación del modelo GR4J



Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 18.

La tabla IV muestra los parámetros, descripción, rangos de valores y las condiciones iniciales del modelo GR4J.

Tabla IV. **Parámetros del modelo GR4J**

Objeto	Parámetro	Unidad	Descripción	Rango	
GR4J	A	m ²	Superficie de la cuenca	> 0	
	X1	m	Capacidad del primer reservorio	0,001 – 1,2	
	X2	m	Coefficiente de intercambio de agua	-0,005 – 0,003	
	X3	m	Capacidad del segundo reservorio	0,01 – 0,5	
	X4	d	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	1,1 – 2,9	
	Condiciones iniciales				
	S	m	Contenido inicial de agua en el primer reservorio	0 – 1,2	
	R	m	Nivel de agua inicial en el segundo reservorio	0 – 1,2	

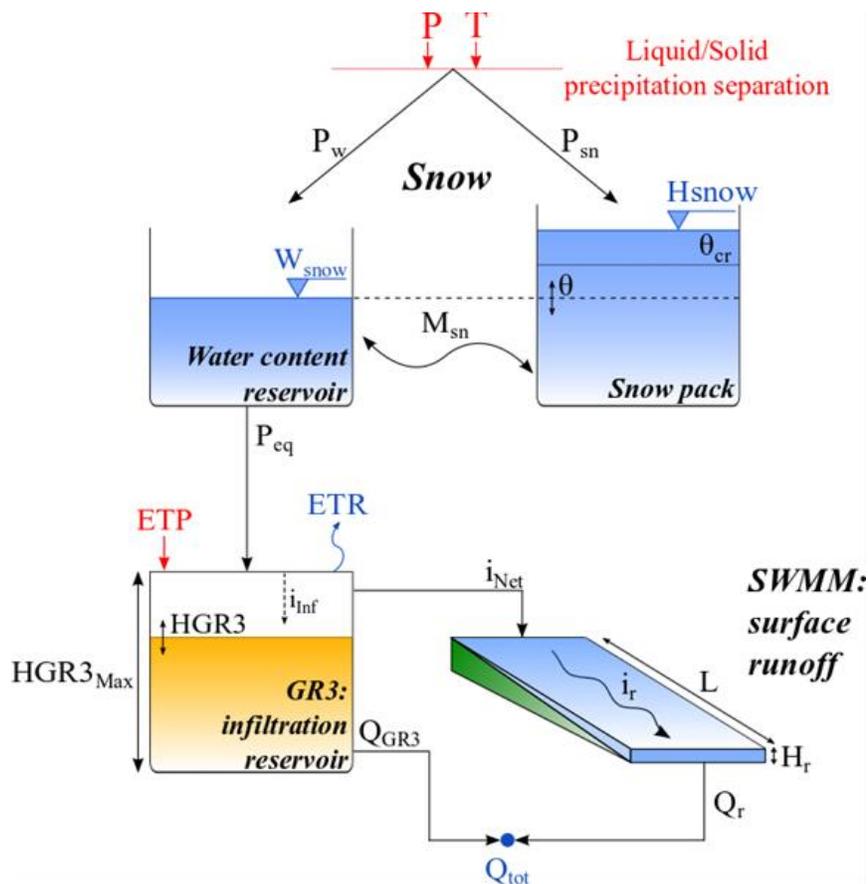
Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 19.

1.7.2. Modelo hidrológico SOCONT

El modelo hidrológico SOCONT denominado así por su nombre en inglés *Soil Contribution* se desarrolló en el año de 1996 por los investigadores Consuegra y Vez. Tiene como variables de entrada la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración para la generación de caudales medios diarios. Este modelo articula en serie a tres modelos hidrológicos de menor complejidad. El modelo Snow-GSM definido como un modelo determinístico conceptual, seguido por el modelo GR3, por último, el modelo SWMM y así generar el caudal total que será la salida del modelo.

El modelo cuenta con 3 reservorios, un reservorio lineal para la contribución de agua glaciario, el segundo no lineal que representa el agua subterránea y el tercero también es no lineal que es para la escorrentía directa.

Figura 6. Representación del modelo SOCONT



Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 14.

Los parámetros y condiciones iniciales del modelo SOCONT se encuentran detallan en la tabla No. V.

Tabla V. **Parámetros del modelo SOCONT**

Objeto	Parámetro	Unidad	Descripción	Rango	
SOCONT	A	m ²	Superficie	>0	
	S	mm/°C/d	Grado de referencia día coeficiente de deshielo	0,5 – 20	
	Sint	mm/°C/d	Intervalo grado-día de deshielo	0 – 4	
	Smin	mm/°C/d	Coeficiente mínimo grado-día de deshielo	0 – 1	
	SPh	d	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal	1 – 365	
	ThetaCri	-	Contenido crítico de agua de nieve	-∞ – ∞	
	bp	d/mm	Coeficiente de fusión debido a la precipitación líquida	-∞ – ∞	
	Tcp1	°C	Temperatura crítica mínima para la precipitación líquida	-1 – 1	
	Tcp2	°C	Temperatura crítica máxima para la precipitación sólida	3 – 5	
	Tcf	°C	Temperatura crítica de deshielo	-1 – 1	
	HGR3Max	m	Altura máxima del reservorio de infiltración	0 – 2	
	KGR3	1/s	Coeficiente de liberación del reservorio de infiltración	0,00025 – 0.1	
	L	m	Longitud del plano	>0	
	J0	-	Pendiente de escorrentía	>0	
	Kr	m ^{1/3} /s	Coeficiente de Strickler	0,1 – 90	
	CFR	-	Coeficiente de congelación	0 – 1	
	Condiciones Iniciales				
	SWEIni	m	Altura inicial de nieve	>0	
	HGR3Ini	m	Nivel inicial del reservorio de infiltración	>0	
	HrIni	m	Nivel inicial de agua de escorrentía aguas abajo de la superficie	>0	

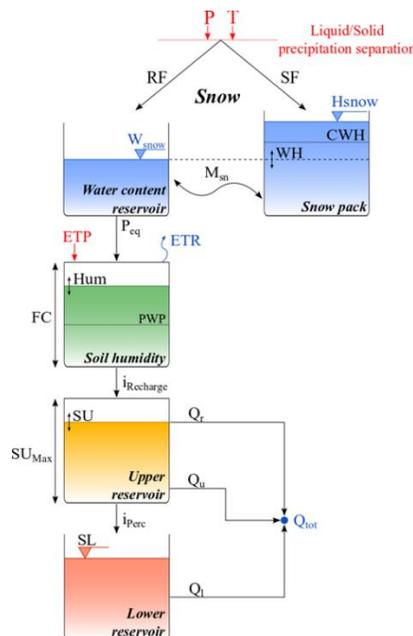
Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 15.

1.7.3. Modelo hidrológico HBV

El modelo hidrológico HBV conocido por sus siglas en sueco, *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* es un modelo determinístico y conceptual desarrollado por Bergstrom en el año de 1992.

El modelo HBV estima la descarga total, compuesta por un flujo de escorrentía, un interflujo y un flujo base, a partir de las variables de entrada, los cuales son la precipitación, temperatura y evapotranspiración. El modelo HBV describe el balance de agua usando tres reservorios de almacenamiento: una zona de humedad del suelo, una zona de almacenamiento superior y una zona de almacenamiento inferior.

Figura 7. Representación del modelo HBV



Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 16.

La tabla VI muestra los parámetros y condiciones iniciales del modelo HBV

Tabla VI. **Parámetros del modelo HBV**

Objeto	Parámetro	Unidad	Descripción	Rango
HBV	A	m ²	Superficie de la cuenca	>0
	CFMax	mm/°C/día	Factor de fusión	0,5-20
	CFR	-	Factor de congelación	0,05
	TT	°C	Temperatura umbral de lluvia/nieve	0-3
	TTInt	°C	Intervalo de temperatura para lluvia/nieve	0-3
	TTSM	°C	Temperatura umbral para la fusión de nieve	0
	Beta	-	Parámetro del modelo (coeficiente de forma)	1-5
	FC	m	Capacidad máxima de almacenamiento del suelo	0,05-0,065
	PWP	-	Punto de marchitez permanente del suelo	0,03-1
	SUMax	m	Umbral del nivel de agua del reservorio superior	0-0,1
	Kr	1/d	Coficiente de almacenamiento del flujo superficial	0,05-0,5
	Ku	1/d	Coficiente de almacenamiento del interflujo	0,01-0,4
	KI	1/d	Coficiente de almacenamiento del flujo base	0-0,15
	Kperc	1/d	Coficiente de almacenamiento de la percolación	0 - 0,8
	Parámetros Iniciales			
	Hini	m	Humedad inicial	-

Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 17.

1.7.4. Modelo hidrológico SAC-SMA

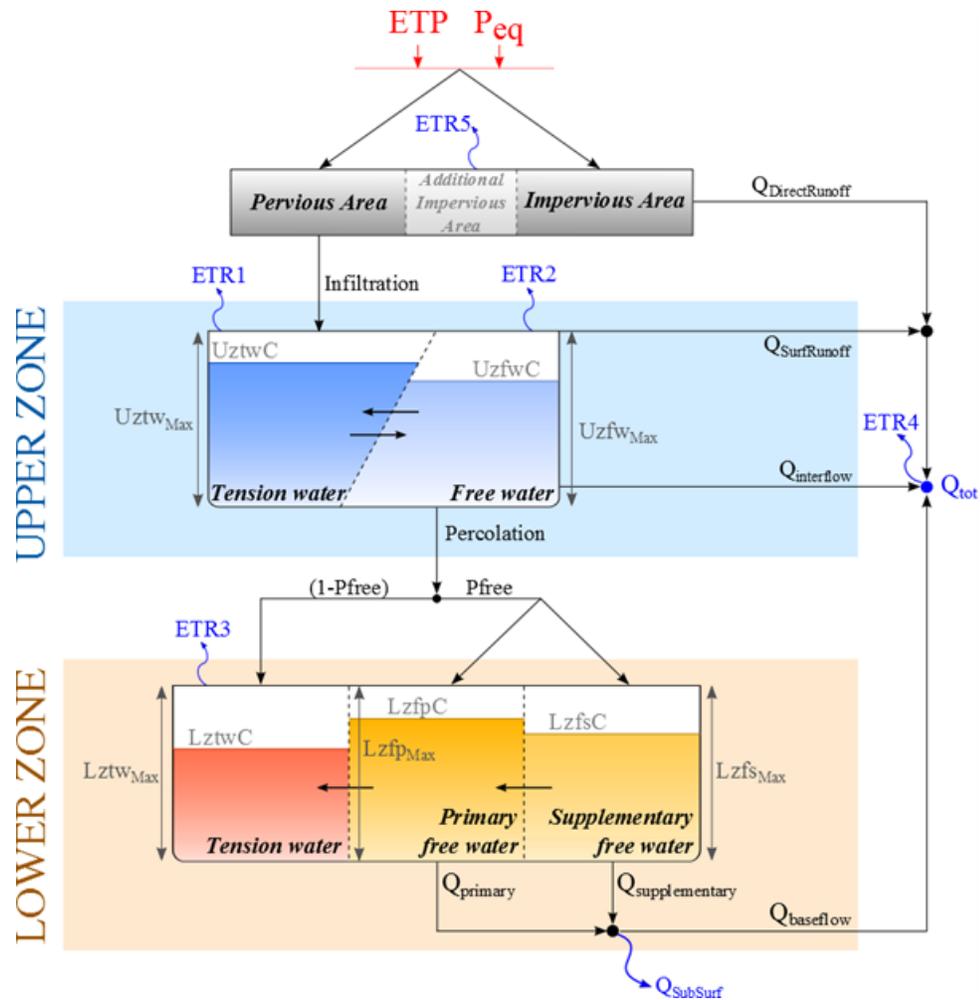
El SAC-SMA (*Sacramento Soil Moisture Accounting*), o modelo hidrológico SACRAMENTO fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos División Norte conjuntamente el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio de Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de Recursos Hídricos, en Sacramento, California en la década de los 70 es un modelo determinístico conceptual que requiere información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar caudales medios diarios. Este modelo representa las características de la humedad del suelo que se distribuye en una manera físicamente realista en las distintas zonas y estados de la energía del suelo, modelo ideal para la simulación de cuencas grandes mayores a 1 000 km².

El modelo, con una gran capacidad para simular descargas medias diarias requiere de 16 parámetros para su calibración aun sin disponer de un submodelo de nieve. Este gran número de parámetros implica un conocimiento profundo de la cuenca a simular, con información sobre la cobertura vegetal o áreas permeables e impermeables.

El modelo SAC-SMA se estructura en tres reservorios complejos, todos ellos influidos por la evapotranspiración. El primer reservorio se encuentra dividido en sectores permeables e impermeables que producen escorrentía superficial cuando la lluvia supera la tasa de infiltración. El segundo reservorio representa la capa superior del suelo donde se origina el interflujo, que puede entenderse como la transferencia de agua lateral al caudal base y que solo se produce cuando se satura la zona superior. El tercer reservorio representa la zona inferior del suelo y está vinculado a los procesos de descarga con respuesta

lenta. Finalmente, los tres reservorios originan el caudal total simulado por el modelo.

Figura 8. Representación del modelo SAC-SMA



Fuente: Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 20.

Los parámetros y condiciones iniciales del modelo SAC-SMA se presentan en la tabla VII.

Tabla VII. **Parámetros del modelo SAC-SMA**

Objeto	Parámetro	Unidad	Descripción	Rango
SAC – SMA	A	m ²	Superficie de la cuenca	> 0
	Adimp	-	Fracción máxima de un impermeable adicional área debido a la saturación	0 – 0,2
	Pctim	-	Fracción de área impermeable permanente	0 – 0,05
	Riva	-	Fracción del área vegetal ribereña	0 – 0,2
	UztlwMax	m	Tensión de la zona superior Capacidad de agua	0,01 – 0,15
	UzflwMax	m	Capacidad de agua libre de la zona superior	0,005 – 0,1
	Uzkl	1/d	Tasa de agotamiento entre flujos desde la parte superior, zona de almacenamiento de agua libre	0,1 – 0,75
	Zperc	-	Relación de tasas de filtración máximas y mínimas	10 – 350
	Rexp	-	Parámetro de forma de la curva de percolación	1 – 4
	Pfree	-	Fracción de percolación que va directamente al almacenamiento de agua libre en la zona inferior	0 – 0,6
	LztlwMax	m	Capacidad de agua de la tensión de la zona inferior	0,05 – 0,4
	LzflpMax	m	Capacidad de agua libre primaria de la zona inferior	0,03 – 0,8
	LzfsMax	m	La zona inferior de agua libre suplementaria	0,01 – 0,4
	Rserv	-	Fracción del agua libre de la zona inferior no transferible al agua de tensión de la zona inferior	0 – 1
	Lzpk	1/d	Tasa de agotamiento de la zona baja primaria libre	0,001 – 0,3
	Lzsk	1/d	Tasa de agotamiento de la zona inferior suplementaria	0,02 – 0,3

Continuación de la tabla VII.

	Side	-	Relación de percolación profunda desde la zona inferior libre de almacenamiento de agua	0 – 0,5
Condiciones iniciales				
	Adimlni	m	Contenido de agua de tensión inicial del área de Adimp	> 0
	Uztlwni	m	Tensión inicial de la zona superior	0 – 150
	Uzfwlni	m	Contenido inicial de agua libre en la zona superior	0 – 100
	LztWiNI	m	Contenido de agua de la tensión inicial de la zona inferior	0 – 400
	LzfpIni	m	Zona Inicial de contenido complementario libre	0 – 800
	LzfsIni	m	Contenido primario inicial de la zona inferior libre	0 – 400

Fuente: FLUIXÁ SANMARTÍN, Javier. *Curso de modelización hidrológica e hidráulica con RS MINERVE*. p. 21.

1.8. Software RS MINERVE

El software RS MINERVE, fue desarrollado por el *Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin CREALP*, con la oficina de ingeniería HydroCosmo S.A. Es un *software* de simulación de caudales que permite la modelación de redes hidrológicas e hidráulicas con un enfoque semidistribuido, es capaz de representar procesos hidrológicos complejos como la fusión de nieve y glaciar, que para este estudio no se toman en cuenta, por la demografía de la subcuenca del río Villalobos, la escorrentía superficial y subsuperficial, y también las infraestructuras de regulación como son los diques de retención, aliviaderos, las tomas de agua, turbina y bombas. El análisis global de una red hidrológico-hidráulico es esencial para la mayoría de los casos, como la optimización de las

centrales hidroeléctricas, el diseño y la regulación de los aliviaderos o el desarrollo y optimización de un concepto de protección contra inundaciones apropiado.

La plataforma RS MINERVE permite este tipo de análisis debido a su interfaz simple y fácil manejo. Los modelos de precipitación-escorrentía, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HVB están disponibles para la modelización del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas y serán parte de este estudio.

1.9. Análisis de eventos extremos

Para realizar un análisis de eventos extremos es necesario conocer algunos términos de gran importancia, los cuales se mencionan a continuación.

1.9.1. Probabilidad

“La probabilidad es una base matemática para la predicción, la cual, para un conjunto exhaustivo de resultados, es la relación entre el número de resultados que producen un evento particular y el número posible de resultados”.¹²

1.9.2. Periodo de retorno (Tr)

“El periodo de retorno (Tr) se define como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud “X” puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en un promedio”.¹³

¹² LINSLEY, Ray. *Hidrología para ingenieros, probabilidad en hidrología*. p. 281.

¹³ BEJAR, Máximo Villon. *Hidrología*. p. 242.

“También se le conoce como intervalo de recurrencia al periodo de retorno y se usa para representar el número de años que transcurren en promedio para que un evento sea igualado o excedido”.¹⁴

Matemáticamente, el período de retorno se define como el inverso de la probabilidad de excedencia.

Desde el punto de vista estadístico, a mayor magnitud de una crecida, mayor es el período de retorno y menor es la probabilidad de que ese evento ocurra en cualquier año.

- Probabilidad de excedencia $p = 1 / T_r$
- Probabilidad de no excedencia $q = 1 - p$

1.9.3. Tiempo de concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.¹⁵

1.9.4. Crecidas

El concepto de una crecida o una avenida es toda aquella elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio que se presenta normalmente a este cauce. En general, es un fenómeno de ocurrencia

¹⁴ LINSLEY, Ray. *Hidrología para ingenieros, probabilidad en hidrología*. p. 282.

¹⁵ IBÁÑEZ, Sara. *Métodos para la determinación del tiempo de concentración*. p. 2.

de caudales relativamente grandes. Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, las lluvias de menor intensidad, pero de duración y cubrimiento grande provocan crecidas en grandes cuencas.

1.9.5. Distribuciones teóricas de frecuencias para eventos extremos

La estadística hidrológica para valores extremos es una de las herramientas más comunes en la hidrología juntamente con el análisis de frecuencias de series hidrológicas. Para realizar un análisis de frecuencias correspondiente a las series de datos es necesario emplear las funciones de distribución estadística, las cuales son las siguientes: distribución de valores extremos tipo I o de Gumbel, distribución normal, distribución Log-Normal, distribución Log-Normal de dos parámetros, distribución de Pearson tipo III o gamma de tres parámetros, distribución de Log-Pearson III y distribución de Log-Gumbel o *Fréchet*. Cabe mencionar que a mayor cantidad de datos se obtendrá mayor precisión en el análisis de frecuencias.

1.10. Componentes básicos de riesgo

Para realizar una gestión de riesgo es necesario conocer algunos términos de gran importancia, los cuales se detallan a continuación.

1.10.1. Riesgo identificado

“Probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas a causa de un desastre (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental) como resultado de la

interacción entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad a las cuales está expuesta una comunidad”.¹⁶

1.10.2. Amenaza

Peligro latente que representa la probable manifestación de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antropogénico, que puede producir efectos riesgo físico externo a un elemento o grupo de elemento sociales expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un fenómeno se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y dentro de un período de tiempo definido.¹⁷

1.10.3. Vulnerabilidad

“Condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, políticos, económicos y ambientales, que aumentan la predisposición, susceptibilidad y exposición de una comunidad al impacto negativo de un fenómeno físico destructor (producido por amenazas naturales o antrópicas) y a reponerse después de un desastre”.¹⁸

1.10.4. Desastre

“Alteración intensa en las personas, los bienes, los servicios y el medio ambiente, causadas por un suceso natural o generado por la actividad humana, que excede la capacidad de respuesta de la comunidad afectada”.¹⁹

También un desastre se puede decir que es la Interrupción y alteración severa e intensa que trastorna gravemente el funcionamiento normal de una

¹⁶ CONRED. *Glosario de secretaria ejecutiva*. p. 22.

¹⁷ CEPREDENAC, *Glosario actualizado de términos*. p. 3.

¹⁸ Op. cit. p. 24.

¹⁹ Op. cit. p. 10.

comunidad o sociedad, provocado por un evento físico potencialmente destructor, de origen natural o antrópico, determinado por condiciones de vulnerabilidad latentes en la sociedad, que puede causar importantes pérdidas de vidas humanas, materiales, económicas, productivas o ambientales que amenaza la forma de subsistencia y desarrollo de un territorio, comunidad, grupos de personas y ecosistemas.

1.10.5. Inundación

“Invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal causado por lluvias abundantes o fusión de las nieves y hielos en la cuenca correspondiente”.²⁰

Una inundación se define como una elevación no usual del nivel de agua, que provoca desbordamientos y posibles perjuicios. Se caracteriza por la ocurrencia de caudales grandes que se salen del canal de la corriente. Una crecida puede no causar inundación, especialmente si se construyen obras de control para tal fin.

Por otro lado, aun no habiendo un aumento grande de escorrentía superficial, podrá suceder una inundación en el caso de que exista alguna obstrucción en el canal natural del río.²¹

²⁰ CONRED, *Glosario de secretaría ejecutiva*. p. 47

²¹ MONSALVE, German. *Hidrología en la ingeniería*. p. 225.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

2.1. Ubicación geográfica

La subcuenca del río Villalobos se encuentra ubicada en la parte central de la República de Guatemala, el área de la subcuenca se encuentra distribuida entre los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez. Se estima que el área del departamento de Guatemala comprende 270,67 km² y el departamento de Sacatepéquez comprende 39,06 km² para un total de área aproximada de 309,73 km².

La subcuenca del río Villalobos se encuentra extendida sobre los municipios de Villa Canales, Guatemala, Fraijanes, Amatitlán, Mixco, Villa Nueva, Santa Catarina Pinula, San Pedro Sacatepéquez y por último en el municipio de Petapa; en el departamento de Sacatepéquez la subcuenca se extiende en los municipios de Santiago Sacatepéquez, San Lucas Sacatepéquez, Magdalena Milpas Altas, Santa Lucía Milpas Altas y por último en el municipio de San Bartolomé Milpas Altas.

Tabla VIII. **Departamentos y municipios dentro de la subcuenca del río Villalobos**

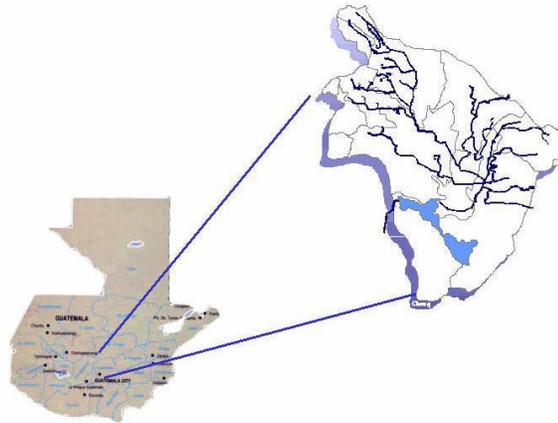
Departamento	Municipio	Área (km²)	Porcentaje de área (%)
Guatemala	Villa Canales	47,20	15,24
Guatemala	Guatemala	43,91	14,18
Guatemala	Fraijanes	0,06	0,02
Guatemala	Amatitlán	0,01	0,01
Guatemala	Mixco	45,71	14,76
Guatemala	Villa Nueva	78,69	25,41
Guatemala	Santa Catarina Pinula	29,06	9,38
Guatemala	San Pedro Sacatepéquez	4,98	1,61
Guatemala	San Miguel Petapa	21,07	6,80
Sacatepéquez	Santiago Sacatepéquez	8,02	2,59
Sacatepéquez	San Lucas Sacatepéquez	21,40	6,91
Sacatepéquez	Magdalena Milpas Altas	5,99	1,94
Sacatepéquez	Santa Lucía Milpas Altas	2,04	0,66
Sacatepéquez	San Bartolomé Milpas Altas	1,59	0,51

Fuente: elaboración propia.

2.2. Delimitación de la subcuenca del río Villalobos

Para la delimitación de la subcuenca del río Villalobos se utilizó la extensión ArcMap del software ArcGIS. Con un mapa cartográfico con escala 1:50 000 proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional, se identificó la red de drenaje y corrientes superficiales, identificando los puntos de mayor cota, cortando las curvas tanto en la parte convexa como en la parte cóncava, cuando aumenta o decrece la altitud, respectivamente se delimitó la subcuenca del río Villalobos.

Figura 9. **Ubicación geográfica y delimitación de la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: GARCÍA, Hayro. *Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en época seca y lluviosa en un periodo de 24 horas 2 veces al mes en un punto previo a la entrada al lago de Amatitlán*. p. 9.

2.3. Determinación de parámetros morfométricos de la subcuenca del río Villalobos

Las características y parámetros morfométricos de una cuenca tienen influencia sobre la respuesta hidrológica de la misma. Se clasifican en dos tipos, según la manera en la que controlan los fenómenos, tales como la precipitación y la escorrentía, las que condicionan el volumen de escurrimiento como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, entre otros.

2.3.1. Área de drenaje

El área de drenaje de una cuenca es la superficie, en proyección horizontal que se delimita por el parteaguas. El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas colindantes. Se obtuvo un área de drenaje de aproximado de 309,73 Km².

2.3.2. Tipo y uso de suelo

La geología presente en la subcuenca del río Villalobos es de rocas ígneas y metamórficas del período cuaternario y terciario; con rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso se estima del período cuaternario abarcando un área aproximada de 153,05 km², con rocas volcánicas sin dividir, incluyendo tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos con un área aproximada de 138,61 km² y por último, rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso con 18,01 km².

“El uso del suelo en la cuenca está cambiando rápidamente, de cobertura vegetal natural y cultivos anuales y perennes, a cobertura urbana, comercial e industrial”²²

El informe del estudio hidrológico del río Villalobos realizado por *Tahal Consulting Engineers* en el año 2005 divide el área en cuatro categorías, la categoría urbana, rural, cultivo perenne y por último bosque. La categoría urbana incluye áreas en proceso de desarrollo, comercios, industrias y áreas urbanas. La categoría rural incluye cultivos, pastos, vivienda rural y suelo limpio.

²² SANDOVAL, Juan José. *Evaluación hidráulica mediante el uso de modelos del tramo final del río Villalobos*. p. 22.

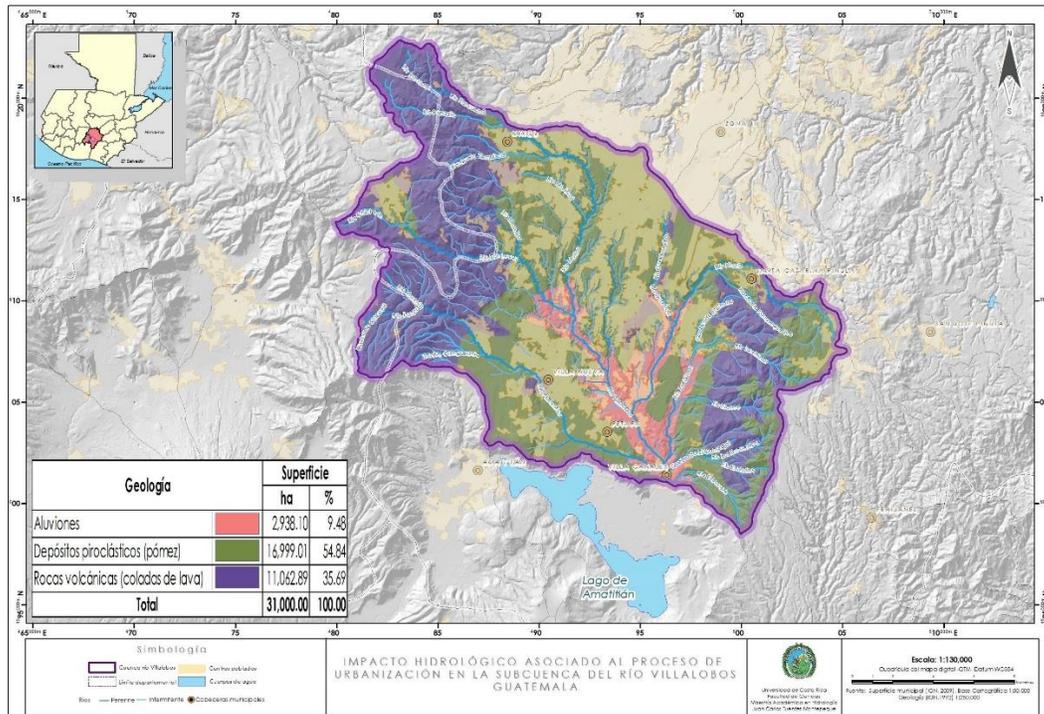
La categoría de cultivos perennes incluye cafetales, entre otros. Y por último la categoría de bosques incluye matorrales, entre otros. Cabe resaltar que debido al crecimiento poblacional la categoría urbana aumenta, por lo cual la superficie de cobertura vegetal y natural disminuirá, lo que puede provocar que el tiempo de concentración disminuya y un evento de genere mayor flujo superficial.

Tabla IX. **Fracción del área de las microcuencas del río Villalobos ocupadas para los usos indicados**

No.	Subcuenca	Fracciones de uso en cada subcuenca			
		Urbana	Rural	Cultivo perenne	Bosque
1	Villalobos en la desembocadura	0,48	0,20	0,05	0,28
2	Villalobos estación El Cementerio	0,48	0,19	0,05	0,28
3	El Bosque	0,03	0,37	0,30	0,30
4	Tulujá	0,11	0,21	0,34	0,34
5	Platanitos	0,36	0,43	0,00	0,21
6	Las Minas	0,20	0,19	0,26	0,35
7	Pinula	0,73	0,13	0,00	0,14
8	El Frutal	0,96	0,00	0,00	0,05
9	El Zacatal	1,00	0,00	0,00	0,00
10	El Arenal	0,07	0,59	0,00	0,34
11	La Palín	1,00	0,00	0,00	0,00
12	San Lucas	0,50	0,15	0,00	0,35
13	Molino	0,45	0,03	0,00	0,52

Fuente: FAJARDO GONZALEZ, Ricardo Javier. *Evaluación hidráulica mediante el uso de modelos, del tramo final del río Villalobos*. p. 23.

Figura 10. Mapa de geología de la subcuenca del río Villalobos



Fuente: FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos*. p. 18.

2.3.3. Pendiente media (S)

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a un evento extremo es la pendiente media de la cuenca. Debido a que la pendiente varía a lo largo de la cuenca, es necesario definir una pendiente media y puede estimarse a través de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{DL_L}{A}$$

Donde L_L es la longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas de la cuenca km, D es la equidistancia entre curvas de nivel del mapa topográfico en km y A es el área de la cuenca en km^2 .

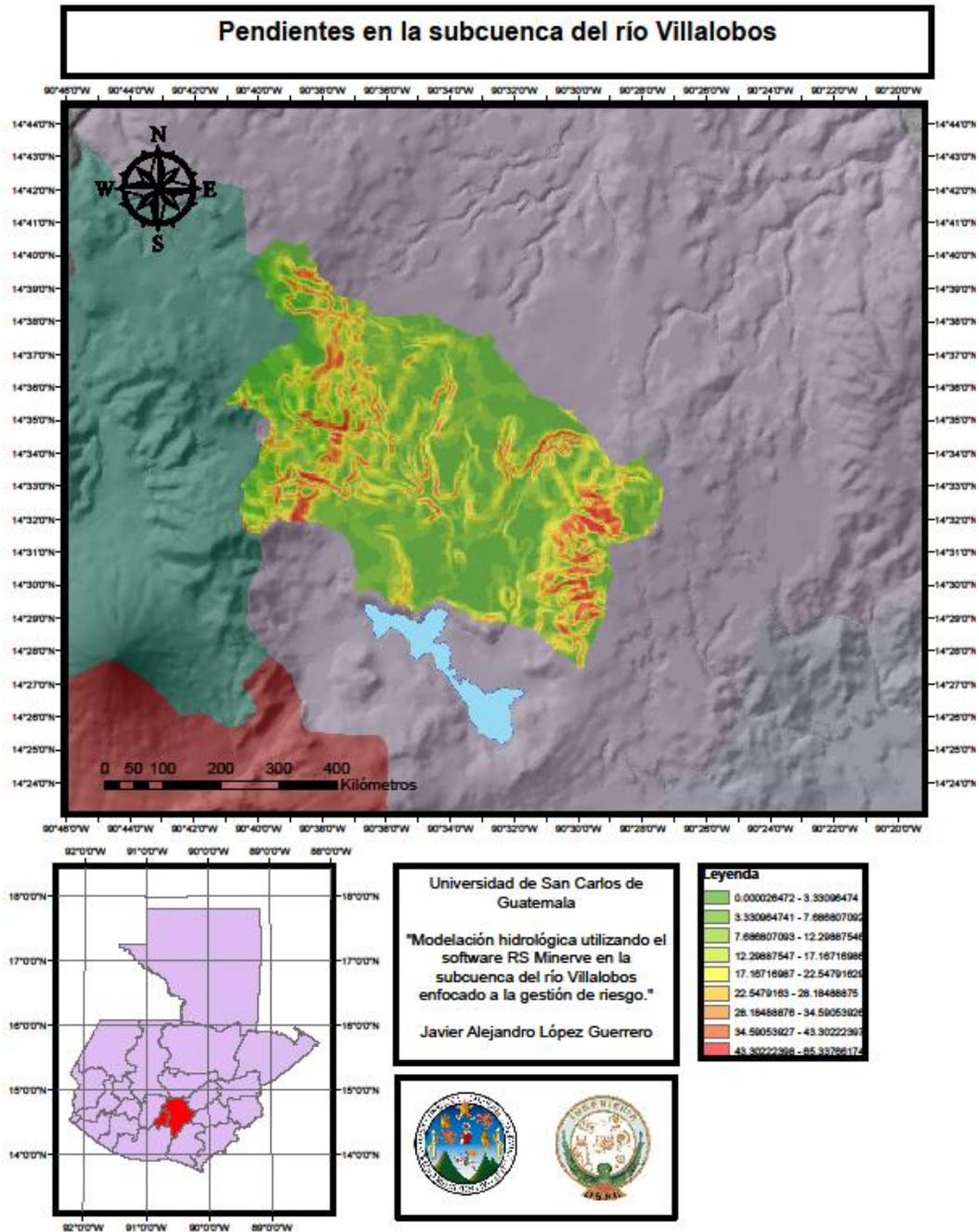
$$S = \frac{(0,02)(2\ 071,38)}{309,73}$$

$$S = \frac{(0,02)(2\ 071,38)}{309,73} = 0,13$$

Adicionalmente se procedió a realizar el cálculo de las pendientes por medio del software ArcMap dando como resultado de pendiente media el valor de 12 %, confirmando así el valor previamente obtenido.

La figura No. 11 muestra el mapa de pendientes que se encuentran en la subcuenca del río Villalobos. Las zonas montañosas muestran grandes pendientes, que se representan con el color rojo con pendientes desde el 34 % hasta 65 %. Mientras que las planicies, donde las pendientes son mínimas, se muestran en color verde, con pendientes de 0 al 12 %.

Figura 11. Mapa de pendientes de la subcuenca del río Villalobos

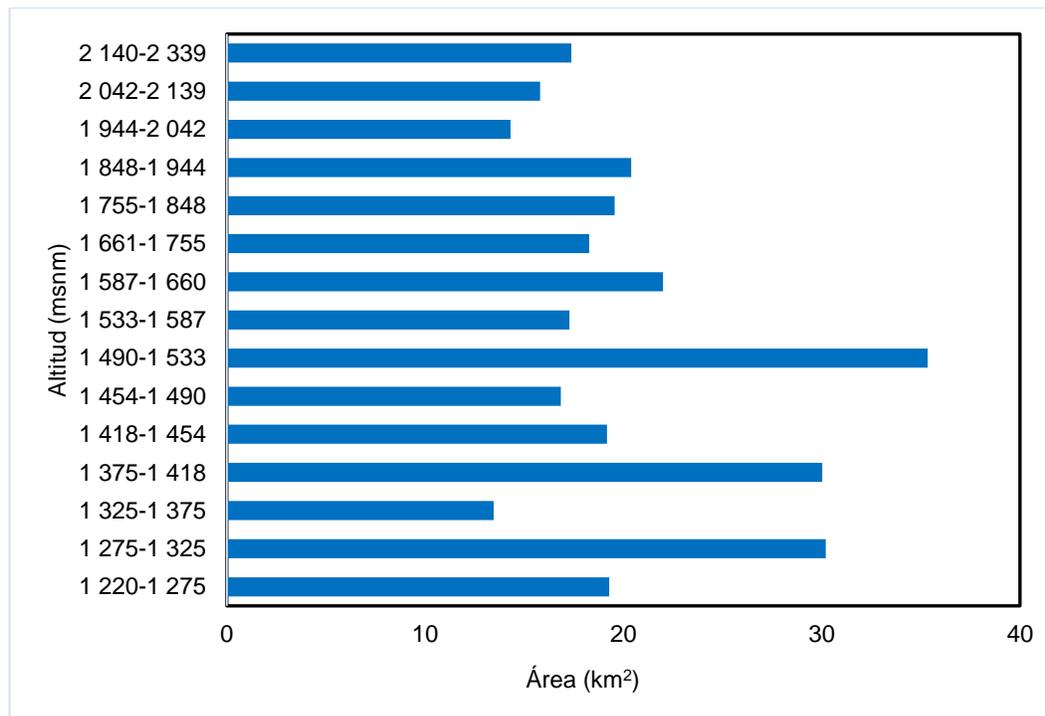


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.

2.3.4. Histograma de frecuencias altimétricas

El histograma de frecuencias altimétricas es la representación gráfica que indica el porcentaje de área comprendida entre alturas determinadas. Se puede obtener calculando el área que existe entre las curvas de nivel de la cuenca. Este histograma es un complemento de la curva hipsométrica.

Figura 12. Histograma de frecuencias altimétricas



Fuente: elaboración propia.

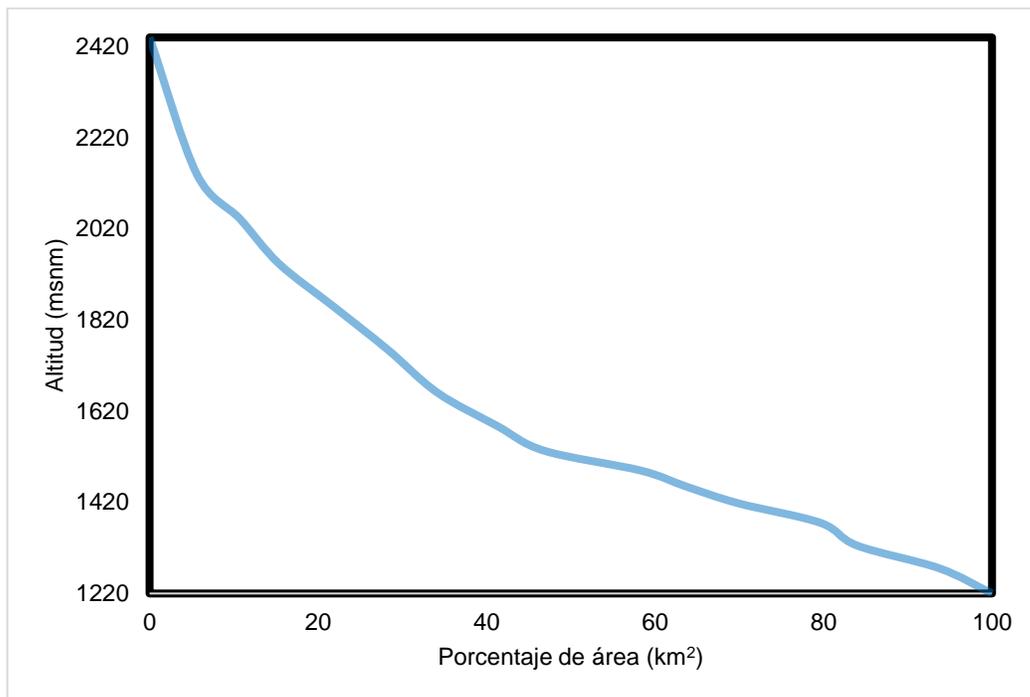
2.3.5. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica o curva de área-elevación es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Es una curva que indica el porcentaje de la

superficie de la cuenca en km^2 que existe por encima o por debajo de una cota determinada. Puede obtenerse con la información extraída del histograma de frecuencias altimétricas, con un planímetro, o bien auxiliándose de plataformas tales como ArcMap o QGIS.

La curva hipsométrica brinda algunos datos sobre características de la cuenca, por ejemplo, una curva hipsométrica con concavidad hacia arriba indica una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas y con concavidad hacia abajo puede indicar valles profundos y sabanas planas.

Figura 13. **Curva hipsométrica de la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

2.3.6. Índice de compacidad (K)

El índice de *Gravelius* o índice de compacidad es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área. mientras más cercano a la unidad sea el coeficiente de compacidad, la forma de la cuenca se aproxima a la circular, y entre más alejado de ella, más irregular es su forma en relación con el círculo.

Este índice es de gran importancia ya que la forma de la cuenca depende en gran medida sobre la distribución del hidrograma resultante de precipitación. Con las ecuaciones de perímetro y área de un círculo.

$$P = 2\pi r$$

$$A = \pi r^2$$

Se despeja la variable del radio r de la ecuación de perímetro del círculo se sustituye en la ecuación del área.

$$r = \frac{P}{2\pi}$$

$$A = \pi \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2$$

Por último, se deja la función del perímetro del círculo en función del área y se sustituye en la ecuación de índice de compacidad.

$$P = 2\sqrt{\pi A}$$

$$k = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\text{Perímetro de un círculo de igual área.}}$$

$$k = \frac{P}{2\sqrt{A}}$$

$$k = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Siendo P el perímetro de la cuenca km, y A el área de la cuenca en km^2

Sustituyendo los valores de perímetro y área obtenidos de la subcuenca del río Villalobos da como resultado un valor de $k = 1,51$ lo cual indica que tiene una forma ligeramente alargada.

2.3.7. Factor de forma

El factor de forma sugerido por Horton es un índice adimensional que relaciona el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El ancho medio es la relación entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal. Siendo B el ancho medio de la cuenca en km y A el área de la cuenca en Km^2 y L la longitud del cauce principal de la cuenca en km. La forma de la cuenca hidrográfica tiene relación con el comportamiento de los hidrogramas de escorrentía y las crecidas.

Una cuenca con un factor de forma bajo está tiene menos probabilidades de estar sujeta a crecidas que con un factor de forma mayor, considerando siempre la misma área.

$$F = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$$

El factor de forma obtenido para la subcuenca del río Villalobos para un área de $309,73 \text{ km}^2$ y una longitud de cauce de $39,67 \text{ km}$ es $0,19$.

2.3.8. Pendiente media del cauce principal

Uno de los factores e indicadores más determinantes e importantes del grado de respuesta y del comportamiento hidrológico de una cuenca ante eventos extremos es la pendiente del cauce principal.

Para la determinación del cálculo del tiempo de concentración de una cuenca intervienen, en su mayoría, parámetros procedentes de las

características físicas del cauce principal, como lo es, en este caso, la pendiente media del cauce principal, que es la relación de la altura total del cauce principal, esto se obtiene a partir de la diferencia entre la cota máxima y la cota mínima, entre la longitud del cauce principal.

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Para la subcuenca del río Villalobos y el cauce principal de la misma con cota superior de 2,34 km y una cota inferior de 1,22 km y una longitud del cauce principal de 39,67 km se obtiene una pendiente del cauce principal de 2,82 %.

2.3.9. Orden de las corrientes

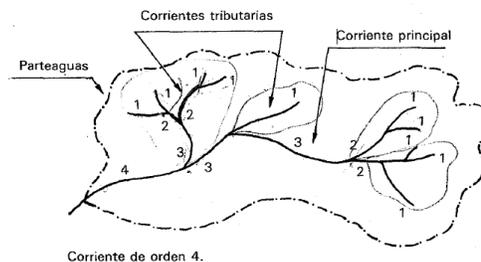
La red de drenaje de una cuenca está formada por el cauce principal y los cauces tributarios. En relación al número de orden de los cauces, Horton estableció 3 leyes o premisas, denominadas las leyes de Horton que siendo estas la ley de los números de los cauces, la ley de las longitudes de los cauces y la ley de las áreas drenantes de los cauces.

Dichas leyes establecen que la relación de bifurcación, la relación de la longitud y la relación de áreas permanecen constantes de un orden a otro de una cuenca. El orden de las corrientes de agua es un número que refleja el grado de ramificación de la red de drenaje. La clasificación de los cauces de una cuenca se realiza a través de las siguientes premisas.

- Los cauces de primer orden no tienen tributarios
- Los cauces de orden n se forman cuando dos cauces n-1 se unen

- Cuando un cauce se une con un cauce mayor, el resultante aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.
- El orden de la cuenca es el mismo del cauce principal a la salida.

Figura 14. **Cuenca hidrológica delimitada por el parteaguas y su red hídrica**



Fuente: APARICIO, Francisco. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 21.

El orden de la red hídrica de la subcuenca del río Villalobos se determinó en 4.

2.3.10. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es un indicador del grado de eficiencia de una cuenca, y se define como la relación de la longitud total de las corrientes o cauces de la cuenca entre el área superficial de la misma. Se expresa con la siguiente fórmula matemática:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde D_d es la densidad de drenaje, L es la longitud total de las corrientes en km y A es el área de la cuenca en km². Si el valor obtenido de la densidad de

drenaje es alto indica que es una cuenca con un óptimo drenaje y por consiguiente las probabilidades para responder rápido a la influencia de la precipitación aumenta. Mientras que una cuenca con una densidad baja refleja un área pobremente drenada con una respuesta hidrológica lenta.

Para la cuenca del río Villalobos sumatoria de todas las longitudes de los cauces se estima en 323,6 km y el área de 309,73 km² obteniendo así un valor de la densidad de drenaje de 1,04 km/km².

La siguiente tabla muestra en resumen los parámetros morfométricos obtenidos para la subcuenca del río Villalobos.

Tabla X. **Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Villalobos**

Parámetro	Valor	Unidad
Área	309,73	km ²
Perímetro	93,99	km
Pendiente media	0,13	Adimensional
Cota mínima	1 220	msnm
Cota máxima	2 340	msnm
Índice de compacidad	1,51	Adimensional
Longitud del cauce principal	39,67	km
Factor de forma	0,19	Adimensional
Pendiente media del cauce	0,03	Adimensional
Orden de corrientes	4	Adimensional
Longitud de los cauces	323,60	km
Densidad de drenaje	1,04	km/ km ²

Fuente: elaboración propia.

3. RÉGIMEN DE LLUVIAS Y CRECIDAS

La subcuenca del río Villalobos, se ubica en la cuenca del río María Linda, conformando con el río Aguacapa, las dos subcuencas que constituyen la parte alta de la cuenca en mención. El régimen de lluvias en la cuenca del río María Linda, es mayor en la parte media de la misma y menor en la parte baja, siendo intermedio en la parte alta. La parte baja la constituye la planicie del Litoral Pacífico, con valores de lluvia anual alrededor de 1 000 milímetros, luego hacia la parte media los valores pueden ser hasta 4 000 milímetros anuales.²³

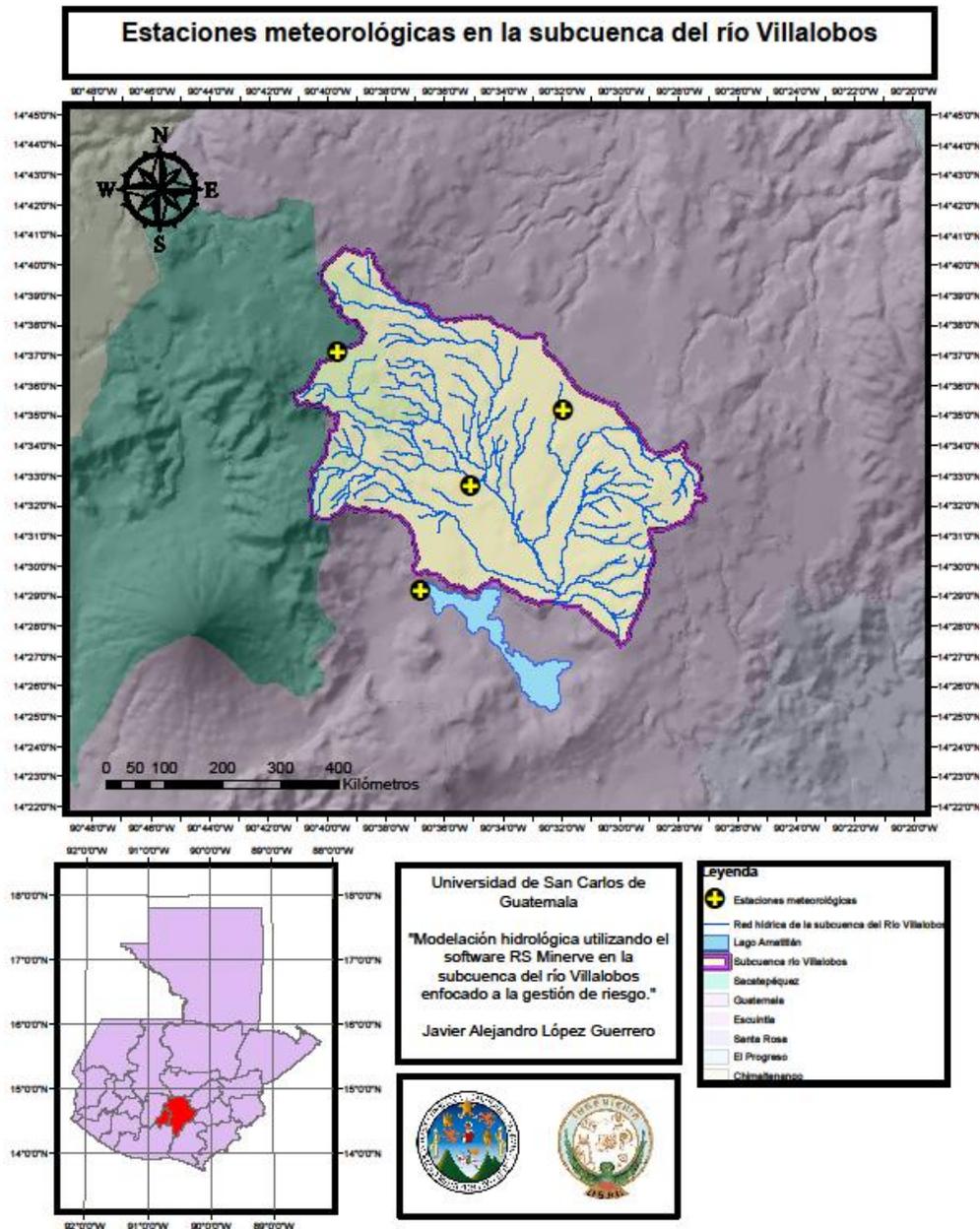
El presente capítulo describe el régimen de lluvias y crecidas en la subcuenca del río Villalobos, series anuales, mensuales y diarias, eventos extremos y lluvias de diseño.

3.1. Red de monitoreo hidrometeorológico

Para el análisis del régimen de lluvias y crecidas se tomaron en consideración 4 estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia de la subcuenca del río Villalobos, cada una con longitud de 40 años, dando inicio en el año 1980 y finalizando en el año 2019, siendo estas Guatemala Sur y Compuertas Amatitlán, pertenecientes al INDE e INSIVUMEH y Suiza Contenta, pertenecientes al INSIVUMEH. La figura No. 15 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas y su área de influencia en la subcuenca del río Villalobos. La tabla No. XII muestra las coordenadas geográficas y correspondiente altura en metros sobre el nivel del mar.

²³ FUENTES MONTEPEQUE. Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. p. 60.

Figura 15. Estaciones meteorológicas en estudio, subcuenca del río Villalobos



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.

Tabla XI. **Coordenadas de las estaciones meteorológicas empleadas para el estudio de la subcuenca del río Villalobos**

No .	Estación	Institución	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
1	Compuertas Amatitlán	INDE	90°36'50"	14°29'10"	1 190
2	Guatemala Sur	INDE	90°35'08"	14°32'40"	1 360
3	INSIVUMEH	INSIVUMEH	90°31'58"	14°35'11"	1 502
4	Suiza Contenta	INSIVUMEH	90°39'40"	14°37'08"	2 105

Fuente: FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos*. p. 9.

Para analizar las series de datos meteorológicos, es necesario, en la mayoría de los casos, el relleno de los datos faltantes contenidos en los registros, que, por distintas causas, no fueron completados o ingresados a la base de datos de los registros interrumpiendo así la continuidad y consistencia de los registros históricos. Para el relleno de los datos faltantes de las series de datos se utilizó la metodología de la distancia inversa ponderada, “este método consiste en calcular un promedio ponderado, donde los pesos para las observaciones son calculados de acuerdo a su distancia con la ubicación de interpolación”²⁴, estableciendo así que la precipitación de las estaciones más cercanas a la estación que cuenta con datos faltantes es más parecida a aquella perteneciente a las estaciones que se encuentran más lejanas.

Cabe resaltar trabajo eficiente de los operadores que se dedican a registrar los eventos de precipitación en las instituciones INDE e INSIVUMEH, ya que, en

²⁴ RUSSI, Jessica. *Comparación de métodos de estimación de datos faltantes en series de precipitación diaria en el Valle del Cauca*. p. 24.

este caso, el porcentaje de datos ausentes es bajo, en la estación INSIVUMEH es casi insignificante, siendo su porcentaje de datos faltantes tan solo 0,3 %. La estación meteorológica con mayor porcentaje de datos faltantes es Suiza Contenta, con 3,36 %.

Tabla XII. **Datos faltantes de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia de la subcuenca del río Villalobos**

No.	Estación	Institución	Inicio	Final	Longitud (años)	Datos faltantes (%)
1	Guatemala Sur	INDE	1980	2019	40	1,29
2	Compuertas Amatitlán	INDE	1980	2019	40	1,71
3	INSIVUMEH	INSIVUMEH	1980	2019	40	0,3
4	Suiza Contenta	INSIVUMEH	1980	2019	40	3,36

Fuente: elaboración propia.

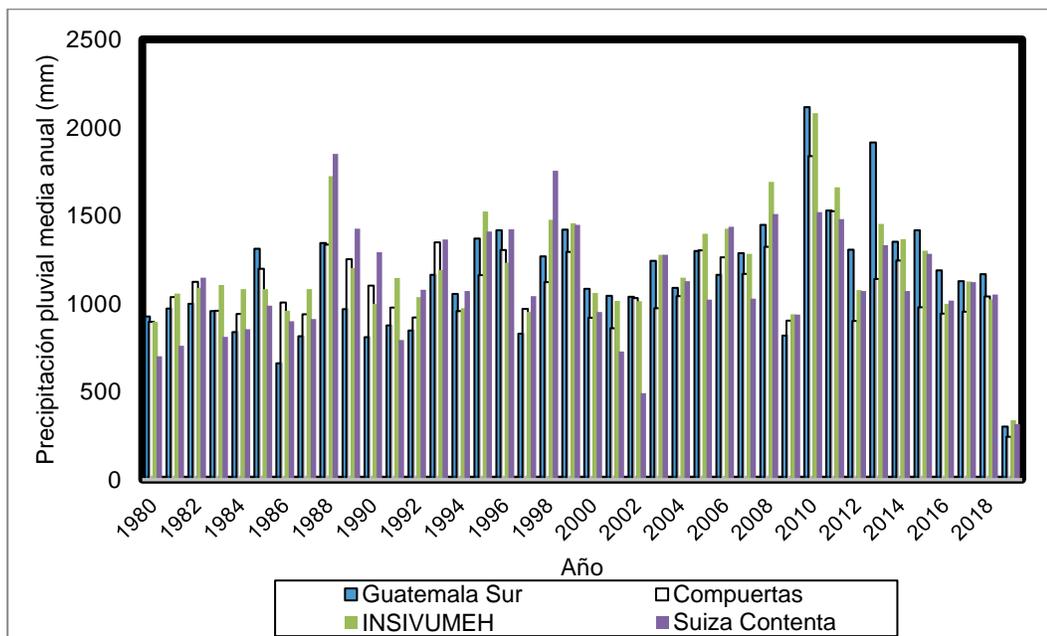
3.2. Régimen de lluvias

El régimen de lluvias y crecidas en la subcuenca del río Villalobos presenta el análisis de las series de lluvia anual, mensual, diaria y diaria máxima anual con su respectiva gráfica y los parámetros estadísticos más importantes tales como la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el sesgo y la curtosis.

3.2.1. Lluvia anual

La precipitación anual que se ha presentado a lo largo de los registros históricos en las estaciones meteorológicas de la subcuenca del río Villalobos muestra la variación de la lluvia desde el año 1980 hasta el año 2019, se puede observar que el año con más precipitación ha sido 2010, alcanzando valores que superan de 2 000 mm de lluvia, por el contrario, el año 2019, ha sido uno de los años con menor cantidad de precipitación, no llegando a alcanzar los 500 mm de precipitación. En la tabla No. XIII se ilustran los parámetros estadísticos estimados de forma convencional, con datos originales, de las series de tiempo de lluvia anual de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis.

Figura 16. **Precipitación anual (1980-2019) de las estaciones Guatemala Sur, Compuertas Amatitlán, INSIVUMEH y Suiza contenta**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Parámetros estadísticos de la precipitación media anual de la subcuenca del río Villalobos**

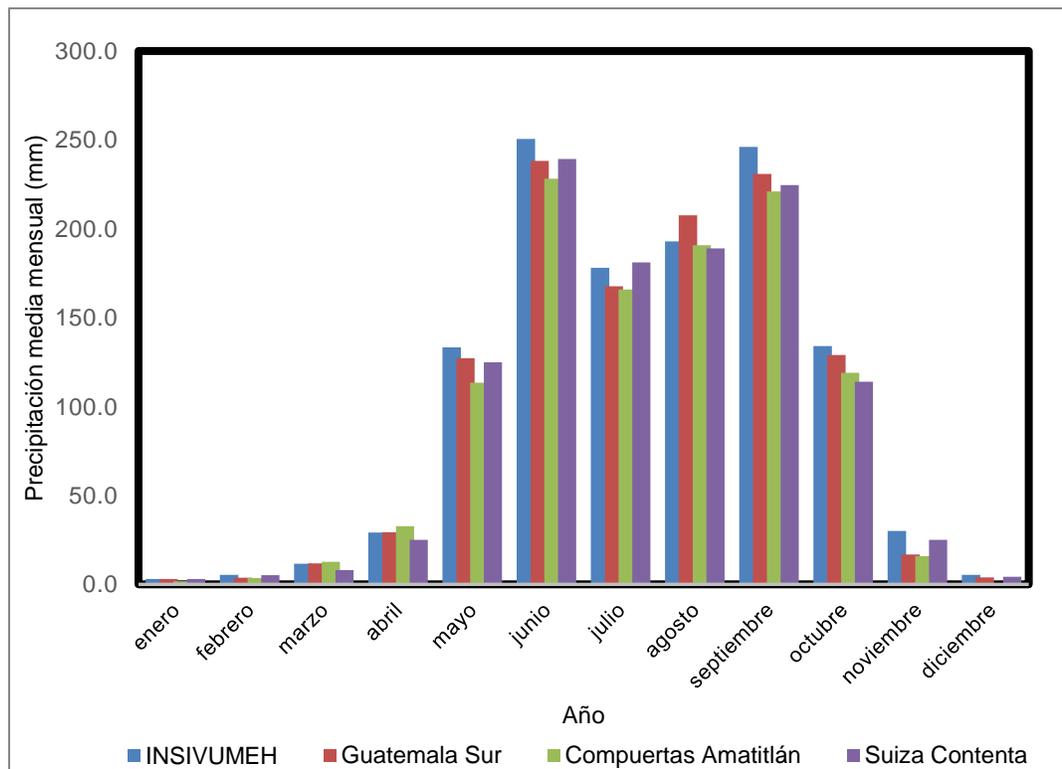
Estación	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo	Curtosis
Guatemala Sur	1 144,21	323,62	0,28	0,48	2,02
Compuertas Amatitlán	1 085,72	242,42	0,22	-0,12	4,46
INSIVUMEH	1 198,10	293,73	0,25	0,42	2,38
Suiza Contenta	1 119,72	321,21	0,29	-0,06	0,24

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Lluvia mensual

La lluvia mensual consiste en la sumatoria de las precipitaciones ocurridas y registradas en un mes. Se puede observar en la figura No. 17 que los meses de mayo hasta octubre, son los que más precipitación muestran, perteneciendo a la época lluviosa en Guatemala, siendo junio el mes con mayor precipitación registrada de 1980 hasta el 2019 superando los 250 mm, por el contrario, desde noviembre hasta marzo, los registros de precipitación disminuyen, conformando estos meses así la denominada época seca en Guatemala.

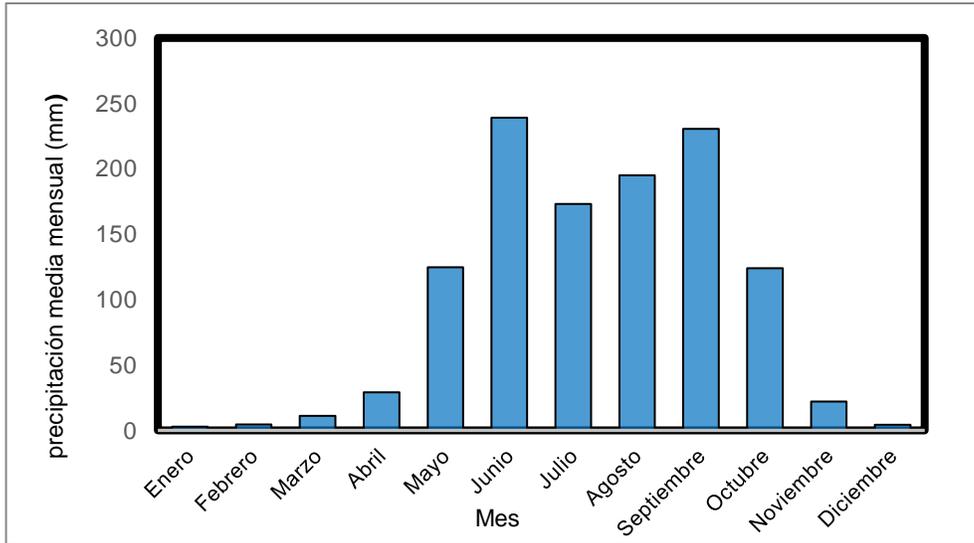
Figura 17. **Precipitación mensual de las estaciones meteorológicas en estudio**



Fuente: elaboración propia.

La figura 18 muestra la distribución típica de lluvias mensuales en la subcuenca del río Villalobos.

Figura 18. **Distribución típica de la precipitación media mensual de la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Parámetros estadísticos de la precipitación media mensual**

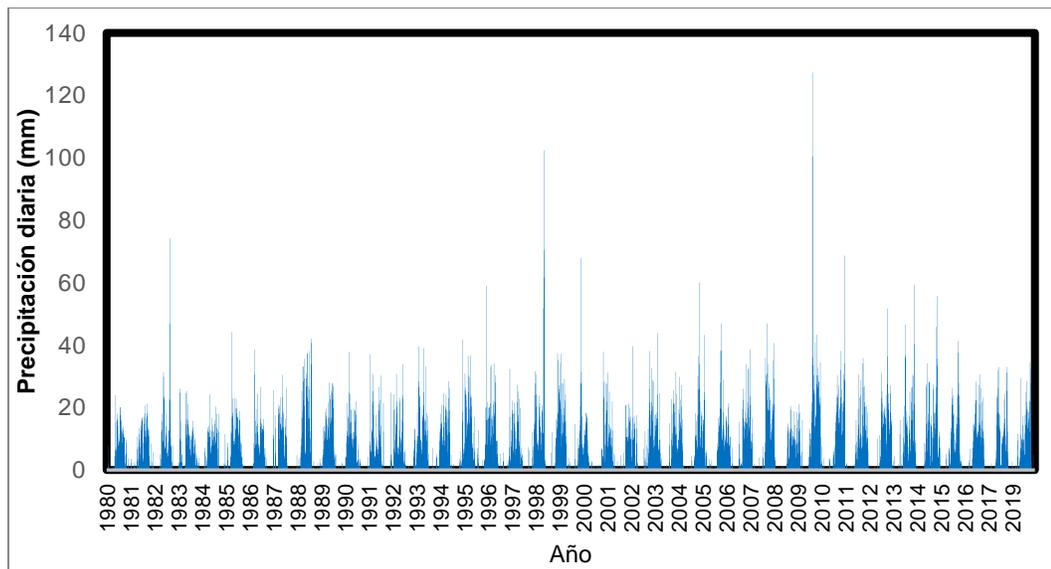
Estación	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo	Curtosis
Guatemala Sur	97,43	113,38	1,16	1,28	1,74
Compuertas Amatitlán	92,40	102,46	1,11	0,95	0,00
INSIVUMEH	101,59	113,09	1,11	1,05	0,29
Suiza Contenta	95,25	112,03	1,18	1,18	0,78

Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Lluvia diaria

En la serie de lluvia diaria anual, resaltan con valores máximos en 1982, 1998 y 2010, pertenecientes al huracán Paul, al huracán Mitch y a la tormenta tropical Agatha, respectivamente. El valor máximo de precipitación diaria pertenece a la tormenta tropical Agatha como se observa en la figura No. 19.

Figura 19. **Precipitación media diaria de la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

Los parámetros estadísticos de la precipitación media diaria se muestran en la tabla XV, con una media de precipitación diaria de 3,17 mm, con una desviación estándar media de 8,7; un coeficiente de variación medio de 2,74 lo cual indica la poca variación existente en las series históricas de las estaciones meteorológicas.

Tabla XV. **Parámetros estadísticos de la serie de precipitación media diaria**

Estación	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo	Curtosis
Guatemala Sur	3,20	9,33	2,92	5,52	53,61
Compuertas Amatitlán	3,03	8,14	2,69	5,10	47,52
INSIVUMEH	3,33	9,26	2,78	5,87	66,77
Suiza Contenta	3,12	8,08	2,59	4,45	29,84

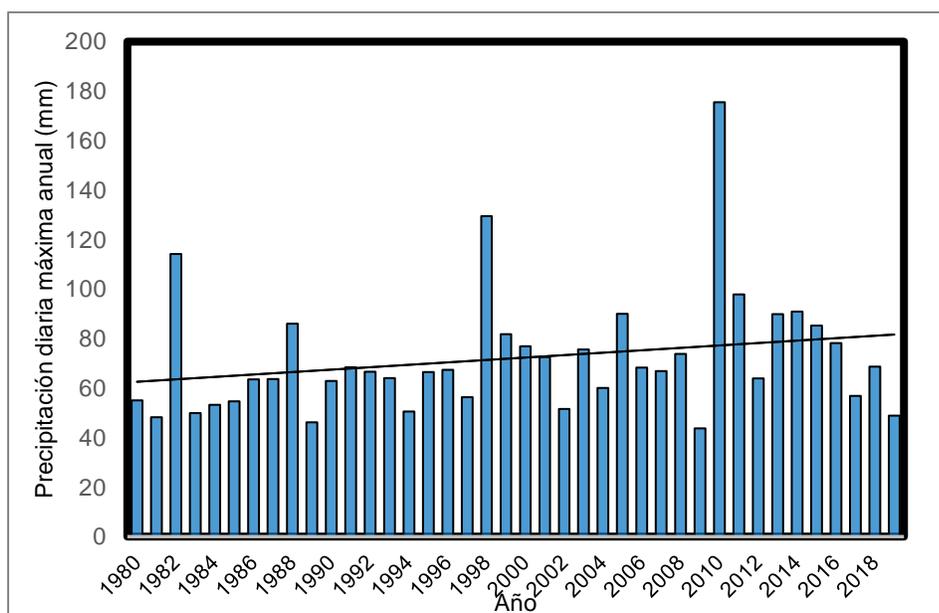
Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Lluvia diaria máxima anual

La lluvia máxima es el valor máximo de precipitación diario registrado para cada año. En la subcuenca del río Villalobos, los resultados de la lluvia diaria máxima anual para cada estación de estudio evidencian un incremento en la tendencia de eventos máximos. Esta tendencia se puede visualizar en la gráfica contenida en la figura 20.

Los parámetros estadísticos de la precipitación diaria máxima anual se muestran en la tabla XVI, con una media de precipitación diaria máxima anual de 72,1 mm, con una desviación estándar media de 31,81 y un coeficiente de variación medio de 0,44.

Figura 20. **Precipitación diaria máxima anual de la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Parámetros estadísticos de la serie de precipitación diaria máxima anual**

Estación	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Sesgo	Curtosis
Guatemala Sur	78,94	33,64	0,43	2,53	8,44
Compuertas Amatitlán	67,53	30,65	0,45	2,19	5,47
INSIVUMEH	80,11	40,64	0,51	2,17	5,42
Suiza Contenta	61,82	22,40	0,36	1,82	5,56

Fuente: elaboración propia.

3.3. Prueba de hipótesis

El estudio de frecuencia de caudales máximos es uno de los tópicos más estudiados de la hidrología, dada la necesidad de estimar la probabilidad de ocurrencia de crecidas para el diseño de obras hidráulicas, protección de ciudades, entre otros.

El enfoque clásico del análisis de frecuencia se basa en el empleo de una serie de datos observados de manera sistemática en una sección o punto de interés de un río o una cuenca. Para el adecuado empleo de dicha serie, es necesario verificar previamente el cumplimiento de dos tipos de pruebas de hipótesis: Pruebas de Independencia y Pruebas de Homogeneidad.²⁵

La aceptación de las pruebas descritas anteriormente de la muestra está en función de un nivel de significancia, usualmente del 5 % y 10 %.

3.3.1. Independencia

Las pruebas de independencia son utilizadas para demostrar que los valores que conforman la serie son aleatorios, por ende, la probabilidad de ocurrencia de cualquiera es independiente de la ocurrencia de los valores precedentes, y, por consiguiente, no afecta, la probabilidad de ocurrencia de los datos posteriores.

3.3.1.1. Prueba de Anderson

Existen numerosas técnicas para definir la independencia de los valores que conforman una serie. La prueba de Anderson hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j , realizando un correlograma para diferentes tiempos de retraso k o desfases, trazando intervalos de 90 % y 95 % de confianza. Para que la serie se clasifique como independiente el 90 % de los puntos deben de estar

²⁵ GANANCIAS MARTÍNEZ, Facundo. *Cátedra de hidrología y procesos hidráulicos. Clase de estadística hidrológica*. p. 3.

comprendidos dentro de los intervalos de confianza, de lo contrario, la serie se clasifica independiente.

Los resultados para las series meteorológicas se presentan en la tabla XVII. De las 4 series analizadas, la correspondiente a la estación Guatemala Sur resultó dependiente con un porcentaje de datos al 87 %, al estar cerca del límite se considera estadísticamente insignificante, porque se clasifica como independiente. Los correlogramas de las series de tiempo de las estaciones meteorológicas se encuentran en el apéndice.

Tabla XVII. **Parámetros obtenidos de la prueba de independencia de Anderson**

Estación	Desfases k	Coeficiente (r)		Datos en el intervalo (%)	Conclusión
		Max	Min		
Compuertas Amatitlán	20	0,22	0,25	95	Independiente
Guatemala Sur	20	0,47	0,25	87	Dependiente
INSIVUMEH	20	0,31	0,34	95	Independiente
Suiza Contenta	20	0,22	0,29	90	Independiente

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Homogeneidad

Las pruebas de Homogeneidad evalúan si todos los valores que conforman la muestra provienen estadísticamente de una misma población. Para demostrar la homogeneidad de una serie de datos puede emplearse distintas pruebas de hipótesis, para este estudio se realiza la prueba *t Student*.

3.3.2.1. Prueba *t Student*

Es una prueba sencilla y ampliamente utilizada con múltiples aplicaciones en estadística. Si se considera una serie Q_i^j para $i = 1, 2, 3, \dots, n$ del sitio j , Se estima un valor de t_e el cual se denomina t estimado y un valor teórico o tabulado t_t , denominado t teórico, generalmente a un intervalo de confianza del 95 %. El valor de t_e debe ser menor a t_t para que la serie de tiempo se considere homogénea.

La tabla XVIII muestra que las series de tiempo de cada una de las estaciones son homogéneas.

Tabla XVIII. **Parámetros obtenidos en la prueba *t Student***

Serie	t_e estimado	t_t teórico	Conclusión
Compuertas Amatitlán	2,01	2,02	Homogénea
Guatemala Sur	1,85	2,02	Homogénea
INSIVUMEH	1,97	2.02	Homogénea
Suiza Contenta	1,46	2,02	Homogénea

Fuente: elaboración propia.

3.4. Análisis de frecuencia

“En términos generales, consiste en el ploteo a escala probabilística de Gumbel, de las series de tiempo máximas conjuntamente con las distribuciones estadísticas tales como Log Normal, Gamma, Pearson, Gumbel, entre otros,

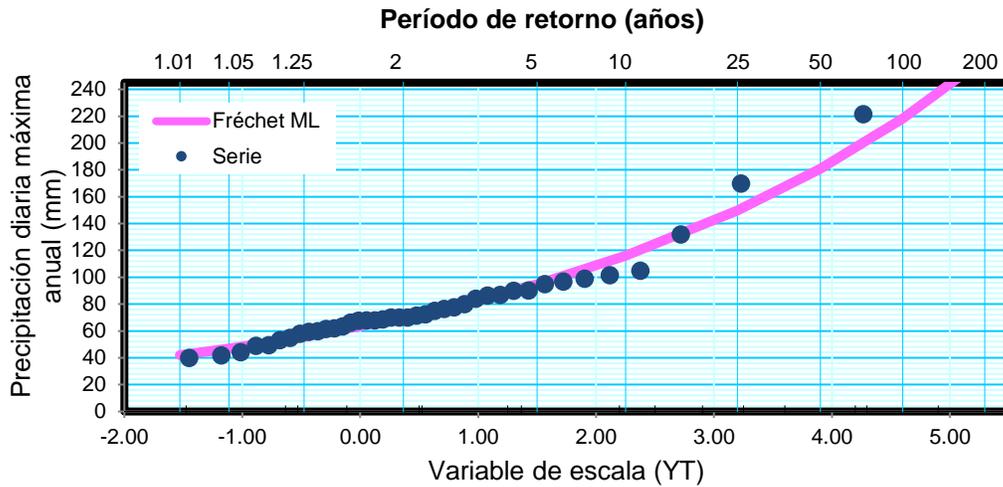
momentos convencionales y lineales. La selección de la distribución que presenta el mejor ajuste puede estimarse de forma visual o estadística.”²⁶

3.4.1. Ajuste de las series de valores extremos

El ajuste de las series a las distribuciones teóricas de frecuencia se puede realizar tanto en forma gráfica como en forma estadística. Para el presente estudio se realizó de forma gráfica. Se trazaron en papel probabilístico a escala Gumbel y se determinó cual distribución presenta el mejor ajuste a las series de tiempo, como se muestran en la figura 21 a la figura 24. Cabe mencionar que la distribución *Fréchet* con momentos lineales es la que se ajustó a 3 de las 4 estaciones de estudio, siendo estas Guatemala Sur, Compuertas Amatitlán e INSIVUMEH y la distribución restante corresponde igualmente a *Fréchet*, en este caso, con momentos convencionales, para la estación Suiza Contenta.

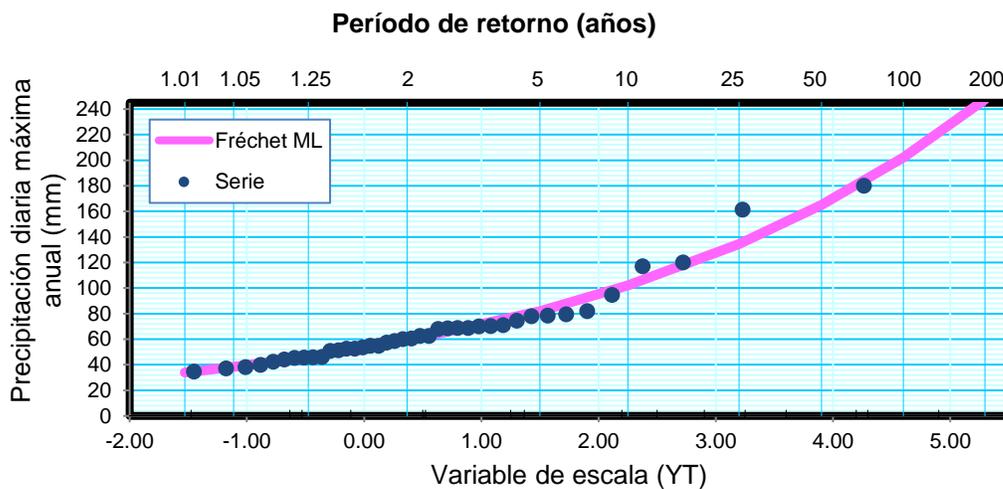
²⁶ FUENTES MONTEPEQUE. Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización de la subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. p. 87.

Figura 21. **Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Guatemala Sur**



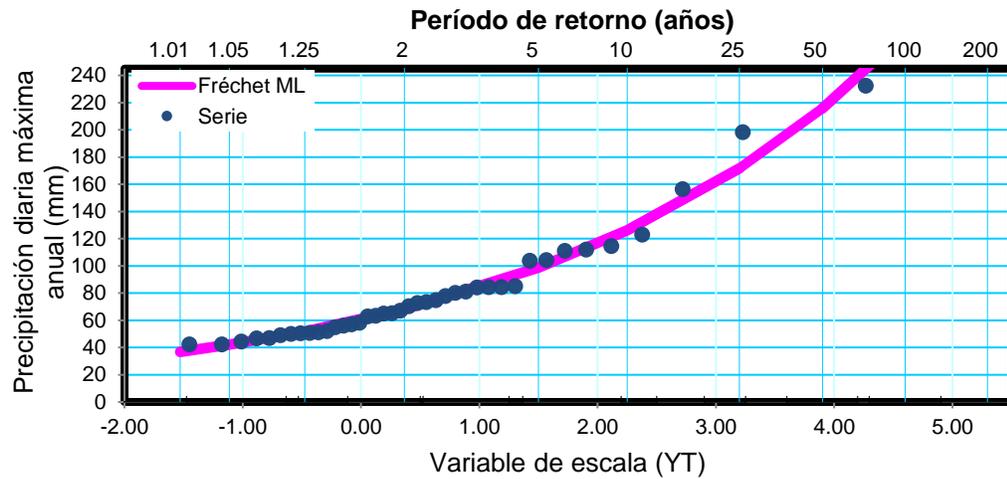
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Compuertas Amatitlán**



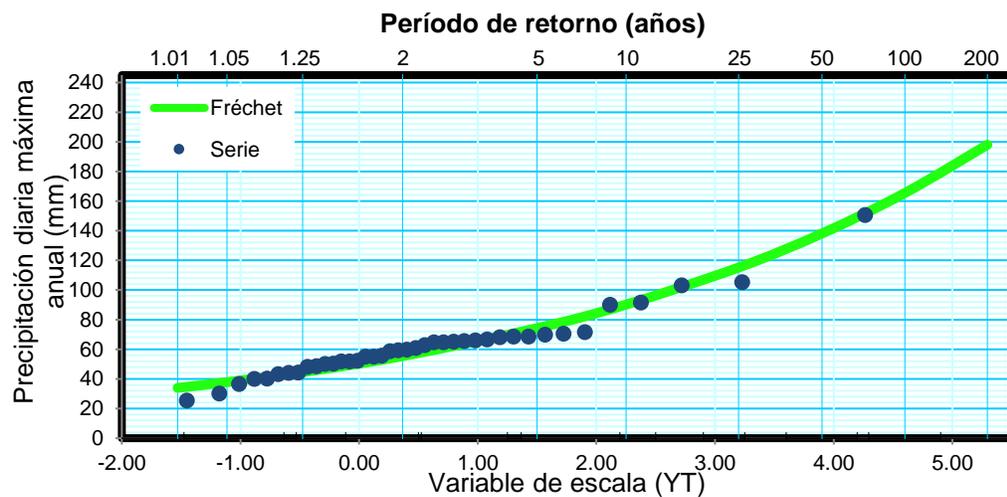
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación INSIVUMEH**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Ajuste a la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual en la estación Suiza Contenta**



Fuente: elaboración propia.

3.5. Estimación de eventos de diseño

Los eventos de diseño para distintos períodos de retorno se estimaron para cada serie de tiempo de eventos extremos, utilizando la distribución que presentó el mejor ajuste, los cuales se presentan a continuación.

Tabla XIX. **Eventos de diseño correspondientes a lluvias diarias máximas anuales**

Período de retorno	Compuertas Amatitlán	Guatemala Sur	INSIVUMEH	Suiza Contenta
1,01	34	42	37	34
1,05	38	47	42	38
1,25	46	56	52	45
2	59	70	68	55
5	82	95	99	74
10	102	116	126	90
25	134	150	172	115
50	165	181	216	138
100	202	218	271	165
200	248	263	340	198

Fuente: elaboración propia.

Como se observa, la estación Suiza Contenta muestra los menores valores para los eventos extremos, mientras que la estación INSIVUMEH muestra los mayores valores para los eventos extremos.

4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA EMPLEANDO EL SOFTWARE RS MINERVE

Para la modelación hidrológica empleando la plataforma RS MINERVE, se procede a dividir la subcuenca del río Villalobos en 6 microcuencas, se obtuvieron las coordenadas X, Y y Z de sus respectivos centroides. Las microcuencas y su respectivo centroide en coordenadas UTM se encuentran en la tabla XX, los cuales fueron obtenidas por medio de la plataforma *ArcMap*, posteriormente, estos valores se ingresan en las estaciones virtuales, las coordenadas del centroide de cada microcuenca, y el área de la misma en el modelo hidrológico, contenidas en la plataforma RS MINERVE.

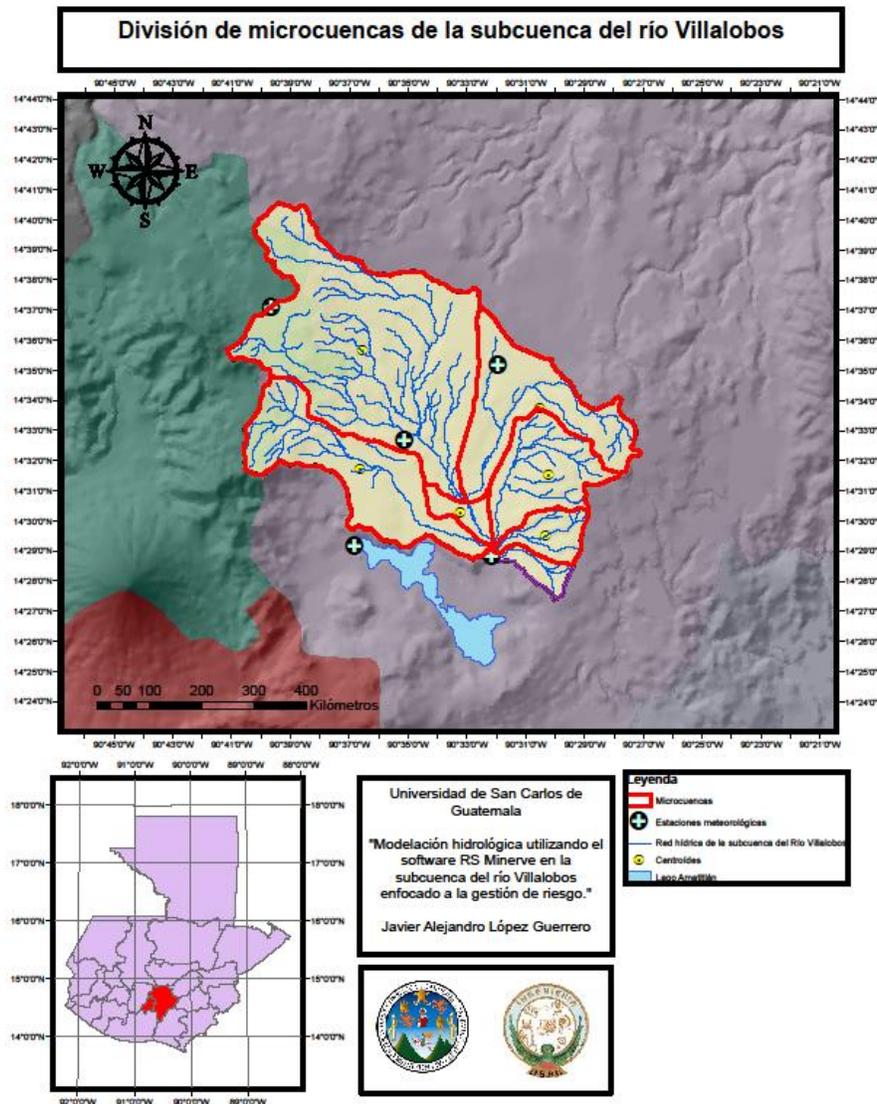
Tabla XX. **Área y centroides de las microcuencas de la subcuenca del río Villalobos**

Nombre	Área (km²)	Perímetro (km)	X (m)	Y (m)	Z (msnm)
Río Platanitos	56,94	46,54	757 482,2	1 607 550,5	1 406
Quebrada El Cangrejal	12,18	16,19	768 860,4	1 603 626,2	1 495
Río Villalobos	143,15	62,48	757 561,6	1 614 839,9	1 608
Río Las Minas	34,20	28,12	768 999,8	1 607 343,9	1 672
Río Pinula	49,15	45,39	768 422,7	1 611 434,5	1 500
Área intermedia	7,16	15,27	763 649,8	1 604 969,6	1 245

Fuente: elaboración propia.

La figura No. 25 muestra la división de las microcuencas y la ubicación de los centroides, muestra, además, las estaciones de estudio y su respectiva red hídrica.

Figura 25. División de la subcuenca del río Villalobos en microcuencas



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.

Para el presente estudio se analizan las mismas estaciones meteorológicas empleadas en el capítulo 3, con la diferencia que se adiciona la estación Villa Canales, la cual contiene registros históricos de caudales medios diarios. La tabla XXI muestra las coordenadas geográficas y la altitud de las estaciones mencionadas.

Tabla XXI. **Estaciones meteorológicas para el estudio de la subcuenca del río Villalobos**

No	Estación	Institución	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
1	Compuertas Amatitlán	INDE	90°36'50"	14°29'10"	1 190
2	Guatemala Sur	INDE	90°35'08"	14°32'40"	1 360
3	INSIVUMEH	INSIVUMEH	90°31'58"	14°35'11"	1 502
4	Suiza Contenta	INSIVUMEH	90°39'40"	14°37'08"	2 105
5	Villa Canales	INSIVUMEH	90°32'10"	14°28'52"	1 215

Fuente: FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos*. p. 8.

La tabla XXII muestra el porcentaje de datos faltantes desde el año 2003 hasta el año 2019. Esto se debe a que los registros de caudales de la estación Villa Canales cuenta con registros únicamente en este período. Para el relleno de datos faltantes de las series meteorológicas de precipitación y temperatura se emplea la metodología de la distancia inversa ponderada conocida por sus siglas en inglés *IDW* la cual calcula un promedio ponderado usando la distancia entre puntos, en este caso la distancia entre las estaciones meteorológicas, donde los valores medidos, en este caso, precipitación o temperatura, más cercanos a la estación que cuenta con datos faltantes, tienen más influencia sobre el valor faltante que las series de las estaciones que se encuentran más alejadas.

Para las series de datos faltantes de caudales de la estación Villa Canales se emplea el método del agotamiento de la humedad del suelo, en el cual, con variables de caudal, tanto inicial como final, la constante de abatimiento, y el tiempo entre caudales, se procede a rellenar los datos faltantes.

Tabla XXII. **Porcentaje de datos faltantes en las estaciones meteorológicas del año 2003 hasta el 2019**

No.	Estación	Institución	Tipo	Datos faltantes (%)		
				Lluvia	Temp.	Caudal
1	Guatemala Sur	INDE	B	0	0,19	-
2	Compuertas Amatitlán	INDE	B	0	-	-
3	INSIVUMEH	INSIVUMEH	A	0,51	0	-
4	Suiza Contenta	INSIVUMEH	B	4,18	3,70	-
5	Villa Canales	INSIVUMEH	L	-	-	3,25

Fuente: elaboración propia.

4.1. Base de datos de la plataforma RS MINERVE

Posterior al relleno de las series de datos faltantes, las series se ingresan a la base de datos de la plataforma RS MINERVE. En la figura 26 se muestra la base de datos que contiene, como variables de entrada de los modelos GR4J, HBV, SOCONT y SAC-SNA, la precipitación, evapotranspiración y temperatura media diaria de las estaciones Guatemala Sur, Compuertas Amatitlán, INSIVUMEH y Suiza Contenta; por último, como caudal de referencia, para la posterior comparación, calibración y validación, la estación Villa Canales con caudales medios diarios.

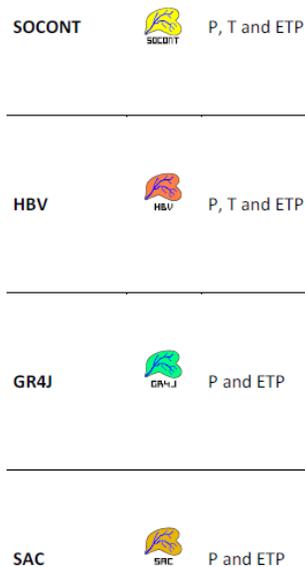
Figura 26. Creación de base de datos en la plataforma RS MINERVE



Fuente: elaboración propia, empleando plataforma RS MINERVE.

Cabe mencionar que una variable de importancia como la evapotranspiración potencial se estima utilizando la metodología propuesta por Hargreaves para las estaciones de Compuertas Amatitlán y Suiza Contenta. Mientras que para la estación de INSIVUMEH, al contar con los valores de evaporación del tanque, se multiplica el dato de evaporación de tanque por un coeficiente de tanque, que para este estudio se estima en 0,85 para la obtención de la evapotranspiración potencial media diaria. Para la estación Guatemala Sur no se procede a realizar la estimación del valor de evapotranspiración potencial, ya que no cuenta con datos meteorológicos necesarios para su estimación.

Figura 27. **Representación gráfica de los modelos hidrológicos y variables de entrada**

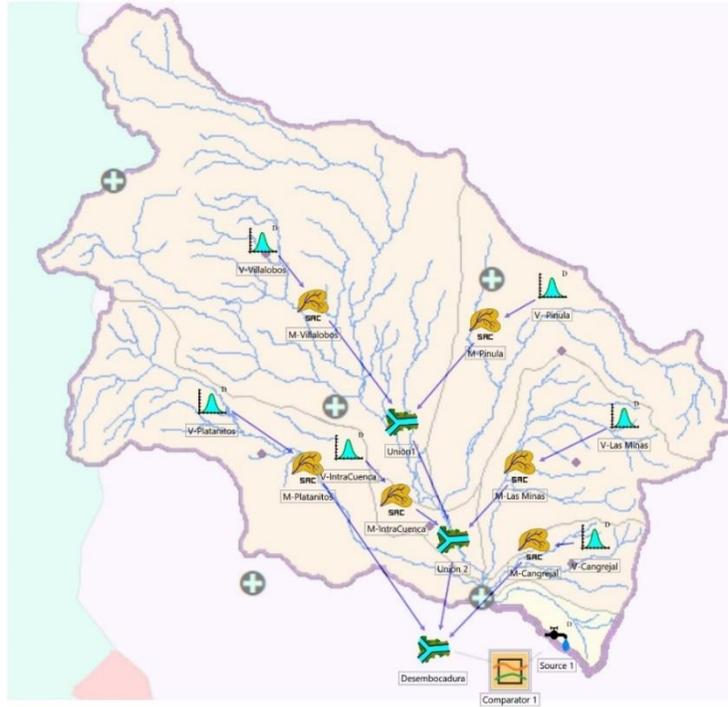


Fuente: CREALP. *RS MINERVE – User manual*. p. 18.

4.2. Incorporación de los elementos hidrológicos

Una vez creada la base de datos, se procede a incorporar los elementos hidrológicos que representarán las microcuencas. La figura muestra los elementos de las estaciones virtuales y los modelos hidrológicos que representan a cada microcuenca, las uniones y la desembocadura. En la cual el objeto comparador tendrá como función analizar el caudal simulado y el caudal de referencia representado por el objeto fuente, que toma los datos de caudales medios diarios de la estación Villa Canales.

Figura 28. **Incorporación de los elementos hidrológicos en la subcuenca del río Villalobos**



Fuente: elaboración propia, empleando plataforma RS MINERVE.

5. RESULTADOS

La simulación hidrológica empleando la plataforma RS MINERVE para la subcuenca del río Villalobos a partir del año 2003 hasta el año 2019 muestra los siguientes resultados.

5.1. Modelo hidrológico GR4J

La modelación del modelo GR4J con una escala temporal diaria presenta, como se puede observar en la figura No. 29, que los valores simulados son mayores a los valores de caudal medio diario de referencia, contando ya con los ajustes presentados mediante la calibración y validación del mismo. Los años de mayor precipitación y, por ende, mayor escorrentía, en el año 2010, con la tormenta tropical *Agatha*, presenta un valor mayor, sin embargo, no se encuentra espacialmente distribuido a lo largo del tiempo, el valor máximo simulado se muestra antes que el valor máximo de referencia. En el año 2016 se puede observar que el valor simulado es considerablemente sobreestimado, en relación con el caudal de referencia.

Se observa que en el año 2012 y 2014 los valores de caudal medio diario simulados presentan un valor menor al caudal medio diario de referencia. En estos años el caudal está subestimado.

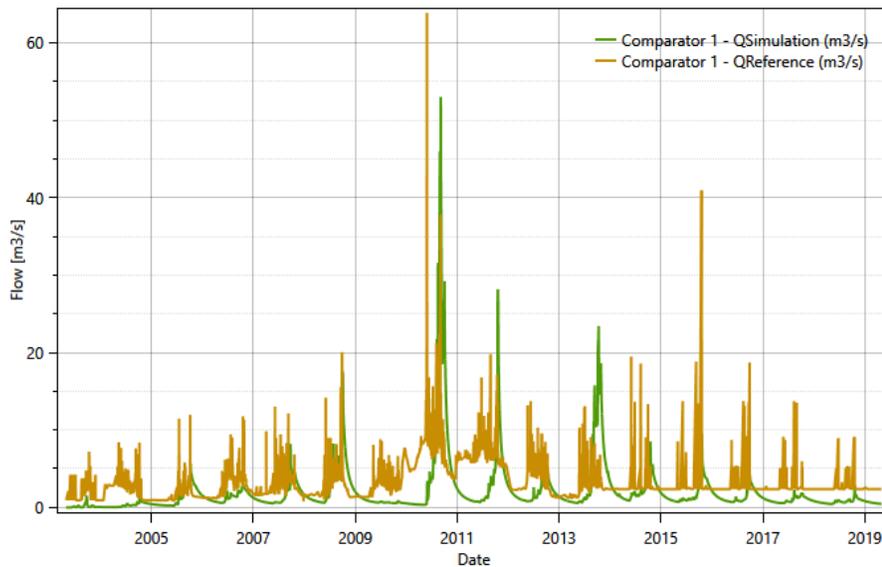
La tabla XXIII muestra 4 parámetros del modelo GR4J, tanto los valores previos a la calibración y validación del modelo, y los parámetros, que se ajustan a los valores de caudal de referencia, como los valores presentados posterior a la calibración y validación.

Tabla XXIII. **Parámetros del modelo GR4J**

Parámetro	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación	Unidad
X1	0,05	1,1998853	m
X2	0	0,0020964	m
X3	0,05	0,4998125	m
X4	1,7	2,8998422	D

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Caudales medios diarios simulados y observados del modelo GR4J**



Fuente: elaboración propia, empleando plataforma RS MINERVE.

La tabla XXIV muestran los valores de los indicadores de eficiencia del modelo GR4J, como se observa los valores aún no se encuentran en los valores

aceptables, confirmando el resultado que se observa en la figura No. 29. Cabe destacar la reducción del error mostrado en el indicador *Nash*. El indicador *Nash In* y *RRMSE* presentan mejoras al realizarse el proceso de calibración y validación.

Tabla XXIV. **Indicadores de eficiencia del modelo GR4J**

Indicador de eficiencia	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación
<i>Nash</i>	-44,81	-1,32
<i>Nash-In</i>	-13,14	-7,22
<i>Pearson Correlation Coeff</i>	0,36	0,35
<i>Kling-Gupta Efficiency</i>	-2,10	-0,45
<i>Bias Score</i>	0,39	0,72
<i>RRMSE</i>	5,48	1,23
<i>Overall Accuracy</i>	0,51	0,84

Fuente: elaboración propia.

5.2. Modelo hidrológico SOCONT

La modelación del modelo SOCONT empleado en la subcuenca del río Villalobos a una escala diaria desde el año 2003 hasta el año 2019 presenta, como se puede observar en la figura 30, que los valores simulados son mayores a los valores de caudal medio diario de referencia, contando ya con los ajustes presentados mediante la calibración y validación. Únicamente, en el año 2016 se puede observar que el valor de caudal de referencia es mayor al valor de caudal de simulado, en relación con el caudal de referencia.

La tabla XXV muestra los valores previos a la calibración y validación del modelo, y los parámetros, que se ajustan a los valores de caudal de referencia, posterior a la calibración y validación. Cabe resaltar que el modelo SOCONT tiene más parámetros que definen su comportamiento, sin embargo, analizan el comportamiento de precipitación sólida, temperaturas de glaciares, entre otros, los cuales no son aplicables en este estudio, por ello, los únicos parámetros a calibrar y validar son los siguientes.

Tabla XXV. **Parámetros del modelo SOCONT**

Parámetro	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación	Unidad
SPh	200	313	d
HGR3Max	1	1,6422266	m
KGR3	0,0001	0,00025	1/s

Fuente: elaboración propia.

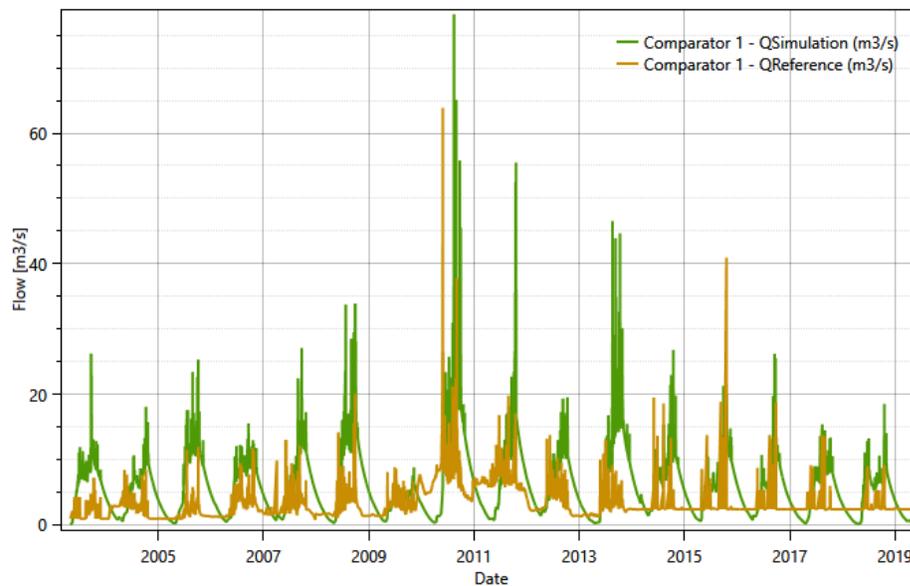
La tabla XXVII muestran los valores de los indicadores de eficiencia del modelo SOCONT, como se observa los valores aún no se encuentran en los valores aceptables, confirmando el resultado que se observa en la figura No. 30. Cabe destacar la reducción del error mostrado en el indicador *Nash In*. Los indicadores *Nash* y *RRMSE* presentan destacadas mejoras al realizarse el proceso de calibración y validación.

Tabla XXVI. **Indicadores de eficiencia del modelo SOCONT**

Indicador de eficiencia	Previo a la calibración	Posterior a la calibración
Nash	-16,90	-4,34
Nash-In	-26,94	-2,57
Pearson Correlation Coeff	0,45	0,34
Kling-Gupta Efficiency	-0,94	-0,17
Bias Score	-2,31	0,08
RRMSE	3,43	1,87
Overall Accuracy	0,73	0,95

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Caudales medios diarios simulados y observados del modelo SOCONT**



Fuente: elaboración propia, empleando RS MINERVE.

5.3. Modelo hidrológico HBV

La modelación del modelo HBV con una escala temporal diaria del año 2003 hasta el año 2019 presenta, como se observa en la figura 31, los valores simulados muy similares a los valores de caudales medios diarios de referencia. El año de mayor precipitación y, por ende, mayor escorrentía, el año 2010, con la tormenta tropical *Agatha*, presenta un valor simulado muchísimo menor al caudal de referencia. El modelo HBV presenta valores simulados menores a los caudales de referencia en todo el período de estudio.

La tabla XXVII muestra los 8 parámetros del modelo HBV previos a la calibración y validación del modelo, y los parámetros, que se ajustan a los valores de caudal de referencia, posterior a la calibración y validación, con su respectiva unidad.

Tabla XXVII. **Parámetros del modelo HBV**

Parámetro	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación	Unidad
Beta	2,5	1	-
FC	0,25	0,6499997	m
PWP	0,5	0,1770109	-
SUMax	0,05	0,0971322	m
Kr	0,3	0,4999995	1/d
Ku	0,1	0,0362897	1/d
KI	0,02	0,0015436	1/d
Kperc	0,15	0,0015436	1/d

Fuente: elaboración propia.

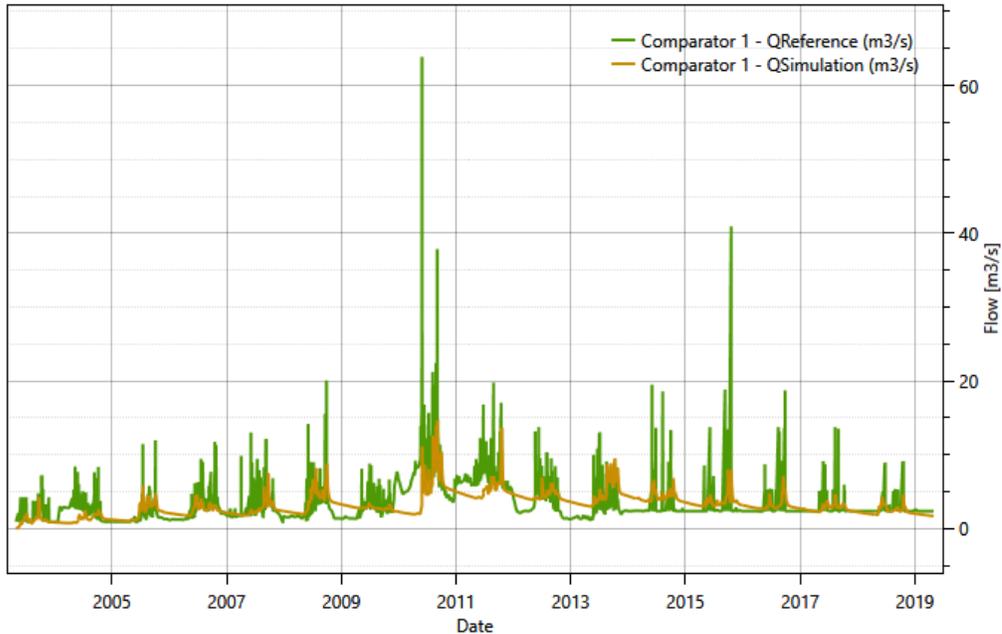
La tabla XXVIII muestran los valores de los indicadores de eficiencia del modelo HBV, como se observa los valores se encuentran en el rango aceptable. El modelo, en sí, tomando en cuenta únicamente los indicadores de eficiencia, es un modelo satisfactorio, sin embargo, la figura 30 muestra la poca representatividad del modelo para eventos con un caudal de referencia alto. Cabe destacar que el modelo previo a la calibración y validación, muestra los valores más cercanos al valor ideal de cada uno de los indicadores de eficiencia, Así también posterior a la calibración y validación del modelo

Tabla XXVIII. **Indicadores de eficiencia del modelo HBV**

Indicador de eficiencia	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación
Nash	-4,00	0,27
Nash-In	-5,77	0,04
Pearson Correlation Coeff	0,49	0,53
Kling-Gupta Efficiency	-0,18	0,41
Bias Score	0,94	0,99
RRMSE	1,81	0,68
Overall Accuracy	0,72	0,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Caudales medios diarios simulados y observados del modelo HBV**



Fuente: elaboración propia, empleando RS MINERVE.

5.4. **Modelo hidrológico SAC-SMA**

La modelación del modelo SAC-SMA con una escala temporal diaria del año 2003 hasta el año 2019 presenta, como se puede observar en la figura No. 32, que los valores simulados son similares a los valores de caudal medio diario de referencia, contando ya con los ajustes presentados mediante la calibración y validación. Sin embargo, muestra, al igual que el modelo HBV, poca representatividad en los caudales altos, como se observa en el año 2010 y en el año 2016. Para todos los demás años, el modelo representa de una manera más acertada los valores medios diarios, mostrando inclusive, en el año 2003 y 2014, valores de caudal por encima al valor de caudal de referencia.

La tabla XXIX muestra los parámetros del modelo SAC-SMA previos a la calibración y validación del modelo, y los valores que se ajustan al caudal de referencia, posterior a la calibración y validación, con su respectiva unidad.

Tabla XXIX. **Parámetros del modelo SAC-SMA**

Parámetro	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación	Unidad
Adimp	0	0,0000001	-
Pctim	0	0,0395073	-
Riva	0	0	-
UztwMax	0,05	0,0597521	m
UzfwMax	0,03	0,0060641	m
Uzk	0,2	0,7495761	1/d
Zperc	10	322,3684649	-
Rexp	1,5	1,1259672	-
Pfree	0,1	0,5761813	-
LztwMax	0,1	0,3964195	m
LzfpMax	0,15	0,8	m
LzfsMax	0,08	0,0100345	m
Rserv	0,3	0,3563237	-
Lzpk	0,03	0,0038408	1/d
Lzsk	0,02	0,1721842	1/d
Side	0	0,3861966	-

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXX muestran los valores de los indicadores de eficiencia del modelo SAC-SMA, como se observa los valores se encuentran en el rango aceptable, este modelo muestra los mejores resultados posterior a la calibración y validación del modelo. Tomando en consideración los resultados de los valores de los indicadores de eficiencia, el modelo SAC-SMA es un modelo satisfactorio,

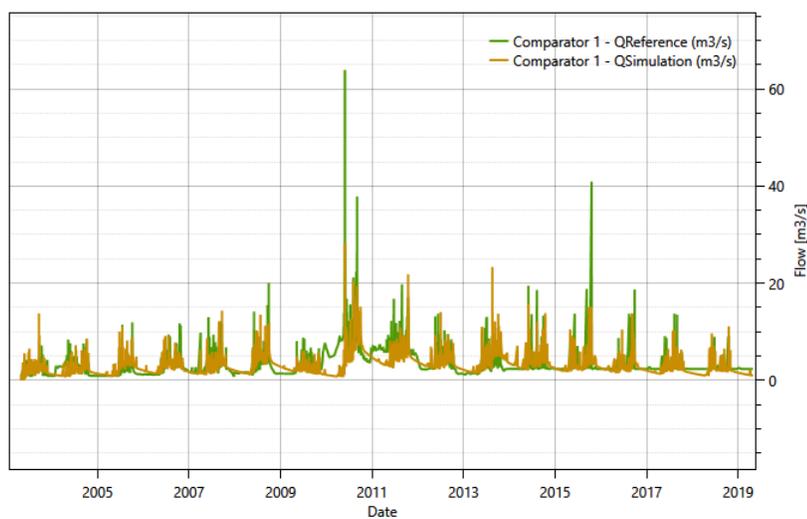
sin embargo, al igual que el modelo HBV, no muestra la representatividad de los eventos con valores de caudales altos.

Tabla XXX. **Indicadores de eficiencia del modelo SAC-SMA**

Indicador de eficiencia	Previo a la calibración	Posterior a la calibración y validación
<i>Nash</i>	-14,90	0,31
<i>Nash-In</i>	-16,77	0,02
<i>Pearson Correlation Coeff</i>	0,27	0,57
<i>Kling-Gupta Efficiency</i>	-0,93	0,55
<i>Bias Score</i>	0,75	0,99
<i>RRMSE</i>	2,84	0,69
<i>Overall Accuracy</i>	0,61	0,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Caudales medios diarios simulados y observados del modelo SAC-SMA**



Fuente: elaboración propia, empleando RS MINERVE.

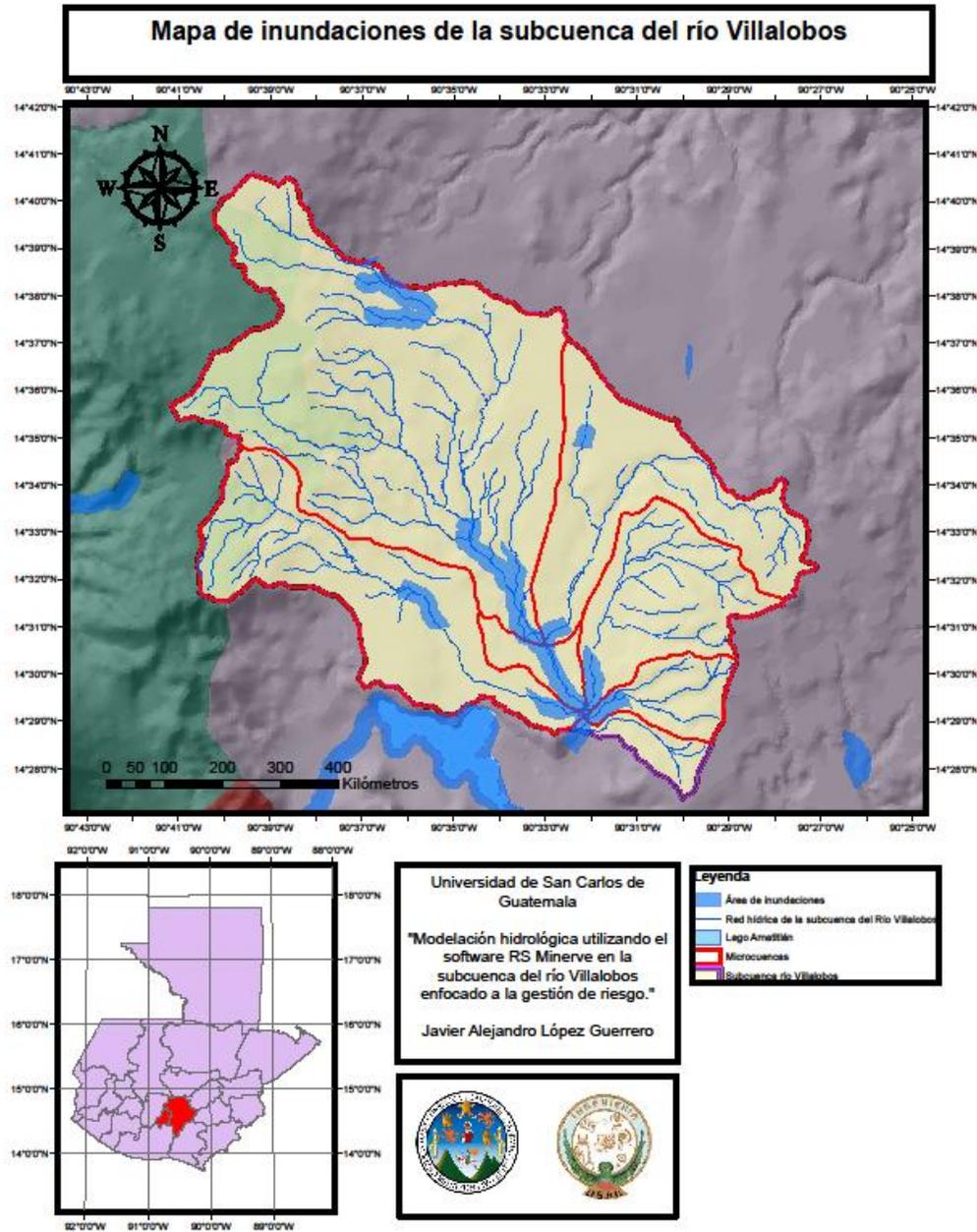
6. MEDIDAS PREVENTIVAS, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS

6.1. Zonas de inundaciones

La figura 33 muestra el mapa de inundaciones generado para la subcuenca del río Villalobos. Se observa que los municipios más afectados en caso de un evento extremo que generen inundaciones serían los que conforman la parte baja de la subcuenca del río Villalobos, siendo estos San Miguel Petapa, Villa Canales y Villa Nueva. En la parte alta, con un menor impacto, los municipios de Guatemala y Mixco presentan potenciales zonas de inundación.

El municipio de Villa Nueva se estima pueda ser afectado por el desborde del río Platanitos y del río Villalobos. El municipio de San Miguel Petapa como se observa en la figura 32, es el que puede ser afectado en mayor medida, principalmente por el río Villalobos y en parte por el río Platanitos. El municipio Villa Canales se estima puede verse afectado por las crecidas generadas del río El Molino, la Quebrada el Cangrejal, Las Minas, y por último el río Villalobos. Con menores magnitudes, el municipio de Mixco se tiene áreas con riesgo de inundación producidas por el río El Molino y el río Pachinguajá. Por último, y con menor cantidad de áreas de posibles inundaciones, el municipio de Guatemala tiene únicamente por el río Guadrón. En total se estima que el área de inundación es de 19,34 km², representando el 6 % del área total de la subcuenca del río Villalobos.

Figura 33. Mapa de inundaciones en la subcuenca del río Villalobos



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap 10.

6.2. Uso del suelo

“Guatemala posee una de las mayores concentraciones de áreas con cambios rápidos en la cobertura del suelo, debido a los procesos de deforestación y urbanización, con los efectos consecuentes en los procesos lluvia-escurrimiento, erosión y sedimentación.”²⁷

6.3. Obras de defensa

Las obras de defensa o de protección son estructuras de ingeniería construidas con la finalidad de proteger el terreno y las propiedades de posibles daños causados por inundaciones. Estos pueden ser gaviones, diques, márgenes, entre otros.

Estudios previos realizados para las obras de protección en la subcuenca del río Villalobos indican que el enrocado es la alternativa más adecuada para ser utilizada como obra de protección.

El enrocado es la unidad formada por la agrupación de elementos pétreos naturales, generalmente procedentes de cantera los elementos o escollos se colocan sin ligante, de manera que la unidad no es monolítica. Su estabilidad se debe al peso propio de los escollos y a su imbricación. Con escollera se pueden formar estructuras independientes cuyo funcionamiento es por gravedad, como por ejemplo espigones, como diques longitudinales.²⁸

²⁷ FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización de la subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. p. 4.

²⁸ FAJARDO, Javier. *Evaluación hidráulica mediante el uso de modelos, del tramo final del río Villalobos*. Guatemala. p. 124.

CONCLUSIONES

1. La caracterización geomorfológica de la subcuenca del río Villalobos cuenta con una extensión territorial de 309,73 km² lo cual la clasifica en una subcuenca intermedia pequeña. Dicha subcuenca muestra una forma oval oblonga a rectangular oblonga de acuerdo con su índice de compacidad de 1,51. Asimismo la forma de la subcuenca es elongada de acuerdo con el factor de forma obtenido de 0,19. Se encuentra clasificada con un orden 4 debido a su gran red de drenaje. Es de mediana eficiencia hidrológica, de acuerdo con su densidad de drenaje de 1,04 km/km². En relación con el relieve, la pendiente media del cauce principal se estimó en 3 %, con una altura mínima y una altura máxima de 1 220 y 2 340 msnm respectivamente y el 50 % de área se encuentra por encima de los 1 500 msnm.
2. El año hidrológico en donde ocurrió la mayor cantidad de precipitación observada en las series de las estaciones meteorológicas pertenece al año 2010-2011, donde aconteció el evento más extremo, la tormenta Agatha, mientras el año hidrológico más seco observado en las series de las estaciones meteorológicas pertenece al año 2018-2019. Como resultado del análisis de las series desde el año 1980 hasta el año 2019 se evidenció un incremento significativo en la tendencia de la lluvia anual. Por otra parte, el comportamiento de la lluvia mensual durante el año hidrológico es similar en todas las estaciones meteorológicas que representan espacialmente la subcuenca del río Villalobos donde se observan claramente las dos épocas; lluviosa, de mayo a octubre y seca,

de noviembre a abril. La distribución que presentó mejor ajuste a las series de tiempo de eventos extremos es *Fréchet* con momentos lineales para las series de tiempo de precipitación diaria máxima anual en las estaciones Compuertas Amatitlán, Guatemala Sur e INSIVUMEH y *Fréchet*. Para las series de tiempo de eventos extremos de la estación Suiza Contenta la distribución de *Fréchet* presentó mejor ajuste a la serie de tiempos de eventos extremos.

3. Los resultados de las simulaciones permiten concluir que los modelos con mejores resultados de indicadores de eficiencia son los modelos hidrológicos HBV y SAC-SMA ya que describen con mayor precisión las series de caudales observadas con los valores simulados, posterior a la calibración y validación, con valores cercanos al ideal de cada indicador de eficiencia. Sin embargo, no representan los caudales que fueron generados por eventos máximos. En cambio, los resultados de la simulación con los modelos hidrológicos GR4J y SOCONT, no presentan valores eficientes tomando en consideración los indicadores de eficiencia, pero, en parte, representan de una manera más adecuada los valores de caudales generados por eventos extremos. Con fines de planificación en la subcuenca del río Villalobos los modelos hidrológicos HBV Y SAC-SMA, presentan mejor resultados, mientras que, para fines de riesgos, GR4J y SOCONT, son los más adecuados.
4. El ordenamiento territorial como herramienta para la reducción del riesgo delimitando zonas de alto riesgo en función a las zonas de posibles inundaciones, junto con la identificación, diseño e implementación de proyectos de mitigación y la elaboración de planes de respuesta pueden

contribuir a la reducción del riesgo de desastres por crecidas debido a eventos extremos.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar el número de estaciones meteorológicas que representen la variabilidad de la precipitación, y principalmente hidrométricas, y así tener la posibilidad de comparar los caudales simulados con los caudales observados, e instalarlos en diversos puntos estratégicos de interés para futuros estudios hidrológicos.
2. Fomentar la realización de estudios de hidrología utilizando la plataforma RS MINERVE en todo el territorio guatemalteco en escenarios futuros para así observar y estimar el comportamiento de caudales generados, con la finalidad de proveer una herramienta útil en la toma de decisiones y para la creación de sistemas de alerta temprana en lugares donde sean vulnerables a crecidas de ríos.
3. Evaluar los modelos hidrológicos que representen y sean aplicables al área de estudio, es por ello que, para el presente estudio, los modelos GSM, SNOW-SD y SWMM no fueron aplicados, ya que toman en consideración los efectos de los glaciares, precipitación sólida, entre otros, que no representan, y, por ende, no son aplicables en la subcuenca del río Villalobos, ni en el territorio guatemalteco.

BIBLIOGRAFÍA

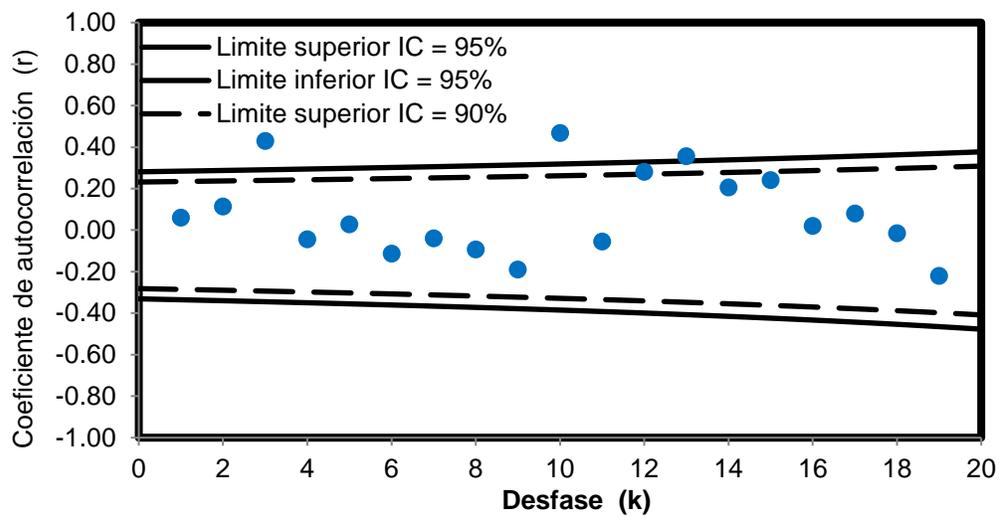
1. AGUILERA, Humberto. *Uso y aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la cuenca del río María Linda para riego*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1974. 101 p.
2. ANLEU, Rafael. *inventario de cuencas en Guatemala*. Secretaría Ejecutiva de CEPREDENAC, 2006. 10 p.
3. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: LIMUSA, S. A., 1992. 302 p.
4. ASTORAYME, Miguel. *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*. Tesis de graduación de Ing. Mecánico de Fluidos. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú, 2017. 150 p.
5. BÉJAR, Máximo Villón. *Hidrología*. 1a ed. Perú: Villón, 2002. 430 p.
6. CABRERA, Juan. *Modelos hidrológicos*. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú, 2012. 8 p.

7. CHAVEZ, Carolina. *Modelos hidrológicos para la generación de caudales diarios en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan – Ica*. Tesis de graduación de Ing. Agrónomo. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú, 2016. 193 p.
8. CHONG-YU, Xu. *Hydrologic models*. Uppsala University, Department of Earth Sciences Hydrology. Suecia, 2002. 168 p.
9. Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres. *Manejo de desastres de origen natural o provocado*. Guatemala: CONRED, 2004. 52 p.
10. FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos, Guatemala*. Maestría Académica en Hidrología. Sistemas de Estudio de Posgrado, Universidad de Costa Rica, 2013. 182 p.
11. GARCÍA, Javier y otros. *RS MINERVE Technical manual*. CREALP, Suiza, 2015. 156 p.
12. INSIVUMEH. *Ríos de Guatemala, hidrología*. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.html>. [Consulta: julio de 2020].
13. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. *Estudio hidrológico de la cuenca del río María Linda*. Guatemala: ICC, 2012. 66 p.

14. LINSLEY, Ray y otros. *Hidrología para ingenieros*. 2a ed. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamérica, S. A., 1975. 386 p.
15. MARROQUÍN, David. *Modelado de un hidrograma unitario sintético en la subcuenca del río Villalobos, empleando el método Soil Conservation Service*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 122 p.
16. MONSALVE SÁENZ, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 382 p.
17. Organización Meteorológica Mundial. *Guía de prácticas hidrológicas volumen II gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. Suiza: OMM, 2011. 330 p.
18. SÁNCHEZ, Javier. *Evapotranspiración*. Departamento de Geología. España: Universidad de Salamanca, 9 p.
19. TÁBORA, Fabiola y otros. *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. Tegucigalpa, Honduras: Impresiones Industriales, 2011. 147 p.

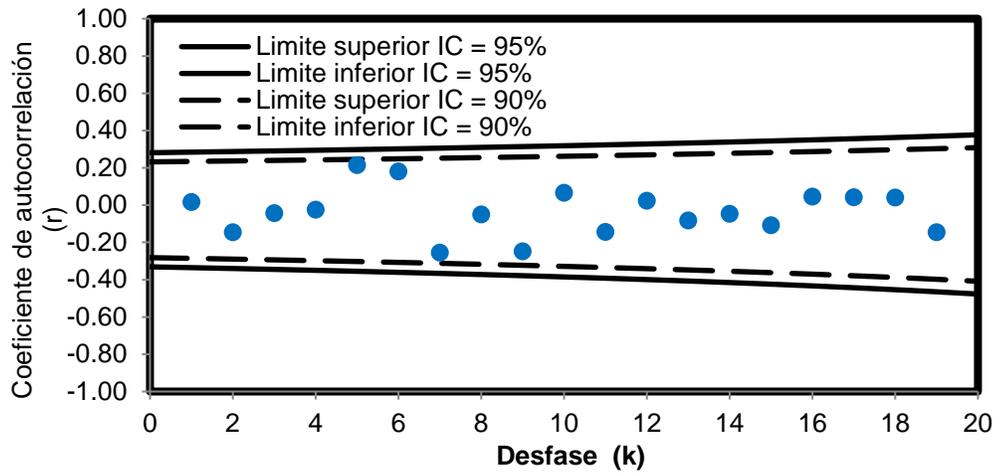
APÉNDICES

Apéndice 1. **Correlograma de la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual, estación meteorológica Guatemala Sur**



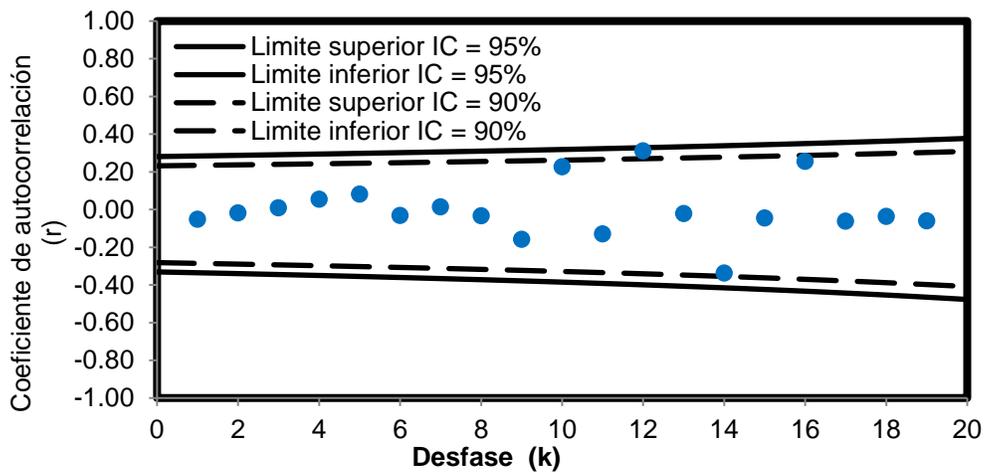
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Correlograma de la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual, estación meteorológica Compuertas Amatitlán**



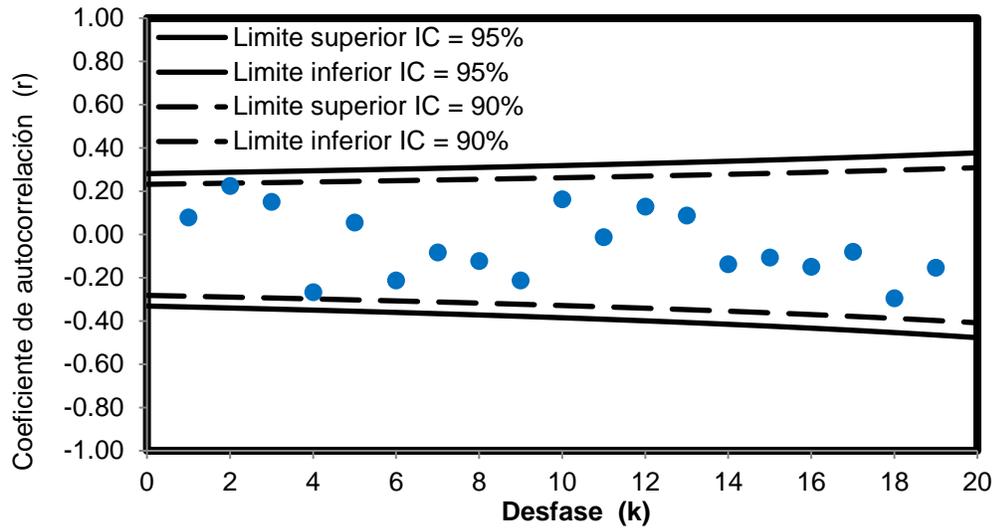
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Correlograma de la serie de tiempo de precipitación diaria máxima anual, estación meteorológica INSIVUMEH**



Fuente: elaboración propia.

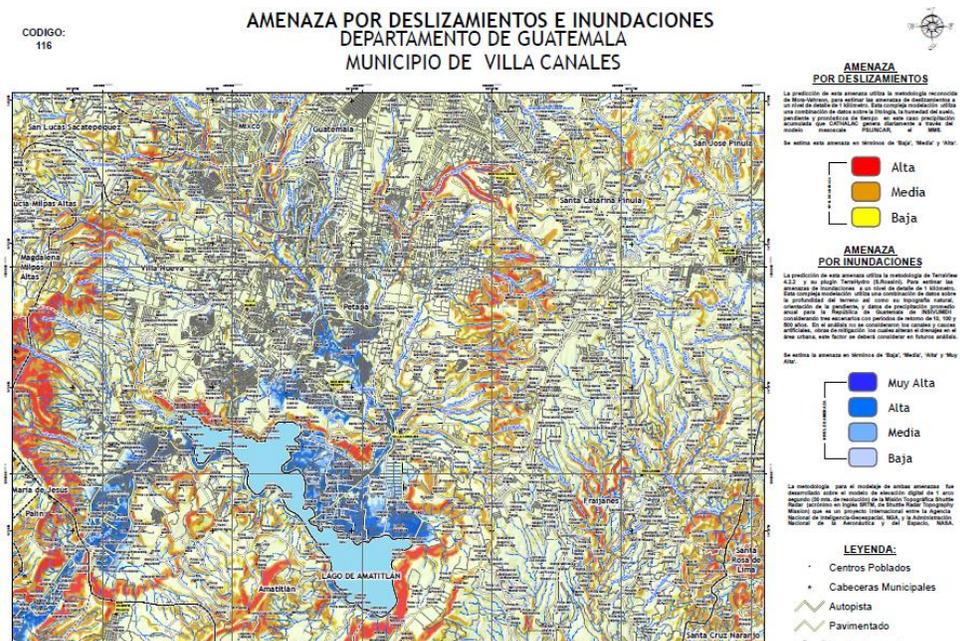
Apéndice 4. **Correlograma de la serie de precipitación diaria máxima anual, estación meteorológica Suiza Contenta**



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Amenaza por deslizamientos e inundaciones en el municipio de Villa Canales, Guatemala



Fuente: CONRED. *Amenazas, deslizamientos e inundaciones*. <http://conred.gob.gt/mapas-municipales-amenaza-deslizamientos-e-inundaciones/>. Consulta: julio de 2020.