

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

Informe de Trabajo Final de Graduación

Departamento:

Ingeniería Hidráulica y Ambiental

**CALIBRACIÓN DEL MODELO CONTINUO SAC-SMA EN LA CUENCA DEL RIO ABANGARES
PARA LA DEFINICIÓN DEL RÉGIMEN DE APROVECHAMIENTO DE AGUA.**

Preparada por:

Eric Andrés Sandi Rojas

Director:

Ing. Rafael Oreamuno Vega

Octubre, 2021

HOJA DE APROBACIÓN

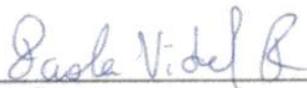


Eric Andrés Sandi Rojas



Ing. Rafael Alfredo Oreamuno Vega

Director del proyecto



Ing. Paola Vidal Rivera



Ing. Alberto Serrano Pacheco

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: 13 de octubre del 2021

El suscrito, Eric Andrés Sandi Rojas, Cédula 6-0440-0853, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B56747, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación, Calibración del modelo continuo SAC-SMA en la cuenca del río Abangares para la definición del régimen de aprovechamiento de agua, bajo la Dirección del Ing. Rafael Oreamuno Vega, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

DEDICATORIA

A mis padres, hermano y el resto de mi familia que me han apoyado y visto crecer hasta este punto.

RECONOCIMIENTOS

Al equipo de trabajo e investigadores del CIEDES que hicieron posible la obtención de los datos necesarios para elaborar este proyecto.

Al director del proyecto quien además de ser un guía durante este proyecto, ha sido un gran amigo y profesional.

A los asesores del proyecto que me guiaron durante el proceso de graduación.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, quienes con su experiencia, conocimiento y tiempo me han formado como un profesional en ingeniería civil.

A mis amigos y compañeros de carrera que me han brindado su ayuda y apoyo durante la carrera y el proceso de graduación.

A mis padres, quienes han sido un apoyo incondicional durante toda mi carrera y sin ellos no hubiera sido posible la elaboración de este proyecto

A mi hermano, quien dedicó parte de su tiempo para ayudarme con el proceso de elaboración de este proyecto.

Por último, quiero agradecer al lector, estudiantes y profesores que lean este proyecto ya que son los que verdaderamente espero que utilicen y disfruten esta lectura.

INDICE

Hoja de aprobación	i
Derechos de autor	ii
Reconocimientos	iii
Índice	iv
Índice de figuras	viii
Índice de cuadros	x
Resumen	xii
1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. El problema específico.....	1
1.1.2. Importancia	1
1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.2. Alcances.....	5
1.2.1. Geográfico	5
1.2.2. Temporal	5
1.2.3. Específicos	5
1.3. Limitaciones	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. Metodología.....	7
1.5.1. Etapa descriptiva	8
1.5.2. Etapa de cálculo.....	8
1.5.3. Etapa final	10

1.6.	Marco teórico e hipótesis	10
1.6.1.	Balance hídrico	10
1.6.2.	Cuenca hidrográfica	12
1.6.3.	Coefficiente de compacidad	13
1.6.4.	Factor de forma	13
1.6.5.	Densidad de drenaje	14
1.6.6.	Método de Polígonos de Thiessen	14
1.6.7.	Modelo de evapotranspiración potencial de Hargreaves	15
1.7.	Modelo Sacramento de Contabilidad de humedad del suelo (NWSRFS-SAC-SMA)	17
1.7.1.	Agua en tensión y agua libre	17
1.7.2.	Zona inferior, zona superior y almacenamientos	17
1.7.3.	Percolación	18
1.7.4.	Método de inteligencia artificial de Redes Neuronales para completar datos	22
2.	Caracterización de las cuencas	24
2.1.	Hidrografía de la cuenca de estudio	24
2.2.	Geomorfología e hidrografía	25
2.2.1.	Meteorología e hidrografía	26
2.2.2.	Tipo de suelo de la zona	28
2.3.	Climatología	29
2.3.1.	Clima	29
2.3.2.	Precipitación	29
2.3.3.	Humedad relativa	30
2.3.4.	Brillo solar	30
2.3.5.	Evapotranspiración	31
2.3.6.	Temperatura	31
2.4.	Uso de suelo y cobertura	32

3.	Estaciones Hidro-meteorológicas	34
3.1.	Ubicación y descripción de las estaciones	34
3.2.	Datos de precipitación	36
3.2.1.	Algoritmo para completar datos faltantes	37
3.2.2.	Análisis de datos completados.....	39
3.2.3.	Precipitación promedio de las cuencas de estudio	41
3.3.	Datos de temperatura	44
3.3.1.	Polígonos de Thiessen para obtener temperatura media de las cuencas.	48
3.4.	Datos de evapotranspiración.....	50
3.5.	Datos de caudal.....	53
4.	Calibración del modelo Sac-sma en la cuenca de marimba	54
4.1.	Aproximación inicial de parámetros	54
4.1.1.	Parámetro ADIMP	56
4.1.2.	Parámetro PCTIM	56
4.1.3.	Parámetros LZFSM, LZSK, LZFPM, LZPK.....	56
4.1.4.	Parámetro UZTWM.....	59
4.1.5.	Parámetro UZFWM	59
4.1.6.	Parámetro LZTWM.....	59
4.1.7.	Parámetro UZK	60
4.1.8.	Parámetro ZPERC.....	60
4.1.9.	Parámetro REXP.....	60
4.1.10.	Parámetro PFREE.....	61
4.1.11.	Parámetro SSOUT.....	61
4.1.12.	Parámetro RSERV	61
4.1.13.	Parámetro SIDE	61
4.2.	Calibración del modelo	61

4.2.1.	Criterios de calidad	62
4.2.2.	Calibración manual inicial del modelo	64
5.	Análisis de los resultados.....	68
5.1.	Resultados de la calibración.....	68
5.1.1.	Calibración de ZPERC y REXP	69
5.1.2.	Calibración de UZK.....	70
5.1.3.	Calibración de PFREE	70
5.2.	Resultados de caudal simulado del modelo	70
5.2.1.	Resultados de caudal Marimba.....	72
5.2.2.	Resultados de cuenca Ecomuseo	75
5.2.3.	Resultados de cuenca Santa Lucía	76
5.3.	Resumen de resultados de las tres cuencas de estudio.....	77
5.3.1.	Coeficientes de escorrentía de las cuencas	79
5.4.	Resultados de pronóstico y simulación futura.....	82
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	88
6.1.	Conclusiones.....	88
6.2.	Recomendaciones	90
7.	Referencias.....	92
Anexos	A1
Anexo A.	Caracterización de tipo de suelo en la cuenca Marimba.....	A1
Anexo B.	Código de la red neuronal en Python	B1
Anexo C.	Gráficos de corridas del modelo.....	C1

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Metodología del proyecto.....	7
Figura 1-2. Diagrama de balance hídrico de una cuenca	11
Figura 1-3. Diagrama de la cuenca hidrográfica	12
Figura 1-4. Polígonos de Thiessen en una cuenca	15
Figura 1-5. Representación del modelo SAC-SMA.....	21
Figura 1-6. Diagrama de Red neuronal simple	22
Figura 1-7. Diagrama de funcionamiento de una red neuronal	23
Figura 2-1. Cuencas delimitadas de Abangares	24
Figura 2-2. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Abangares	26
Figura 2-3. Curva hipsométrica de las cuencas de estudio.....	28
Figura 2-4. Climas de la cuenca del Río Abangares.....	30
Figura 2-5. Niveles de humedad y comodidad de las Juntas de Abangares	31
Figura 2-6. Uso de suelo de la cuenca del Río Abangares.....	33
Figura 3-1. Mapa de ubicación de las estaciones del CIEDES.....	35
Figura 3-2. Mapa de ubicación de estaciones a utilizar.....	36
Figura 3-3. Datos incompletos de estaciones	37
Figura 3-4. Gráfico de datos completos precipitación.....	39
Figura 3-5. Polígonos de Thiessen de la cuenca de estudio	41
Figura 3-6. Datos de precipitación de las cuencas de estudio	42
Figura 3-7. Mapa de zonas de vida de Holdridge.....	43
Figura 3-8. Mapa de ubicación de estaciones de temperatura.....	45
Figura 3-9. Gráfico de temperatura acumulada para San Rafael y Campos de Oro. 47	
Figura 3-10. Polígonos de Thiessen para estaciones de temperatura	49
Figura 3-11. Mapa nacional de EVTP del IMN	52

Figura 3-12. Hidrograma de la estación Marimba	53
Figura 4-1. Diagrama de funcionamiento del modelo SAC-SMA.....	55
Figura 4-2. Método de cálculo de zonas inferiores de SAC-SMA	57
Figura 4-3. Curva de recesión combinada de Marimba	58
Figura 5-1. Cambio de curva de percolación por aumento de REXP.....	70
Figura 5-2. Hidrograma simulado y observado de Marimba	72
Figura 5-3. Hidrograma simulado de la cuenca Ecomuseo.....	75
Figura 5-4. Hidrograma simulado de la cuenca Santa Lucía.....	76
Figura 5-5. Hidrograma de cuenca faltante.....	77
Figura 5-6. Hidrograma combinado de simulación de cuencas de estudio	78
Figura 5-7. Series pronosticadas años 2021 a 2022.....	83
Figura 5-8. Series de EVTP pronosticadas para los años 2021 - 2022	84
Figura 5-9. Series pronosticadas de precipitación 2021-2022.....	85
Figura 5-10. Series pronosticadas de EVTP 2021-2022	85
Figura 5-11. Hidrogramas simulados de la cuenca Marimba año 2021-2022.....	86

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1. Cuadro de coordenadas de puntos las estaciones fluviográficas en CRTM05.....	25
Cuadro 2-2. Características físicas de las cuencas	27
Cuadro 2-3. Distribución de uso de suelo de la cuenca del Río Abangares	32
Cuadro 3-1. Porcentaje de datos faltantes.....	37
Cuadro 3-2. Datos anuales de precipitación.....	39
Cuadro 3-3. Pesos de cada estación para método de Thiessen	42
Cuadro 3-4. Datos promedio anuales de las cuencas de estudio	43
Cuadro 3-5. Porcentaje de zonas de vida de Holdridge	44
Cuadro 3-6. Temperaturas anuales para las estaciones de Abangares.....	47
Cuadro 3-7. Corroboración de datos de temperatura con datos del IMN	48
Cuadro 3-8. Pesos de áreas de temperatura.....	49
Cuadro 3-9. Temperaturas anuales de las cuencas de estudio.....	50
Cuadro 3-10. Radiación Extraterrestre de acuerdo al mes del año para latitud 10° .	51
Cuadro 3-11. Evapotranspiración potencial anual para cuencas de estudio	51
Cuadro 4-1. Datos de zona inferior del modelo SAC-SMA.....	58
Cuadro 4-2. Primera corrida del modelo para cuenca Marimba	64
Cuadro 4-3. Segunda corrida del modelo para cuenca Marimba.....	65
Cuadro 4-4. Tercera corrida del modelo para cuenca Marimba	65
Cuadro 4-5. Cuarta corrida del modelo para cuenca Marimba.....	66
Cuadro 4-6. Quinta corrida del modelo para cuenca Marimba.....	66
Cuadro 4-7. Sexta corrida del modelo para cuenca Marimba	67
Cuadro 4-8. Séptima corrida del modelo para cuenca Marimba	67
Cuadro 5-1. Resultados finales de calibración del modelo para cuenca Marimba.....	68

Cuadro 5-2. Estadística descriptiva para Marimba en periodo mayo 2015 a mayo 2016	74
Cuadro 5-3. Estadística descriptiva para Marimba en periodo mayo 2016 a mayo 2017	74
Cuadro 5-4. Volúmenes anuales escurridos en las cuencas de estudio.....	79
Cuadro 5-5. Volúmenes anuales precipitados en las cuencas de estudio	79
Cuadro 5-6. Coeficientes de esorrentía anuales para las cuencas de estudio	80
Cuadro 5-7. Coeficientes de esorrentía según pendiente y cobertura.	81
Cuadro 5-8. Datos de caudal promedio mensual obtenidos en simulación de series 2021-2022	86

Sandi Rojas, Eric Andrés
Calibración del modelo continuo SAC-SMA en la cuenca del río Abangares para la
definición del régimen de aprovechamiento de agua
TFG Ingeniería Civil – San José, C.R
S.R.Eric A., 2021
117.:il.-41 refs

RESUMEN

Se calibra un modelo continuo SAC-SMA para la cuenca del Río Abangares con punto de control en la estación fluviográfica de Marimba dirigida por el CIEDES.

La calibración de la cuenca de Marimba, se realiza utilizando series de datos de precipitación generadas desde el 2015 al 2019. Estas se completan con una red neuronal que se entrena para este propósito. Para la evapotranspiración se utilizan datos de temperatura media, mínima y máxima de tres estaciones y el método de Hargreaves. Para completar los registros de temperatura se utiliza un método matemático propio basado en el comportamiento de las estaciones. Para poder calcular los hidrogramas de las subcuencas Santa Lucía y Ecomuseo se supone que poseen características similares y que la calibración de la cuenca Marimba aplica a sus subcuencas.

Se obtiene una calibración excelente de la cuenca de Marimba, la cual presenta unas anomalías que son resueltas. El hidrograma generado coincide muy bien con el hidrograma observado del periodo 2015 al 2017, al punto de simular de manera correcta el huracán Nate. La veracidad de la calibración deberá ser revisada en unos años cuando existan más datos para mejorar la calibración.

Por último, se pronostican los datos de precipitación y evapotranspiración y se simulan los hidrogramas de la cuenca en el 2021 y 2022 con la intención de conocer el comportamiento de la cuenca en un futuro y comprobar su veracidad para definir el régimen de aprovechamiento de agua de años venideros por parte de la Municipalidad de Abangares.

Palabras clave: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, SAC-SMA, Abangares, Modelo hidrológico.

Director: Ing. Rafael Oreamuno Vega

Escuela de Ingeniería Civil

Sandi Rojas, Eric Andrés

Calibration of the continuous SAC-SMA model in the Abangares river basin for the definition of the water use regime

FGP Civil Engineering San José, C.R

S.R.Eric A., 2021

117.:il.-41 refs

ABSTRACT

A continuous SAC-SMA model is calibrated for the Abangares River basin with an output point at the Marimba fluvigraphic station managed by CIEDES.

The calibration of the Marimba basin is carried out using precipitation data series generated from 2015 to 2019. These are completed with a neural network that is trained for this purpose. Average, minimum and maximum temperature data from three stations and the Hargreaves method are used for potential evapotranspiration. A proprietary mathematical method based on the behavior of the stations is used to complete the temperature records. In order to calculate the hydrographs of the Santa Lucía and Ecomuseo sub-basins, it is assumed that they have similar characteristics and that the Marimba basin calibration applies to their sub-basins.

An excellent calibration of the Marimba basin is obtained, which presents some anomalies that are resolved. The hydrograph generated coincides very well with the hydrograph observed from 2015 to 2017, to the point of simulating Hurricane Nate. The accuracy of the calibration should be reviewed in a few years when there is more data to improve a calibration.

Finally, the precipitation and evapotranspiration data are predicted and the hydrographs of the basin are simulated in 2021 and 2022 with the intention of knowing the behavior of the basin in the future and checking its veracity to define the water use regime of years to come by the Municipality of Abangares.

Key Words: University of Costa Rica, Civil Engineering School, SAC-SMA, Abangares, Hydrologic model.

Director: Ing. Rafael Oreamuno Vega

Civil Engineering School

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

1.1.1. El problema específico

El proyecto se puede dividir en dos partes que representan en su totalidad, el objetivo y aspectos que lo hacen importante. La primera parte es la técnica-científica en la que se debe observar el comportamiento de la lluvia. Según Fabián Méndez (2019) en su tesis "Caracterización de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Abangares, debido a eventos de precipitación" la lluvia en la cuenca de Abangares no se distribuye uniformemente en toda la cuenca, sino que presenta una variabilidad en su distribución, concentrando en algunos sectores, la mayoría de la precipitación. Por lo que en cierto momento se puede observar un gran incremento en el hidrograma del río, pero no todas las estaciones meteorológicas registran un aumento de precipitación. Esto indica que hay variaciones en el modelaje que deben ser tomados en cuenta a la hora de calcular los promedios de lluvia de la cuenca.

La segunda parte es que al tener un modelo diario continuo de balance hídrico de la cuenca y sabiendo que un año va a ser húmedo, se puede determinar de antemano el hidrograma del año con la suficiente certeza, para poder ser utilizado como referencia en tomas de decisiones importantes. Esto permitiría un mejor control del agua de parte de la Municipalidad de Abangares y permite definir el caudal ecológico de la cuenca.

1.1.2. Importancia

El cantón de Abangares es el séptimo cantón de Guanacaste el cual posee cuatro distritos: Las Juntas, La Sierra, San Juan y Colorado. Las Juntas está dentro de la cuenca del río Abangares y es la cabecera el cantón. La Municipalidad de Abangares obtiene el recurso hídrico para el acueducto de la parte alta de cuenca específicamente las cuencas del río Gongolona y Santa Lucía.

El Instituto Meteorológico Nacional menciona que la época seca de Costa Rica se extiende de diciembre a mayo, en este periodo la lluvia representa solo un 4% de la lluvia total anual en la zona pacífico Norte del país (IMN, s.f). De manera homóloga, el río Abangares presenta, según datos del CIEDES del año 2015, una pérdida de caudal de un 67.9% respecto a los meses lluviosos y un 59% respecto al promedio anual de caudales. Esto indica que el manejo y la distribución de agua a la población de Las Juntas de Abangares

debe ser racionado o controlado durante los meses secos. Junto a esto, la Ley No.9590 indica:

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados deberá asegurar que no se altere el caudal ecológico indispensable para el funcionamiento del ecosistema, dentro y fuera de las áreas silvestres protegidas, de manera que se mantenga bajo un esquema de uso y aprovechamiento sostenible. El monitoreo de este le corresponderá al Minae.

En forma anual, el ente autorizado prestador del servicio público para el abastecimiento poblacional autorizado deberá presentar, ante el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac) y la Dirección de Aguas, el informe de los resultados de los aforos, dada la naturaleza y la fragilidad ambiental de las áreas silvestres protegidas. (Ley 9590, 2018)

debido a esto, el manejo del abastecimiento de agua se vuelve complicado en las cuencas, más aún las administradas por ASADAS o la municipalidad.

Otra importancia del proyecto va ligada al hecho que en 1995 se declara la Zona Protectora Cuenca del Río Abangares. Esta zona abarca la parte alta de la cuenca del río Abangares donde se encuentra la Quebrada Gongolona, el río Agua Claras y el río Tres Amigos. Esto provoca que el caudal ecológico del cauce deba ser estrictamente controlado. En la desembocadura de la Zona Protectora se encuentra el humedal de Colorado denominado manglar de Estero Culebra. En la Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el golfo de Nicoya realizado por el SINAC en el 2019 se menciona que en la zona de los humedales del golfo de Nicoya se concentra el 76% de la biomasa del sistema del golfo, esto implica que, el humedal, es de gran importancia ambiental para el cantón. (SINAC, 2019)

Por último, dos puntos vistos desde la perspectiva de la ingeniería civil el aumento poblacional que está recibiendo Abangares y la habilidad de poder crear un plan de ordenamiento territorial basado en la ubicación y comportamiento del recurso hídrico representa la importancia que tiene un estudio como el realizado en este proyecto.

Considerando la información anterior, la necesidad de un modelo que logre representar el comportamiento de la cuenca del río Abangares es evidente. Mediante este modelo la

municipalidad puede establecer los lineamientos base, programas de racionamiento y los valores de caudales que se pueden aprovechar en el río sin afectar el ambiente de la cuenca.

1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En esta sección se muestran investigaciones hechas utilizando el modelo SAC-SMA en cuencas de Costa Rica y además la línea de proyectos realizados en la cuenca del río Abangares de los cuales, es parte, el presentado en esta propuesta. Indicado esto, es importante resaltar que esta investigación sigue una línea de proyectos realizados en Abangares.

1.1.3.1. Proyectos que utilizan el modelo SAC-SMA

Como parte de los proyectos que utilizan SAC-SMA se encuentra Simulación Matemática en la cuenca del río grande de Térraba realizada por Rafael Oreamuno Vega en el año 1979. En esta tesis se utiliza el modelo SAC-SMA en la cuenca del río Térraba la cual se calibra utilizando un periodo de cuatro años de datos de precipitación. Con el modelo calibrado se procede a calcular la avenida máxima probable. Esta se compara con otras simulaciones de modelos realizadas por la Oficina de Estudios Básicos del Instituto Costarricense de Electricidad. Este proyecto es uno de los pocos que existen a nivel nacional donde se utiliza el modelo SAC-SMA. En el trabajo se recalca que el uso de este modelo brinda un gran nivel de certeza en sus resultados, por lo que puede ser usado en una gran cantidad de estudios y proyectos de investigación.

En el trabajo de maestría de Gustavo Arguello "Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla" en 1992, se realiza la calibración del modelo SAC-SMA en la cuenca del río Virilla de la cual obtiene buenos resultados. El proyecto utiliza buenas referencias en cuanto a la aproximación de los valores iniciales de la calibración y menciona la importancia de este tipo de modelos en el entendimiento del comportamiento de la cuenca. Como parte de los resultados muestra una nueva propuesta para la reubicación de las estaciones meteorológicas del ICE con la intención de obtener mejores resultados en el modelaje futuro de la cuenca.

1.1.3.2. Investigaciones realizadas en la cuenca de Abangares

Mario González en su trabajo final de graduación “Zonificación de las áreas en riesgo de inundación por desbordamiento del río Abangares, a la altura de Las Juntas” estima valores de caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno generados por eventos de precipitación en la cuenca del río Abangares. Con estos datos y las características geomorfológicas de la cuenca genera los mapas de riesgo de inundación que luego podrán ser utilizados por la Municipalidad de Abangares para realizar ajustes al Plan Regulador en materia de prevención de riesgos. Este trabajo muestra la importancia de los proyectos de investigación en zonas alejadas como Las Juntas de Abangares. (Gonzalez, 2012)

En su trabajo final de graduación “Caracterización de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Abangares, debido a eventos de precipitación”, Fabian Méndez define la caracterización del comportamiento de la precipitación en la cuenca del río Abangares utilizando datos de las estaciones meteorológicas: Gongolona, San Rafael, Campos de Oro, Colegio Técnico de Las Juntas de Abangares, Marimba y Eco-museo. En este trabajo (Méndez, 2019) obtiene como resultado que, si el evento de precipitación se da en toda la cuenca o si se concentra en la parte media o alta de la cuenca, genera distintos valores de caudal medidos en la estación pluviográfica y por ende, distintos hidrogramas. Esto implica que el valor de escorrentía depende también de donde se genere el evento de mayor precipitación de la cuenca y no solo está ligado a características físicas de la misma.

En su trabajo final de graduación (Araya, 2014) utiliza las estaciones meteorológicas de Abangares para establecer un modelo de balance hídrico para la cuenca del río Abangares. Este modelo contempla las subcuencas de los ríos Santa Lucía, Gongolona, Boston y Aguas Claras. Como modelo de balance hídrico utiliza el modelo propuesto por Thornwaite a nivel mensual suponiendo que la aportación de otras cuencas a la escorrentía es nula. Este trabajo se puede considerar un predecesor del trabajo presentado en esta propuesta donde se piensa mejorar el balance hídrico de la cuenca del río Abangares utilizando el modelo de Sacramento a nivel diario, esto debido al mejoramiento de las estaciones meteorológicas y la cantidad de datos generadas desde el 2014.

1.2. Alcances

1.2.1. Geográfico

El proyecto abarca la parte alta de la cuenca del río Abangares con punto de control en la estación fluviográfica Marimba, con las subcuencas: Ecomuseo y Santa Lucía. De la subcuenca Ecomuseo es de donde se obtiene el agua para el acueducto de agua potable de Las Juntas de Abangares.

1.2.2. Temporal

El proyecto utiliza datos generados de las estaciones de Abangares del 2015 al 2019. El modelo de balance hídrico puede ser utilizado para la definición del régimen de aprovechamiento de agua por tiempo indefinido, siempre y cuando se actualice la información, del mismo, cada año. El modelo es afectado por cambios en el uso de suelo y fenómenos atmosféricos.

1.2.3. Específicos

Realizar un balance hídrico a nivel diario lo cual mejoraría los trabajos antes hechos en la cuenca que utilizaron volúmenes mensuales de precipitación y caudales mensuales de escorrentía.

1.3. Limitaciones

La información de las estaciones meteorológicas y fluviográficas está restringida a un periodo de 5 años. Dentro de este periodo existen intervalos de tiempo con datos faltantes por falla del equipo o vandalismo que se extienden a más de seis meses. Esto implica la investigación y el uso de métodos avanzados para completar datos.

Para la caracterización física y delimitación de la cuenca se utiliza información cartográfica escala 1:25000. La información más precisa disponible para la cuenca de Abangares es la que se encuentra en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) en escala 1:25000.

La plataforma a utilizar solo puede calibrar modelos en una sola cuenca y no sus subcuencas. Por lo que el proceso se debe hacer para cada una por separado.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar el balance hídrico, a nivel diario, en la cuenca del río Abangares, con el modelo SAC-SMA.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar los datos de precipitación, caudal y temperatura de las estaciones de la cuenca del río Abangares para identificar patrones de comportamiento, datos faltantes y valores atípicos.
- Caracterizar la cuenca y subcuencas del río Abangares en cuanto al uso de suelo y condiciones morfológicas.
- Calibrar el modelo de la cuenca del río Abangares hasta la estación fluviográfica Marimba, mediante datos de la estación fluviográfica Marimba para obtener los parámetros de simulación de la cuenca.
- Simular los escenarios de las subcuencas del río Santa Lucía hasta la estación Santa Lucía y río Aguas Claras hasta la estación Ecomuseo con el modelo calibrado de la cuenca de Marimba.

1.5. Metodología

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1-1.

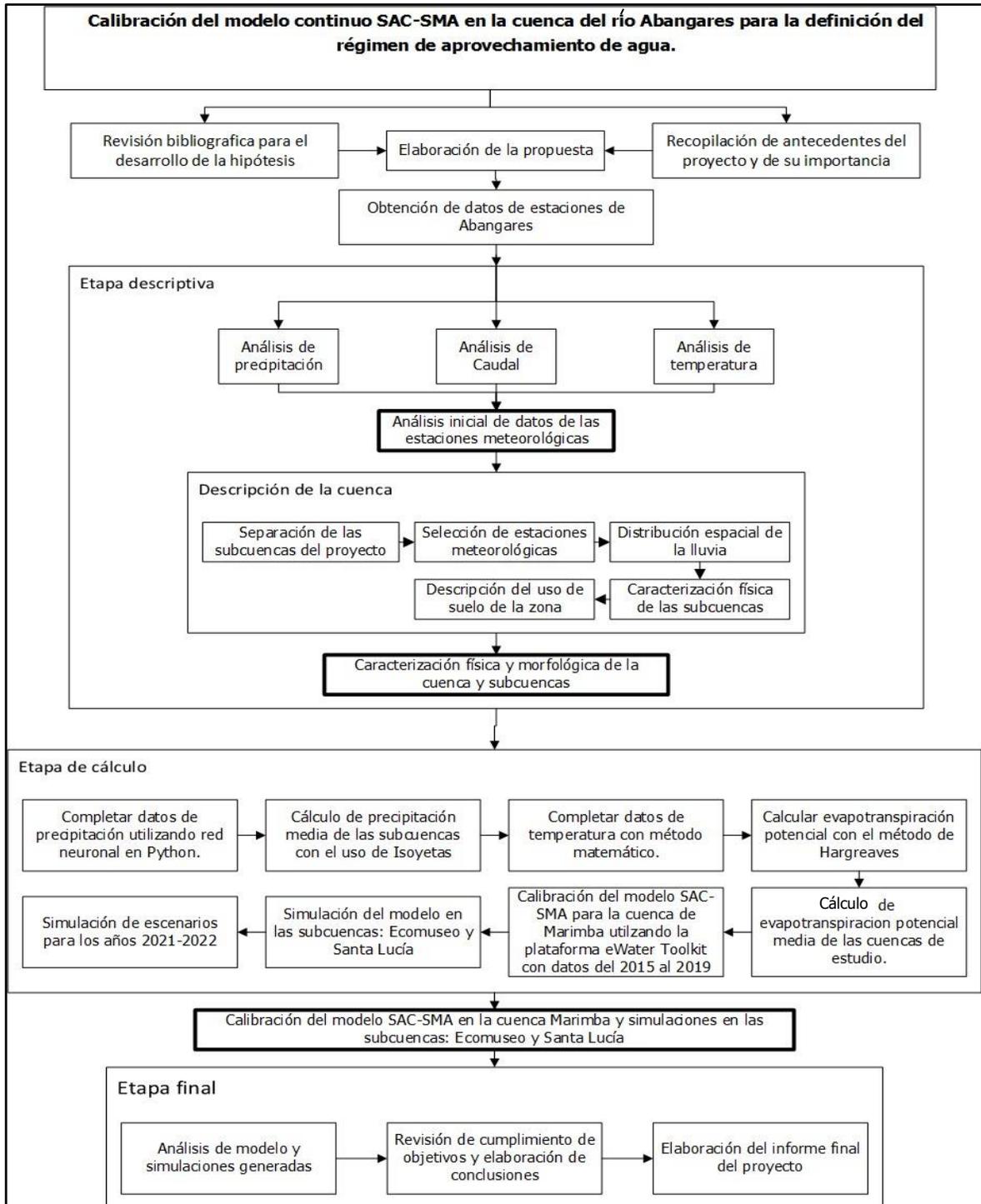


Figura 1-1. Metodología del proyecto

1.5.1. Etapa descriptiva

Para poder realizar el modelado del comportamiento de una cuenca es importante conocer una serie de parámetros que se utilizan para definir el comportamiento y procesos naturales del patrón de escorrentía de la cuenca. Para conocer estos parámetros, se realiza una caracterización física de la cuenca. Esto permite conocer la distribución del uso de suelo de la misma y describir las características del clima de la cuenca mediante los datos de las estaciones meteorológicas y fluviográficas.

La primera etapa de proyecto comienza con la obtención de los datos de las distintas estaciones meteorológicas de Abangares: Ecomuseo, Santa Lucía, San Rafael, Las Juntas y la estación fluviográfica Marimba. De estas estaciones se obtienen los datos de precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y caudal. Estos datos se analizaron para determinar el comportamiento de las variables meteorológicas e identificar datos faltantes.

Para realizar la caracterización física y morfológica de la cuenca y subcuencas se utilizan datos de SIG obtenidos del Atlas de Datos del Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Sistema Nacional de Información Territorial. De esta información se utilizó la más actualizada y se supone que los errores de precisión por el uso de esta información están contemplados en la misma. Como datos de elevación se utilizó las curvas de nivel del SNIT con escala 1:25000 y para el drenaje de la cuenca se utiliza la capa de información de la misma fuente y escala. Para el manejo de estos datos se utilizará el programa Qgis 3.10.5 de uso abierto.

Esta etapa brinda los insumos para el montaje y la calibración del modelo SAC-SMA en la plataforma eWater Toolkit.

1.5.2. Etapa de cálculo

El desarrollo del proyecto requiere una gran cantidad de cálculos que involucran escorrentía y el uso de una plataforma con el modelo SAC-SMA. Este proceso se realiza utilizando los datos analizados en la etapa descriptiva.

Para el cálculo de la evapotranspiración se realizó utilizando el modelo de Hargreaves, el cual, se maneja a nivel diario. Este método es menos robusto que el método de Penmann pero tiene la ventaja que utiliza menos variables (Hernandez, 2014). En el CIEDES se cuenta con las series de tiempo diarias para las variables necesarias con algunos intervalos de

tiempo faltantes debido al daño del equipo o vandalismo. Estos intervalos varían en periodos de una semana hasta más de seis meses, evitando que se puedan utilizar modelos simples de correlación para completar datos. Entonces, se utilizó una red neuronal programada en Python que se entrena para modelar datos de las estaciones. Esto genera las series diarias de precipitación para todas las estaciones.

La precipitación que utiliza el modelo SAC-SMA es la precipitación media de la cuenca en mm/día. Por lo tanto, se debe obtener el promedio de las precipitaciones diarias de las subcuencas con respecto a las estaciones a utilizar. Para esto se aplica el método de los Polígonos de Thiessen, el cual, permite una buena estimación del promedio de la precipitación que ocurre en la cuenca, que se sabe, tiene una distribución muy concentrada de la precipitación.

Para el montaje y calibración del modelo SAC-SMA se utilizó la plataforma eWater Toolkit. Esta plataforma es muy utilizada en Australia por distintas universidades y profesionales por ser un entorno virtual con varios modelos de balance hídrico y métodos de calibración. En esta plataforma se realizará el cálculo y la calibración de la cuenca y subcuencas de estudio.

La simulación y calibración del modelo se realizó en dos fases. La primera es de manera manual que permite controlar el rango de las variables y se estudia su comportamiento. La segunda fase implica el uso del algoritmo de optimización de Rosenbrock incluido en la plataforma eWater Toolkit y se controla su eficacia con el criterio de Nash-Sutcliffe.

Debido a la necesidad del modelo para la definición del régimen de aprovechamiento de agua de Abangares se divide la cuenca en subcuencas: Ecomuseo y Santa Lucía. Para estas subcuencas se realizaron simulaciones de datos de caudal con la calibración del modelo de la cuenca de Marimba, precipitación y evapotranspiración de las áreas de drenaje Santa Lucía y Ecomuseo.

Por último, se realizó la predicción de las series de precipitación y evapotranspiración mensual para los años 2021 y 2022, y se simula el comportamiento de la cuenca Marimba utilizando la calibración obtenida anteriormente.

1.5.3. Etapa final

En la etapa final del proyecto se realizó un análisis estadístico de los datos generados por el modelo SAC-SMA. Este análisis se basa en la correlación de las variables generadas de caudal de escorrentía y los datos reales obtenidos de la estación fluviográfica de Marimba.

1.6. Marco teórico e hipótesis

1.6.1. Balance hídrico

El balance hídrico es la conceptualización del proceso de aplicación de la ecuación de conservación de la masa a una cuenca en la que se toman en cuenta las pérdidas significativas que puede sufrir la cuenca de estudio. Con los años se han generado diferentes ecuaciones y conceptualizaciones del balance hídrico pero la más común y la primera que surge es la generada por Thornthwaite en la década de 1980 a 1990. Thornthwaite plantea el balance con el aporte de la precipitación y las pérdidas de evapotranspiración, recarga de acuíferos y flujo superficial. (Dingman, 2015) En la Figura 1-2 se puede apreciar el diagrama que ejemplifica los aportes y pérdidas que representan el balance hídrico planteado por Thornwaite.

Thomas Dunne, 1978, plantea en su libro "Water in environmental planning" que se puede deducir la importancia de conocer el balance hídrico de una cuenca, ya sea para conocer los procesos como sedimentación, salinidad de aguas, el aprovechamiento de agua superficial y subterránea, procesos de riego de cultivos y erosión del suelo.

La ecuación de balance hídrico se define como:

$$P = I + AET + OF + \Delta SM + \Delta GWS + GWR \quad [1]$$

Donde:

P: Precipitación [mm]

I: Intercepción [mm]

AET: Evapotranspiración real [mm]

OF: Flujo Superficial [mm]

ΔSM : Cambio en la humedad del suelo [mm]

ΔGWS : Cambio en el almacenamiento de agua subterránea [mm]

GWR: Escorrentía de agua subterránea [mm]

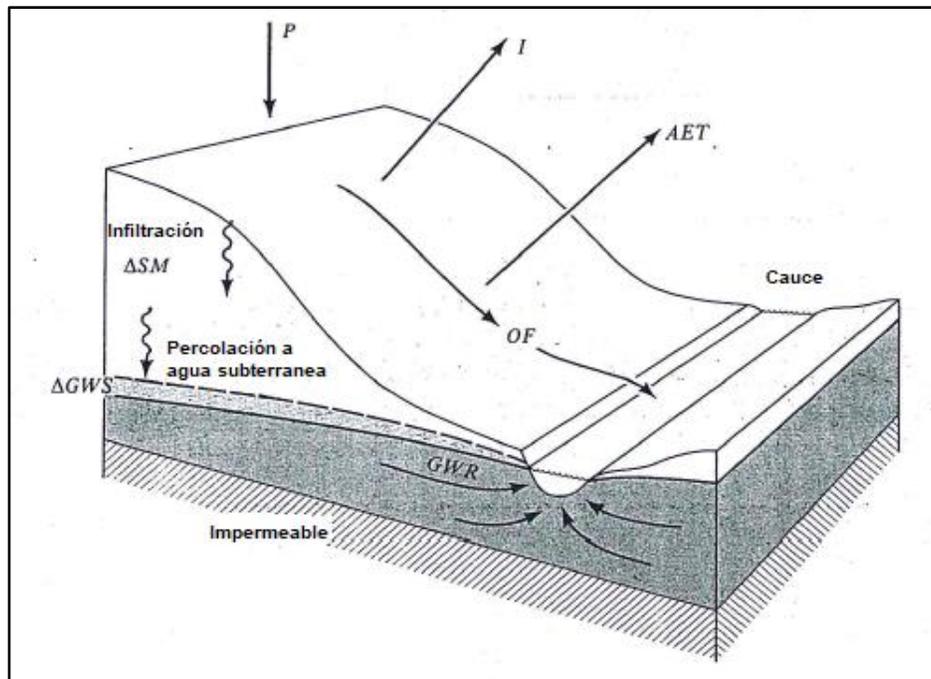


Figura 1-2. Diagrama de balance hídrico de una cuenca
Fuente: (Dunne, 2002)

1.6.2. Cuenca hidrográfica

Existen muchas definiciones de una cuenca hidrográfica que dependen del punto de vista que se esté analizando, para este proyecto la definición que se utilizará corresponde a la siguiente: La superficie o zona por donde ocurre la escorrentía superficial y la cual desfoga por el punto de control de la cuenca, definido de acuerdo a las necesidades del análisis. La cuenca hidrográfica se puede ver como un sistema que se encuentra delimitado en un espacio físico donde se tienen entradas y pérdidas de agua mediante precipitación. De igual manera, su morfología es defendida por el terreno al cual se le llama la divisoria de aguas.

Las cuencas hidrográficas pueden ser analizadas bajo distintos parámetros que establecen características físicas de la misma, a este proceso se le denomina "caracterización de cuencas". Estos parámetros se explican a partir del apartado 1.6.3 del marco teórico. En la Figura 1-3 se muestra el diagrama de una cuenca con sus partes a como se define en el Manual de Hidrología de Ven te Chow.

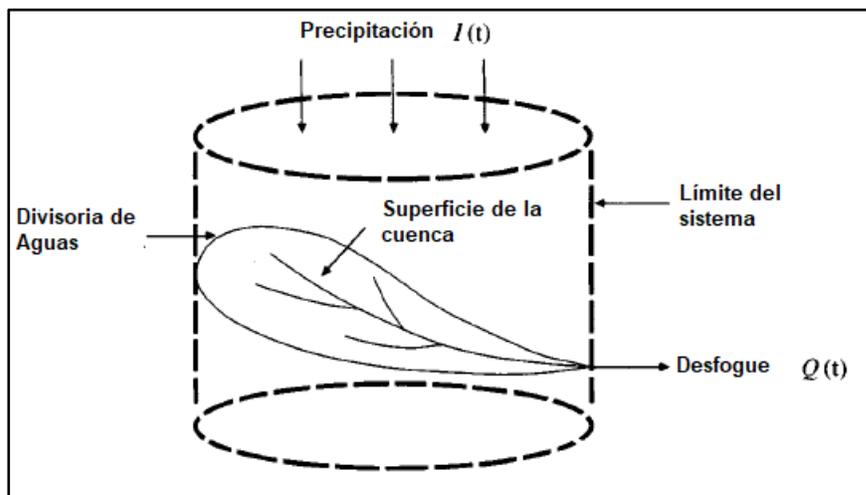


Figura 1-3. Diagrama de la cuenca hidrográfica
Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1988)

1.6.3. Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad (K_c) es la relación que existe entre un área circular y el área real de la cuenca. Este parámetro permite conocer que tan similar es el área de la cuenca a un círculo perfecto. Según (Cruz, Alfonso, Gaspari, & Carrillo, 2015) entre más cercano al valor de uno sea este coeficiente, más se parece la cuenca a un círculo, y si es mayor que el valor de uno, la cuenca es más alargada y con un mayor tiempo de retención o menor tendencia a las crecientes.

Según (Ven Te Chow, 1994) el coeficiente de compacidad se calcula como:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad [2]$$

Donde:

P: Perímetro [km]

A: Área [km²]

1.6.4. Factor de forma

El factor de forma (K_f) representa la razón entre ancho medio de la cuenca y la longitud axial del cauce principal de la misma. Este factor indica si una cuenca está más o menos sujeta a creciente ya que al tener un factor bajo está menos sujeta a las crecientes.

Se puede calcular como:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad [3]$$

Donde:

A: Área [km²]

L: Longitud axial del cauce principal [km]

1.6.5. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la razón entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca. Cuando una cuenca tiene un drenaje pobre presenta valores cercanos a 0.5 km/km² y si son cuencas bien drenadas posee valores cercanos a 3.5 km/km².

$$D_d = \frac{L}{A} \quad [4]$$

Donde:

L: Longitud total de cauces [km]

A: Área [km²]

1.6.6. Método de Polígonos de Thiessen

Para el análisis de la precipitación de la cuenca se requiere conocer la precipitación promedio de toda la cuenca; dado que solo se pueden realizar mediciones puntuales de la precipitación se utilizan distintas metodologías ya investigadas de los cuales existen métodos espaciales que utilizan las características de los datos con relación a la cuenca. El método de los polígonos de Thiessen consiste en establecer las áreas de influencia de cada una de las estaciones meteorológicas en la cuenca de acuerdo a su ubicación dentro y fuera de la misma (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad [5]$$

Donde "n" es el número de estaciones, Pi es la precipitación en la estación i en mm y Ai es el área de influencia de la estación i en km²

El cálculo de estas áreas de influencia se realiza mediante el programa Qgis con la información de la ubicación de las estaciones y la delimitación de la cuenca. Al final del proceso se debería obtener un resultado similar al de la Figura 1-4.

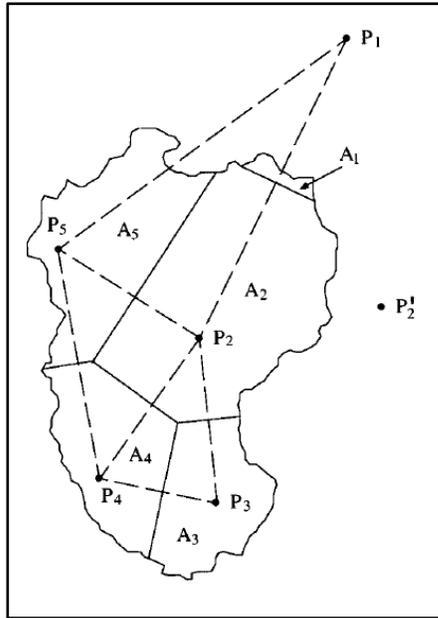


Figura 1-4. Polígonos de Thiessen en una cuenca
Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1988)

1.6.7. Modelo de evapotranspiración potencial de Hargreaves

Para el cálculo de los datos de evapotranspiración de las cuencas de estudio se utiliza el método de Hargreaves. La ecuación para datos diarios se presenta como:

$$ETp = 0.0135 * (t_{med} + 17.78) * R_s \quad [6]$$

Donde:

ETp: Evapotranspiración potencial [mm]

Tmed: Temperatura media de la cuenca [°C]

Rs: Radiación solar incidente [mm/día]

La radiación solar incidente puede ser calculada de distintas formas. La más precisa es utilizando los valores de radiación solar medidos en las estaciones, pero estos están incompletos y se prefiere utilizar la ecuación de (Samani, 2000) junto con la tabla de (Allen & Pereira, 2006) donde relacionan la radiación extraterrestre con la latitud de la zona de estudio y el mes deseado. La ecuación de Samani se muestra a continuación.

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad [7]$$

Donde:

Rs: Radiación solar incidente [mm/día de agua evaporada]

KT: Coeficiente igual a 0.19 en zonas costeras y 0.16 en zonas mediterráneas

Tmax: Temperatura máxima diaria [°C]

Tmin: Temperatura mínima diaria [°C]

Si se toma KT como 0.17 se puede simplificar la ecuación a:

$$ETp = 0.0023(t_{med} + 17.78) * R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad [8]$$

Donde:

ET_p: Evapotranspiración potencial [mm]

T_{med}: Temperatura media [°C]

T_{max}: Temperatura máxima [°C]

T_{min}: Temperatura mínima [°C]

R₀: Radiación extraterrestre [mm/día]

1.7. Modelo Sacramento de Contabilidad de humedad del suelo (NWSRFS-SAC-SMA)

El modelo Sacramento es un modelo hidrológico conceptual creado por el Dr. Michael Smith del departamento de hidrología de la Organización Meteorológica Mundial en 1971, que toma en cuenta la humedad del suelo. Este modelo utiliza el concepto de agua en tensión que es retenida por las partículas del suelo y el agua que es libre de fluir a través del suelo permeable. De esta manera se separa el modelo en dos zonas, una superior húmeda y una inferior seca en las cuales se basa su funcionamiento, ya que, según el mismo, solo hay percolación si la zona inferior está seca y menos húmeda que la superior. Además de lo mencionado anteriormente, el modelo toma en cuenta zonas impermeables de la cuenca, tasas de flujo de agua en las zonas y la percolación (NOAA, 1999).

1.7.1. Agua en tensión y agua libre.

Según la NOAA, el agua en tensión se define como el agua que es retenida o atrapada por la partícula del suelo, esto incluye agua completamente o parcialmente retenida. Como ejemplo: el suelo, al secarse naturalmente, retiene una cantidad de humedad en su interior.

Luego de que la capacidad de retener agua del suelo es superada, el agua comienza a fluir por el suelo y se llenan los vacíos del mismo generando lo que se conoce como agua libre. Esta agua es la responsable del flujo subsuperficial, flujo base y la percolación. De manera resumida se define como "Toda agua no obstruida ni retenida por partículas de suelo" (NOAA, 2002).

1.7.2. Zona inferior, zona superior y almacenamientos

El modelo de Sacramento utiliza el concepto de cinco almacenamientos distribuidos en dos zonas: la zona superior y la zona inferior. Estas zonas representan la parte superficial y subterránea del suelo.

El primero de los almacenamientos se conoce como el almacenamiento en tensión de la zona superior (UZTWM). Este almacenamiento, como se vio en la sección anterior, representa el agua que es retenida por las partículas del suelo en la zona superior. Esta zona es la primera en recibir agua por lo tanto hasta que este almacenamiento esté lleno, no hay flujo hacia los demás almacenamientos.

El segundo almacenamiento es el almacenamiento de agua libre de la zona superior (UZFWM). Esta es el agua que fluye luego de que el UZTWM está lleno. El agua de esta sección es la responsable del flujo vertical en el suelo (hacia zona inferior) o flujo lateral (flujo subsuperficial). La condición para que ocurra flujo hacia zonas más profundas del suelo es que la humedad en la zona inferior sea menor a la humedad en la zona superior, esto ocurre cuando el almacenamiento de agua libre está lleno.

El tercer almacenamiento el agua en tensión de la zona inferior (LZTWM). Este almacenamiento recibe parte del agua del UZFWM. Este almacenamiento no genera flujo hasta que esté lleno. Este almacenamiento aporta flujo a los almacenamientos de agua libre de la zona inferior.

Los últimos dos almacenamientos representan el agua libre principal de la zona inferior (LZFPM) y el agua libre secundaria de la zona inferior (LZFSM). El LZFPM es un almacenamiento que eventualmente aporta al flujo base. LZFSM se llena más rápido que el LZFPM y de igual manera aporta caudal al flujo base. Ambos almacenamientos siguen la ley de Darcy de flujo, pero el almacenamiento secundario es el primero en responder ante un evento de lluvia (eWater Toolkit, 2004).

1.7.3. Percolación

La percolación es uno de los procesos más importantes del modelo SAC-SMA. La percolación se define como "El movimiento del agua a través del suelo mediante procesos de gravedad y capilaridad" (NOAA, s.f). Esto implica que toda agua que se infiltra hacia zonas inferiores de suelo donde pueden existir acuíferos, es denominado percolación. Este proceso es el que permite que los almacenamientos de la zona inferior se llenen y generen el flujo base de la cuenca.

El movimiento se da cuando el UZTWM está completamente lleno o el almacenamiento en la zona inferior disminuye. Esto cambios de humedad y saturación relativa es el que genera la percolación entre las distintas zonas del modelo (NOAA, 2002).

La percolación mínima se da cuando los almacenamientos inferiores están completamente llenos por lo que el flujo se rige por el flujo base como se muestra en la ecuación [9].

$$Pbase = LZFSM * LZSK + LZFPM * LZPK \quad [9]$$

Donde:

Pbase: Límite inferior de la percolación [mm/día]

LZFSM: Almacenamiento secundario de agua libre de la zona inferior [mm]

LZFPM: Almacenamiento primario de agua libre de la zona inferior [mm]

LZPK: Razón de agua del almacenamiento principal del agua libre [1/día]

LZSK: Razón de agua del almacenamiento secundario del agua libre [1/día]

Para obtener la percolación máxima se multiplica el Pbase por el factor ZPERC como se muestra en la ecuación [10]

$$PERC_{MAX} = Pbase(1 + ZPERC) \quad [10]$$

Donde:

PERC_{MAX}: Percolación máxima [mm/día]

Pbase: Límite inferior de la percolación [mm/día]

ZPERC: Factor de cambio para la percolación de periodo seco a lluvioso [adimensional]

Dado esto la percolación real del modelo se da como:

$$Perc = Pbase[1 + Zperc * [1 - LZ_{rs}]^{Rexp}] * UZ_{rs} \quad [11]$$

Donde LZ_{rs} es la relación de entre la capacidad real de la capa inferior y su capacidad máxima. Esta relación se calcula como:

$$LZ_{rs} = \frac{LZTC + LZFSC + LZFPC}{LZTM + LZFSM + LZFPM} \quad [12]$$

Donde:

LZTC: Capacidad real de almacenamiento de agua en tensión de la zona inferior [mm]

LZFSC: Capacidad real de almacenamiento secundario de agua libre de la zona inferior [mm]

LZFPC: Capacidad real de almacenamiento primario de agua libre de la zona inferior [mm]

LZTM: Capacidad máxima de almacenamiento de agua en tensión [mm]

LZFSM: Capacidad máxima de almacenamiento secundario de agua libre de la zona inferior [mm]

LZFPM: Capacidad máxima de almacenamiento primario de agua libre de la zona inferior [mm]

El término UZ_{rs} es la relación entre el contenido de la zona superior y su capacidad máxima. Este término define el suministro de agua que recibe realmente la capa inferior por percolación en el suelo y se calcula como:

$$UZ_{rs} = \frac{UZFWC}{UZFWM} \quad [13]$$

Donde:

UZFWC: Capacidad real de almacenamiento de agua libre de la zona superior [mm]

UZFWM: Capacidad máxima de almacenamiento de agua libre de la zona superior [mm]

A manera general, se muestra el esquema del modelo SAC-SMA en la Figura 2.

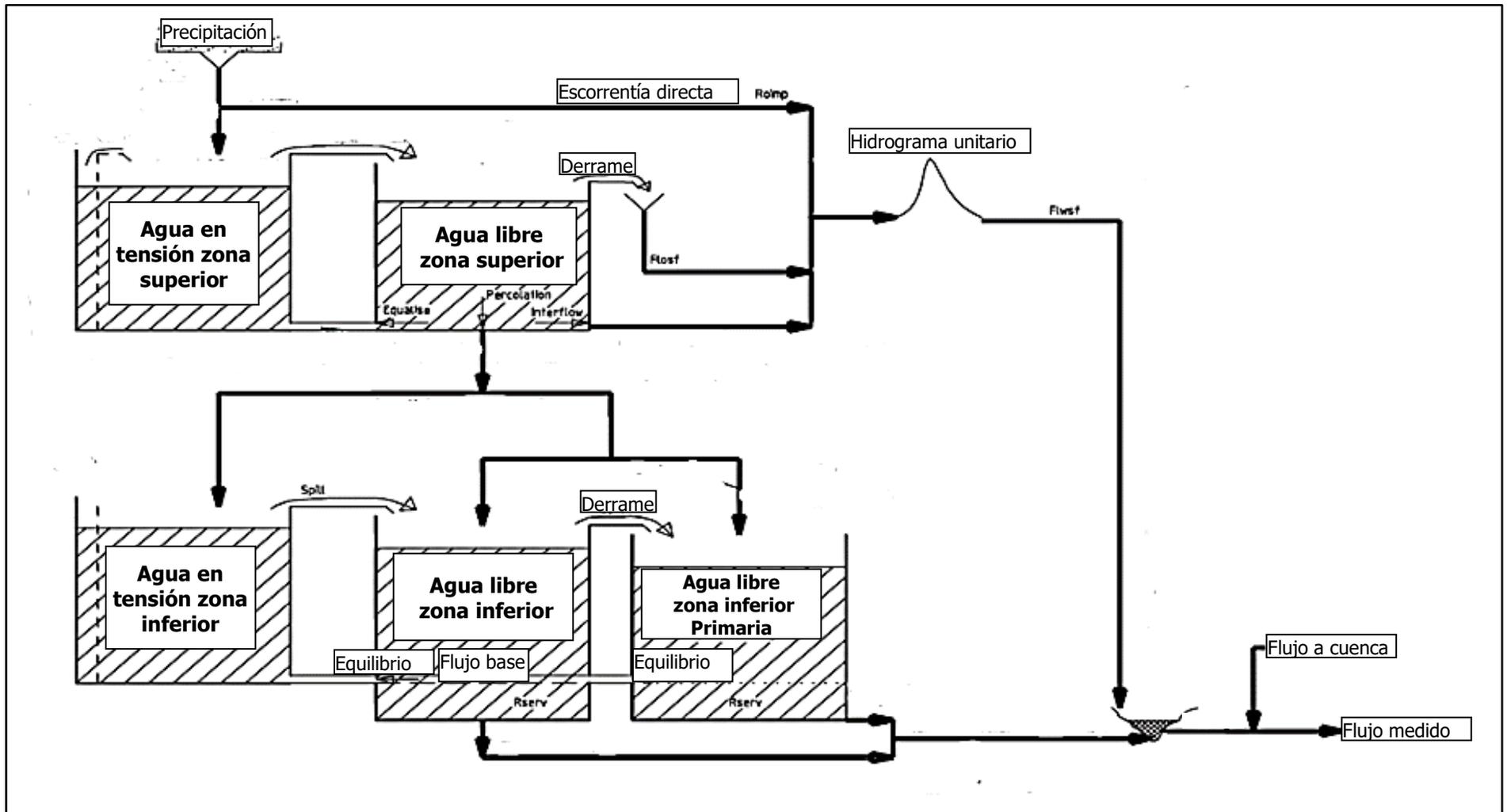


Figura 1-5. Representación del modelo SAC-SMA
 Fuente: (eWater Toolkit, 2004)
 Traducida por: (Sandi, 2021)

1.7.4. Método de inteligencia artificial de Redes Neuronales para completar datos

Una red neuronal es un algoritmo computacional que se basa en el funcionamiento del cerebro humano, incluso al punto que una de sus componentes se denomina neuronas haciendo alusión a las neuronas del cerebro humano.

La red neuronal se compone de tres principales elementos o capas: La capa de entrada, las capas ocultas o las neuronas y la capa de salida. La capa de entrada son todos los datos que se introducen en la red neuronal que se pueden ver como estímulos que afectan el funcionamiento de la red. Las capas ocultas poseen ciertos parámetros dentro de ellas incluida una serie de pesos que determina la importancia que poseen las distintas entradas en la neurona. La capa de salida son los resultados que se desea que obtenga la red neuronal, básicamente se interpreta como la información de lo que queremos que calcule la red basada en los pesos y los datos de entrada.

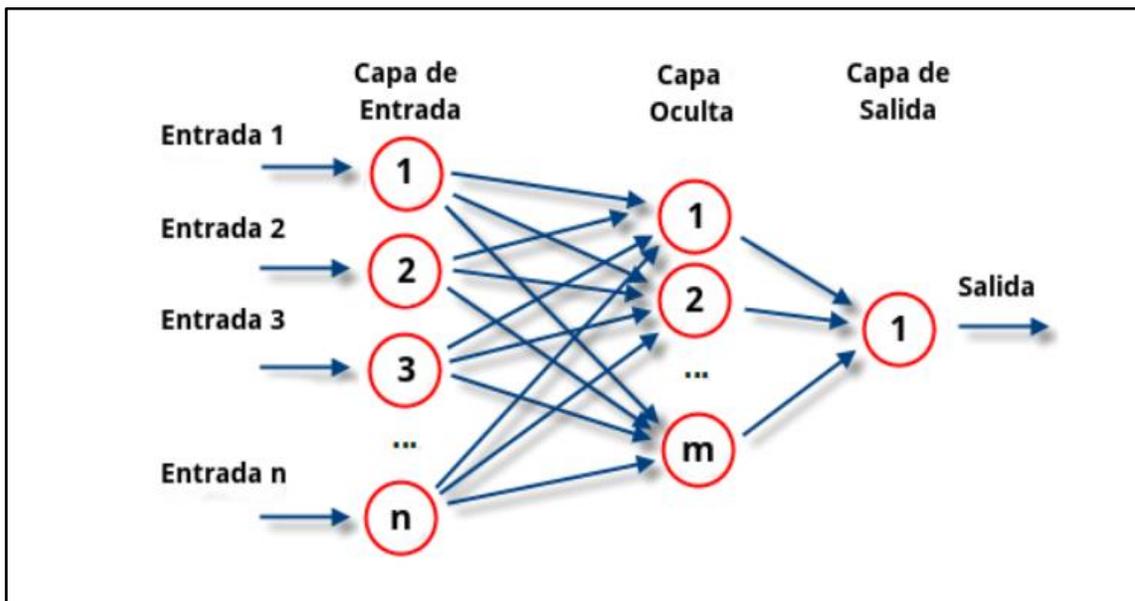


Figura 1-6. Diagrama de Red neuronal simple
Fuente: www.atriainnovation.com

Como una explicación un poco más específica y matemática del algoritmo de una red neuronal, se puede ver de la siguiente manera. Se tiene una red neuronal con una capa de entrada, una capa de neuronas y una de salida. La primera neurona de la capa recibe todos los datos de entrada y realiza una suma ponderada de estos. Para ponderar esta suma se coloca un peso específico a cada uno de las entradas y se obtiene un resultado. Este resultado se procesa con una función de activación la cual busca eliminar la linealidad que posee una suma ponderada; estas funciones van desde funciones binarias, tangentes hiperbólicas, sigmoides, etc. Luego de pasar por la función de activación el resultado pasa a la capa de salida donde se obtiene el error mediante una función de errores. La red utiliza un método denominado retro propagación del error que permite a la red distribuir este error a las distintas capas de neuronas, por lo tanto, ajusta los pesos de los datos de entrada acorde al error brindado a cada neurona. (Mckinney, 2013). Un esquema simple del este funcionamiento se puede observar en la Figura 1-7.

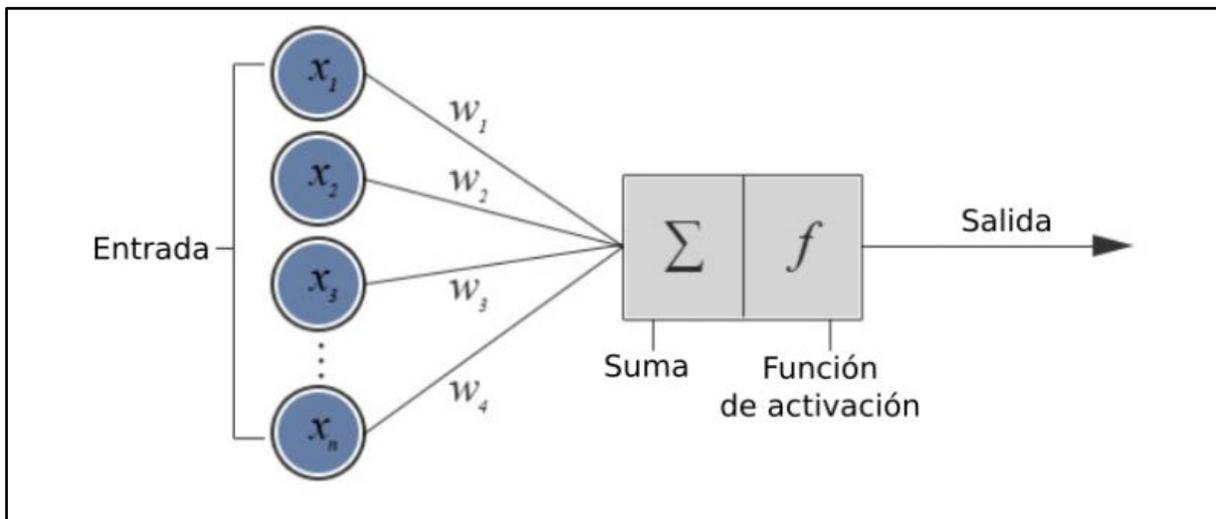


Figura 1-7. Diagrama de funcionamiento de una red neuronal

Fuente: (Mckinney, 2013)

Existen estudios de las redes neuronales utilizadas para reconstruir series de precipitación de distintas cuencas. Entre ellos se puede mencionar el de (Muñoz, Bediya, & Rincón, 2020) que explican de manera muy gráfica el proceso que se puede seguir para reconstruir las series de tiempo. Debido a que este proyecto no se enfoca en el uso de redes neuronales, solo se brinda una explicación general del método.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

2.1. Hidrografía de la cuenca de estudio

En los siguientes apartados se presentan las caracterizaciones de la cuenca alta del río Abangares y las subcuencas Santa Lucía y Ecomuseo tal y como se presenta en la Figura 2-1. Las tres cuencas poseen aspectos similares en cuanto a clima, temperatura y uso de suelo, siendo las subcuencas menos pobladas que la cuenca del río Abangares. Las tres cuencas se caracterizan principalmente utilizando las características descritas en el apartado 1.6 del marco teórico. La información de las tres cuencas de estudio se presenta en las distintas secciones de forma conjunta, por lo que en los mapas se muestran las tres cuencas con sus características.

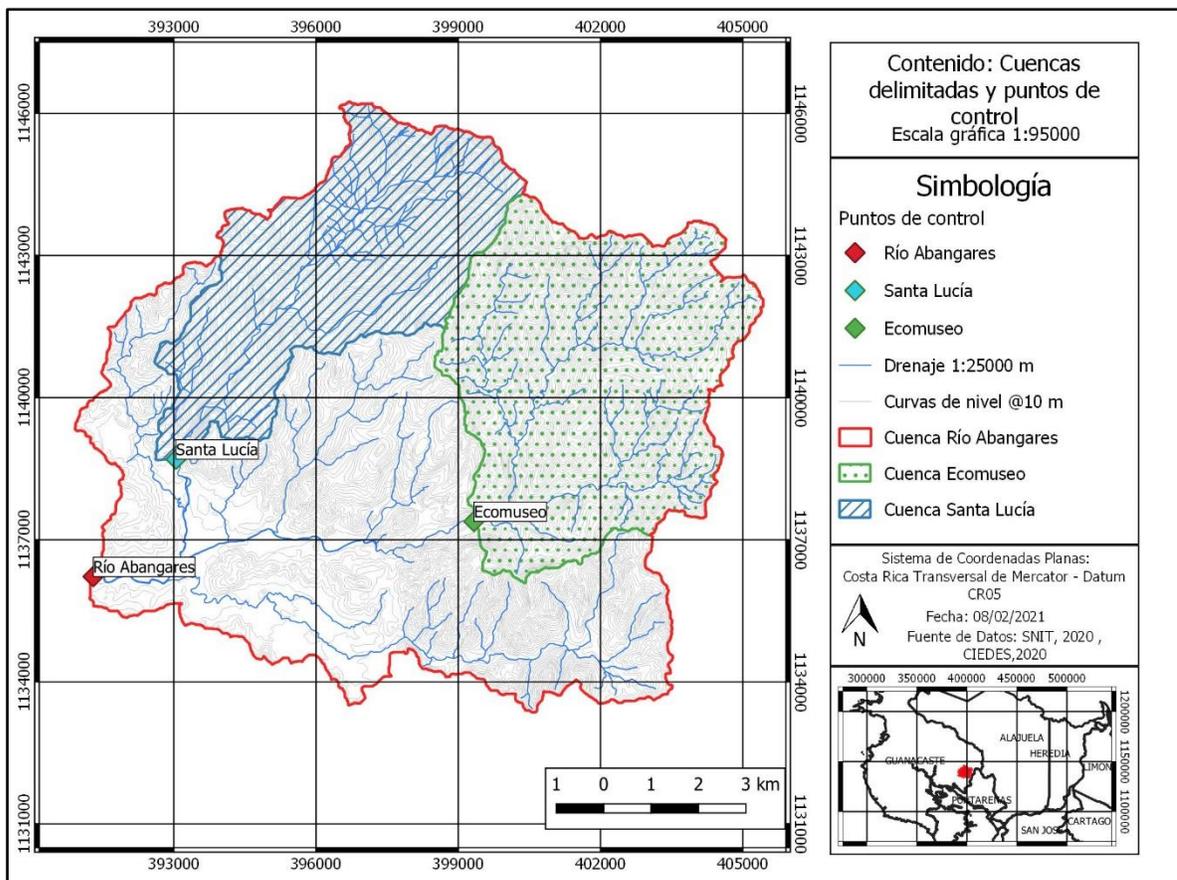


Figura 2-1. Cuencas delimitadas de Abangares

Para la delimitación de las cuencas se utilizan las hojas cartográficas 1:25000 del SNIT, capa de drenaje 1:25000 del Sistema Nacional de Información Territorial y curvas de nivel a cada 10 m que coinciden con las hojas 1:25000 del SNIT. Como software principal se utiliza Qgis en su versión 3.10.5 y no requiere licencia al ser un programa gratuito.

Como puntos de desfogue se utiliza la ubicación de las estaciones fluvigráficas manejadas por el CIEDES: Marimba, Santa Lucía y Ecomuseo las cuales corresponden a las cuencas Río Abangares, Santa Lucía y Ecomuseo respectivamente, como se muestra en la Figura 2-1. En el Cuadro 2-1 se muestran las coordenadas exactas de las estaciones utilizadas. Estos puntos se movieron ligeramente para evitar problemas con el software de Qgis pero no altera significativamente los resultados finales.

Cuadro 2-1. Cuadro de coordenadas de puntos las estaciones fluvigráficas en CRTM05

Nombre	X (m)	Y (m)
Marimba	391287.445	1136201.17
Santa Lucía	392989.122	1138709.31
Ecomuseo	399292.478	1137379.61

2.2. Geomorfología e hidrografía

La cuenca de Marimba corresponde a la más grande de las tres con un área de 123.51 km². Dentro de esta cuenca se encuentra el pueblo de Las Juntas de Abangares, la capital del cantón de Abangares y corresponde a la mayor cantidad de área impermeable de la cuenca. Es importante recalcar que para este proyecto se delimita la cuenca hasta el punto de control de la estación Marimba, pero, la cuenca completa sigue hasta la desembocadura con el Golfo de Nicoya y abarca unos 302.55 km², por lo que el área de estudio se compone solo del 41% del total de la cuenca (Araya, 2014).

Las cuencas de Santa Lucía y Ecomuseo corresponden a cuencas de estudio del proyecto, pero existe un área que no está delimitada como una cuenca. Esta no se toma cuenta en el análisis ya que si se realizan cálculos de escorrentía debería ser un acumulado con Santa Lucía y Ecomuseo.

2.2.1. Meteorología e hidrografía

Para obtener la mayoría de las características físicas de la cuenca se utiliza un modelo de elevación digital (MED) generado con las curvas de nivel a cada 10 m de elevación y la delimitación de la cuenca. En la Figura 2-2 se muestra el MED de la cuenca del Río Abangares.

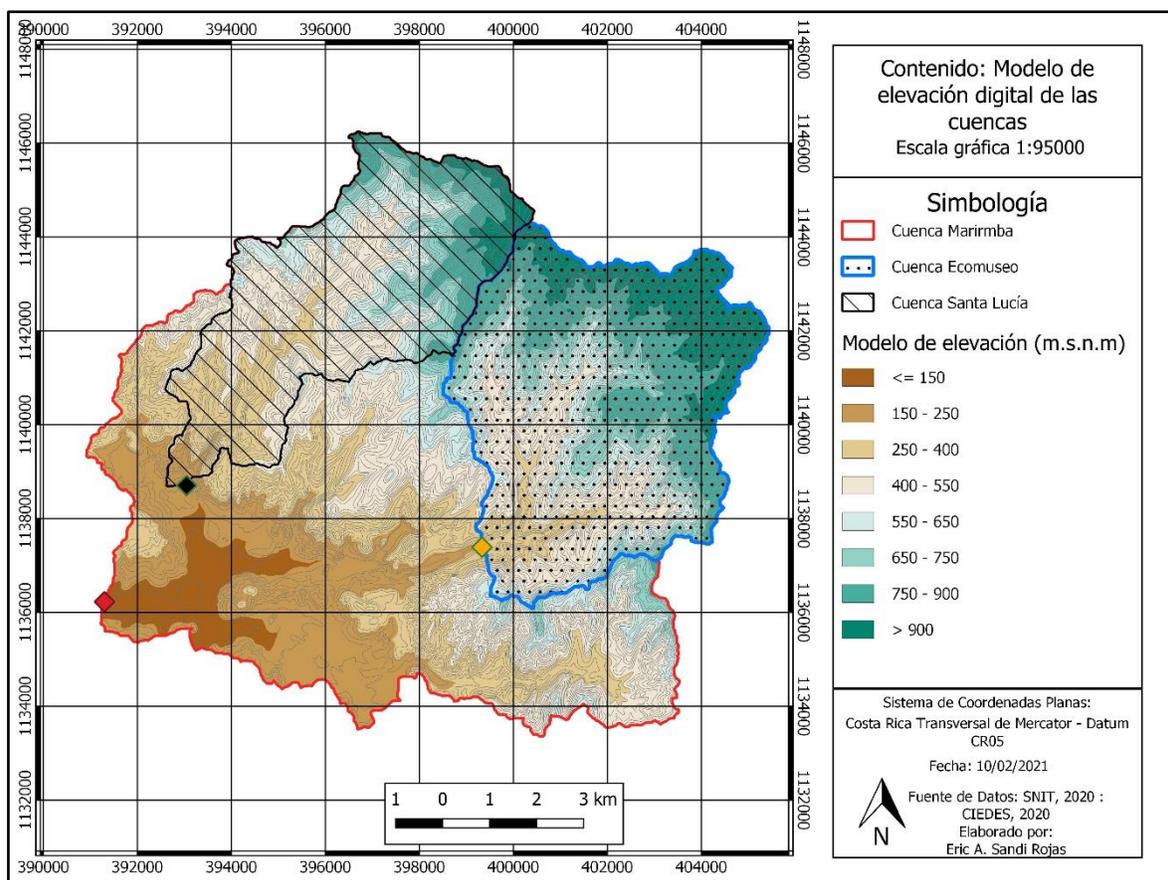


Figura 2-2. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Abangares

Como parte de las características físicas obtenidas para las cuencas de estudio, se muestran en el siguiente cuadro como resumen.

Cuadro 2-2. Características físicas de las cuencas

Característica	Marimba	Santa Lucía	Ecomuseo
Área (km ²)	123.5	23.4	36.8
Perímetro (km)	61.0	31.1	30.9
Pos. X del centroide (m)	398181.280	396397.624	401773.614
Pos. Y del centroide (m)	1139386.950	1142709.497	1140326.260
L.axial (km)	4.7	8.8	7.8
L.cauce principal (km)	18.8	11.2	9.9
L.total de corrientes de agua (km)	219.7	50.7	71.9
Kf (Factor de forma)	0.3	0.2	0.4
Kc (coeficiente de compacidad)	1.5	1.4	1.8
Dd (Densidad de drenaje)	1.8	2.2	2.0
Sinuosidad	4.0	1.3	1.3
Altura mínima (m)	96.0	161.1	246.6
Altura máxima (m)	1169.4	1100.8	1169.5
Índice de pendiente Ip	0.2	0.2	0.3
Distancia al centroide (km)	9.6	0.4	0.7
Numero de orden	5.0	4.0	4.0
Lado mayor del rectángulo equivalente L (km)	25.7	13.9	12.5
Lado menor del rectángulo equivalente L (km)	4.8	1.7	2.9
Pendiente media de la cuenca (%)	0.3	0.4	0.41
Pendiente del cauce principal (S1) (%)	5.7	9.6	9.3

Del Cuadro 2-2 se puede observar que la cuenca de Marimba es de tamaño mediano según (Serrano, 2019), ya que tiene un área menor a los 250 km² y mayor a los 100 km² y las cuencas de Ecomuseo y Santa Lucía son pequeñas. Las tres cuencas presentan una densidad de drenaje promedio de 2 km/km², por lo que se puede decir que poseen un buen drenaje. Por los valores obtenidos del factor de forma y el coeficiente de compacidad, las cuencas son de forma oblonga, según (Cruz, Alfonso, Gaspari, & Carrillo, 2015), esto indica que tienen mayor tendencia a las avenidas, pero un tiempo de respuesta más rápido, comportamiento que se aprecia en los datos de caudal de las cuencas.

De los datos de elevación se sabe que la cuenca de Marimba tiene una gran variación de alturas (de los 95 msnm a los 1116 msnm), pero no posee una elevación media alta y las pendientes de las cuencas Ecomuseo y Santa Lucía son mayores a la de Marimba. En la Figura 2-3 donde se muestra la curva hipsométrica de las cuencas, el mayor porcentaje de

área en la cuenca Marimba, se encuentra entre los 695 msnm y los 280 msnm, lo cual causa que la elevación media se encuentre, aproximadamente, a los 495 msnm. En el caso de las cuencas de Ecomuseo y Santa Lucía se observa que la elevación media es mayor que la de Marimba siendo esta de 700 m.s.n.m y 568 m.s.n.m respectivamente. En el primer 20% de las áreas se encuentran las mayores elevaciones de las cuencas por lo que se sabe que hay un buen porcentaje con pendiente alta. Esta distribución de áreas podría indicar una respuesta rápida a crecientes y un bajo tiempo de drenaje.

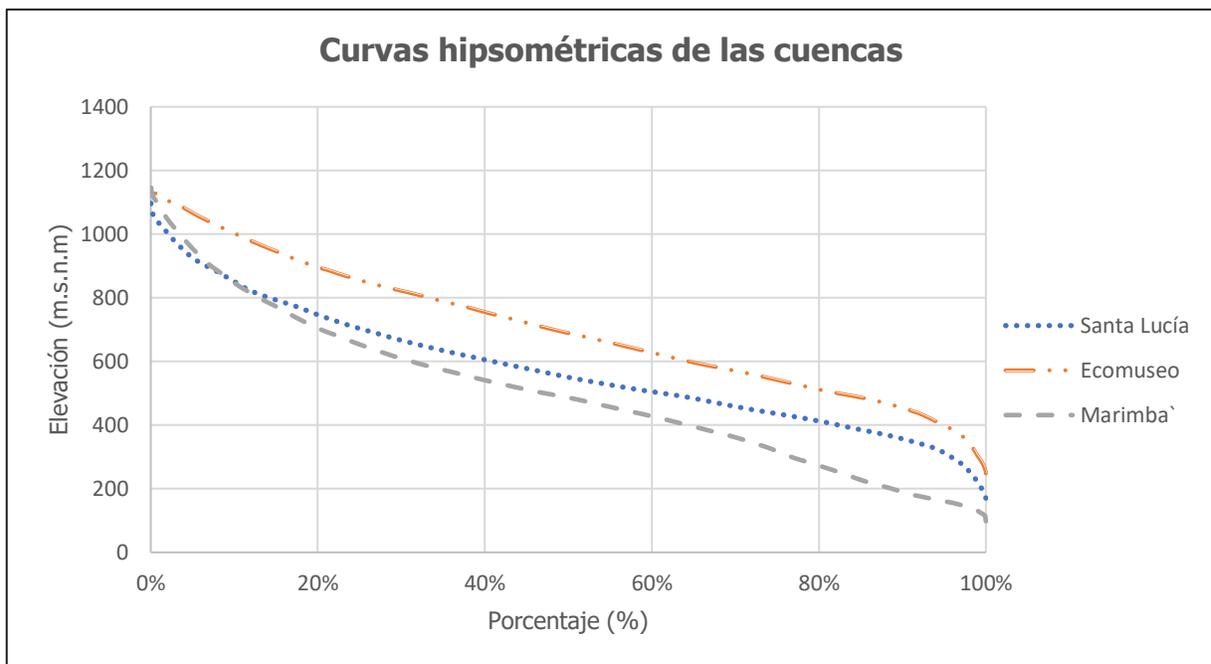


Figura 2-3. Curva hipsométrica de las cuencas de estudio

2.2.2. Tipo de suelo de la zona

En el presente proyecto existen tres fenómenos importantes que se deben tener en consideración a la hora de plantear el modelo SAC-SMA, estos son: La percolación, infiltración y escorrentía. Estos tres fenómenos definen el comportamiento de la cuenca ante avenidas y el aporte que genera la precipitación al cauce de los ríos. Estos tres fenómenos existen en todas las cuencas, pero sus características están definidas por parámetros como topografía, tipo de suelo y la cobertura del suelo; esto hace que sea importante conocer las características y el comportamiento del suelo en la cuenca de estudio.

La cuenca de Marimba posee una gran cantidad de pastos como se demuestra en el apartado de uso de suelo y cobertura. Si las cuencas poseen una gran cantidad de suelos gruesos como grava o arena, posee un alto índice de infiltración. Esto causa que en periodos lluviosos y ante crecientes, mucha de esta agua se infiltre en el suelo como agua subterránea y el caudal del cauce, varíe.

Del mapa en la Figura A-1 se puede observar que la mayoría de la cuenca se compone de suelos Alfisoles con un aporte, en la parte baja de la cuenca, de Molisoles y Ultisoles. Estos dos últimos tipos de suelos corresponden a suelos sedimentarios por la acción de los ríos en el terreno y tienden a ser más arenosos que los de la parte alta. La tabla con las características de los tipos de suelo se muestra en el Cuadro A-1 del Anexo A.

2.3. Climatología

2.3.1. Clima

El clima de la cuenca del río Abangares dentro de la zona de estudio posee según el IMN, dos tipos de clima: El clima tropical lluvioso y el clima tropical lluvioso y seco, como se muestra en la Figura 2-4. El clima tropical lluvioso se caracteriza por su moderada cantidad de precipitación y su temperatura media de aproximadamente 22 °C. Por otro lado, el clima tropical seco se caracteriza por tener poca lluvia, una estación seca muy marcada en los meses de diciembre a mayo y temperatura media de 28 °C. Estas características se comparan con los datos de precipitación y temperatura de las estaciones del CIEDES. (IMN, s.f)

2.3.2. Precipitación

Según el IMN, al estar la cuenca del río Abangares dentro de la región Pacífico Norte, posee un periodo seco en los meses de diciembre a finales de marzo, luego comienza un periodo lluvioso de mayo a noviembre. El mes de abril se considera un periodo de transición entre las estaciones secas y lluviosas. Los datos del IMN muestran precipitaciones medias anuales entre los 2000 mm y 3000 mm, la parte alta de la cuenca posee un registro más alto de los 3000 mm a 4000 mm.

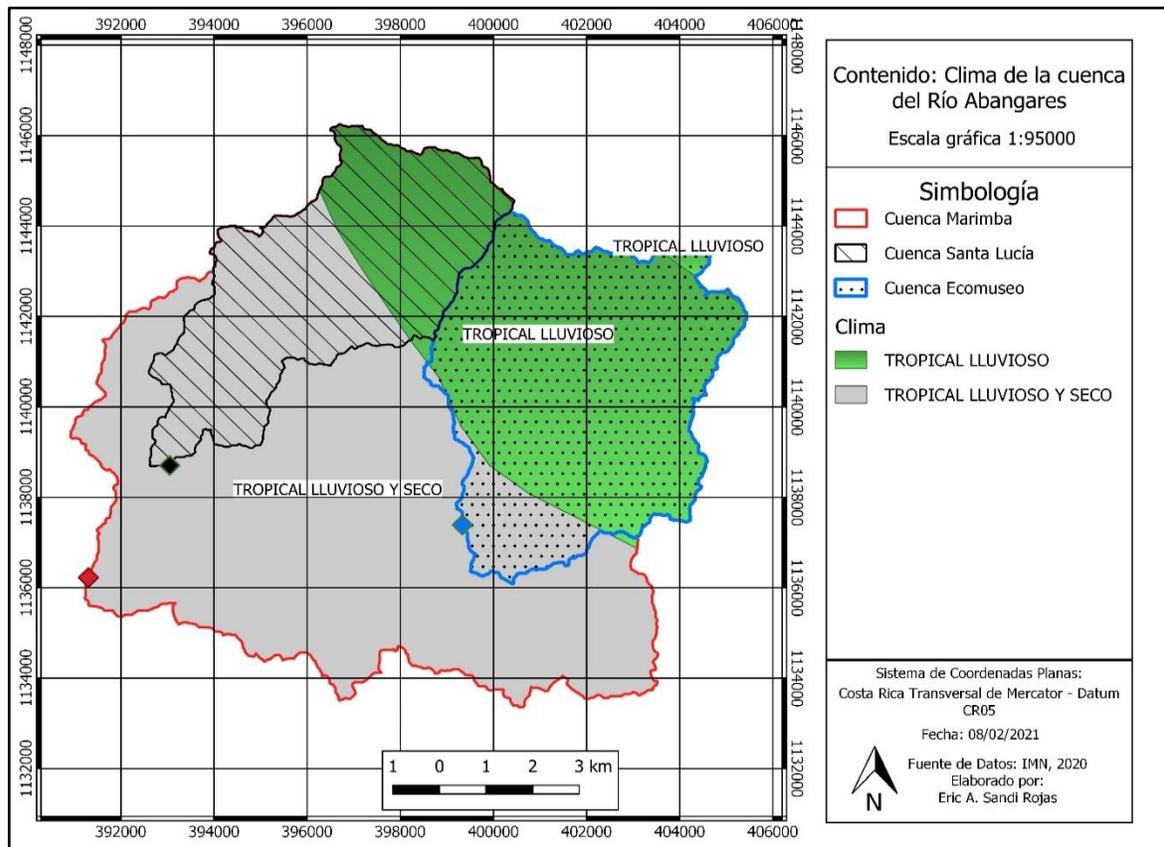


Figura 2-4. Climas de la cuenca del Río Abangares

2.3.3. Humedad relativa

En Abangares por estar a las faldas de una cordillera y cerca de la costa posee una alta variación de humedad. Según la página web Weather Spark existe un periodo húmedo de unos 9 meses comenzando en abril y terminando en enero. Las humedades varían de manera extrema pasando del 22% de humedad en enero al 99% en septiembre causando que haya una variación considerable de la sensación térmica como se observa en la Figura 2-5 (WeatherSpark, s.f).

2.3.4. Brillo solar

El brillo solar en la zona de la cuenca Marimba se encuentra entre las 7 horas y 5 horas de brillo solar al día. En las zonas altas se aproxima más a las 5 horas y se debe a la nubosidad que se presenta a esta altitud (IMN, 2009).

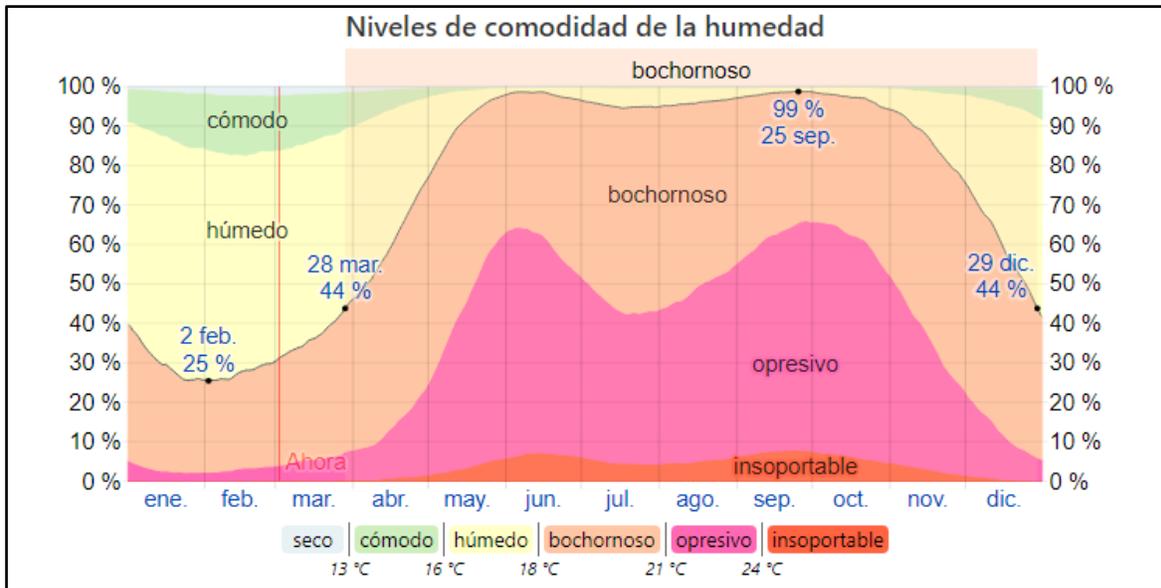


Figura 2-5. Niveles de humedad y comodidad de las Juntas de Abangares

2.3.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración no posee registros directos en la cuenca del Río Abangares por lo complicado de comprar y mantener un equipo de medición de evapotranspiración en una zona rural, pero existen distintos estudios que se han realizado donde se han utilizado métodos como el de Hargreaves para calcular la evapotranspiración real en la cuenca de manera aproximada.

Según el IMN la zona de Las Juntas de Abangares posee una evapotranspiración real promedio entre los 1500 mm a los 1700 mm según la zona de la cuenca que se estudie, por lo tanto, se puede ver que la evapotranspiración es menor a la precipitación anual promedio de la zona.

2.3.6. Temperatura

La cuenca del Río Abangares se encuentra cerca de la costa y en la zona pacífico norte del país. Al tener zonas altas dentro de la cuenca su rango de temperaturas puede ser variable dependiendo de las condiciones del clima y la elevación a la que se realice el estudio. En los registros del IMN para esta zona se encuentran temperaturas promedio de los 20 °C a los 28 °C. La temperatura máxima está en el rango de los 26 °C a los 34 °C y la mínima de los 20 °C a los 16 °C.

2.4. Uso de suelo y cobertura

Utilizando los datos generados por Edwin Matarrita en su trabajo final de graduación: "Modelo de estimación de producción de sedimento por erosión hídrica en la cuenca del río Abangares", se genera el mapa de la Figura 2-6. Estos datos son generados de manera manual utilizando imágenes satelitales de Google como referencia y fueron actualizados en el 2020. En el mapa se puede observar que la mayoría del terreno posee solamente bosque, pasto y charral; existe un pequeño porcentaje con uso de suelo urbano que definirá el porcentaje de suelo impermeable en la cuenca para el modelo SAC-SMA. Con el programa Qgis se obtienen las áreas de cada uno de los usos de suelo y con esto el porcentaje respecto al área total de la cuenca; estos se muestran en el Cuadro 2-3. La cuenca de Santa Lucía no posee uso de suelo de cultivos, pero si tiene un 0.2% de uso de suelo urbano mientras que Ecomuseo no posee cultivos ni uso de suelo urbano que sea significativo. Este análisis es importante ya que uno de las suposiciones del proyecto es que las cuencas se comportan de manera similar y conociendo que poseen un uso de suelo similar, ayuda a confirmar la suposición y a mejorar el nivel de confianza en los resultados.

Cuadro 2-3. Distribución de uso de suelo de la cuenca del Río Abangares

Uso de suelo	Santa Lucía		Marimba		Ecomuseo	
	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Bosque	16.3	59.5	71.4	57.7	24.2	65.9
Café	0.7	2.5	3.4	2.8	2.7	7.5
Charral	3.3	12.1	25.3	20.5	1.7	4.7
Cultivos	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0
Pasto	6.6	24.0	19.0	15.4	8.1	21.9
Suelo desnudo	0.5	1.8	2.2	1.8	0.0	0.0
Urbano	0.1	0.2	2.0	1.6	0.0	0.0
TOTAL	27.4	100.0	123.6	100.0	36.8	100.0

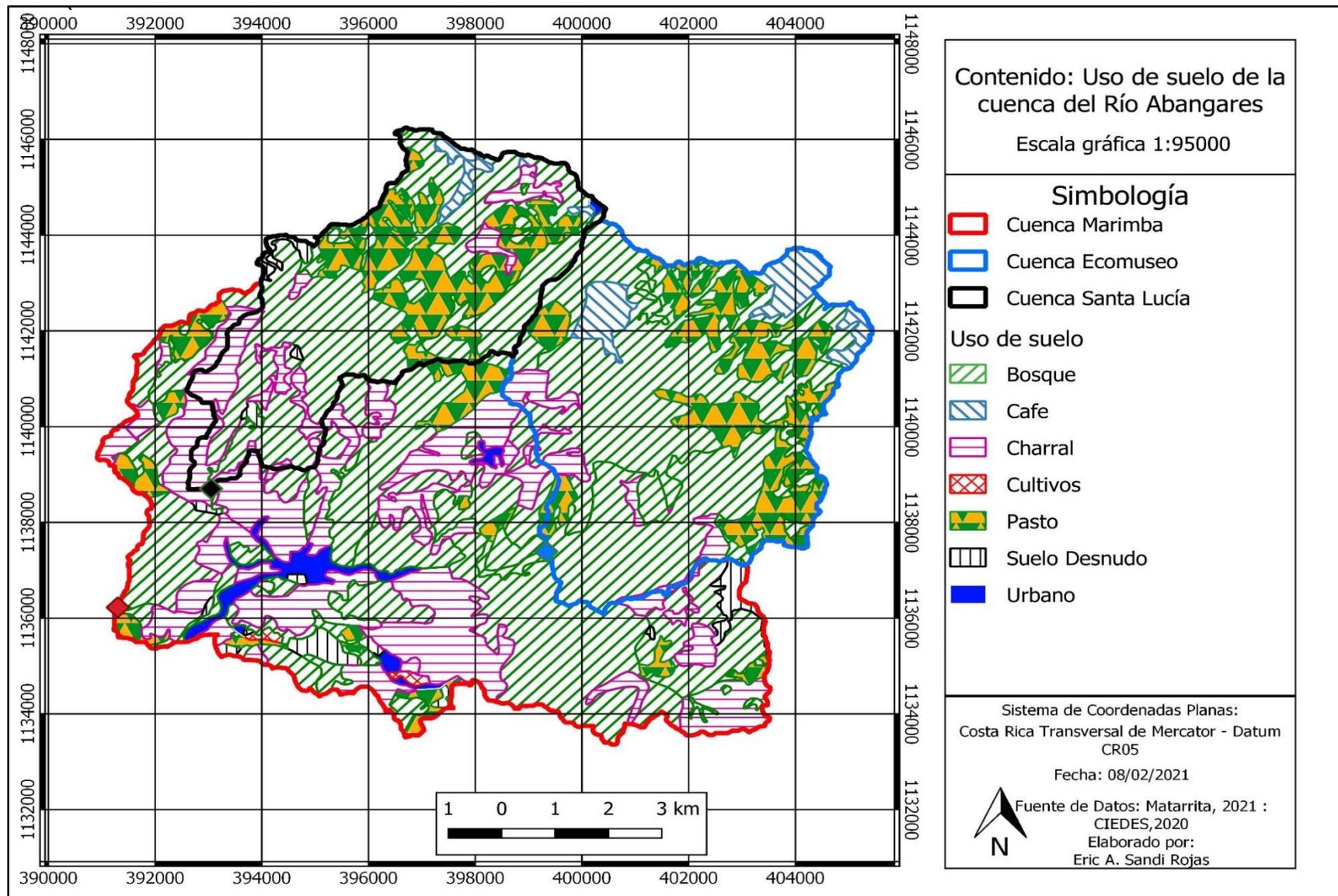


Figura 2-6. Uso de suelo de la cuenca del Río Abangares

3. ESTACIONES HIDRO-METEOROLÓGICAS

La cuenca del Río Abangares es actualmente, una cuenca que cuenta con bastantes estaciones meteorológicas administradas por el CIEDES con ayuda de la Municipalidad de Abangares y otras administradas por el IMN. Estas estaciones poseen datos de acceso público que pueden ser solicitadas a las entidades correspondientes.

Para el presente proyecto se trabaja con las estaciones administradas por el CIEDES, las cuales son: Colorado, Ecomuseo, Las Juntas, Liceo San Rafael, Marimba, Marsellesa, San Rafael y Santa Lucía. De estas estaciones las únicas que poseen un registro amplio de 2015 a 2020 son las estaciones: Las Juntas, Ecomuseo, Santa Lucía, San Rafael, y Marimba; las demás estaciones se colocaron hace poco y solo poseen registros del 2018 al 2020. Tomando esto en consideración se decide solo utilizar las cinco estaciones completas para el proyecto, que, aunque poseen datos faltantes, tienen más datos que las otras estaciones. Las estaciones se muestran en la Figura 3-2.

En cuanto a los datos de caudal solo se posee registro de la estación de Marimba. Los datos de las otras dos estaciones se dañaron o fueron perdidos en la base de datos.

3.1. Ubicación y descripción de las estaciones

De las ocho estaciones que maneja el CIEDES en Abangares, solo cinco se encuentran dentro de la cuenca de estudio, dos están cerca de la divisoria de aguas de la cuenca de Marimba y la última está por fuera de la divisoria de aguas. Si se toma en cuenta que solo se van a utilizar cinco de las estaciones, tal y como se aprecia en la Figura 3-1, tres de estas serán fluviográficas y las otras dos meteorológicas. Cabe aclarar que las estaciones fluviográficas también tienen pluviómetros y otros sensores por lo que se consideran también meteorológicas. La distinción solo se hace para saber cuáles son capaces de medir caudal y cuáles no.

Saber la ubicación de las estaciones es importante porque de acuerdo a estas se puede decidir el método a utilizar para obtener la precipitación y evapotranspiración promedio de la cuenca.

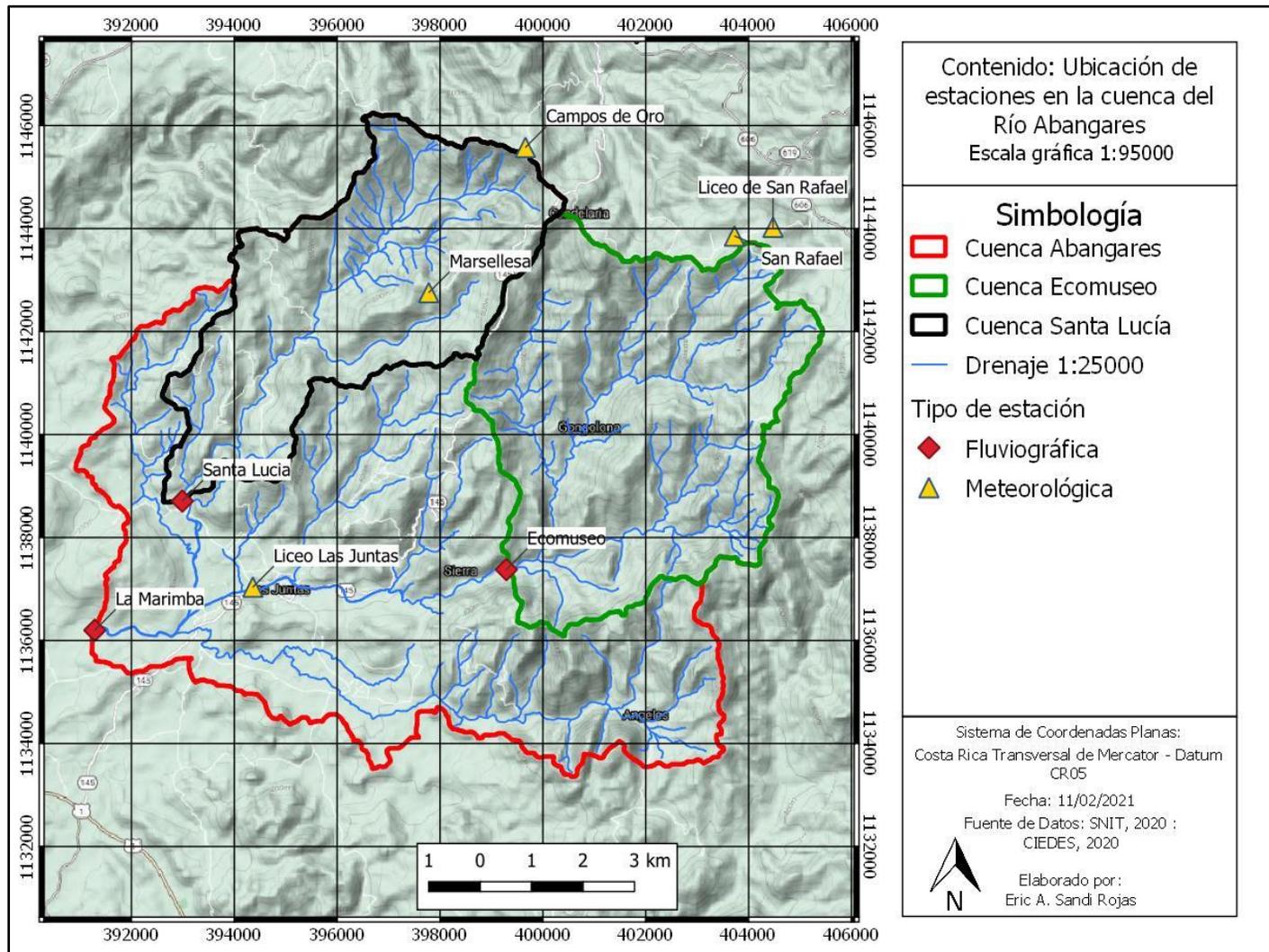


Figura 3-1. Mapa de ubicación de las estaciones del CIEDES

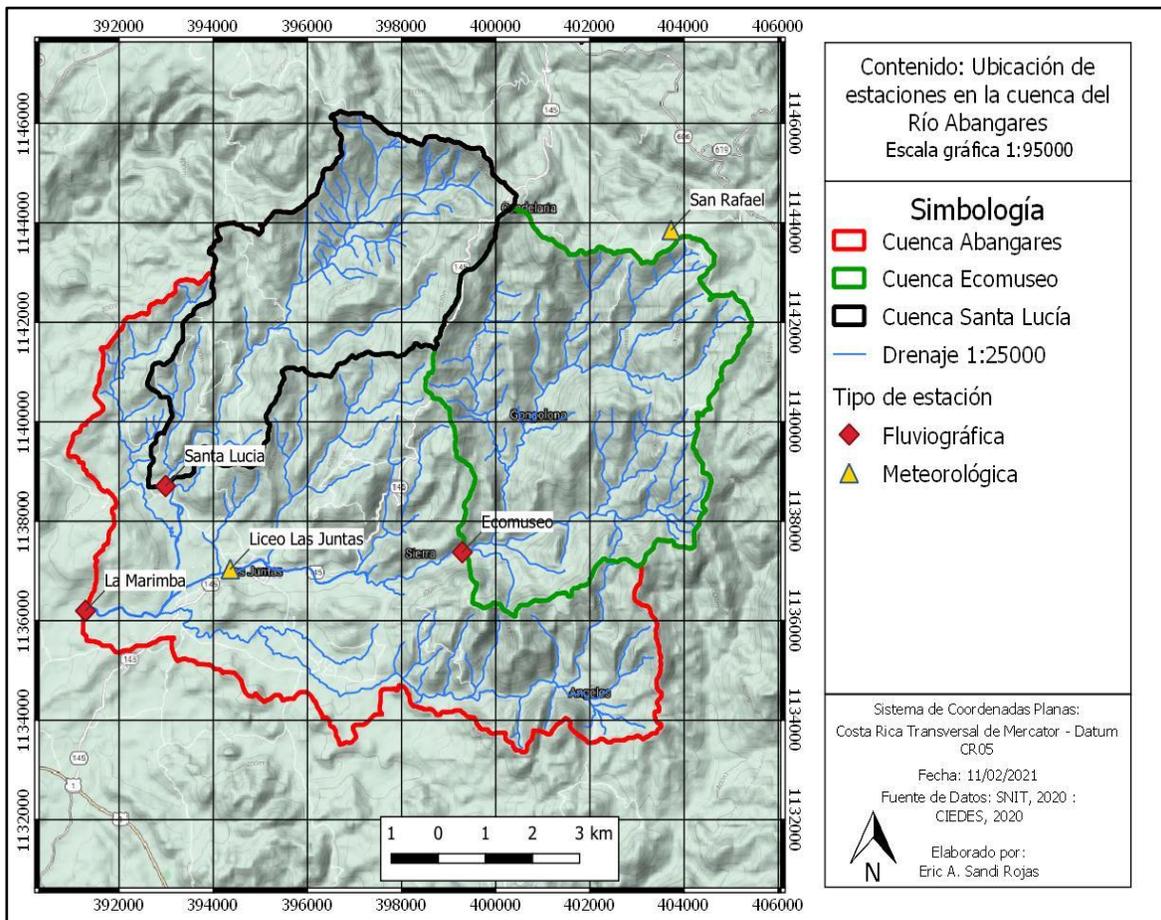


Figura 3-2. Mapa de ubicación de estaciones a utilizar

3.2. Datos de precipitación

Las cinco estaciones a utilizar son capaces de medir la precipitación horaria en la cuenca teniendo registros tan precisos como cada cinco minutos. Todas las estaciones a utilizar poseen datos faltantes en el periodo 2015 – 2020 por lo tanto estas se deben completar utilizando algún método que genere un registro preciso y coherente con el comportamiento de la precipitación en la zona. Para dar un mejor punto de vista a la situación con los datos de precipitación, se presentan los datos del porcentaje de datos faltantes para cada estación en el Cuadro 3-1. En la Figura 3-3 se muestra el gráfico de todas las estaciones para observar los periodos en que faltan datos.

Cuadro 3-1. Porcentaje de datos faltantes

	Santa Lucía (mm)	San Rafael (mm)	Marimba (mm)	Las Juntas (mm)	Ecomuseo (mm)
Datos faltantes	621	460	348	320	465
Total	1826	1826	1826	1826	1826
Porcentaje faltante (%)	34.0	25.2	19.1	17.5	25.5

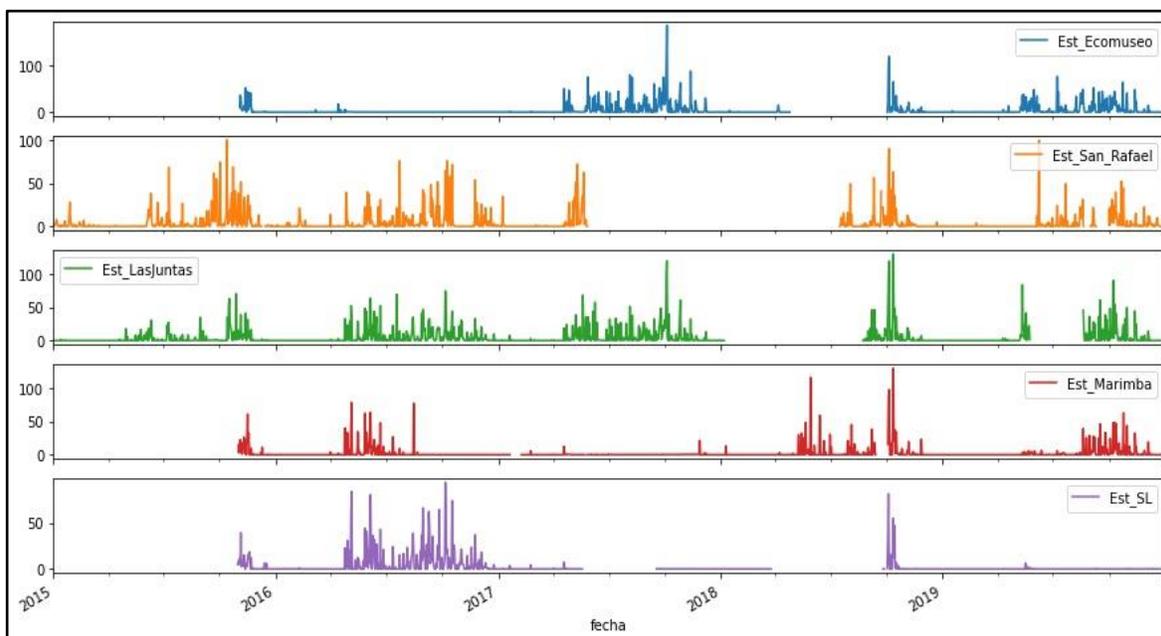


Figura 3-3. Datos incompletos de estaciones

De igual manera se aprecia, en la Figura 3-3, que existen periodos en el que hay errores de registro, por ejemplo, en la estación Ecomuseo, durante el año 2016 todos los registros de precipitación son cero, por lo tanto, existe un registro que no concuerda con un patrón de precipitación para Costa Rica.

3.2.1. Algoritmo para completar datos faltantes

Para poder completar los datos diarios se debe utilizar un método que sea lo suficientemente flexible para poder modelar el comportamiento diario de la precipitación. Debido a la gran falta de datos de precipitación se decide que el método debe utilizar todos los datos posibles de las estaciones para completar las demás, por lo tanto, se descartan método de correlación directa entre dos estaciones, además, al ser los datos

diarios bastante aleatorios la correlación general tiende a ser bastante baja para estaciones que no son cercanas.

Basado en lo anterior, se elige utilizar un algoritmo denominado "Red neural", el cual se basa en el comportamiento del cerebro humano para poder desarrollar predicciones. De esta manera, la red neuronal "se entrena" para poder predecir y simular de acuerdo a una cantidad de datos de entrada.

El programa para el algoritmo se programa en el lenguaje Python 3.6 utilizando el libro "Python for data Analysis" del autor Wes McKinney y el código se adjunta en el Anexo B.

Antes de comenzar a correr el modelo de red neural para predecir las estaciones se presenta un problema. No se pueden colocar datos vacíos o nulos en el algoritmo ya que se indefine y presenta un error en la consola. Para solucionar esto, se decide sustituir los valores diarios de las estaciones por los valores diarios de todas las estaciones. Esto podría conllevar que todas las estaciones posean un mismo comportamiento y los mismos datos, pero como el modelo calibra con todo el registro y la cantidad de datos faltantes no sobrepasa el 50%, se supone que no habrá mayor alteración en la calibración.

Al escoger la cantidad de neuronas se aplica el método de prueba y error, donde se comienza a utilizar en el modelo se comienza a procesar los datos con 100 neuronas y 500 iteraciones para calibrar y se comparan los datos generados con los reales. Con esta configuración prueba ser muy bajo para obtener datos precisos de manera diaria. Se realizan algunas pruebas más y se concluye que la mejor configuración es de 800 neuronas y 1200 a 1500 iteraciones ya que, con el uso de más neuronas e iteraciones, los resultados no mejoran considerablemente. Esta configuración requiere mucho poder computacional pero los resultados son bastante más precisos.

Después de cada corrida del algoritmo se completa la estación correspondiente y se actualizan los datos para que el algoritmo pueda mejorar la precisión.

3.2.2. Análisis de datos completados

Luego de procesar los datos completos se obtienen todas las cinco estaciones con los datos de precipitación completos. Los datos generales se muestran a continuación. El registro completo de las estaciones se encuentra en la base de datos del CIEDES-UCR.

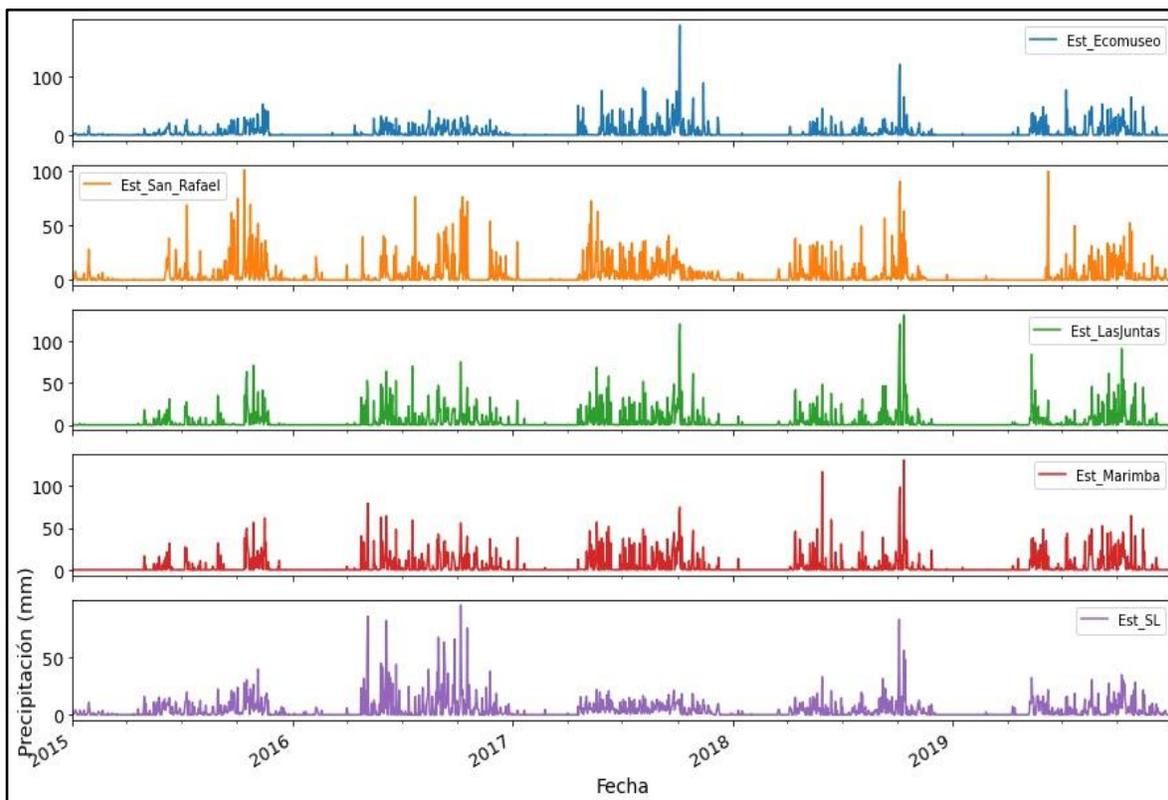


Figura 3-4. Gráfico de datos completos precipitación

Cuadro 3-2. Datos anuales de precipitación

Estación	Ecomuseo (mm)	Santa Lucia (mm)	Las Juntas (mm)	San Rafael (mm)	Marimba (mm)
2015	1372.9	1274.7	1045.0	1788.5	1032.0
2016	1536.8	2344.2	2074.2	1889.7	1928.9
2017	2586.9	1355.1	2068.7	2295.4	2059.6
2018	1285.7	1206.1	1660.2	1550.8	1623.9
2019	1804.8	1218.0	1573.3	1305.8	1805.0
Promedio	1717.4	1479.6	1684.3	1766.1	1689.9
Total	8587.0	7398.1	8421.4	8830.3	8449.3

De los datos del gráfico se puede observar que el 2015 presenta datos bajos para todas las estaciones y se considera un año seco; mientras que el 2017 presenta datos altos de precipitación lo cual puede indicar la afectación de fenómenos atmosféricos importantes en la cuenca de Abangares.

Es importante notar que puede haber ciertos errores dentro de los valores anuales como por ejemplo entre la estación de Las Juntas y la estación de Marimba que están cercanas y poseen valores muy distintos, pero lo que se busca es que el promedio interanual tenga sentido físico para asegurarnos que el modelo pueda generar una tendencia correcta del comportamiento de la precipitación en las cuencas.

A manera de validar los datos de manera confiable se utiliza el estudio realizado por Leslie Holdridge sobre las Zonas de Vida, las cuales, son franjas que delimita Holdridge utilizando criterios de elevación, temperatura biótica, humedad, evapotranspiración, precipitación y vegetación. Por lo tanto, se puede definir la cuenca de Abangares dentro de una de estas zonas de vida y comparar los datos de precipitación de la zona de vida con los obtenidos al completar las estaciones.

Utilizando la base de datos del Atlas de Costa Rica del ITCR se sabe que la cuenca de Abangares se encuentra dentro del clima "Bosque húmedo" y que posee precipitaciones promedio anuales de 2000 mm a 3000 mm. Si se comparan los promedios anuales de las estaciones con este rango de precipitaciones se puede observar que no se encuentra dentro del rango establecido por el estudio de Holdridge. Eso sí, según (Villalobos, 2018), la cuenca del Río Abangares proyecta a tener escenarios de menor precipitación y mayor temperatura debido al cambio climático. Sumado a esto el IMN reporta que, en los años 2014 a 2017, el país se encuentra bajo la influencia del fenómeno del niño que causa una disminución de las precipitaciones en la costa pacífica de Costa Rica. Con esta información en mente, si se considera que: el estudio de Holdridge es un estudio de la década de 1970 y la información no ha sido actualizada ni adaptada al cambio climático, que tres de los años de registro se encuentra bajo la influencia del fenómeno del niño y que según (Holdridge, 1982) un promedio interanual de precipitaciones es un registro largo de aproximadamente 30 años; se puede justificar que

el promedio anual de los datos se encuentre por debajo de lo establecido en el rango de la zona de vida.

3.2.3. Precipitación promedio de las cuencas de estudio

Para poder obtener el promedio de las cuencas de estudio se utiliza el método de Polígonos de Thiessen. Para obtener los porcentajes de área de la cuenca se utiliza el programa Qgis 3.10, el cual genera los polígonos de acuerdo con la ubicación de las estaciones a utilizar. Para esto se realiza un mapa con los polígonos de las cuencas de estudio, esto se puede observar en la Figura 3-2.

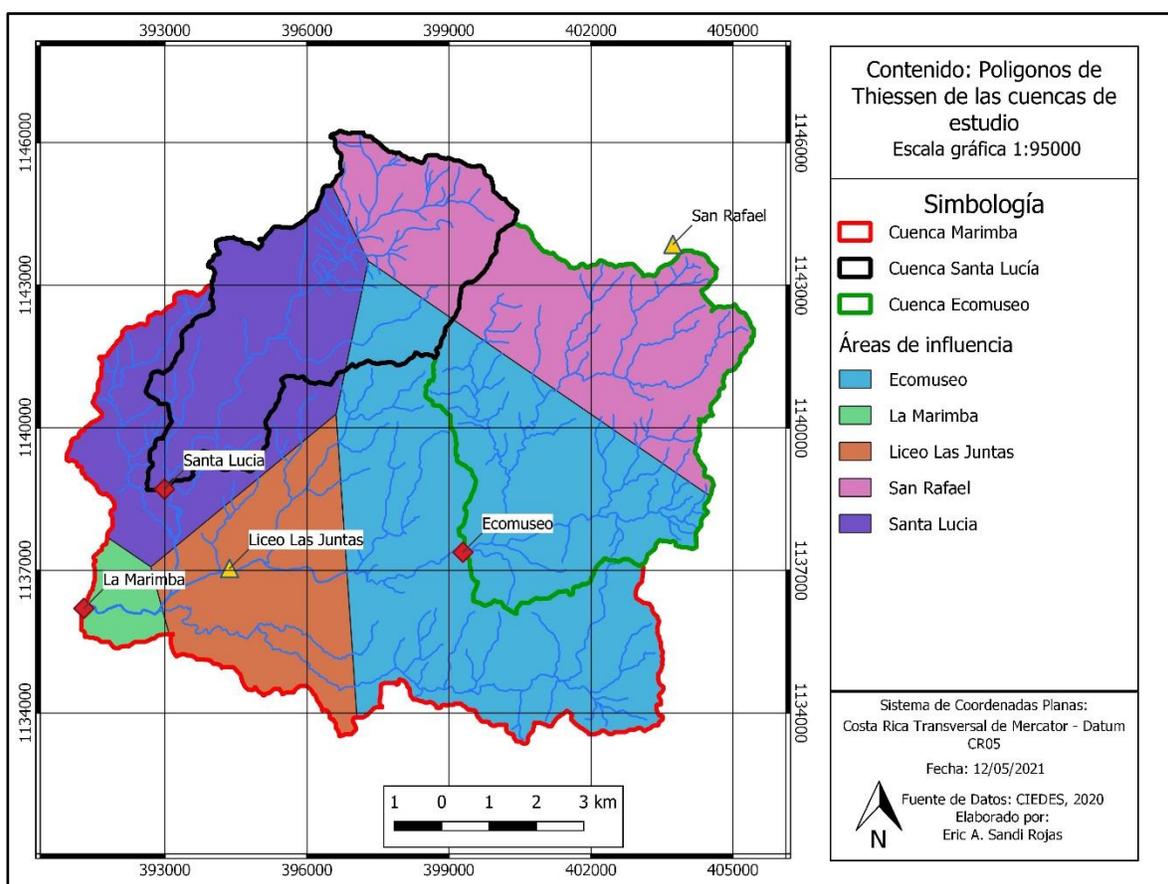


Figura 3-5. Polígonos de Thiessen de la cuenca de estudio

Cuadro 3-3. Pesos de cada estación para método de Thiessen

Estación	Cuencas		
	Marimba	Ecomuseo	Santa Lucía
Ecomuseo	41%	52%	11%
La Marimba	2%	0%	0%
San Rafael	22%	48%	32%
Santa Lucía	22%	0%	57%
Liceo Las Juntas	13%	0%	0%
Total	100%	100%	100%

Utilizando los pesos del Cuadro 3-3 y los datos diarios de precipitación de las estaciones se obtienen los siguientes resultados.

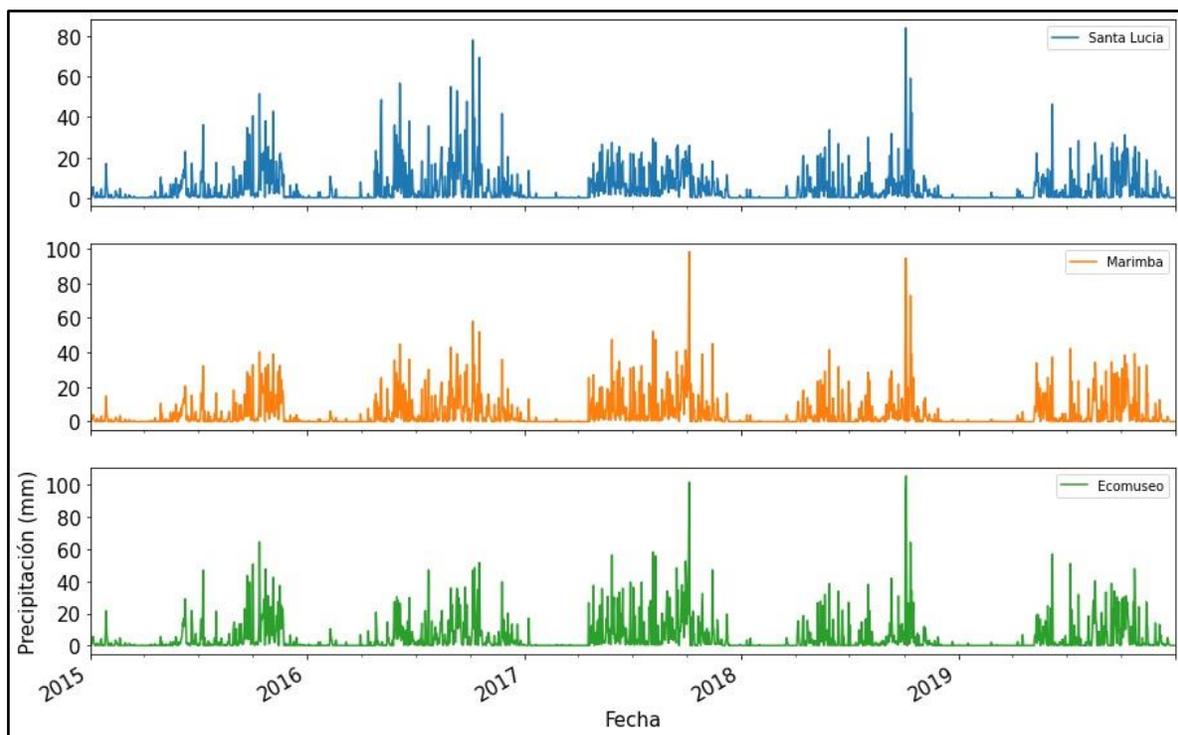


Figura 3-6. Datos de precipitación de las cuencas de estudio

Cuadro 3-4. Datos promedio anuales de las cuencas de estudio

Etiquetas de fila	Marimba (mm)	Ecomuseo (mm)	Santa Lucía (mm)
2015	1389.9	1574.3	1451.2
2016	1867.4	1707.8	2110.8
2017	2177.6	2445.4	1791.2
2018	1383.4	1414.2	1326.0
2019	1539.8	1562.9	1309.3
Promedio (mm)	1671.7	1741.0	1597.7

A manera de dar un mayor análisis a los datos de precipitación obtenidos para las cuencas se generan el mapa de las zonas de vida con las cuencas superpuestas presentado en la Figura 3-7.

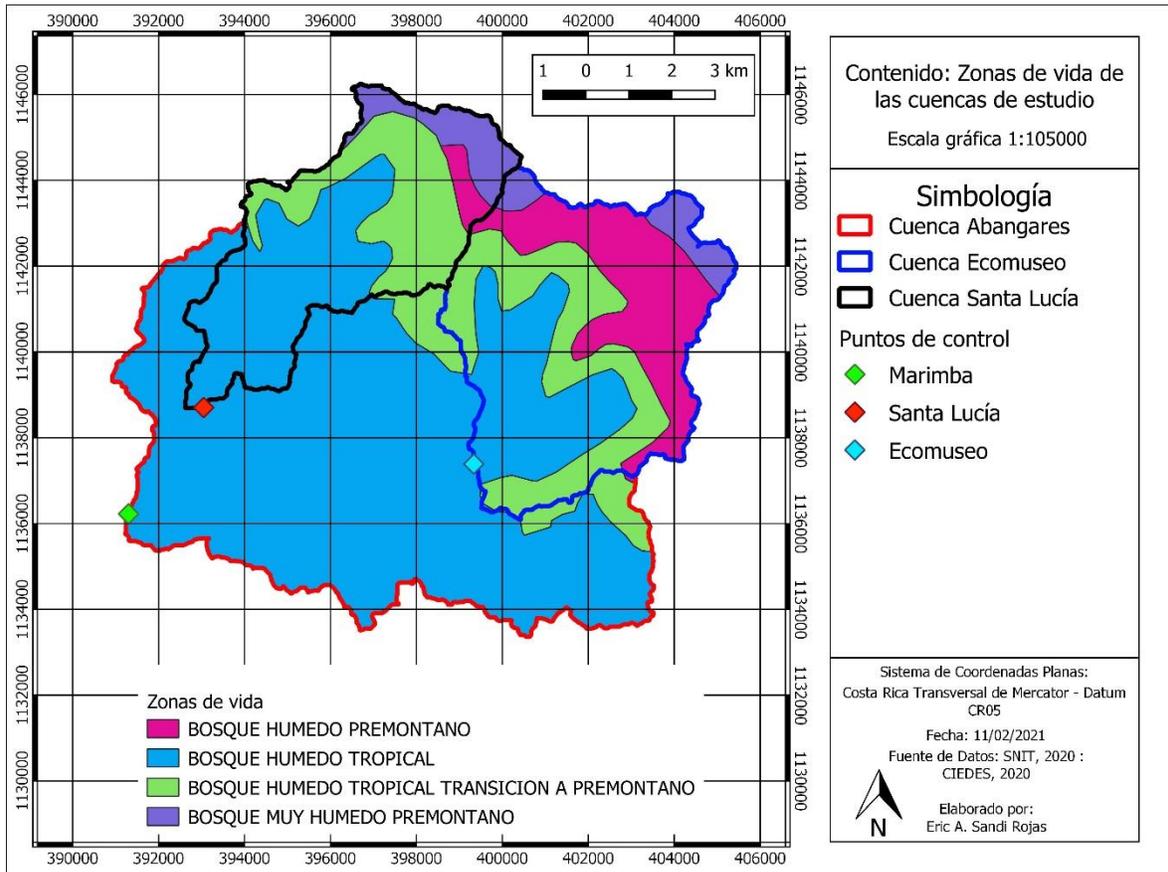


Figura 3-7. Mapa de zonas de vida de Holdridge

Del mapa de zonas de vida se puede observar que se encuentran dispersas en las tres cuencas por lo que ninguna cuenca coincide completamente con una zona de vida. De esta manera, los rangos de las precipitaciones de las cuencas pueden variar. Para ajustar estos rangos, se obtienen los porcentajes de área de cada zona de vida en las cuencas y se generan los valores promedio ponderados de los límites ajustándolos a la condición real.

Cuadro 3-5. Porcentaje de zonas de vida de Holdridge

Nombre	Precipitación (mm)	Marimba (%)	Ecomuseo (%)	Santa Lucía (%)
Bosque húmedo premontano	1000-2000	10%	32%	4%
Bosque húmedo tropical	2000-4000	65%	30%	50%
Bosque húmedo tropical transición a premontano	2000-4000	20%	31%	34%
Bosque muy húmedo premontano	2000-4000	5%	7%	12%

Utilizando los datos del Cuadro 3-5 se obtiene un rango de 1896 mm a 3791 mm en Marimba, 1677 mm a 3355 mm en Ecomuseo y de 1962 mm a 3925 mm en Santa Lucía por lo que los valores obtenidos al completar las series de datos se encuentran más cerca del rango de zona de vida, aun así, están por debajo de lo normal. Para poder explicar este fenómeno se brinda la misma hipótesis planteada para las series de las estaciones involucrando el fenómeno del Niño, el cambio climático y que el estudio de Holdridge se realizó hace más de 50 años.

Los datos promedio diarios de precipitación de cada una de las cuencas será introducido en el modelo SAC-SMA para lograr una calibración óptima. Por lo tanto, lo que se muestra en este apartado es un resumen de los datos diarios completos de las estaciones y cuencas que se encuentran disponibles en la base de datos del CIEDES – UCR.

3.3. Datos de temperatura

La temperatura en la cuenca de Marimba se determina utilizando registros de tres estaciones: San Rafael, Las Juntas y Campos de Oro. Estas estaciones son las únicas que miden la temperatura media, mínima y máxima de la cuenca. Sus ubicaciones se muestran en la Figura 3-8.

Analizando los datos de temperatura disponibles se puede observar que los registros de Las Juntas y Campos de Oro poseen un porcentaje de datos faltantes de 18% y 26% respectivamente, mientras que San Rafael solo posee un 9% de datos faltantes. Esto indica que de manera general se pueden utilizar los datos de San Rafael para completar las otras dos estaciones, especialmente Campos de Oro porque se encuentran, aproximadamente, a la misma elevación.

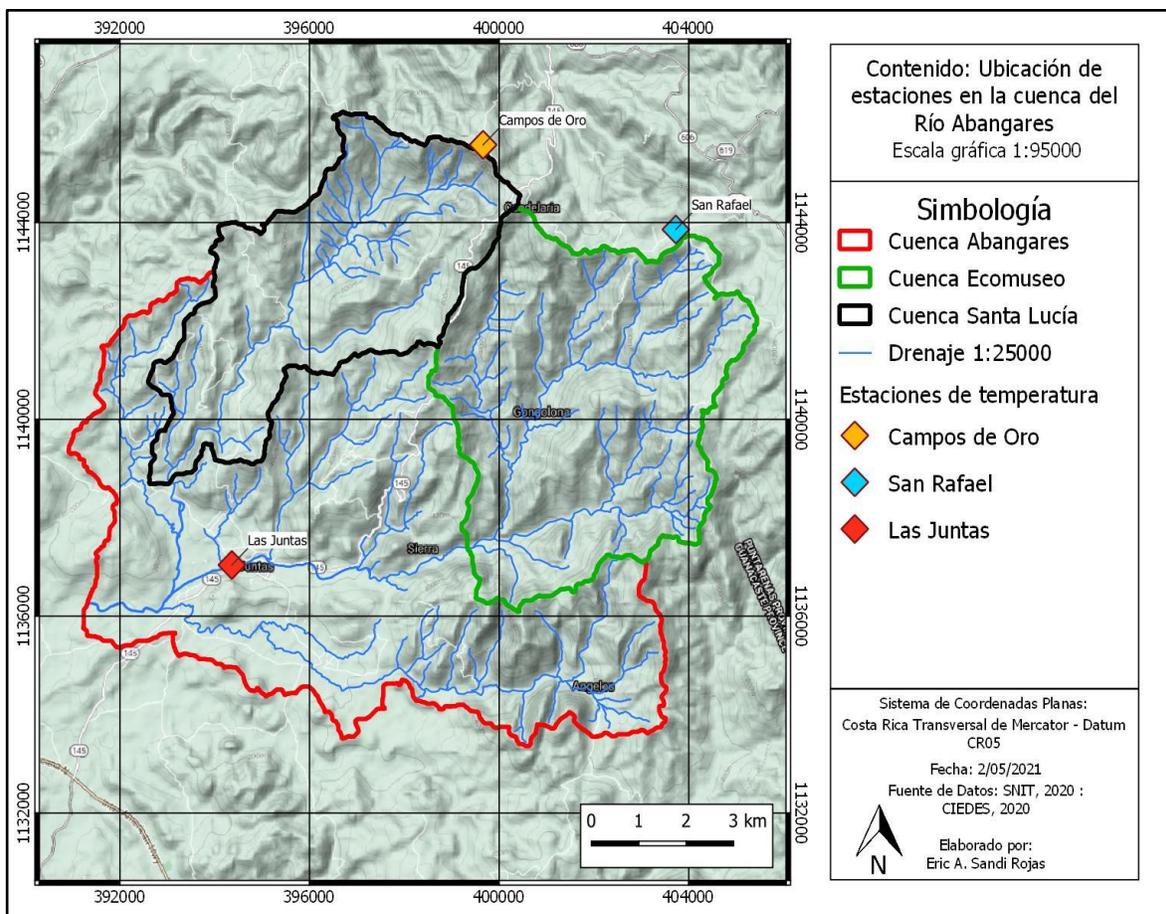


Figura 3-8. Mapa de ubicación de estaciones de temperatura

Para poder completar los registros de temperatura se buscan distintos métodos en la bibliografía incluso se intenta calibrar una red neuronal para los datos de temperatura, pero da resultados que no concuerdan con el registro original. Esto se debe a que no se puede calcular un promedio diario de las temperaturas de las distintas estaciones, porque varían considerablemente sus promedios. La estación de Las Juntas tiene una temperatura media promedio de 28 °C y las estaciones de Campos de Oro y San Rafael, poseen una temperatura media promedio de 20 °C, por lo que ajustar una red neuronal a este

promedio no funciona de la misma manera que funciona para precipitación, además, existen periodos en que ninguna estación tiene datos lo que provoca que la red diverja. Otra alternativa fue utilizar el valor promedio constante de la temperatura para los datos faltantes según su estación, pero esto hace que la red neuronal ajuste a una constante de y termine divergiendo de una solución viable.

Debido a que no se encuentra un método para completar efectivo, surge la idea de que las estaciones poseen una temperatura relativamente uniforme con una variación menor a 5 °C. Por lo que para el periodo 2015-2019 se utiliza un método matemático. Este consiste en obtener las sumas acumuladas de cada estación y graficarlas. Con esto se obtiene una regresión lineal precisa que permite completar los datos aplicando simple correlación. Es importante notar que este método sigue los mismos pasos que el método de doble masa aplicado a precipitación, pero en este caso se tiene el problema que el fundamento general físico de ese método es que la precipitación se puede acumular, lo cual, no aplica a la temperatura. Para poder aclarar cualquier confusión, se definen los siguientes puntos: 1. Este método es meramente matemático y gráfico. No posee ninguna implicación física de que la temperatura se pueda acumular. 2. Este método proviene del hecho de que la temperatura en las regiones tropicales es uniforme en el tiempo, por lo que no puede ser generalizado ni aplicado fuera de regiones que no se compruebe este tipo de comportamiento. 3. La regresión se debe ir ajustando para compensar por los cambios en la temperatura y su estacionalidad, ya que, sí hay variaciones, pero son pequeñas. A manera de ejemplo se muestra, en la Figura 3-9, un gráfico, su curva de regresión lineal y su parámetro R^2 .

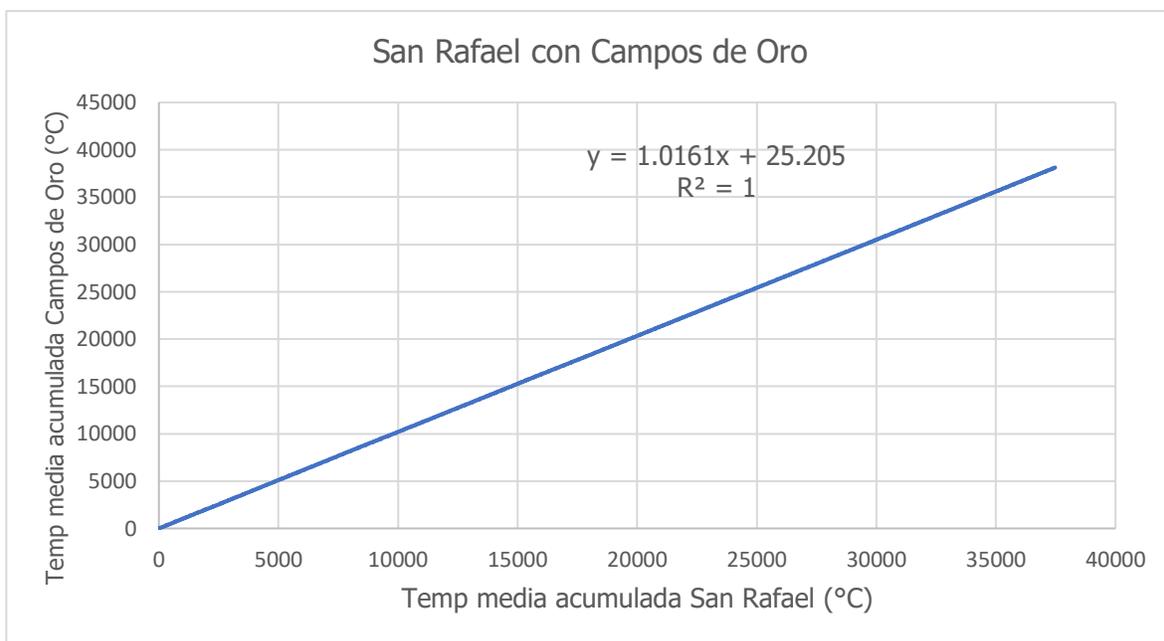


Figura 3-9. Gráfico de temperatura acumulada para San Rafael y Campos de Oro

Utilizando el método matemático se completan los registros de temperatura máxima, mínima y media de todas las estaciones, obteniendo los siguientes resultados.

Cuadro 3-6. Temperaturas anuales para las estaciones de Abangares.

Año	San Rafael			Campos de Oro			Las Juntas		
	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)
2015	21.2	25.9	18.4	20.7	25.9	18.5	28.1	36.1	23.1
2016	21.1	26.0	18.0	20.7	25.6	18.4	27.6	35.3	23.0
2017	20.7	25.6	17.6	20.5	25.1	18.2	27.2	34.9	22.7
2018	20.6	25.2	17.6	20.3	24.9	17.9	26.6	34.1	22.2
2019	20.8	25.7	17.9	20.4	25.4	18.2	27.1	34.1	22.1
Promedio	20.9	25.7	17.9	20.5	25.4	18.2	27.3	34.9	22.6

Para poder corroborar los datos se obtienen los promedios anuales para temperatura máxima, mínima y media del IMN y se comparan con los obtenidos de las estaciones. Estos resultados se muestran en el Cuadro 3-7.

Cuadro 3-7. Corroboración de datos de temperatura con datos del IMN

Dato	San Rafael			Campos de Oro			Las Juntas		
	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)
Promedio obtenido	20.8	25.6	17.9	20.5	25.4	18.2	27.3	34.9	22.6
Rango promedio IMN	20-22	24-26	16-18	20-22	26-28	18-20	26-28	>32	20-22
Cumple	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si

Fuente: (IMN, s.f)

Del Cuadro 3-7 se puede observar que solo el dato de temperatura máxima de Campos de Oro está por debajo del rango establecido por el IMN pero al estar cercano al valor mínimo se puede aceptar dentro de un rango de error.

3.3.1. Polígonos de Thiessen para obtener temperatura media de las cuencas.

Para poder calcular la temperatura media diaria de cada una de las cuencas se utiliza el método de los polígonos de Thiessen. Para esto se obtienen los polígonos y porcentajes de área en el programa Qgis 3.10. Se muestran los polígonos y porcentajes en la Figura 3-8 y Cuadro 3-8 respectivamente.

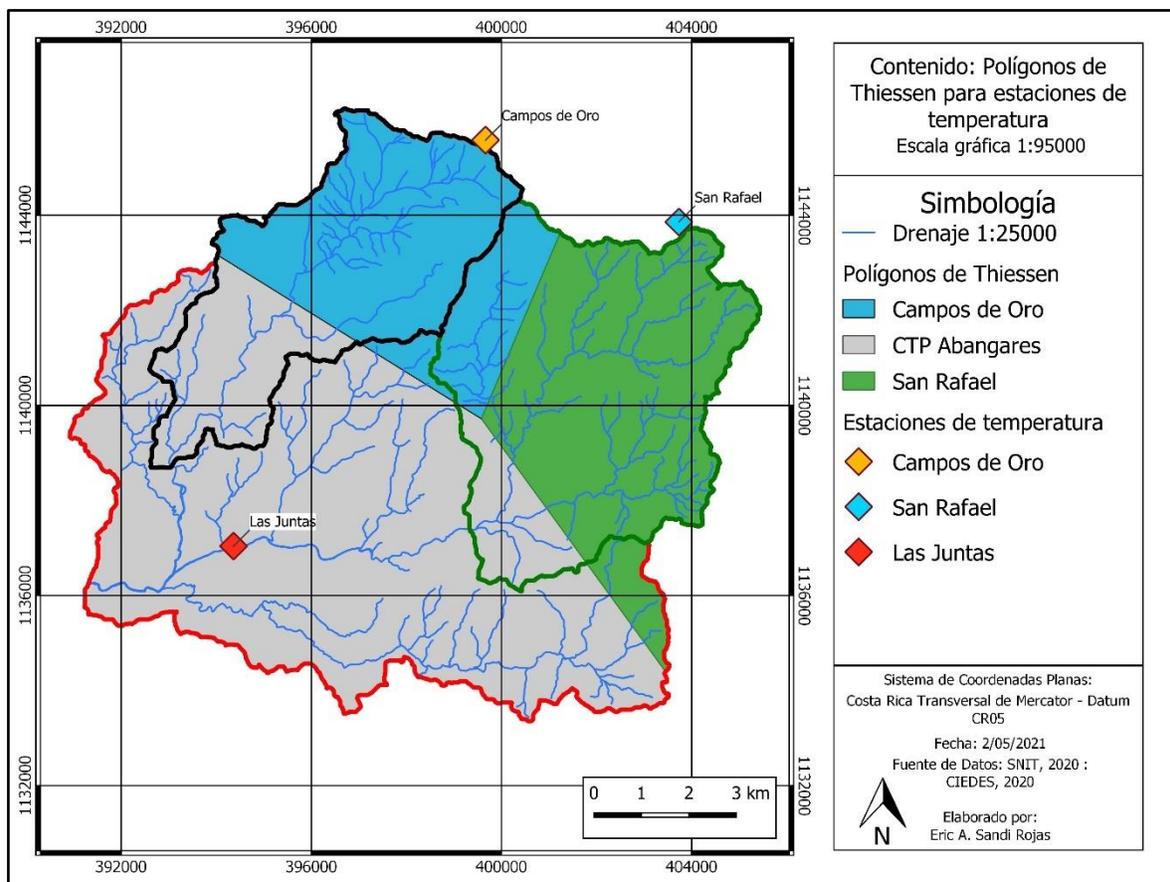


Figura 3-10. Polígonos de Thiessen para estaciones de temperatura

Cuadro 3-8. Pesos de áreas de temperatura.

Estación	Cuenca		
	Marimba	Ecomuseo	Santa Lucía
Las Juntas	57%	13%	34%
San Rafael	23%	71%	0%
Campos de Oro	20%	16%	66%

De los datos del Cuadro 3-8 se observa a simple vista que la cuenca de Marimba va a tener mayores temperaturas que las otras dos cuencas debido a que Marimba tiene un 57% del área de la estación Las Juntas que está a una elevación menor. Utilizando estos pesos para calcular las temperaturas de cada cuenca se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 3-9. Temperaturas anuales de las cuencas de estudio

Año	Marimba			Ecomuseo			Santa Lucía		
	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)	Temp media (°C)	Temp Máx (°C)	Temp Min (°C)
2015	25.1	31.7	21.1	22.0	27.2	19.0	23.3	29.3	20.0
2016	24.7	31.2	20.9	21.9	27.1	18.7	23.1	28.9	20.0
2017	24.3	30.8	20.6	21.5	26.7	18.4	22.7	28.5	19.7
2018	23.9	30.2	20.3	21.3	26.3	18.3	22.4	28.0	19.4
2019	24.3	30.4	20.3	21.6	26.7	18.5	22.7	28.3	19.5
Promedio	24.5	30.8	20.7	21.7	26.8	18.6	22.8	28.6	19.7

Los registros completos de las temperaturas de las cuencas y las estaciones se encuentran en el base de datos del CIEDES – UCR y pueden ser solicitados por cualquier persona que requiera el uso de estos.

3.4. Datos de evapotranspiración

Para poder calcular los datos de evapotranspiración del proyecto se utiliza el método de Hargreaves presentado en el apartado 1.6.7 del marco teórico, específicamente la ecuación [8]. El valor de R_0 se toma del cuadro de (Allen & Pereira, 2006) sabiendo que la cuenca de estudio se ubica a 10° de latitud.

Cuadro 3-10. Radiación Extraterrestre de acuerdo al mes del año para latitud 10°

Mes	Radiación (mm de agua evaporada/día)
Enero	13.0
Febrero	14.2
Marzo	15.1
Abril	15.5
Mayo	15.3
Junio	15.1
Julio	15.1
Agosto	15.3
Septiembre	15.1
Octubre	14.4
Noviembre	13.3
Diciembre	12.7

Fuente: (Allen & Pereira, 2006)

Utilizando los datos del Cuadro 3-10 y la ecuación [8] se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 3-11. Evapotranspiración potencial anual para cuencas de estudio

Año	Marimba (mm/día)	Ecomuseo (mm/día)	Santa Lucía (mm/día)
2015	1693.0	1379.5	1521.2
2016	1656.3	1397.6	1486.9
2017	1628.1	1376.1	1452.0
2018	1589.4	1342.1	1431.1
2019	1616.6	1365.3	1452.6
Promedio	1636.7	1372.1	1468.8

De los datos anuales se puede observar que la evapotranspiración se mantiene dentro de un rango pequeño de variación y que el año 2015 es el dato con mayor evapotranspiración. Esto coincide con que el 2015 es el año más seco del registro de las estaciones por lo que se puede verificar que los datos poseen la tendencia esperada.

A manera de verificar más los datos de evapotranspiración se comparan con los datos presentados en el mapa de EVTP del IMN que se muestra en la Figura 3-11. En este mapa se indica que la zona de Abangares, específicamente Las Juntas, posee una evapotranspiración promedio anual de 1600 mm a menos de 1700 mm, la zona de San

Rafael ronda entre los 1300 mm a 1400 mm anuales y la zona de Santa Lucía se encuentra en la zona de los 1400 mm a los 1500 mm por lo tanto se sabe que los datos se encuentran en un rango aceptable presentado por el IMN.

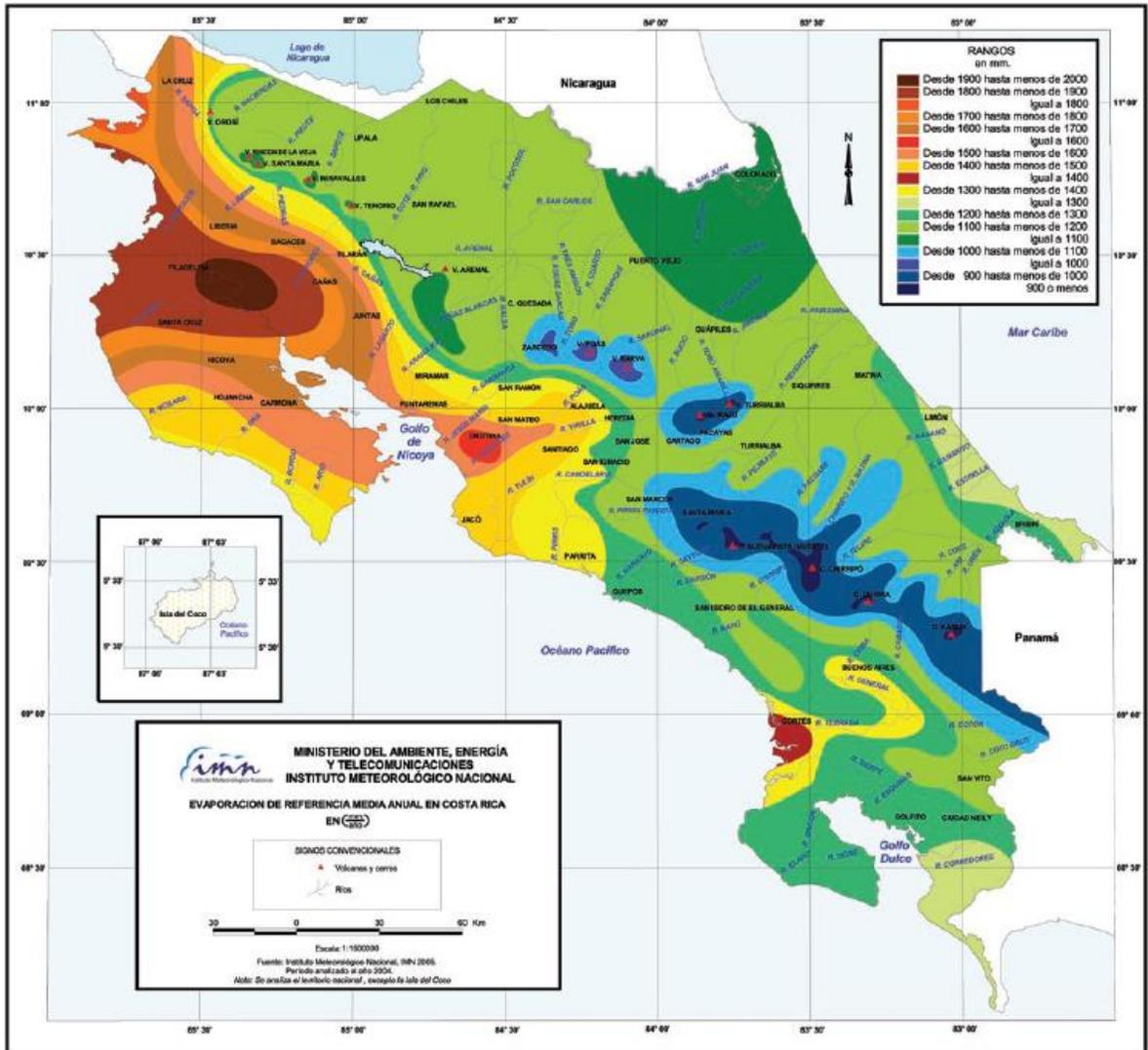


Figura 3-11. Mapa nacional de EVTP del IMN
 Fuente: (IMN,s.f)

3.5. Datos de caudal

Como se mencionó anteriormente solo se poseen datos de caudal de la estación fluviográfica de Marimba. Este registro es el más importante ya que es con el único que se puede verificar la calibración del modelo. El periodo que se tiene es de enero del 2015 hasta julio del 2017. En este periodo se encuentra el año 2015 que es el más seco del siglo y no se puede completar ya que no se tienen más registros de caudal. El hidrograma de la estación Marimba se muestra en la Figura 3-12.

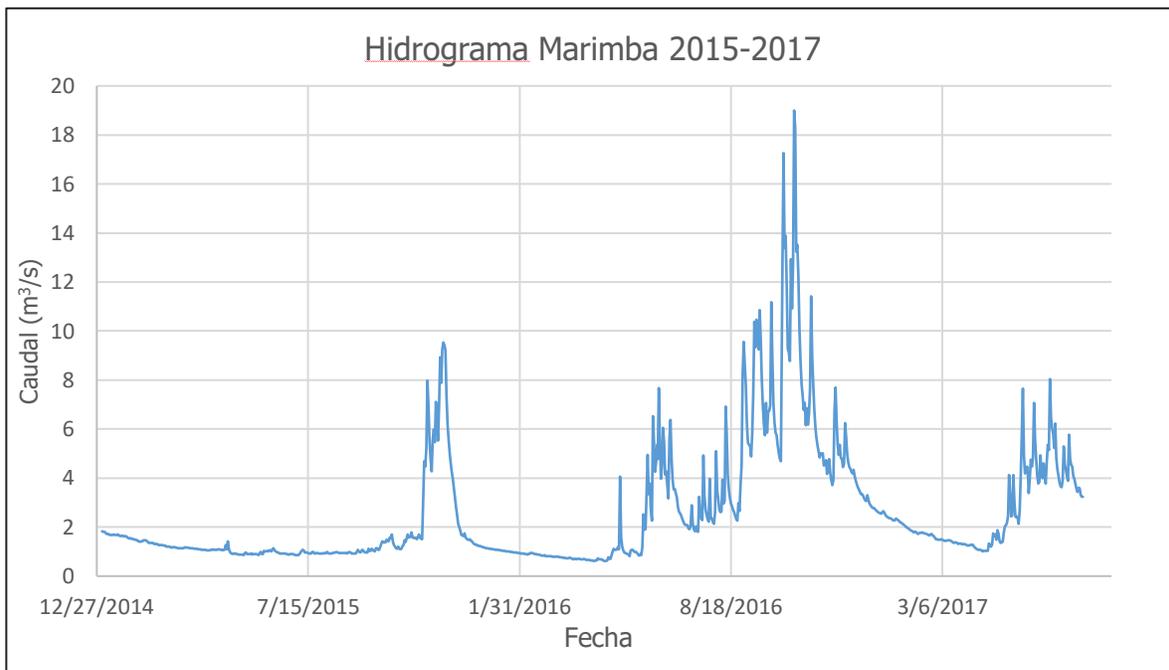


Figura 3-12. Hidrograma de la estación Marimba

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO SAC-SMA EN LA CUENCA DE MARIMBA

4.1. Aproximación inicial de parámetros

El modelo de balance hídrico de Sacramento o SAC-SMA, utiliza 16 parámetros distintos para calcular la esorrentía de una cuenca. De estos parámetros, se puede calcular una aproximación inicial a solo seis del total de los parámetros, siendo los demás, recomendación de una referencia bibliográfica o elegida a criterio del modelador. En este capítulo se presentan las 16 variables del modelo y sus aproximaciones iniciales u valores recomendados de bibliografía. Además, se presentan los resultados de cada iteración del modelo, así como su calibración final y se analizan su valor de Nash-Sutcliffe.

Para utilizar el modelo de manera más efectiva se utiliza la plataforma eWater Toolkit de uso público en Australia, que posee el programa de SAC-SMA incorporado. Por lo tanto, se obtiene ayuda del Ingeniero Gerardo Sandi Phd. de la Universidad de Newcastle, Australia, para mejorar el proceso de calibración y discutir posibles errores que puedan ocurrir durante las iteraciones. Cabe recalcar que la calibración del modelo se da utilizando tanto métodos manuales y computarizados para acelerar el tiempo de calibración y poder optimizar aún más la calibración del modelo utilizando las series de datos completadas en el capítulo 3.

Antes de presentar los parámetros, sus significados y aproximaciones iniciales se presenta el diagrama del modelo con todas sus ecuaciones en la Figura 4-1 se puede observar que las relaciones entre los parámetros son complejas pero su comprensión radica directamente en la definición específica de cada uno de los parámetros.

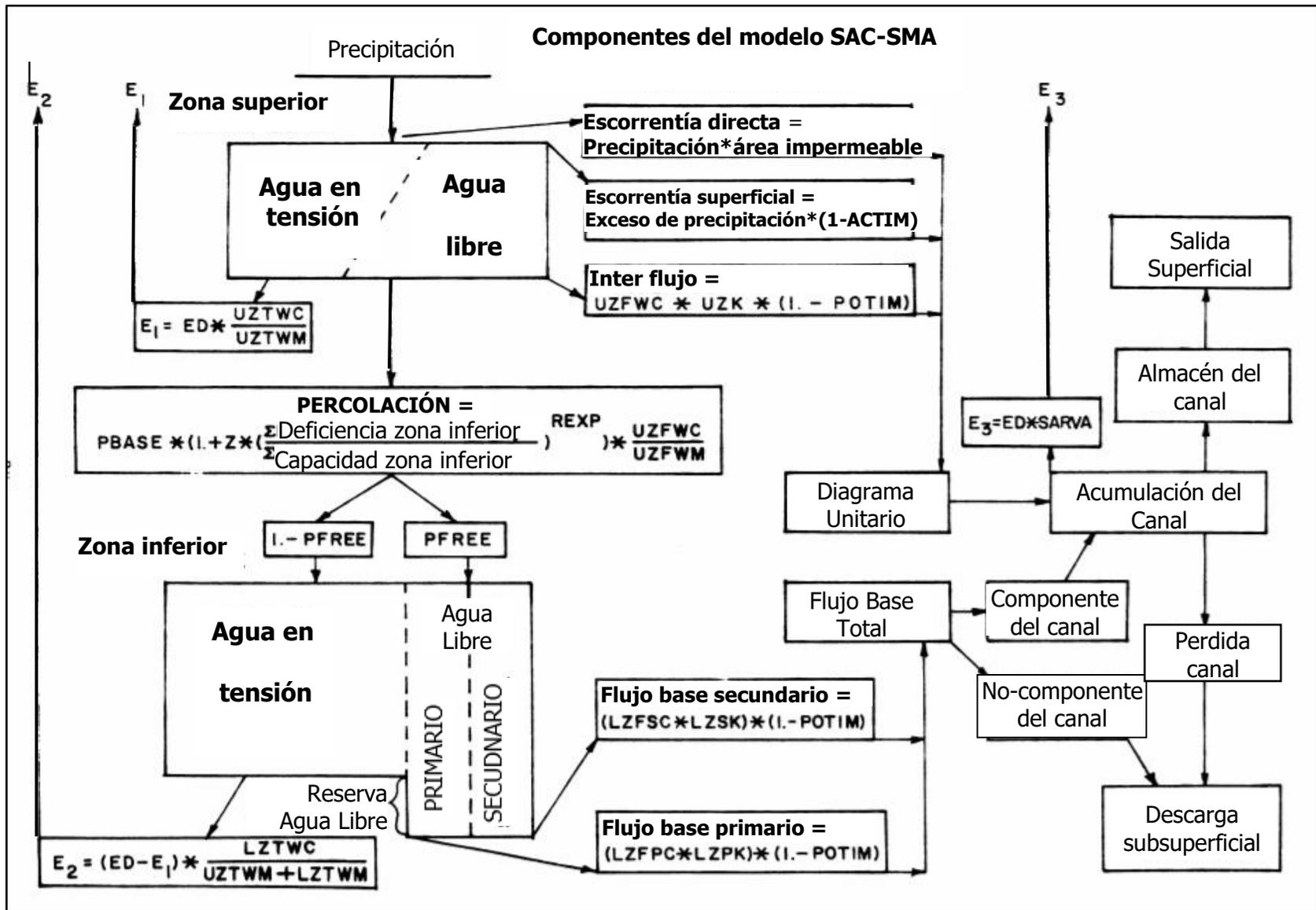


Figura 4-1. Diagrama de funcionamiento del modelo SAC-SMA
Fuente: (Burnash, Ferral, & McGuire, 1973) traducido por (Sandi, 2021)

4.1.1. Parámetro ADIMP

Este parámetro representa el porcentaje de área que toma características impermeables cuando se satisface el requerimiento de agua en tensión. Este parámetro depende de la saturación inicial del suelo. Este parámetro varía dependiendo de la cuenca ya que puede oscilar entre un 0% y un 10% (Oreamuno, 1979).

4.1.2. Parámetro PCTIM

El parámetro PCTIM se refiere a toda el área que está impermeabilizada ya sea por infraestructura u cuerpos de agua como lagos, ríos u manglares. Este parámetro se puede obtener de manera sencilla utilizando el programa de SIG Qgis 3.10 y se presentan en el capítulo 2. Para la cuenca de Marimba se tiene un 1.6% del área está impermeabilizada, en la cuenca de Santa Lucía un 0.2% y en la cuenca de Ecomuseo un 0%. Estos parámetros varían en el programa de acuerdo a la cuenca con que se esté trabajando.

4.1.3. Parámetros LZFSM, LZSK, LZFPM, LZPK

Estos parámetros representan el comportamiento de la zona secundaria inferior del modelo SAC-SMA, por lo tanto, sus características determinan el drenaje y flujo subsuperficial de la zona inferior.

LZFSM y LZFPM son los almacenamientos de agua libre de la zona secundaria y primaria inferior y determinan la cantidad de agua que drena de la zona inferior luego de cumplir con los requerimientos de agua en tensión. Los parámetros LZPK y LZSK son las tazas a las que drenan los almacenamientos mencionados. Estas dos tazas pueden ser distintas por lo que sus características pueden ser observadas en un hidrograma del río correspondiente. Si se analiza el comportamiento general de la cuenca se puede ver que incluso en el periodo seco de la cuenca existe agua en el cauce por lo que se puede esperar que uno de los almacenamientos sea grande y con una taza baja de drenaje.

Para poder determinar los valores de almacenamiento y las tazas del agua libre de la zona inferior se realiza una curva de recesión del hidrograma del periodo 2015 a 2017, de la estación Marimba. Este proceso es manual y depende de la precisión y el criterio del modelador de la cuenca para obtener las distintas pendientes de drenaje. El método a utilizar es el encontrado estudio de (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973) citado por (Oreamuno, 1979) y se presenta en la Figura 4-2.

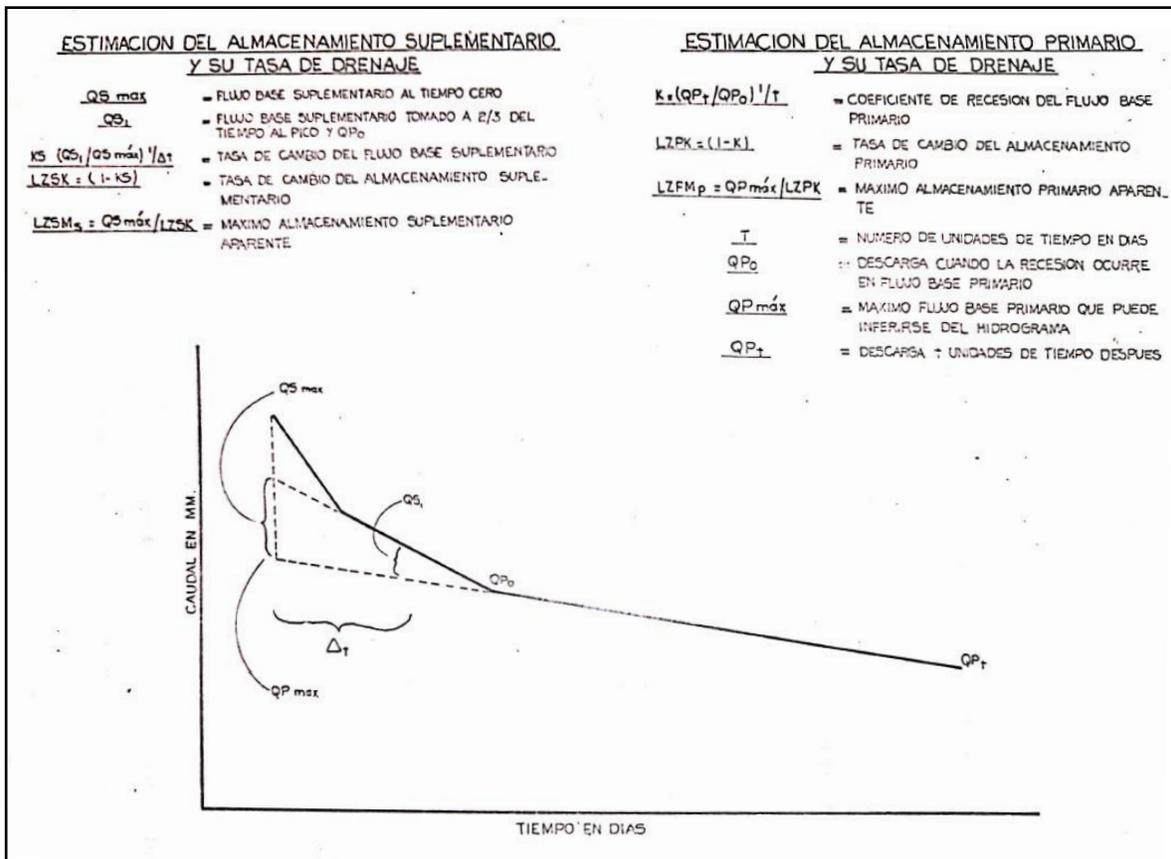


Figura 4-2. Método de cálculo de zonas inferiores de SAC-SMA
Fuente: (Oreamuno, 1979)

Como se mencionó anteriormente se pueden observar los distintos comportamientos de la recesión en el hidrograma y normalmente se encuentran tres pendientes. Estas se toman de los distintos periodos de recesión del hidrograma y se obtiene un promedio de las mismas, se combinan en una sola gráfica y se obtiene una curva general de recesión para el hidrograma del año 2016 de la cuenca de Marimba.

En la Figura 4-3 se observan los resultados de la curva de recesión combinada para Marimba. A partir de esta gráfica y utilizando el método de la Figura 4-2 se obtienen los resultados del Cuadro 4-1.

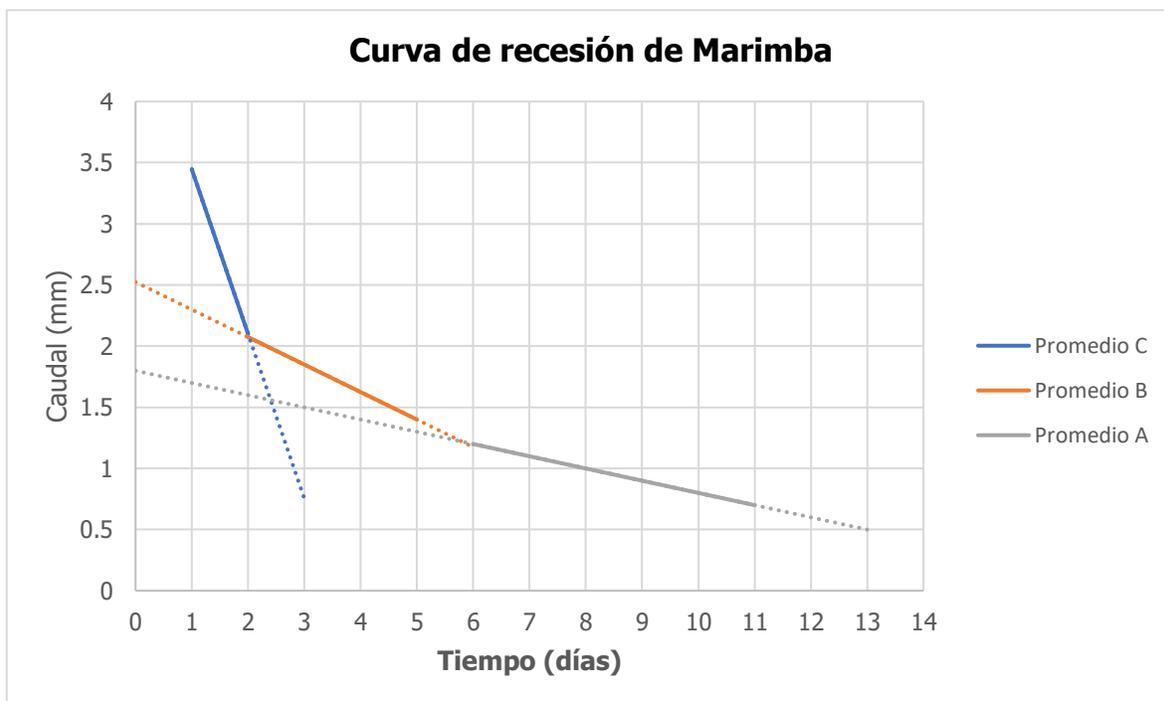


Figura 4-3. Curva de recesión combinada de Marimba

Cuadro 4-1. Datos de zona inferior del modelo SAC-SMA

Dato	Valor
QP0 (mm)	1.20
Qpmax (mm)	1.70
Qsmax (mm)	0.85
QS1 (mm)	0.35
QPt (mm)	0.70
KS	0.84
LZSK	0.16
LZSMs (mm)	5.29
K	0.95
LZPK	0.05
LZFMp (mm)	32.40

4.1.4. Parámetro UZTWM

El parámetro UZTWM representa el agua en tensión de la zona superior y a su vez el agua a llenar antes de que pase a los almacenamientos de agua libre. Esta agua representa el agua que se pierde por los fenómenos de evapotranspiración y encharcamiento. Dado que la evapotranspiración es menor que la precipitación se espera que este almacenamiento sea menor que el de agua libre.

Para calcular este parámetro es necesario utilizar un hidrograma que represente un año muy seco en el cual se hayan agotado los almacenamientos de agua en tensión y observar el volumen necesario para que ocurra escorrentía en exceso sobre la escorrentía directa.

En caso de que no se posea un hidrograma representativo de esta condición de puede utilizar un dato inicial entre los 25 mm a los 100 mm y ajustar en las posteriores corridas del modelo (Oreamuno, 1979).

4.1.5. Parámetro UZFWM

UZFWM controla la función de percolación del modelo. Se refiere al almacenamiento de agua libre de la zona superior y representa el volumen de agua que drena sub superficialmente y por escorrentía superficial.

Una aproximación inicial de este parámetro se puede calcular utilizando datos de suelos y correlaciones con valores de porosidad del suelo presentado por (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1977) y citados por (Koren, Smith, Wang, & Zhang, 2000). Dado que no se poseen datos tan específicos del suelo de la cuenca, no se puede calcular una aproximación del parámetro. Se puede utilizar un rango de 25 mm a 100 mm y se ajusta en posteriores corridas del modelo (Oreamuno, 1979).

4.1.6. Parámetro LZTWM

Este parámetro representa la capacidad de almacenamiento en tensión de la zona inferior. Representa un porcentaje de agua que se pierde por evapotranspiración y encharcamiento. Depende de distintas condiciones como la humedad del suelo y el tipo de suelo presente en la cuenca. Según (Oreamuno, 1979) si existe un periodo con una condición extrema de sequía en que se haya afectado el efecto de la transpiración de las

plantas se puede lograr una aproximación de este parámetro. En la tesis de (Argüello, 1992) utiliza los datos aproximados obtenidos por (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973) en el cual menciona que para vegetación con árboles de raíces superficiales y pasto, que puede ser atribuido a la mayoría de la cuenca de Marimba, posee valores que rondan los 762 mm por lo que se utiliza este valor como aproximación inicial y se le brinda un rango de 400 mm a 900 mm de almacenamiento.

4.1.7. Parámetro UZK

El parámetro UZK se refiere a la tasa de drenaje lateral de la zona de agua libre de la capa superior y es una razón entre el drenaje diario y el disponible de la capa. Existe una posibilidad de aproximar este valor considerando el estudio de (Terzaghi & Peck, 1955) que relaciona granulometría de los suelos con tasas de drenaje lateral del suelo. También del estudio de (Koren, Smith, Wang, & Zhang, 2000) se tiene la relación de la porosidad del suelo con las tasas de drenaje lateral del suelo. Dado que no se poseen estos datos no se puede aproximar este parámetro. Por lo tanto, se utiliza una aproximación inicial de 0.18 a 1 según (Oreamuno, 1979).

4.1.8. Parámetro ZPERC

El parámetro ZPERC representa el incremento de la percolación al pasar de un medio saturado a uno seco. No se puede aproximar este parámetro por lo tanto se utiliza un valor de 30 a 50 para iniciar, según (Oreamuno, 1979).

4.1.9. Parámetro REXP

Determina la tasa a la que la demanda de percolación cambia de la condición seca. Este parámetro está relacionado con los parámetros ZPERC y PBASE, esto significa que algún cambio hecho a alguno de estos parámetros altera a los otros dos parámetros. Según (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973) el parámetro REXP normalmente se encuentra entre 1 a 3 siendo 1.8 un buen punto inicial. Si se observan simulaciones del parámetro para REXP se obtienen curvas que se asemejan a las curvas obtenidas de pruebas de infiltración típicas y dependen primariamente del tipo de suelo que existe en la cuenca. Por lo tanto, si existen pruebas de infiltración de la cuenca se puede aproximar un valor basado en la forma de las curvas.

4.1.10. Parámetro PFREE

El parámetro PFREE determina el porcentaje de agua percolada que pasa directamente al almacenamiento libre de la capa inferior. No se puede hacer una aproximación inicial de este parámetro, pero su valor oscila entre 0 y 0.4 siendo 0.2 un buen valor inicial (Oreamuno, 1979).

4.1.11. Parámetro SSOUT

SSOUT se refiere al drenaje subsuperficial a lo largo del canal que debe que se necesita antes que ocurra escorrentía superficial. Este parámetro tiende a ser cero y en raras ocasiones sube a más de 0.2 m³/s (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973).

4.1.12. Parámetro RSERV

Este es el volumen de agua libre de la capa inferior que no está disponible para evaporación. Tiene muy baja sensibilidad por lo que su valor no genera mucho impacto en la calibración y normalmente oscila entre 0 y 0.4 siendo 0.3 el valor más común (Oreamuno, 1979).

4.1.13. Parámetro SIDE

El parámetro SIDE se refiere a la fracción de flujo base que no drena hacia el canal principal. Este parámetro está sujeto a la cantidad de pérdidas por flujo subterráneo que tenga la cuenca ya que, si hay muchas pérdidas, SIDE ronda el valor de cinco, pero si no hay mucha pérdida el valor es típicamente cero.

4.2. Calibración del modelo

La calibración de un modelo es un proceso que en el siglo XXI puede ser elaborado de manera sencilla con técnicas matemáticas y computacionales, pero, la comprensión y el análisis de la calibración recae completamente sobre el profesional encargado. Conocer los parámetros y comprender sus relaciones es vital para la correcta calibración, ya que, aunque un criterio como el de Nash Sutcliffe puede dar un buen indicio de la calidad de la calibración, puede que la calibración no posea sentido físico. Dicho esto, la calibración de este modelo se realiza en una combinación de calibración manual y automática utilizando el algoritmo de Rosenbrock de un solo inicio. Esto permite que la calibración sea hecha de manera más rigurosa controlando el resultado del modelo.

El área de la cuenca es uno de los parámetros de entrada más simples de obtener y su estimación se realiza en el Capítulo 2 de caracterización de la cuenca. Por lo tanto, este no se adjunta en este capítulo como un apartado específico.

4.2.1. Criterios de calidad

Parte de la calibración del modelo recae en su procesamiento matemático que debe ser evaluado con algún parámetro ya sea numérico o cualitativo. En el caso de la calibración del modelo SAC-SMA es común utilizar dos criterios. Uno es el criterio de Nash-Sutcliffe y el otro es el factor de correlación R^2 . Estos son vitales ya que en cada calibración se puede estimar el impacto del cambio de un parámetro en el comportamiento de los datos sin hacer un análisis exhaustivo cada vez que se corre el modelo. Dada la importancia de estos criterios se realiza una mención de estos antes de comenzar a presentar la información sobre la calibración.

4.2.1.1. Criterio de Nash-Sutcliffe

El criterio de Nash-Sutcliffe es la razón de la varianza de los datos simulados al cuadrado contra la varianza de los datos observados al cuadrado. Este parámetro es un porcentaje y su rango va de 0 a 1 siendo el valor unitario una calibración perfecta. (Coy, 2017). El criterio de Nash-Sutcliffe se presenta en la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Observado} - Q_i^{Simulado})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Observado} - Q_i^{Promedio})^2} \right] \quad [14]$$

Donde:

$Q_i^{Observado}$: Caudal observado el día i [m^3/s]

$Q_i^{Simulado}$: Caudal simulado el día i [m^3/s]

$Q_i^{Promedio}$: Caudal promedio del día i [m^3/s]

Además de conocer el comportamiento del criterio de Nash-Sutcliffe, se debe saber hasta qué punto se puede considerar un valor aceptable de este criterio. Esta consulta se realiza al asesor externo Ingeniero Gerardo Sandi. Phd a lo cual responde que esto depende de la cantidad de datos del modelo, pero en general un modelo con un criterio de Nash superior a 0.6 se considera bueno, uno que sobrepase el 0.8 es excelente. Por lo

tanto, se toma este criterio como el rango deseable para la calibración. Es importante recalcar que, aunque el criterio de Nash-Sutcliffe representa una medida cualitativa de la calidad de los resultados de la simulación, no reemplaza el criterio y pensamiento de la persona a cargo de analizar y procesar los resultados del modelo. Por lo que un aunque el criterio de Nash-Sutcliffe sea alto, se debe revisar que el comportamiento que posee el modelo con respecto a la cuenca sea el adecuado y represente de la mejor manera la realidad que intenta simular.

4.2.2. Calibración manual inicial del modelo

En este apartado se muestra los resultados de la calibración del modelo. Para esto, se utiliza de referencia el criterio de Nash-Sutcliffe hasta obtener una calibración mayor a 0.6. Luego de este punto se aplica el algoritmo de optimización de Rosenbrock para optimizar y calibrar el modelo. Como parte adicional de los cuadros con los datos de las corridas se presentan los gráficos de cada corrida en el Anexo C.

Cuadro 4-2. Primera corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
1	ADIMP	0.05	-	0.27	Se encuentra de los resultados que la curva de recesión no coincide con la observada ya que la observada es más 'brusca'. También, dado que los caudales estimados por el modelo están por debajo de los observados se debe aumentar el almacenamiento de la zona inferior. El valor de Pfree se debe aumentar ya que los picos de la zona creciente están por encima de los observado. El valor de UZFWM se aumenta para conocer su comportamiento. Gráfico en Figura C-1.
	LZFPM	33.84	-		
	LZFSM	7.704	-		
	LZPK	0.01	-		
	LZSK	0.089	-		
	LZTWM	732	-		
	PCTIM	0.05	Valor fijo		
	PFREE	0.3	-		
	REXP	1.8	-		
	RSERV	0	-		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	75	-		
	UZK	0.18	-		
	UZTWM	50	-		
ZPERC	45	-			

Cuadro 4-3. Segunda corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
2	ADIMP	0.05	0-1	0.45	La calibración está mejor que la anterior. Se encuentra que el valor del almacenamiento inferior debe variarse aún más, pero se va a mantener fijo para determinar otros valores. Se aumenta un poco más los valores de ZPERC, REXP y PFREE ya que impactaron de manera positiva la corrida anterior. Gráfico en Figura C-2.
	LZFPM	50	0-150		
	LZFSM	100	0-150		
	LZPK	0.01	0-1		
	LZSK	0.089	0-1		
	LZTWM	675.423	0-800		
	PCTIM	0.05	Valor fijo		
	PFREE	0.5	0-0.6		
	REXP	2.5	1 a 3		
	RSERV	0	0 - 0.4		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	100	25- 100		
	UZK	0.18	0 -0.4		
UZTWM	50	25-100			
ZPERC	50	30-50			

Cuadro 4-4. Tercera corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
3	ADIMP	0.05	0-1	0.51	Mejora el resultado del modelo, pero igual tiene algunas inconsistencias. La curva de recesión sigue sin ajustarse de manera correcta por lo que se aumenta ZPERC en la siguiente corrida. Se cambian los valores de agua libre inferior para conocer su impacto. Al ajustar de manera dinámica el valor de LZSK se ajusta mejor en cuanto menor sea. Esto indica que el almacenamiento inferior aporta más caudal en la estación seca ya que drena de manera lenta. Gráfico en Figura C-3.
	LZFPM	50	0-150		
	LZFSM	100	0-150		
	LZPK	0.5	0-1		
	LZSK	0.089	0-1		
	LZTWM	520	0-800		
	PCTIM	0.01	Valor fijo		
	PFREE	0.6	0-0.6		
	REXP	3	1 - 3		
	RSERV	0	0 - 0.4		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	100	25- 100		
	UZK	0.1	0 -0.4		
UZTWM	50	25-100			
ZPERC	60	30-70			

Cuadro 4-5. Cuarta corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
4	ADIMP	0.05	0-1	0.61	El valor del pico en el 2017 se dispara para reducirlo se aumenta el valor de almacenamiento superior en tensión para que haya más perdidas por EVTP. Además, el ajustar el valor de LZSK mejora de manera considerable el modelo. El valor del almacenamiento inferior se debe aumentar. El valor de Nash ya se encuentra en el valor aceptable para calibrar automáticamente por lo que se comienza a utilizar el algoritmo de Rosenbrock. Gráfico en Figura C-4.
	LZFPM	8	0-150		
	LZFSM	200	0-200		
	LZPK	0.6	0-1		
	LZSK	0.02	0-1		
	LZTWM	450	0-800		
	PCTIM	0.01	Valor fijo		
	PFREE	0.65	0-0.6		
	REXP	2.99	1 - 3		
	RSERV	0.05	0 - 0.4		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	250	25- 250		
	UZK	0.1	0 -0.4		
UZTWM	15	25-100			
ZPERC	80	30-70			

Cuadro 4-6. Quinta corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
5	ADIMP	0.0415	0-1	0.68	Utilizando el algoritmo se puede observar que muchos valores llegan al límite. Por lo que a estos se les amplía el rango de calibración especialmente ZPERC que se le da completa libertad para variar. Gráfico en Figura C-5.
	LZFPM	1.568	0-150		
	LZFSM	299.99	0-300		
	LZPK	0.742	0-1		
	LZSK	0.0246	0-1		
	LZTWM	330.256	0-800		
	PCTIM	0.01	Valor fijo		
	PFREE	0.6	0-0.6		
	REXP	3.85	1 - 4		
	RSERV	0.0874	0 - 0.4		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	250	25-250		
	UZK	0.1	0 -0.4		
UZTWM	12.45	0-100			
ZPERC	79.999	30-80			

Cuadro 4-7. Sexta corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
6	ADIMP	0.0425	0-1	0.78	De la calibración solo se observa que los parámetros de almacenamiento de la zona superior se encuentran en el límite y el valor de ZPERC sigue aumentando por encima de lo normal encontrado en la literatura. Se amplían los rangos de estos parámetros para conocer su verdadero límite. Gráfico en Figura C-6.
	LZFPM	1.612	0-150		
	LZFSM	334.24	0-400		
	LZPK	0.902	0-1		
	LZSK	0.0102	0-1		
	LZTWM	321.045	0-800		
	PCTIM	0.01	Valor fijo		
	PFREE	0.699	0-0.7		
	REXP	4	1 - 4		
	RSERV	0.1001	0 - 0.4		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	267.84	25-300		
	UZK	0.0687	0 -0.4		
UZTWM	10.24	0-100			
ZPERC	99.998	30-100			

Cuadro 4-8. Séptima corrida del modelo para cuenca Marimba

Corrida	Parámetros	Valor	Rango	Nash-Sutcliffe	Comentario
7	ADIMP	0.0481	0-1	0.90	Aumenta significativamente el valor del criterio de Nash para esta corrida. Ocurren dos situaciones fuera de lo normal. El valor de ZPERC alcanza un valor muy por encima del valor sugerido en la literatura por lo que se debe revisar en el análisis de resultados. El valor de REXP alcanza el límite de 4, esto también se debe revisar posteriormente. Se realizan iteraciones posteriores a esta pero el parámetro de Nash no aumenta significativamente por lo que se considera esta como la calibración final ya que presenta unos resultados aceptables.
	LZFPM	1.637	0-150		
	LZFSM	358.476	0-400		
	LZPK	0.995	0-1		
	LZSK	0.00853	0-1		
	LZTWM	297.0609	0-900		
	PCTIM	0.01	Valor fijo		
	PFREE	0.701	0-0.75		
	REXP	4	1 - 4		
	RSERV	0.1092	Valor fijo		
	SARVA	0	Valor fijo		
	SIDE	0	Valor fijo		
	SSOUT	0	Valor fijo		
	UZFWM	270.547	25-400		
	UZK	0.0814	0 -0.4		
UZTWM	5.276	0-150			
ZPERC	224.562	30-250			

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. Resultados de la calibración

Parte del análisis de resultados se refiere a comprobar la veracidad de la calibración que se realiza para la cuenca de Marimba que luego se utiliza para calcular las cuencas de Santa Lucía y Ecomuseo suponiendo que la calibración se mantiene entre cuencas.

La calibración final de la cuenca de Marimba se muestra en el Cuadro 5-1. Se puede observar que los parámetros en general se mantienen dentro del rango esperado de la aproximación inicial según (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973). Pero los parámetros: PFREE, REXP, UZK y ZPERC se alejan mucho de la estimación inicial obtenida para estos, por lo tanto, se da principal atención a estos parámetros. Los parámetros que involucran almacenamientos no se analizan, aunque se salen de los márgenes establecidos en la bibliografía, se consideran parámetros que dependen de la cuenca en específico. Lo que sí se puede mencionar es que el almacenamiento de la zona inferior está por encima del almacenamiento de la zona superior, esto indica que hay una mayor cantidad de agua que escurre por drenaje de la zona inferior que la superior.

Cuadro 5-1. Resultados finales de calibración del modelo para cuenca Marimba

Parámetros	Valor
ADIMP	0.0481
LZFPM	1.637
LZFSM	358.476
LZPK	0.995
LZSK	0.00853
LZTWM	297.0609
PCTIM	0.01
PFREE	0.701
REXP	4
RSERV	0.1092
SARVA	0
SIDE	0
SSOUT	0
UZFWM	270.547
UZK	0.0814
UZTWM	5.276
ZPERC	224.562

5.1.1. Calibración de ZPERC y REXP

Parte de la veracidad de estos dos parámetros recae en la búsqueda de una explicación física a su comportamiento atípico, más que buscar una explicación matemática.

Como definición, estos dos parámetros controlan una cosa en común, y eso es la percolación. El parámetro ZPERC representa el cambio en la percolación con el cambio de estación seca a lluviosa. Que, si se observan los datos de precipitación de la cuenca en la Figura 3-6, se tiene una estación seca muy marcada. Esto significa que en cuestión de una semana se pasa de tener una condición muy húmeda a una severamente seca. En consecuencia, esto genera una curva de recesión con mucha curvatura lo cual solo puede ser ajustado en el modelo aumentando el parámetro ZPERC o el parámetro REXP. Esto quiere decir que para una condición específica como la encontrada en esta parte de Costa Rica es justificable que un modelo como este se pueda salir tanto de un rango establecido en cuencas con comportamientos "normales" de zonas no cercanas al trópico. Si se analizan calibraciones hechas en Costa Rica, muchas de estas poseen valores de ZPERC y REXP más cercanos a la bibliografía. Pero, estas cuencas son de mayor tamaño a la de este proyecto, véase cuenca del río Térraba (Oreamuno, 1979) y cuenca del río Virilla (Argüello, 1992), los registros no coinciden en el tiempo de estudio de este proyecto y las condiciones son distintas como que la cuenca del río Virilla posee 26.30% de área impermeable en el 1992, hace que no se puedan comparar las calibraciones o generalizarlas de manera correcta.

Como parte de demostrar a que se refiere cuando se menciona una recesión muy marcada o con mucha curvatura se presenta el ejemplo mostrado en el estudio de (Burnash, Ferral, & McGuire, 1973) donde ajusta una curva de percolación para distintos valores de REXP.

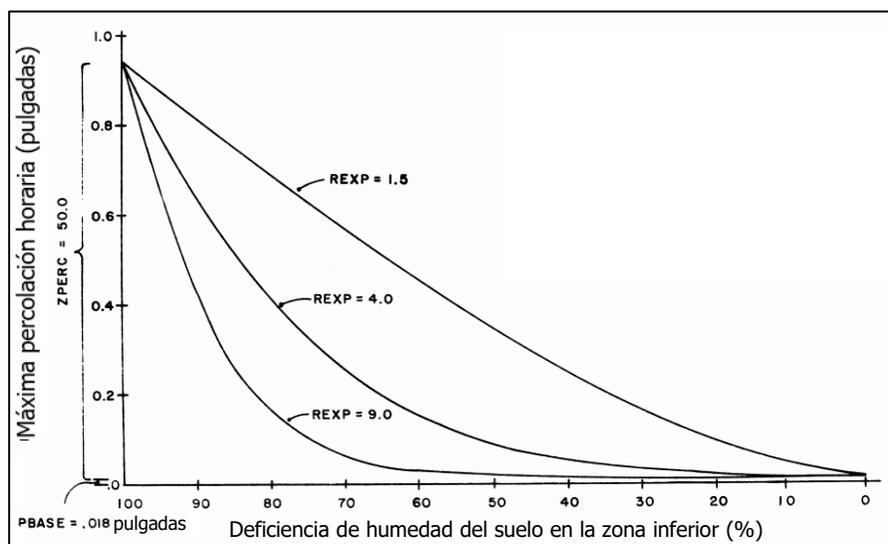


Figura 5-1. Cambio de curva de percolación por aumento de REXP
Fuente: (Burnash, Ferral, & McGuire , 1973) traducida por (Sandi, 2021)

5.1.2. Calibración de UZK

Si se analiza los resultados de los almacenamientos de agua libre y en tensión de la zona superior e inferior, se puede apreciar que el almacenamiento inferior es mucho mayor, debido al alto PFREE, ZPERC y REXP, por lo que, si se considera que UZK, siendo la capacidad de drenaje lateral de la zona superior, coincide que sea pequeño ya que los almacenamientos y el drenaje de la zona superior es pequeño. De esta manera se justifica que el valor sea menor al rango establecido inicialmente.

5.1.3. Calibración de PFREE

Del apartado 2 sobre caracterización de las cuencas, se sabe que la cuenca de Marimba se compone principalmente de suelos alfisoles, molisoles y Ultisoles, los cuales, según la información del Cuadro A-1, poseen un drenaje alto. Esto quiere decir que existe una buena cantidad de agua que escurre al cauce por flujo subsuperficial primario y secundario y requiere de una alta tasa de drenaje para funcionar. Esto coincide con la idea de que el 70% del agua percolada pasa al agua libre en la zona inferior.

5.2. Resultados de caudal simulado del modelo

De los datos obtenidos a partir de la calibración del modelo SAC-SMA de la cuenca se debe comparar las estadísticas de las series de tiempo con series de tiempo observadas para comprobar la veracidad de estos. Parte del análisis involucra la explicación de

comportamientos anómalos en la serie de tiempo que pueden hacer perder la confianza que se posee en la calibración del modelo.

Existen estudios referentes a la transferencia de parámetros a otras cuencas vecinas siendo uno de los más notables el de (Hogue, Yilmaz, Wagener, & Gupta , 2006) que comparan dos métodos para obtener una calibración de una cuenca que no posee datos de esorrentía. Uno de los métodos involucra obtener parámetros con el método de (Koren, Smith, Wang, & Zhang, 2000) mediante parámetros del suelo y el otro involucra la calibración de dos cuencas vecinas y asignar el promedio de la calibración a la cuenca sin medición de caudal. Sobre este último se menciona que, aunque el resultado haya dado similar a utilizar el método con parámetros de suelos, no está por encima de una calibración específica para cada cuenca. Parte de este análisis es para tomar en consideración que en el presente estudio se supone de manera teórica que las cuencas comparten de manera efectiva características similares de suelo, precipitación, uso de suelo, etc... y a partir de esto se realiza el cálculo de las cuencas Santa Lucía y Ecomuseo utilizando la calibración de Marimba.

El modelo SAC-SMA supone que la cuenca se encuentra en una condición seca normal por lo que, si se simula el periodo deseado, los primeros meses los valores de caudal van a ser más bajos de lo normal. Para solucionar esto se puede colocar un año de registro anterior al periodo de estudio o bien utilizar un registro sintético basado en promedios diarios como sugiere el asesor Alberto Serrano.

5.2.1. Resultados de caudal Marimba

Sobre la cuenca Marimba es que se realiza la calibración específica y posee un registro más completo de datos de caudal (solo el periodo 2015-2017) pero permite optimizar la calibración a un punto deseable. Los resultados de caudal se presentan a continuación.



Figura 5-2. Hidrograma simulado y observado de Marimba

Del gráfico de la Figura 5-2 se hace evidente que para el periodo que se posee registro de datos el modelo logra simular de manera bastante acertada el comportamiento de la cuenca y surgen dos puntos en los que ocurren anomalías que se deben explicar. La primera corresponde al periodo 2015 en el cual el modelo no logra simular de manera precisa el comportamiento de un año tan seco. Dado que este periodo es un año muy atípico y para un año normal como el 2016 el modelo logra simular de manera muy efectiva el hidrograma, se le permite ese margen de error al modelo. Además, se debe recordar que bajo ninguna circunstancia se va a poder simular al 100% todos los comportamientos de la cuenca con un modelo sin importar la certeza de los datos o la eficacia del modelo. Lo que se busca es aproximar un comportamiento normal que podría sufrir la cuenca y en eso el modelo es exitoso. El segundo problema es el pico de caudal que ocurre en octubre 2017 que sobrepasa los demás valores. En el 2017, exactamente en ese periodo, Costa Rica es afectada por el huracán, grado 1, Nate que genera inundaciones y afectaciones a todo lo largo del país. La Zona Norte, específicamente, sufre

fuertes inundaciones y precipitaciones largas que generan el aumento de caudales en muchas cuencas. (CNE, 2018) Por lo tanto, dada la afectación que sufre el país durante este periodo, es entendible que el modelo simule esta condición en la cuenca. Lastimosamente no se poseen registros de este evento entonces no se puede comparar el dato observado contra el simulado por el modelo SAC-SMA.

Se elabora la estadística descriptiva de los datos simulados y observados para los periodos hidrológicos mayo 2015 a mayo 2016 y mayo 2016 a mayo 2017. Estos se presentan en el Cuadro 5-2 y Cuadro 5-3 respectivamente.

De los datos se puede observar que la mayoría de los parámetros estadísticos poseen cierta similitud, que, para una calibración de un modelo de balance hídrico diario con tanta dispersión, es lo normal. La media en el caso del periodo mayo 2015 a mayo 2016 es un poco diferente al igual que la variancia y coeficiente de Curtosis. Este comportamiento es esperado de este periodo dado que a como se observó en el hidrograma, es el periodo más atípico y es una condición complicada de simular a la par de otros años que representan una condición media de la cuenca.

En el periodo mayo 2016 a mayo 2017 se aprecia que la estadística es un poco mejor con valores similares entre las dos series de tiempo. Esto implica que el ajuste del modelo ante una condición media es mejor que para condiciones atípicas y logra simular de manera efectiva el comportamiento de la cuenca.

Cuadro 5-2. Estadística descriptiva para Marimba en periodo mayo 2015 a mayo 2016

Dato estadístico	Observado	Simulado
Media	1.91	1.45
Error típico	0.11	0.08
Mediana	1.09	0.96
Moda	No hay	0.92
Desviación estándar	2.09	1.53
Varianza de la muestra	4.38	2.35
Curtosis	4.89	12.27
Coefficiente de asimetría	2.26	3.50
Rango	10.62	8.90
Mínimo	0.09	0.62
Máximo	10.71	9.52
Suma	698.21	529.13
Cuenta	365	365
Nivel de confianza (95.0%)	0.22	0.16

Cuadro 5-3. Estadística descriptiva para Marimba en periodo mayo 2016 a mayo 2017

Dato estadístico	Observado	Simulado
Media	3.44	3.83
Error típico	0.15	0.16
Mediana	2.40	2.67
Moda	No hay	1.46
Desviación estándar	2.82	3.05
Varianza de la muestra	7.94	9.31
Curtosis	2.77	4.37
Coefficiente de asimetría	1.73	1.88
Rango	13.82	18.17
Mínimo	0.84	0.82
Máximo	14.66	19.00
Suma	1251.21	1394.41
Cuenta	364	364
Nivel de confianza (95.0%)	0.29	0.31

5.2.2. Resultados de cuenca Ecomuseo

Para la cuenca de Ecomuseo se supone que la calibración de Marimba es similar a Ecomuseo por compartir características físicas y meteorológicas. El único parámetro que se cambia es el de área impermeable y el área total de la cuenca. El hidrograma generado se muestra en la Figura 5-3.

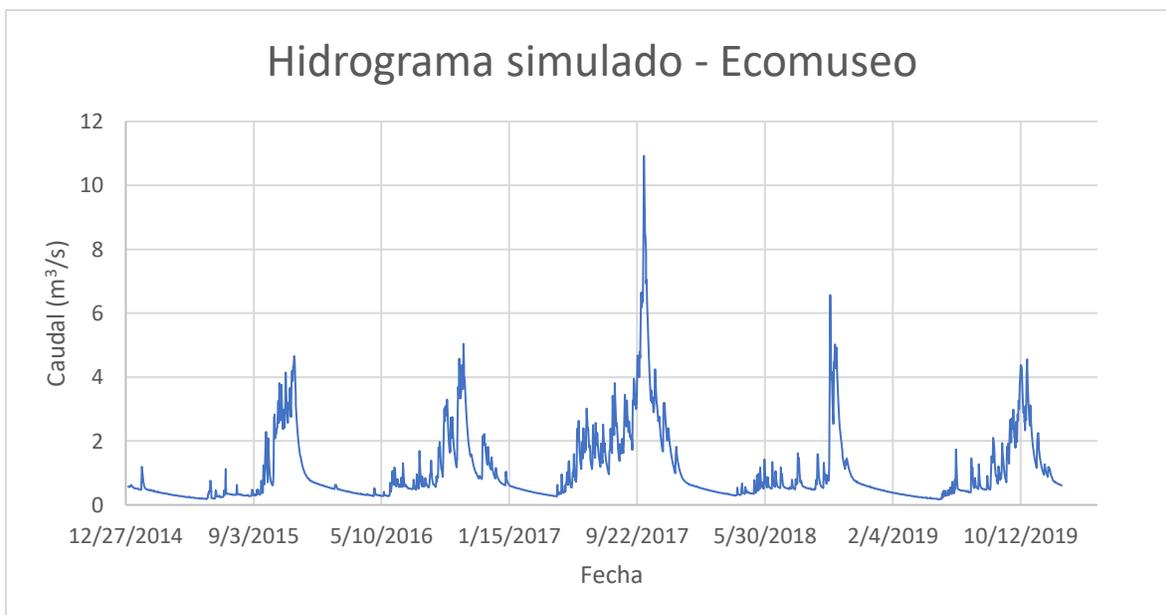


Figura 5-3. Hidrograma simulado de la cuenca Ecomuseo

Se puede observar que existe un comportamiento similar al de la cuenca de Marimba, pero en menor escala debido al área de la cuenca. Es importante notar que en el 2017 el registro coincide con el pico del huracán Nate que se registra en el hidrograma de Marimba.

5.2.3. Resultados de cuenca Santa Lucía

Al igual que los resultados de la cuenca de Ecomuseo se supone que Santa Lucía comparte características físicas y geológicas similares a la cuenca de Marimba. A partir de esta suposición se simula el hidrograma de Santa Lucía cambiando solo el área total e impermeable de la calibración.

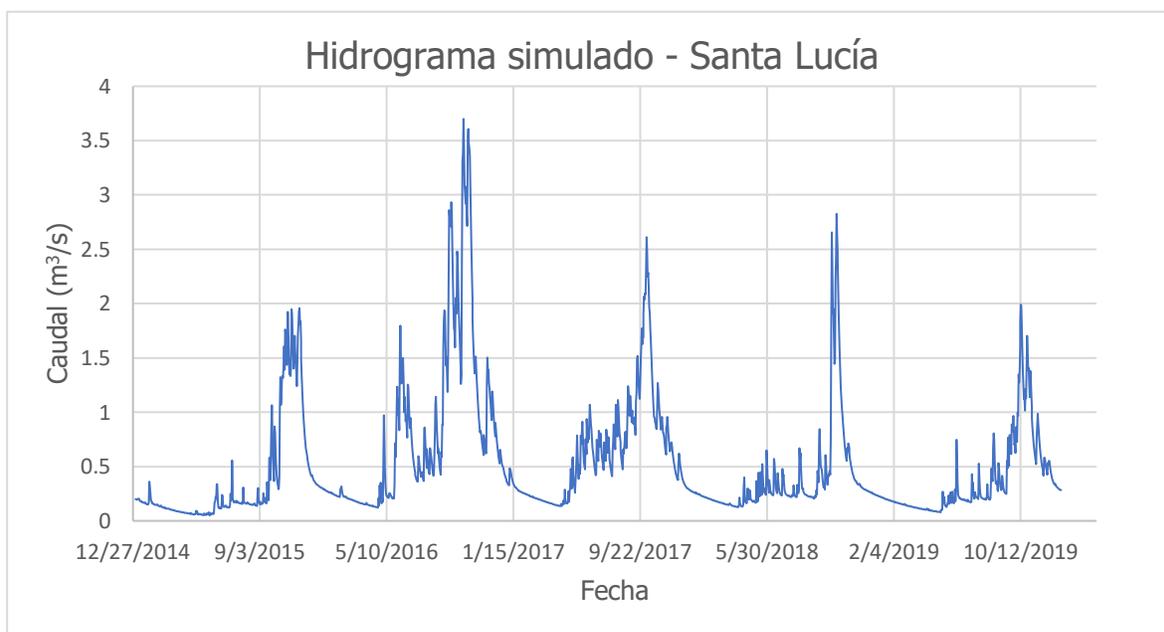


Figura 5-4. Hidrograma simulado de la cuenca Santa Lucía

En la Figura 5-4 se muestran los resultados de la simulación de la cuenca de Santa Lucía. Existe una disminución en la escala de los caudales, teniendo un caudal máximo menor a 3 m³/s. También, en el 2017 no se muestra tan resaltado el efecto del huracán Nate que si se muestra en las otras dos cuencas por lo que se puede inferir que la cuenca Santa Lucía posee el menor drenaje en condiciones extremas de tormenta y que el mayor aporte de escorrentía a la cuenca de Marimba es la cuenca de Ecomuseo.

5.3. Resumen de resultados de las tres cuencas de estudio

A manera de conocer las relaciones existentes entre la cuenca de Marimba y sus dos subcuencas: Santa Lucía y Ecomuseo, se realiza la gráfica combinada de los tres hidrogramas simulados.

En la Figura 5-6 se muestra el gráfico de los tres hidrogramas combinados. En este se puede observar que los tres presentan un comportamiento similar ante los picos de caudal generados y también que en todos los casos la cuenca que menos aporta al caudal de Marimba es la de Santa Lucía. Esto es consistente con la idea de que la cuenca con menor área posee una menor escorrentía.

Si se aplica la idea de balance de masas, se puede obtener un hidrograma de la parte de la cuenca que no se evalúa en este proyecto. Para obtenerlo solo se restan los caudales de Santa Lucía y Ecomuseo al registro de Marimba. Este hidrograma se muestra en la Figura 5-5. Se puede observar que sigue el mismo patrón que los demás hidrogramas pero que su aporte es alto comparado con las cuencas de Ecomuseo y Santa Lucía. Calculando el promedio del peso que representa esta cuenca para la cuenca de Marimba se obtiene un 48% con una máxima de 65%, lo que significa que su aporte es significativo dentro de los resultados de caudal de Marimba.

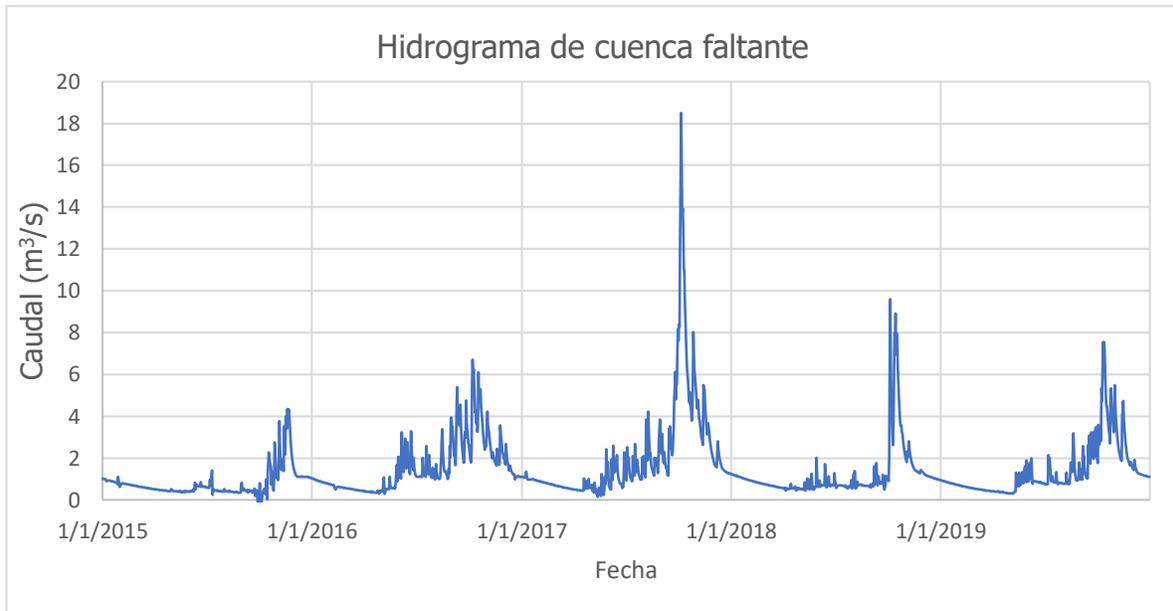


Figura 5-5. Hidrograma de cuenca faltante

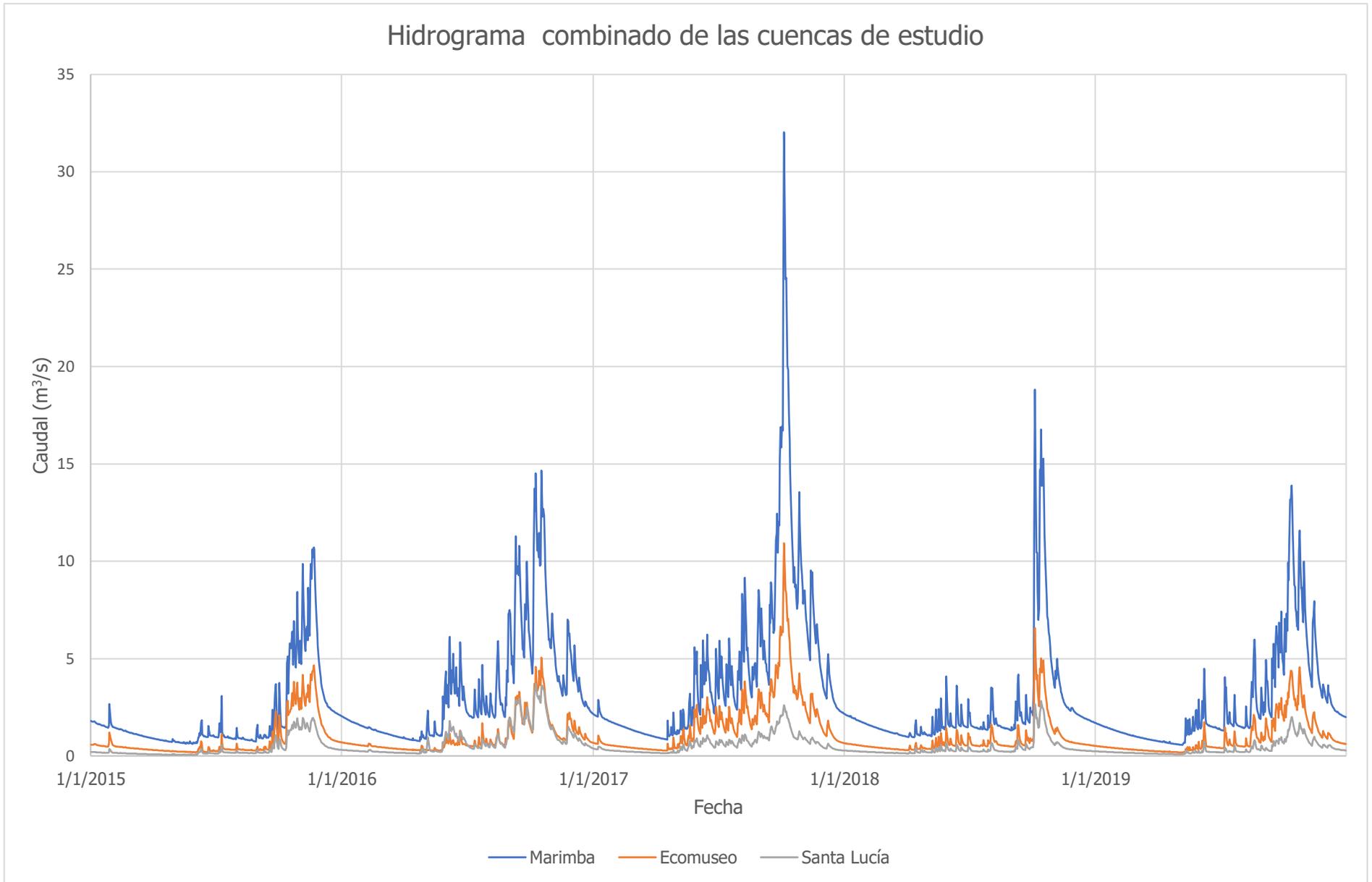


Figura 5-6. Hidrograma combinado de simulación de cuencas de estudio

5.3.1. Coeficientes de escorrentía de las cuencas

Una vez obtenidos los hidrogramas de las tres cuencas de estudio se puede hacer un análisis de los resultados por medio del coeficiente de escorrentía. Para poder calcular este se utiliza la definición física que es la razón entre el volumen de agua escurrida sobre el volumen de agua precipitada en un periodo de tiempo determinado. En este caso se utiliza un periodo anual.

$$C = \frac{\text{Volumen escurrido anual}}{\text{Volumen precipitado anual}} * 100$$

[15]

Cuadro 5-4. Volúmenes anuales escurridos en las cuencas de estudio

Año	Marimba Observado(m³)	Marimba (m³)	Ecomuseo(m³)	Santa Lucía (m³)
2015	50,717,676.38	48,031,551.44	21,458,557.87	10,427,942.89
2016	111,733,844.17	106,679,933.63	30,967,867.18	26,054,662.34
2017	-	139,595,851.36	53,995,719.49	19,447,266.34
2018	-	75,707,170.39	25,724,939.01	12,282,589.55
2019	-	84,253,931.52	28,555,982.97	11,832,184.55
Total	-	454,268,438.35	160,703,066.52	80,044,645.67

Cuadro 5-5. Volúmenes anuales precipitados en las cuencas de estudio

Año	Marimba (m³)	Ecomuseo(m³)	Santa Lucía (m³)
2015	171,663,069.42	194,435,039.65	179,234,730.85
2016	230,629,989.57	210,918,507.32	260,667,288.62
2017	268,936,459.28	302,030,716.67	221,216,539.11
2018	170,859,626.97	174,653,849.10	163,770,713.07
2019	190,170,007.21	193,021,141.83	161,704,714.51
Total	1,032,259,152.46	1,075,059,254.58	986,593,986.15

Cuadro 5-6. Coeficientes de escorrentía anuales para las cuencas de estudio

Año	Marimba Observado	Marimba	Ecomuseo	Santa Lucía
2015	0.30	0.28	0.37	0.31
2016	0.48	0.46	0.49	0.53
2017	-	0.52	0.60	0.46
2018	-	0.44	0.49	0.39
2019	-	0.44	0.50	0.38

De los datos del Cuadro 5-6 se pueden observar dos aspectos importantes. En el 2015 los coeficientes son menores a los de los otros años esto coincide con que es el año más seco registrado en la década. Otro aspecto a resaltar es que los mayores coeficientes coinciden con la cuenca que posee un terreno más quebrado lo cual es correcto de manera física. De estudios realizados en el CIEDES se sabe que el coeficiente de escorrentía ronda el 0.6 pero considerando que los estudios son realizados a tormentas en periodos cortos se puede aceptar los resultados anuales con un rango de error.

Estos valores se pueden comparar con los de tablas de la bibliografía como la de (Benitez, Arias, & Quiroz , 1980), presentada en el Cuadro 5-7.

Cuadro 5-7. Coeficientes de escorrentía según pendiente y cobertura.

Cobertura del suelo	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		> 50	20 a 50	5 a 20	1 a 5	0 a 1
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.50	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.46
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: (Benitez, Arias, & Quiroz , 1980)

Se puede apreciar que para una cuenca como la de Marimba donde predomina la cobertura de bosque y pasto, con una condición semipermeable y una pendiente promedio en la cuenca de 30% se obtiene un valor entre 0.55 a 0.40 dependiendo de la cobertura específica de la zona. Por lo que se puede considerar que los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptado en la literatura.

Otra consideración importante que se puede tomar de los coeficientes de escorrentía es que si se toma en cuenta la hipótesis de que el cambio climático está generando cambios en los patrones de precipitación de las cuencas, estas pueden estar sufriendo cambios en la escorrentía también.

5.4. Resultados de pronóstico y simulación futura

Como parte adicional de este proyecto de investigación se decide generar pronósticos para el 2021 y 2022 de precipitación y evapotranspiración. Con estos valores y la calibración de la cuenca de Marimba se simulan los caudales para el 2021 y 2022. Esto permitiría regular el uso de agua en la cuenca a cargo de la Municipalidad de Abangares.

Para obtener los pronósticos del 2021 al 2022 se utilizan valores mensuales de precipitación y evapotranspiración del periodo 2015 al 2019. El uso de valores mensuales se debe a que utilizar técnicas de pronóstico diario requiere un gran registro de la cuenca, alrededor de 30 años, y el uso de técnicas principalmente autorregresivas. Por lo tanto, para el registro de cinco años es más prudente utilizar valores mensuales. Además, el pronosticar datos mensuales y distribuirlos bajo un comportamiento promedio de los datos diarios, presenta una similitud con la incertidumbre que posee un pronóstico diario.

El modelo estocástico a utilizar corresponde al elaborado por Thomas y Fiering que involucra el uso no solo de la media y la varianza de la serie de tiempo, pero también el coeficiente de correlación de la serie. Este modelo supone que existe un fenómeno de persistencia en los procesos hidrológicos (Moreno & Enrique, 2008).

La ecuación general del modelo de Thomas y Fiering se expresa como:

$$D_{j+1} = \bar{D}_{j+1} + b_j(D_j - \bar{D}_j) + t_j * s_{j+1} * \sqrt{(1 - r_j^2)} \quad [16]$$

Donde:

\bar{D}_j = Dato del mes j

D_j = Promedio en el mes j

b_j = Pendiente de la recta de regresión entre el mes j y j+1

s_{j+1} = Varianza de la distribución de los caudales en el mes j

r_j = Coeficiente de correlación entre el mes j y j+1

t_j = Número aleatorio que viene de una distribución normal de media nula y de varianza igual a 1.

Se recomienda que la serie de datos que se utilice para pronosticar no sea menor que 10 años para que los resultados sean representativos. Para el proyecto no se posee series de datos de 10 años por lo que solo se pueden utilizar los cinco disponibles. Esto podría afectar el pronóstico y se debe considerar a la hora de analizar los datos (Moreno & Enrique, 2008).

Para poder controlar los resultados obtenidos del pronóstico, ya que utiliza valores aleatorios, se generan los límites de confianza de las series de datos disponibles del 2015 al 2019 con la intención de escoger una serie de números aleatorios que se ajuste a estos límites. Esto permite reducir la incertidumbre que presentan los métodos estocásticos.

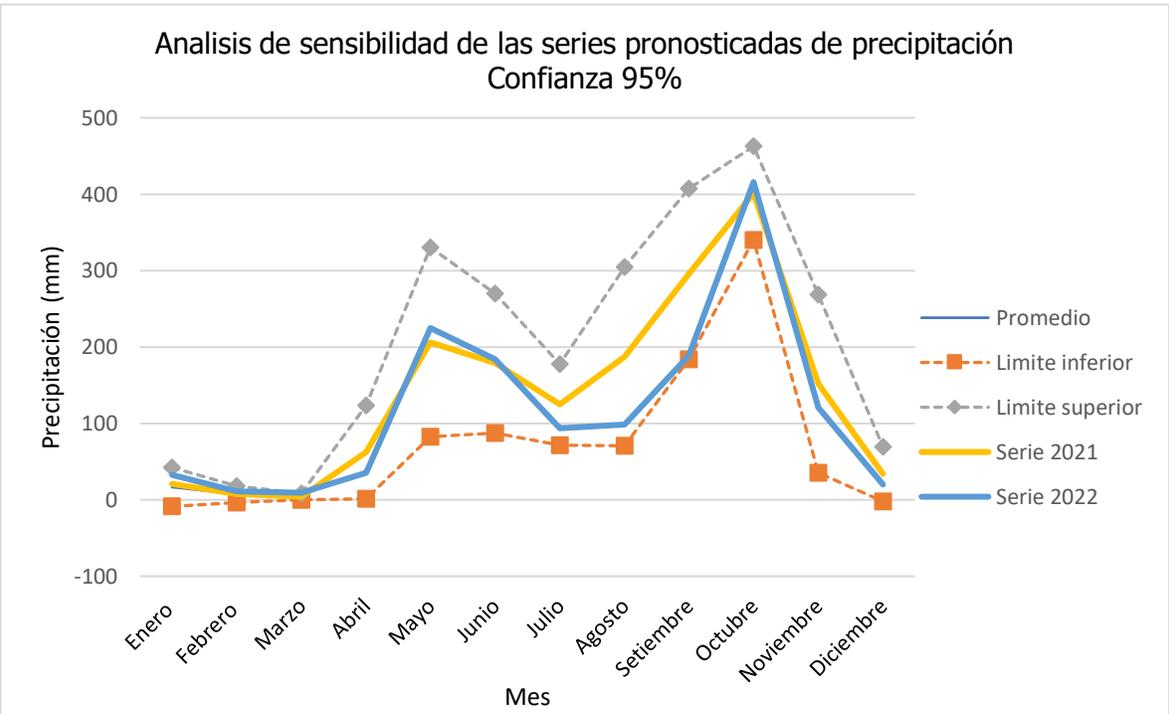


Figura 5-7. Series pronosticadas años 2021 a 2022

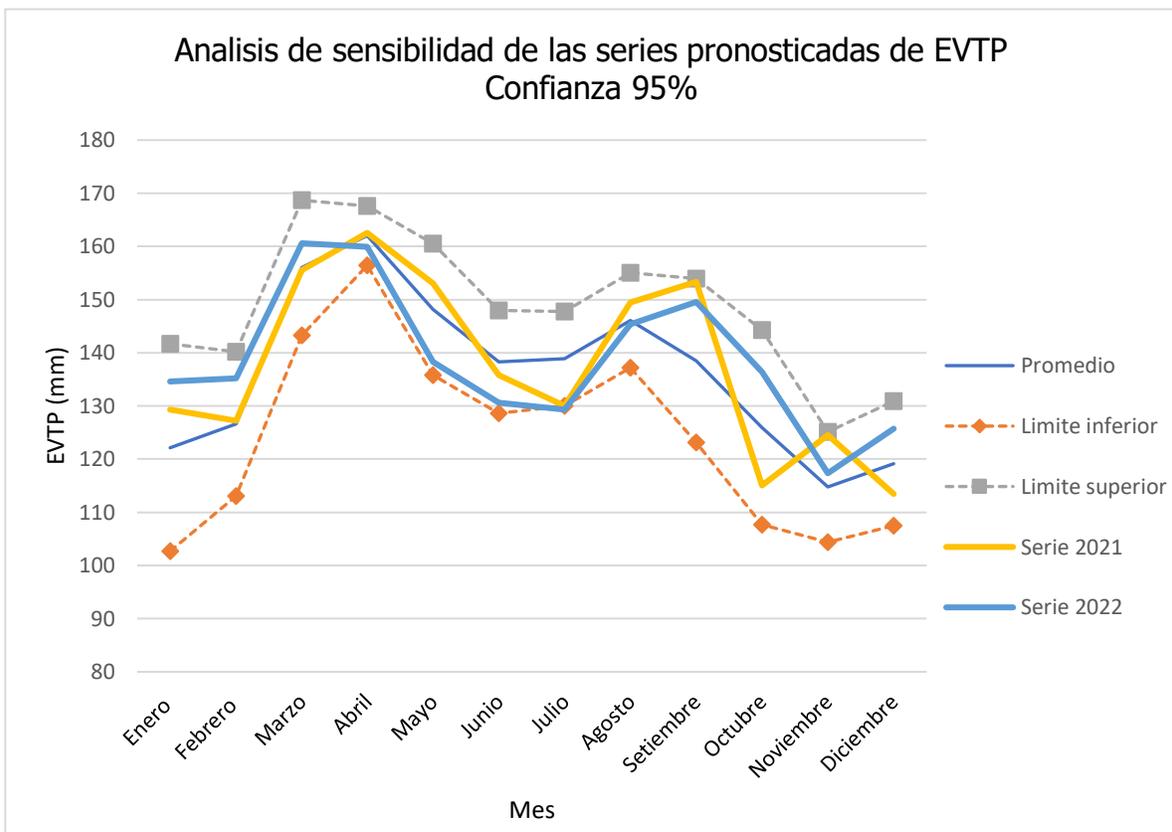


Figura 5-8. Series de EVTP pronosticadas para los años 2021 - 2022

De la Figura 5-7 y Figura 5-8 se puede observar que las series pronosticadas siguen el mismo comportamiento de las series de tiempo del periodo 2015 al 2019. Existe una época seca marcada de enero a abril y una lluviosa de mayo a diciembre con la reducción de la precipitación en el mes de julio. Todos los datos de las series se encuentran dentro del límite de confianza establecido para un 95% por lo tanto se aceptan los resultados para la distribución a valores diarios.

Para distribuir los valores diarios se obtiene los promedios mensuales y diarios del periodo 2015 – 2019 y se generan los porcentajes diarios para cada mes promedio. Esto genera una serie de pesos que se aplican a los datos mensuales pronosticados anteriormente. A continuación, se presentan los resultados.

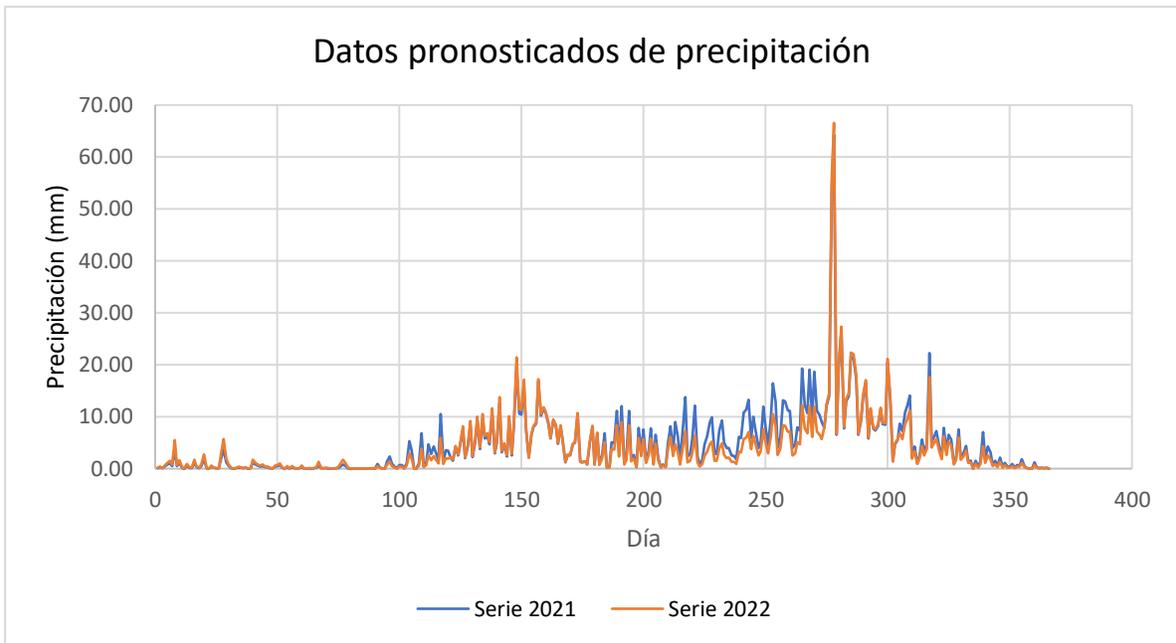


Figura 5-9. Series pronosticadas de precipitación 2021-2022

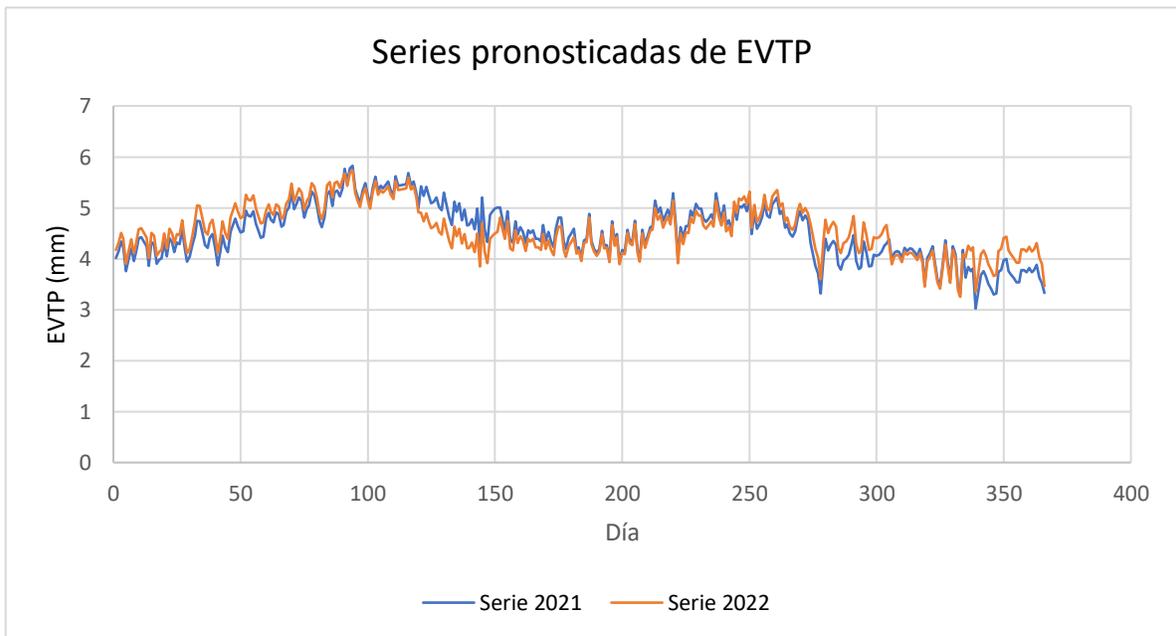


Figura 5-10. Series pronosticadas de EVTP 2021-2022

Se puede observar que las series siguen el patrón esperado de comportamiento y son similares en algunos valores que las series predichas mensuales coinciden.

Utilizando estas series de tiempo diarias y la calibración del modelo SAC-SMA obtenido para Marimba se obtienen los siguientes hidrogramas.



Figura 5-11. Hidrogramas simulados de la cuenca Marimba año 2021-2022

Cuadro 5-8. Datos de caudal promedio mensual obtenidos en simulación de series 2021-2022

Fecha	Serie 2021 (m³/s)	Serie 2022 (m³/s)
Enero	0.01	1.67
Febrero	0.00	1.29
Marzo	0.00	1.00
Abril	0.04	0.79
Mayo	0.31	0.99
Junio	1.00	1.66
Julio	1.07	1.36
Agosto	1.25	1.13
Setiembre	2.27	1.18
Octubre	8.06	5.84
Noviembre	4.86	3.51
Diciembre	2.26	1.95

Se puede observar que no se obtienen buenos resultados realizando las predicciones para los años 2021 a 2022. Esto se debe principalmente a la incertidumbre que agrega el pronóstico hecho solo con un registro de 5 años. El modelo logra simular de manera correcta la estacionalidad esperada de la cuenca con sus aumentos de caudal en el cauce, pero es el valor específico de cada mes o día el que presenta una incertidumbre considerable. De igual manera en el 2021 se observa que el caudal se mantiene bajo para el inicio, condición que se debe a que el modelo SAC-SMA supone que se comienza con una condición seca en la cuenca. Considerando que solo se utiliza una serie de tiempo de 5 años para predecir los datos y que no ocurre ningún evento extraordinario en la cuenca, el modelo logra modelar el comportamiento de la cuenca ante una condición promedio de precipitación, esto se demuestra comparando los hidrogramas de años como los del 2016 y 2018 con los del 2021 y 2022. Ahora sí, es importante aclarar que lo que se obtiene es un valor promedio de los caudales del mes, pero estos pueden tener una variación considerable en solo unos días por lo que el valor máximo puede estar muy por encima del valor promedio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En el presente proyecto de investigación se logra calibrar un modelo de balance hídrico a nivel diario para la cuenca del río Abangares hasta la estación de Marimba. Esto es de gran importancia ya que permite a la población de Abangares y especialmente a su Municipalidad, conocer el comportamiento general diario de su cuenca. La idea principal es que los resultados de este proyecto puedan ser utilizados para en un futuro obtener la disponibilidad de recurso hídrico y así definir el régimen de aprovechamiento de agua y el futuro del diseño urbano de Abangares con la idea la disponibilidad del recurso hídrico.

Se logra de manera efectiva procesar los datos de precipitación, temperatura y caudal de la cuenca del río Abangares hasta el punto de control de Marimba. Los datos de precipitación fueron los más alterados y con mayor porcentaje de datos faltantes por lo que fue el mayor reto en este proyecto de investigación. Debido a que el proyecto posee un registro corto de 5 años no se puede brindar una conclusión estadística sólida, pero si brinda una tendencia del comportamiento de la cuenca ante eventos de precipitación. Junto con la idea de que el cambio climático puede estar causando una disminución de la precipitación en la cuenca, se puede pensar la hipótesis de que el cambio climático puede estar generando condiciones que se alejan más de un periodo interanual grande, que lo que se alejaría en un periodo corto atípico en los años setenta. Como ejemplo se plantea el escenario que un periodo seco de cinco años en la década de los setentas podrá estar más cerca de un promedio interanual de 30 años que un periodo seco ahora. Esto podría indicar que la hidrología moderna debe avanzar al uso de periodos más cortos que se adapten a una condición temprana. El uso de técnicas avanzadas y complejas como algoritmos de inteligencia artificial brindan al proyecto un enfoque innovador, que se espera, ayude a fomentar y normalizar estos métodos que podrían resultar útiles en varias situaciones. Por lo demás, la idea del uso de correlación de series acumuladas de temperatura es un método simple para completar datos, y ciertamente efectivo para lugares que cumplen con las condiciones mencionadas en el apartado 3.3.

De la caracterización de las cuencas se logra definir sus características morfológicas, geológicas y meteorológicas. Esto permitió que a la hora de modelar se conociera de manera cualitativa el comportamiento esperado de la misma. El saber el tipo de suelo que

existe en la cuenca y sus características generales de drenaje es sumamente importante a la hora de calibrar un modelo de este tipo.

La calibración del modelo SAC-SMA en la cuenca de Marimba se realiza de manera exitosa y obteniendo resultados excelentes. La calibración realizada presenta valores atípicos que no se encuentran en bibliografía, pero se logra encontrar y explicar estos fenómenos en el apartado 5.1. El modelo presenta una alta tasa de percolación y almacenamientos grandes en la zona inferior, lo cual, genera un alto flujo subterráneo que aporta al cauce principal de la cuenca. Este hecho indica que la Municipalidad de Abangares debe conocer y manejar de manera correcta el flujo base que se genera en la cuenca durante los meses secos ya que este no depende de la precipitación y es limitado al almacenamiento inferior del suelo A medida que se generen más datos de precipitación y caudal para la cuenca, esta calibración se puede mejorar al igual que el pronóstico realizado a la hora de definir la disponibilidad del recurso hídrico. Debido a que el modelo se calibra para un periodo seco, si se aplica a un periodo húmedo se puede indicar la tendencia de la escorrentía con una posibilidad de ser más alto que lo estimado.

La simulación de las subcuencas de Santa Lucía y Ecomuseo se realizan con éxito, pero dado que no se poseen registros de caudal en estos puntos, no se puede comparar los resultados con datos observados en campo ni estadística descriptiva como se realiza para la cuenca de Marimba. Es importante resaltar este punto ya que cuando existan registros se puede verificar esta calibración y su eficacia a la hora de transferir la calibración a otra cuenca vecina. En el estudio de (Hogue, Yilmaz, Wagener, & Gupta , 2006) se realiza un proceso similar al de este proyecto, pero con dos cuencas calibradas. Como resultado, obtienen que el uso de este método sirve para conocer el comportamiento general de la cuenca, pero se recomienda calibrar de manera específica para cada cuenca, ya que no puede ser un sustituto a la calibración con datos observados. Una verificación eficaz de los datos simulados habría sido sumar los caudales de las subcuencas y compararlo con el valor de la cuenca de Marimba. Esto no se puede realizar en este proyecto dado que existe una zona intermedia de la cuenca que no se toma en cuenta dentro del estudio. Es importante recalcar que la disponibilidad del recurso está sujeta al aporte proporcional de cada una de las subcuencas y su comportamiento. Ya que el recurso hídrico para el acueducto de Abangares se toma principalmente de la cuenca de Ecomuseo.

La predicción de datos de los años 2021 y 2022 genera resultados aceptables en una escala mensual para la precipitación y evapotranspiración, pero los resultados obtenidos para las simulaciones del modelo a escala diaria tienen inconsistencias que hacen dudar de su veracidad. Realizar simulaciones más allá del 2022 con un registro de solo 5 años no es recomendable por la incertidumbre que brinda el corto registro. Es importante ver estos resultados como una prueba de lo que se podría generar en el futuro y aunque el periodo es corto, poca información es información. El uso de métodos estocásticos de pronósticos no es lo mejor para pronósticos diarios dada su gran aleatoriedad, por lo tanto, en un futuro podría ser un estudio aparte el generar dichos pronósticos diarios y verificar sus resultados. Debido a que el modelo se calibra en un periodo predominantemente seco, se hace la salvedad que en caso de requerir el uso de los resultados de este proyecto de investigación para pronosticar valores futuros y el periodo resulta húmedo, se debe aclarar que el pronóstico podría resultar más húmedo de lo normal.

6.2.Recomendaciones

Para toda persona que quiera utilizar un modelo de datos diarios como SAC-SMA, se recomienda conocer muy de antemano la condición en la que se encuentran los datos de la cuenca. Si no se poseen datos con valores faltantes menores al 15% no se recomienda el uso de modelos continuos, no porque los resultados van a estar mal, sino porque el tiempo consumido en completar datos de series diarias tan alteradas es mayor al tiempo de elaboración del resto del proyecto. El proyecto brinda una idea de lo que es trabajar modelos continuos en zonas tropicales y las condiciones que se pueden ver reflejadas en estos por lo que es una guía del manejo de modelos de este tipo en regiones.

Es importante que si se realiza una simulación con el modelo SAC-SMA, se introduzca un año de datos anterior al periodo a evaluar, esto quiere decir, que si el estudio es en los años 2015-2019 se introduzca, además, el año 2014. También puede utilizarse una serie sintética de datos anterior al periodo de estudio, como se hace en este proyecto. Esto es para disminuir la suposición que hace el modelo de comenzar en una condición seca, así, la serie de datos de estudio se genera de manera apropiada.

El uso de un estudio de este tipo, con la hipótesis de la afectación del cambio climático, permite a las distintas instituciones plantearse las políticas de adaptación al cambio climático que se pueden aplicar a una cuenca como la del río Abangares. La

importancia mencionada con anterioridad y el hecho de que la cuenca experimental se encuentra en un solo cantón permite que la disposición de políticas sea más simple que en otras situaciones rogando a la acción de las entidades gubernamentales.

Se puede estudiar en un futuro la idea de extrapolar el estudio y la calibración de este proyecto a la parte baja de la cuenca del río Abangares para conocer la disponibilidad del recurso hídrico para uso productivo. Solo se recomienda tomar en cuenta los cambios de pendiente, uso de suelo, precipitación y demás variables utilizadas en el proyecto ya que si existen una variación considerable, se puede cometer el error de suponer que es correcto.

El CIEDES en sus estaciones maneja el registro de variables como humedad relativa, brillo solar, velocidad del viento y temperaturas por lo que cuando se tengan mejores registros de estas variables, se puede mejorar el método con el que se calcula la evapotranspiración, pasando de Hargreaves el método de Penman que es más preciso para condiciones diarias. Además, el uso de variables como la posición de las estaciones y la temperatura podrían mejorar la red neuronal con la que se reconstruye el modelo.

Si se utiliza esta metodología en otra cuenca similar se pueden generar datos del mismo tipo para cada cuenca.

7. REFERENCIAS

- Allen, R., & Pereira, L. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma, Italia: FAO Irrigación y drenaje 56. Recuperado el 4 de junio de 2021, de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Araya, A. (2014). *Trabajo final de graduación: Integración del balance hídrico de la red fluvial de la cuenca del río Abangares, Guanacaste*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Argüello, G. (1992). *Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Benitez, C., Arias, W., & Quiroz, J. (1980). *Manual de conservación de suelos y aguas*. Lima (Perú): Ministerio de Agricultura y Alimentación.
- Burnash, R., Ferral, L., & McGuire, R. (1973). *A generalized streamflow simulation system Conceptual modeling for digital computers*. Sacramento, California: US Department of Commerce.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Hidrología Aplicada*. New York: McGraw Hill.
- CNE. (2018). *Decreto de emergencia No. 40677 - Plan general de la emergencia generada por la tormenta tropical Nate*. San José: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.
- Coy, L. (2017). Ajuste y validación del modelo precipitación - escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca Nevado. *Ingénio Magno*, 51-53. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2857>
- Cruz, B., Alfonso, M., Gaspari, F., & Carrillo, M. (Abril de 2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale. *Investigación y Ciencia*(64), 26-34. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>
- Cubero, D. (2015(a)). Suelos de Costa Rica de orden Alfisol. (MAG, Ed.) San José. Recuperado el 01 de Marzo de 2021, de Ministerio de Agricultura y Ganadería: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1827.PDF>
- Díaz, J. M. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Nueva Etapa*, XXII(31), 31-72. Recuperado el 8 de mayo de 2020, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=721/72103103>

- Dingman, L. (2015). *Physical Hydrology*. Long Grove: Waveland Press, Inc.
- Dunne, T. (2002). *Water in Environmental Planning*. New York: W.H. Freeman and Company .
- eWater Toolkit. (16 de 08 de 2004). *Rainfall Runoff Library*. Obtenido de <https://toolkit.ewater.org.au/Tools/RRL/documentation>
- Gonzalez, M. (2012). *Trabajo final de graduación. Zonificación de las áreas en riesgo de inundación por desbordamiento del río Abangares, a la altura de las juntas*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Hernandez, K. (junio de 2014). Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56. *Tópicos meteorológicos y Oceanográficos*, 43-49. Obtenido de <http://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/21061>
- Hogue, T., Yilmaz, K., Wagener, T., & Gupta , H. (6 de Enero de 2006). *Modelling ungauged basins with the Sacramento Model*. Obtenido de Reaserch Gate: https://www.researchgate.net/publication/298028371_Modelling_ungauged_basins_with_the_Sacramento_model
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida/ Trad. del inglés*. San José: IICA: serie de libros y materiales educativos.
- IMN. (Agosto de 2009). *Cuenca del Río Abangares*. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencas-cuencaRioAbangares.pdf>
- IMN. (s.f). *Climas de Costa Rica*. Recuperado el 12 de Marzo de 2020, de <https://www.imn.ac.cr/52>
- Koren, V., Smith, M., Wang, D., & Zhang, Z. (2000). *Use of property data in the derivetion of conceptual rainfal-runoff model parameters*. Obtenido de NOAA/NWS/HRL: https://www.nws.noaa.gov/ohd/hrl/modelcalibration/3.%20%20A%20priori%20model%20parameters/ams_2000_koren_soils_parameters.pdf
- Ley 9590. (29 de agosto de 2018). Ley para autorizar el aprovechamiento de agua para consumo humano y construcción de obras conexas en el Patrimonio Natural del Estado. *La Gaceta*, Artículo No. 2.

- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Cali, Colombia: McGraw Hill - Latinoamérica.
- MAG. (2015). *Suelos de Costa Rica*. Recuperado el 01 de Marzo de 2021, de Biblioteca Virtual MAG: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/>
- Matarrita, E. (2020). *Modelo de estimación de producción de sedimento por erosión hídrica en la cuenca del río Abangares*. San José: Trabajo Final de Graduación Ingeniería Civil Universidad de Costa Rica.
- Mckinney, W. (2013). *Python for Data Analysis*. California: O'Reilly.
- Méndez, F. (2019). *Caracterización de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Abangares, debido a eventos de precipitación*. San José: UCR.
- Moreno, J., & Enrique, J. (Mayo de 2008). Generación de series sintéticas de caudales usando un Modelo Matalas con medias condicionadas. *Avances en Recursos Hidráulicos*(17), 5-15. Recuperado el 21 de junio de 2021
- Municipalidad de Abangares. (s.f). *Pagina web de la Municipalidad de Abangares*. Recuperado el 11 de 3 de 2020, de <http://www.abangares.go.cr/index.php/mn-conozcanos/mn-micanton/mn-historiacanton>
- Muñoz, W., Bediya, O., & Rincón, M. (2020). Aplicación de reden neuronales para la reconstrucción de series de tiempo de precipitación y temperatura utilizando información satelital. *EIA*, 17(34), 1-16. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1492/149264860008/html/>
- NOAA. (9 de Noviembre de 1999). *Organizacion Meteorologica Mundial*. Obtenido de MODELO SACRAMENTO DE CONTABILIDAD DE HUMEDAD DEL SUELO (NWSRFS-SAC-SMA): <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/homs/Components/Spanish/j04301.htm>
- NOAA. (4 de Diciembre de 2002). *Organizacion Meteorologica Mundial*. Obtenido de https://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/23sacsma.pdf
- NOAA. (s.f). *National Oceanic and Atmospheric Admnistration* . Obtenido de https://www.nwrfc.noaa.gov/info/water_cycle/hydrology.cgi
- Ordoñez, J. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrográfica?* Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.

- Oreamuno, R. (1979). *Simulación matemática en la cuenca de Río Grande de terraba*. San José, Costa Rica: UCR.
- Samani, Z. (2000). Estimando Radiación Solar incidente y Evapotranspiración Usando un mínimo de información meteorológica. *Diario de Ingeniería de Irrigación y Drenaje*, 126(4), 265-267.
- Serrano, A. (2019). *Notas del curso de Hidrología General - UCR*. San José: EIC - UCR.
- SINAC. (febrero de 2019). *Estrategia Regional para el Manejo y Conservación de los Manglares en el golfo de Nicoya (2019-2030)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/334694833_Estrategia_Regional_para_el_Manejo_y_Conservacion_de_los_Manglares_en_el_Golfo_de_Nicoya-Costa_Rica-2019-2030/citation/download
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1955). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. (O. Moreto, Trad.) Barcelona, España: El Ateneo.
- Ven Te Chow, D. M. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill.
- Villalobos, D. (2018). Experiencias comunitarias en defensa del agua en distritos rurales de Puntarenas. *Rupturas*, 8(1), 131-140.
- WeatherSpark. (s.f). *Clima promedio en Abangares*. Recuperado el 01 de Marzo de 2021, de <https://es.weatherspark.com/y/15524/Clima-promedio-en-Juntas-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>

ANEXOS

Anexo A. Caracterización de tipo de suelo en la cuenca Marimba

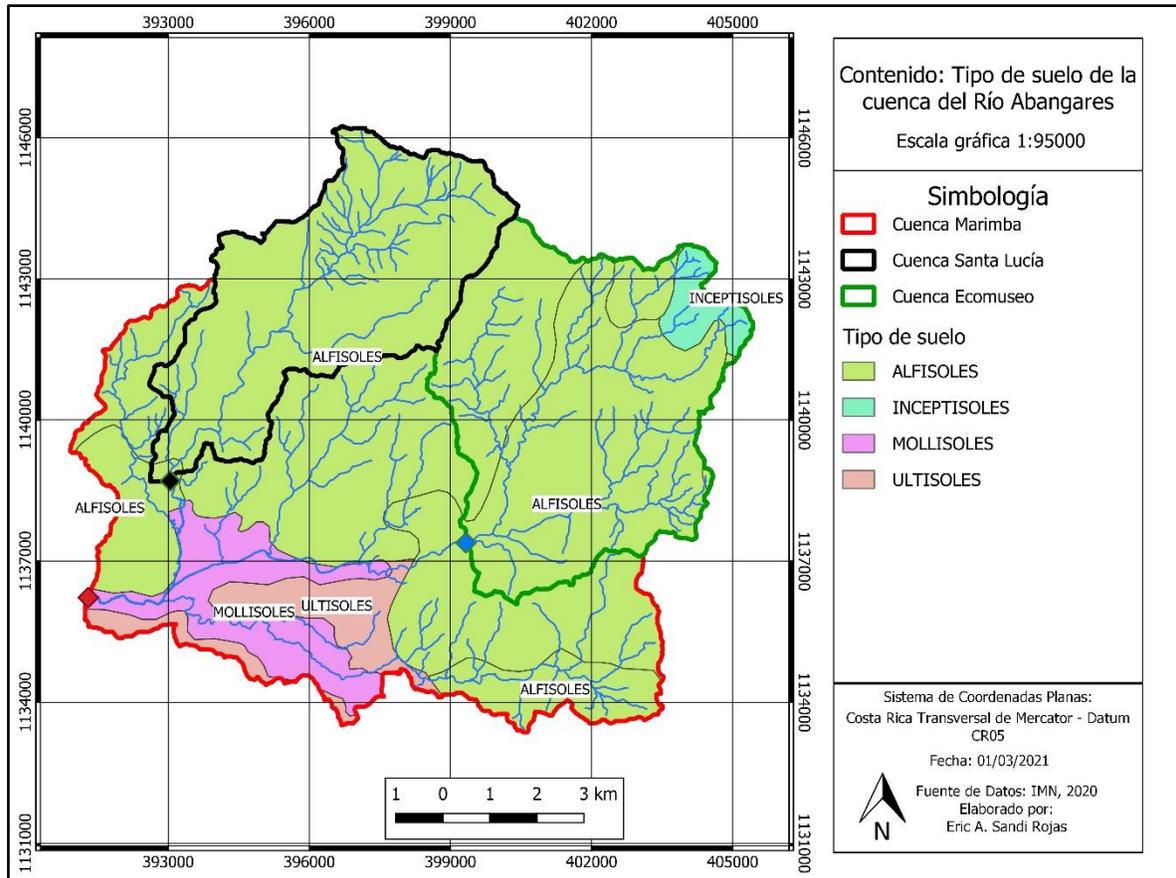


Figura A-1. Tipo de suelos presentes en la cuenca de Marimba

Cuadro A-1. Cuadro de tipos de suelos en la cuenca de Marimba

Suelo	Características
Alfisoles	Los alfisoles son suelos presentes en la provincia de Nicoya, de buen drenaje, de muy alta fertilidad y con partes de arcilla. Suelen ser muy utilizados en agricultura. (Cubero, 2015(a))

Molisoles	Los molisoles son suelos que se forman en climas cálidos de valles y en la cobertura de pasturas. Son suelos bien estructurados, fértiles y de color oscuro.
Ultisoles	Son suelos formados generalmente por una mezcla de arcilla y cuarzo con buen drenaje interno al estar bien estructurados.
Inceptisoles	Estos suelos suelen ser precursores de suelos como Ultisoles. Son suelos con drenaje moderado y se encuentran en zonas de baja temperatura.

Fuente: (MAG, 2015)

Anexo B. Código de Python para red neuronal

```
# Importar el `os`
```

```
import os
```

```
# Obtener el directorio (`cwd`)
```

```
cwd = os.getcwd()
```

```
cwd
```

```
# Cambiar el directorio a donde están los archivos
```

```
os.chdir("D:\Ruta ejemplo")
```

```
# Abrir la lista de los archivos en la carpeta
```

```
os.listdir('.')
```

```
#importar la libreria Pandas y Numpy
```

```
%pylab inline
```

```
import pandas as pd
```

```
import numpy as np
```

```
#Cargar los datos desde excel con la primera columna de fechas y la segunda con la precipitación
```

```
Ecomuseo = pd.read_excel('Ecomuseo1.xlsx',sheet_name='Hoja1',index_col=0)
```

```
Ecomuseo = Ecomuseo.rename(columns={'Precipitacion (mm)': 'Est_Ecomuseo'})
```

```
San_Rafael = pd.read_excel('San Rafael1.xlsx',sheet_name='Hoja1',index_col=0)
```

```
San_Rafael = San_Rafael.rename(columns={'Precipitacion (mm)': 'Est_San_Rafael'})
```

```
Las_Juntas = pd.read_excel('LasJuntas1.xlsx',sheet_name='Hoja1',index_col=0)
```

```
Las_Juntas = Las_Juntas.rename(columns={'Precipitacion (mm)': 'Est_LasJuntas'})
```

```
Marimba = pd.read_excel('Marimba1.xlsx',sheet_name='Hoja1',index_col=0)
```

```
Marimba = Marimba.rename(columns={'Precipitacion (mm)': 'Est_Marimba'})
```

```
Santa_Lucia = pd.read_excel('SantaLucia1.xlsx',sheet_name='Hoja1',index_col=0)
```

```
Santa_Lucia = Santa_Lucia.rename(columns={'Precipitacion (mm)': 'Est_SL'})
```

```
#Graficar las estaciones para verificar que todo cargó bien
```

```
figsize(30,5)
```

```
Ecomuseo.plot()
```

```
Marimba.plot()
```

```
San_Rafael.plot()
```

```
Las_Juntas.plot()
```

```
Santa_Lucia.plot()
```

```
#Colocar todas las estaciones en un dataset concreto y si los datos están en horas se suman a días.
```

```
TodasEstaciones = Ecomuseo.resample('24H').sum()
```

```
TodasEstaciones['Est_San_Rafael']=San_Rafael['Est_San_Rafael'].resample('24H').sum()
```

```
TodasEstaciones['Est_LasJuntas']=Las_Juntas['Est_LasJuntas'].resample('24H').sum()
```

```
TodasEstaciones['Est_Marimba']=Marimba['Est_Marimba'].resample('24H').sum()
```

```
TodasEstaciones['Est_SL']=Santa_Lucia['Est_SL'].resample('24H').sum()
```

```
TodasEstaciones.head()
```

```
#Se establece el periodo a trabajar en la red neuronal
```

```
Fecha_inicio = '2015-01-01'
```

```
Fecha_final = '2019-12-31'
```

#Se grafica el dataset para ver que todo cargó bien

```
TodasEstaciones.plot(subplots=True, figsize=(15, 10), legend = 'best', fontsize = 13)
plt.ylabel('Precipitación (mm)', fontsize = 14)
plt.xlabel('Fecha', fontsize = 14)
#Este comando es para guardar el gráfico pero si se desea se puede desactivar
plt.savefig("Graf_final.jpg", bbox_inches='tight')
```

#Se importa el sknn que es el paquete que posee la red neuronal

```
from sknn.mlp import Regressor, Layer
```

#Se cargan las capas de inicio como las que se quieren usar para calibrar

```
capasinicio = TodasEstaciones.loc[Fecha_inicio:Fecha_final].to_numpy()[:[0,1,2,4]]
```

#La capa de salida es el resultado que queremos de la red para poder entrenarla

```
capasalida = TodasEstaciones.loc[Fecha_inicio:Fecha_final].to_numpy()[:,3]
```

#La cantidad de neuronas afecta mucho el tiempo que dura en calibrar la red, pero también afecta la precisión de los resultados

```
neuronas = 900
```

```
tasaaprendizaje = 0.0001
```

```
numiteraciones = 1200
```

#Se define el entrenamiento de la red neuronal

```
redneural = Regressor(
    layers=[
        Layer("ExpLin", units=neuronas),
        Layer("ExpLin", units=neuronas), Layer("Linear")],
    learning_rate=tasaaprendizaje,
    n_iter=numiteraciones)
redneural.fit(capasinicio, capasalida)
```

#Se obtiene la predicción y se guardan los valores en "valortest"

```
valortest = ([])
for i in range(capasinicio.shape[0]):
    prediccion = redneural.predict(np.array([capasinicio[i,:].tolist()]))
    valortest.append(prediccion[0][0])
```

#Se grafican los resultados vs los observados para comparar

```
plot(TodasEstaciones.loc['2015-01-01':'2019-12-31'].index, valortest, '--', label='Predecido')
TodasEstaciones['Est_Marimba'].loc['2015-01-01':'2019-12-31'].plot()
figsize(30,10)
xlim('2015-01-01','2019-12-31')
ylim(0,150)
legend(loc='best')
```

#Se guardan las predicciones en un excel para sustituir los datos faltantes en excel

```
df=pd.DataFrame(valortest,columns=['prediccion'])
df.to_excel('Pred_MARIMBA4.xlsx', sheet_name='Hoja1')
```

Anexo C. Gráficos de corridas de calibración.

En este anexo se muestran las gráficas brindadas por el modelo al hacer las distintas corridas.

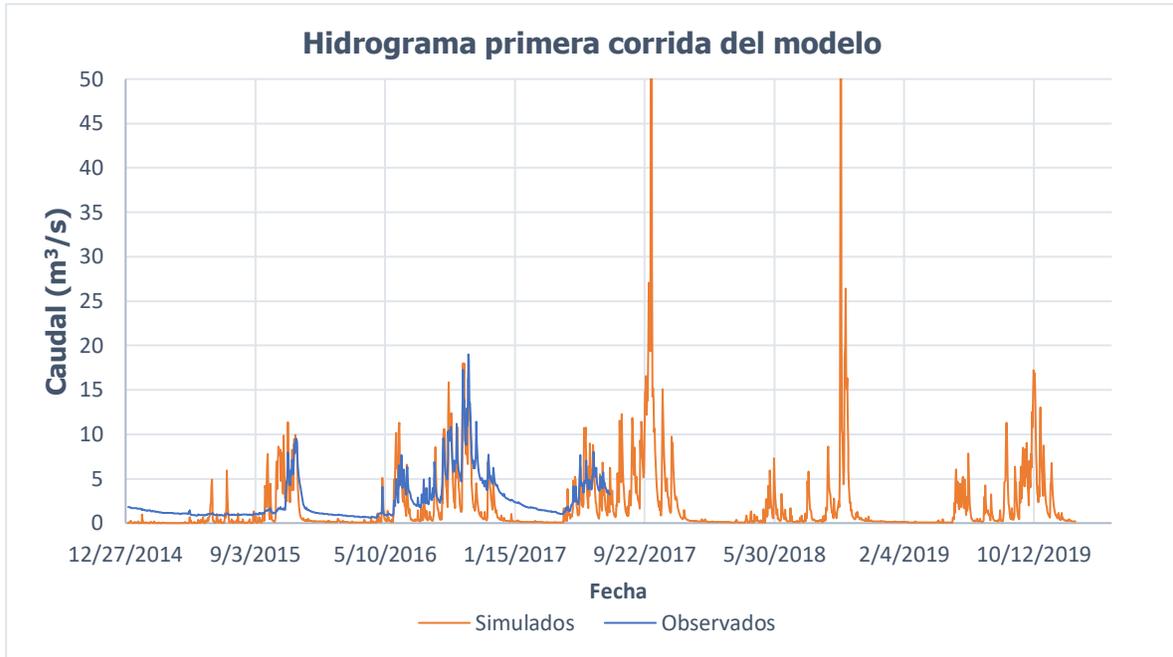


Figura C-1. Primera corrida del modelo

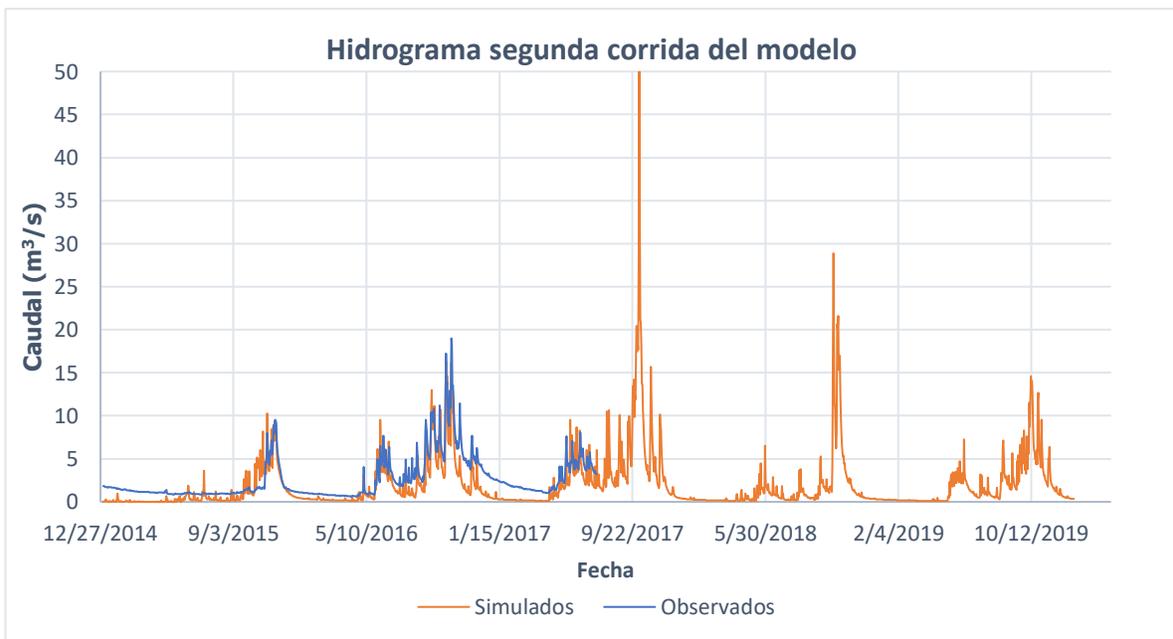


Figura C-2. Segunda corrida del modelo

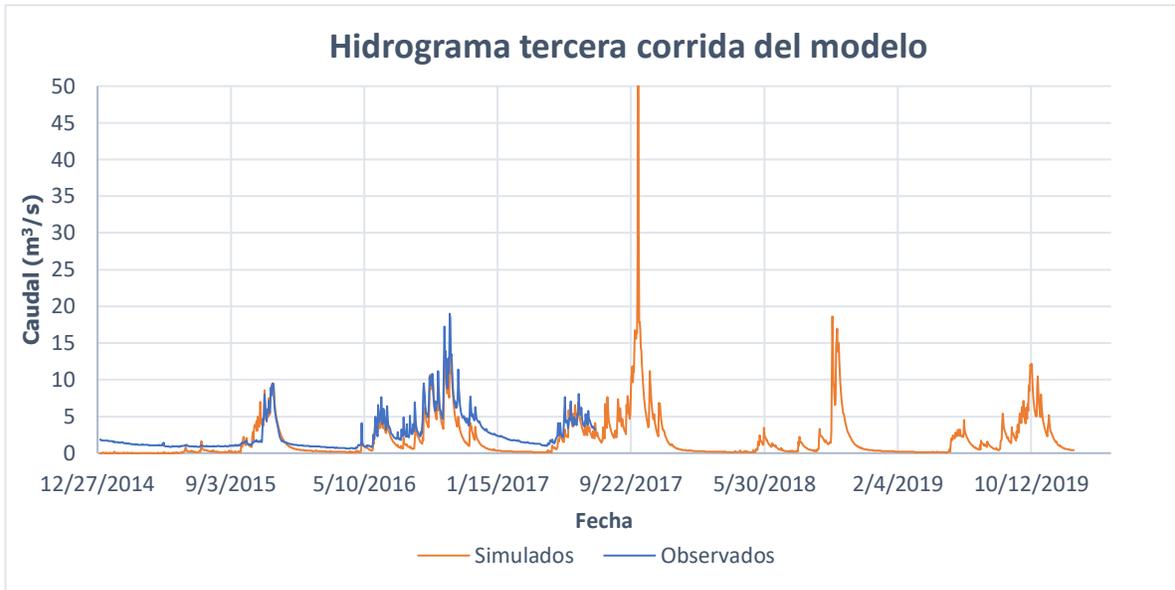


Figura C-3. Tercera corrida del modelo

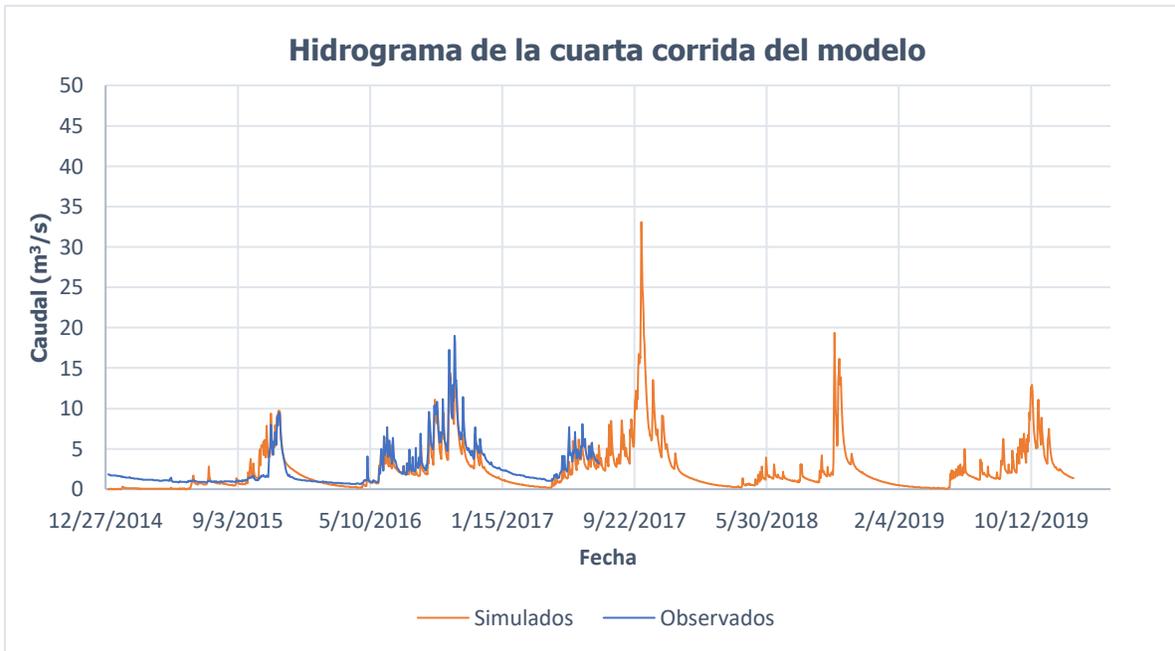


Figura C-4. Cuarta corrida del modelo

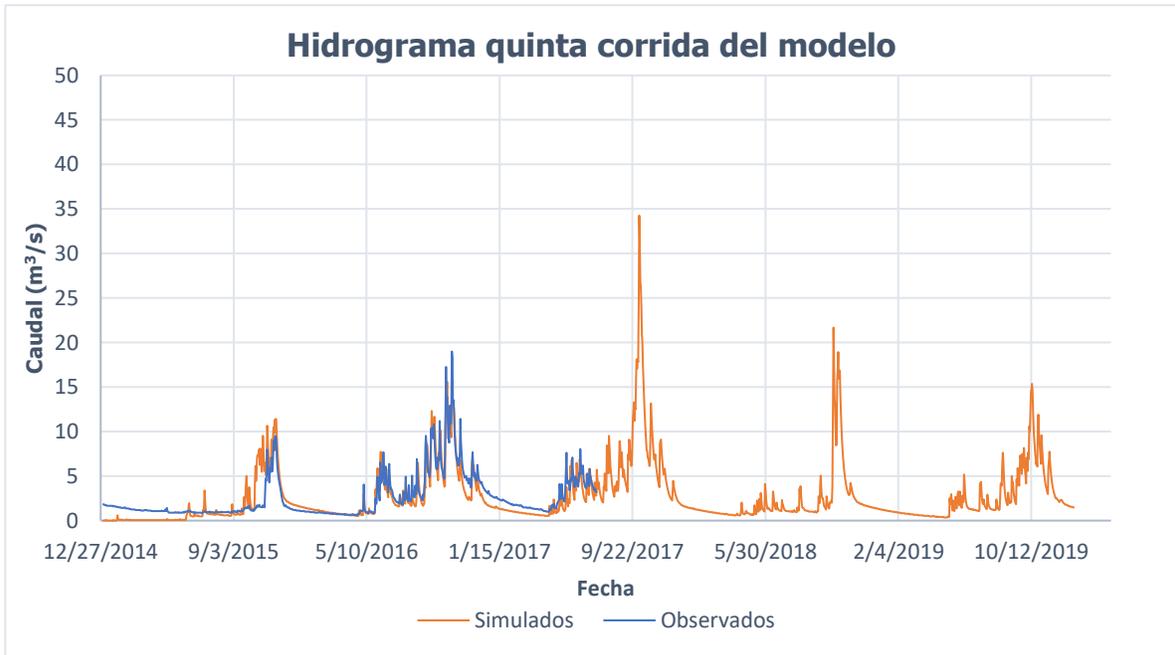


Figura C-5. Quinta corrida del modelo

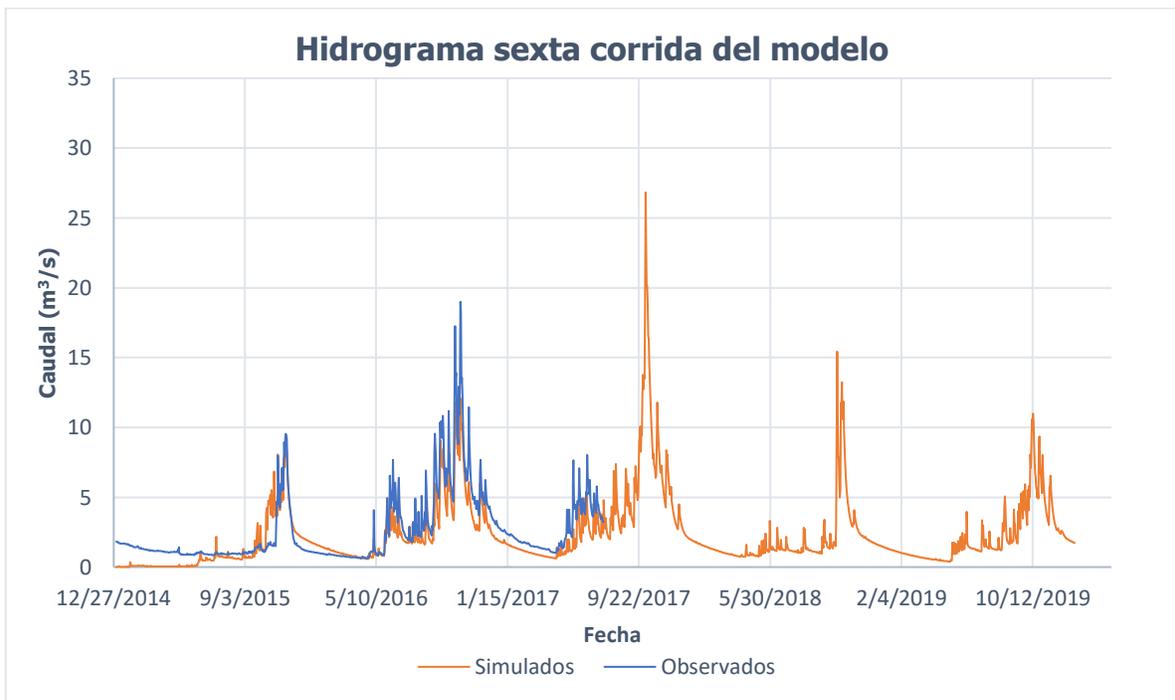


Figura C-6. Sexta corrida del modelo