

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en
Ciencias e Ingeniería



**"MODELO MATEMÁTICO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO
HÍDRICO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ, CÓRDOBA,
COLOMBIA"**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios
para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta

LUISA ELVIRA MARTÍNEZ ACOSTA

Director de tesis

Dr. ALVARO ALBERTO LÓPEZ LAMBRAÑO

Ensenada, Baja California, agosto del 2020.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

MODELO MATEMÁTICO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO
HÍDRICO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ, CÓRDOBA,
COLOMBIA

TESIS

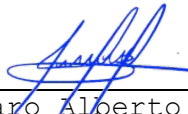
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

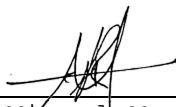
Presenta

LUISA ELVIRA MARTÍNEZ ACOSTA

Aprobada por:



Dr. Alvaro Alberto López Lambraño
Director de Tesis



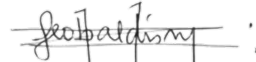
Dr. Miguel Martínez Rosas
Miembro del Comité



Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez
Miembro del Comité



Dr. Mario González Durán
Miembro del Comité



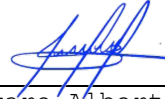
Dr. Teobaldis Mercado Fernández
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, agosto del 2020.

Resumen de la tesis de Luisa Elvira Martínez Acosta, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, agosto del 2020.

**MODELO MATEMÁTICO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO
HÍDRICO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO SINÚ, CÓRDOBA,
COLOMBIA**

Resumen Aprobado por:



Dr. Alvaro Alberto López Lambraño
Director de Tesis

Se realizó la simulación hidrológica en la cuenca hidrográfica del río Sinú, Colombia, con un área total de 13972 Km² y está dividida en tres subcuencas: Alto, Medio y Bajo Sinú. Se utilizó el Sistema de Información Geográfico (SIG) y, a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), cuya resolución es de 460mx460m, se establecieron las microcuencas y se establecieron los límites del área de estudio. Con el fin de determinar las estaciones meteorológicas que se localizan en el área de influencia de la cuenca, se utilizó la metodología de los polígonos de Thiessen, encontrándose 75 estaciones que tienen al menos 20 años de registros. Posteriormente, a cada una de estas estaciones se les aplicó la transformación Box-Cox buscando garantizar la estacionariedad. Luego se encontró que los modelos SARIMA son los adecuados para las series de tiempo de precipitación de la zona y evaluando el criterio de información de Akaike se seleccionaron los modelos óptimos. Una vez evaluado lo anterior, se estableció la escorrentía directa utilizando la metodología del Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS por sus siglas en inglés), para de esta manera alimentar el modelo de simulación hidrológica. De igual manera se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_0) en la zona, así como se utilizaron los valores del coeficiente del cultivo (K_c) reportados para Colombia con el fin de establecer la demanda de acuerdo con los usos/cobertura del suelo en la cuenca. Para completar la demanda de agua, se calcularon la cantidad de agua requerida por la población y la parte pecuaria.

Una vez obtenida esta información se generó el modelo hidrológico, encontrándose algunos déficits en la zona de la parte media y baja de la cuenca, esto debido a la saturación de la demanda en esta y a la poca disponibilidad del recurso hídrico en épocas de sequía. También se determinó que la mayor demanda a satisfacer es la ganadera, esto va acorde con la actividad económica preponderante en la cuenca.

Finalmente, se evalúan las políticas en la zona considerándose que son adecuadas pero susceptibles a mejoras en el aspecto de la importancia de las acciones encaminadas a dar incentivos a las personas o empresas que promuevan el uso del agua lluvia y las

tecnologías emergentes de aprovechamiento y uso eficiente del recurso hídrico.

Palabras clave: Escorrentía superficial, cuenca hidrográfica, ciclo hidrológico, precipitación, modelación hidrológica, modelación estocástica, aprovechamiento de agua lluvia.

DEDICATORIA

A mi hijo,

David Montes Martínez

A mis padres y hermanos,

Sinibaldo Martínez Begambre,

Yadira Acosta Cordero,

Silsa Martínez Acosta,

Silia Martínez Acosta

Y

Sinibaldo Martínez Acosta

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California, por permitirme ser parte de ella y desarrollarme bajo sus aulas con el apoyo de sus profesores. A la Facultad de Ingeniería, por aceptarme como estudiante y facilitarme los medios para culminar el doctorado. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su programa de becas, que sustentó económicamente el trayecto de mi posgrado y que fue esencial para alcanzar este logro. A la Universidad Pontificia Bolivariana Montería por su apoyo económico quien en gran medida sustentó mis estudios en el exterior.

Al Dr. Alvaro López-Lambrano, por creer en mí y por el apoyo brindado. Gracias por su tiempo, paciencia, dedicación, por todos los consejos brindados, por la motivación, por ayudarme a culminar con éxito mi trabajo de tesis y a obtener el título de doctorado.

Al M.Sc. Álvaro López Ramos, por confiar en mis capacidades y por todos los consejos brindados. Por ser parte de este proceso, por darme la oportunidad de realizar este posgrado y apoyarme incondicionalmente hasta lograr el objetivo de culminar con éxito el posgrado y simplemente por estar allí para mí.

A mis sinodales, Dr. Miguel Martínez Rosas, Dr. Mario González Durán, Dr. Jorge Octavio Mata y Dr. Teobaldis Mercado Fernández. Por ser parte de mi comité, por su tiempo y recomendaciones durante el desarrollo de la tesis.

A mis compañeros(as) de posgrado Juan Pablo Medrano Barboza y Ena Del Carmen Gámez Balmaceda; por su amistad, conocimientos brindados y todo su apoyo en la realización de esta investigación.

A todas aquellas personas que de una manera u otra fueron soporte y apoyo en este proceso y a las cuales les agradezco enormemente. Siempre existen personas en el camino que con una palabra te ayudan a seguir adelante.

Contenido

1	Introducción	15
2	Antecedentes	17
3	Objetivos	21
3.1	Objetivo general	21
3.2	Objetivos específicos	21
4	Marco teórico	23
4.1	Hipótesis	24
5	Metodología general	26
6	Fundamentación teórica de la gestión integral del recurso hídrico en zonas rurales y urbanas.....	29
6.1	Criterios de diseño para la planificación de los sistemas de aprovechamiento de agua en la agricultura: una revisión bibliográfica.....	29
6.1.1	Introducción.....	29
6.1.2	Estructuras hidráulicas para el aprovechamiento de aguas lluvias	34
6.1.3	Discusión:.....	49
6.1.4	Conclusiones.....	59
6.2	Revisión de los parámetros de diseño para la recolección de agua lluvia en zonas urbanas: una solución en la gestión integral de los recursos hídricos.....	61
6.2.1	Introducción.....	61
6.2.2	Factores que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico en zonas urbanas.....	65
6.2.3	Discusión.....	82
6.2.4	Conclusiones.....	87
7	Análisis de estacionariedad y modelos autorregresivos	88
7.1	Introducción	88
7.2	Materiales y métodos	92
7.2.1	Área de estudio.....	92
7.3	Modelos SARIMA	98
7.4	Resultados y discusión	99
7.5	Conclusiones	112
8	Escurrimiento directo	114
8.1	Introducción	114
8.2	Materiales y métodos	116
8.2.1	Área de estudio.....	116

8.2.2	Método del número de curva del NRCS.....	119
8.3	Resultados y discusión.....	122
8.4	Conclusiones.....	133
9	Modelo hidrológico.....	134
9.1	Introducción.....	134
9.2	Materiales y métodos.....	135
9.2.1	Área de estudio.....	135
9.2.2	Datos hidroclimatológicos.....	137
9.2.3	Evapotranspiración de referencia.....	142
9.2.4	Demanda poblacional y pecuaria.....	146
9.2.5	Información en WEAP.....	147
9.3	Resultados y discusión.....	149
9.4	Conclusiones.....	175
10	Operatividad de la normatividad existente.....	177
10.1	Introducción.....	177
10.2	Políticas en Colombia.....	179
10.3	Política Nacional para la GIRH (PNGIRH).....	183
10.4	Conclusiones.....	188
11	Conclusiones.....	189
12	Referencias.....	191

Índice de tablas

Tabla 1. Grupo 1: Sistemas de macrocuencas.....	38
Tabla 2. Grupo 2: Sistemas de microcuencas.....	39
Tabla 3. Grupo 3: Sistemas para recarga de acuíferos.....	44
Tabla 4. Grupo 4: Sistemas de microcuencas y macrocuencas..	45
Tabla 5. Grupo 5: Sistemas de labranza de reserva (o labranza de yacimiento).....	48
Tabla 6. Grupo 1. Factibilidad del sistema y eficiencia del sistema.....	66
Tabla 7. Grupo 2. Cambio climático y percepción del uso de sistemas de recolección de agua lluvia, políticas e impactos ambientales.....	72
Tabla 8. Grupo 3. Potencial de ahorro del agua.....	75
Tabla 9. Grupo 4. Almacenamiento (costos, ahorro de agua, capacidad).....	77
Tabla 10. Grupo 5. Calidad y tratamiento de aguas de la recolección de agua lluvia.....	80
Tabla 11. Número de autores que utilizan cada uno de los parámetros.....	83
Tabla 12. Número de autores de acuerdo con el sitio donde se destina el agua recolectada.....	84
Tabla 13. Número de estudio realizado por países.....	86
Tabla 14. AIC de algunos de los modelos de pronóstico probados en la estación Momil.....	103
Tabla 15. Prueba de hipótesis nula respecto a diferencia de dos medias de la estación Momil.....	107
Tabla 16. Modelos SARIMA para las estaciones de la cuenca del río Sinú.....	109
Tabla 17. Grupo hidrológico del suelo de acuerdo con el tipo de suelo.....	119

Tabla 18. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de la lluvia de SCS hoy NRCS	122
Tabla 19. Valores de área, pendiente promedio, precipitación, CN, S, Ia y Q para cada subcuenca de la cuenca del río Sinú	128
Tabla 20. Porcentaje de vacíos de la precipitación encontrado en las estaciones climatológicas de la cuenca del río Sinú, Colombia.....	138
Tabla 21. Promedio mensual multianual de la temperatura máxima	140
Tabla 22. Promedio mensual multianual de la temperatura mínima	140
Tabla 23. Valores de BIAS y NSE para las estaciones calibradas	149
Tabla 24. Presión y constante psicrométrica de cada estación	152
Tabla 25. Valores de K_c para la zona de estudio	152
Tabla 26. Velocidad del viento promedio mensual multianual (m/s)	154
Tabla 27. Punto de rocío promedio mensual multianual ($^{\circ}\text{C}$) ..	154
Tabla 28. Brillo solar promedio mensual multianual.....	155
Tabla 29. Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, Δ (kPa/ $^{\circ}\text{C}$)	156
Tabla 30. Presión real de vapor, e_a (kPa)	157
Tabla 31. Presión de saturación de vapor, e_s (kPa)	157
Tabla 32. Radiación solar entrante, R_s (MJ/m ² -día)	158
Tabla 33. Radiación en un día despejado, R_{so} (MJ/m ² -día) ...	159
Tabla 34. Radiación neta solar o de onda corta, R_{ns} (MJ/m ² -día)	160
Tabla 35. Radiación de onda larga, R_{nl} , (MJ/m ² -día).....	160

Tabla 36. Radiación neta en la superficie del cultivo, R_n , (MJ/m ² -día)	161
Tabla 37. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o , (mm/día)	162
Tabla 38. Empresas prestadoras de servicios públicos en las cabeceras municipales de la cuenca.....	163
Tabla 39. Demanda poblacional y pérdidas del sistema en las cabeceras municipales de la cuenca.....	164
Tabla 40. Demanda de agua del sector porcino ¹	165
Tabla 41. Demanda de agua para el ganado vacuno ¹	166
Tabla 42. Consumo de agua pecuario - aves.....	168
Tabla 43. Consumo de agua pecuario - porcino.....	169
Tabla 44. Consumo de agua pecuario - Bovino.....	170
Tabla 45. Consumo de agua pecuario - búfalos y equinos....	171
Tabla 46. Consumo de agua pecuario - caprinos y ovinos....	172
Tabla 47. Consumo de agua y demanda no satisfecha en la cuenca mensualmente.....	174
Tabla 48. Leyes del sector recurso hídrico en Colombia....	180
Tabla 49. Decretos del sector del recurso hídrico en Colombia	180
Tabla 50. Resoluciones del sector recurso hídrico en Colombia	181

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para obtener el modelo apropiado para cada estación climatológica.....	26
Figura 2. Diagrama de flujo de metodología para estimar el escurrimiento directo o escorrentía superficial.....	27
Figura 3. Diagrama de flujo de metodología para la modelación en WEAP.....	28
Figura 4. Número de parámetros de diseño por autor.....	49
Figura 5. Países donde se realizaron los estudios reportados en la revisión bibliográfica.....	85
Figura 6. Localización de la cuenca del río Sinú en Colombia. Se observa la localización de la ciudad de Montería por ser el casco urbano más representativo, el río Sinú y el embalse de la hidroeléctrica Urrá.....	96
Figura 7. Polígonos de Thiessen de las 75 estaciones climatológicas seleccionadas en la cuenca del río Sinú (Colombia).....	97
Figura 8. Vector de calibración de la serie de precipitación mensual de la estación Momil.....	100
Figura 9. Vector de calibración de la serie de precipitación mensual de la estación Momil transformado usando Box-Cox	101
Figura 10. Descomposición del vector de calibración de la serie de precipitación de la estación Momil transformado usando Box-Cox (gráfica de la serie de tiempo con los componentes aleatorios, estacionalidad y tendencia).....	101
Figura 11. ACF del vector de calibración de la serie de tiempo de precipitación, transformada usando Box-Cox.....	103
Figura 12. PACF del vector de calibración de la serie de tiempo de precipitación, transformada usando Box-Cox.....	104
Figura 13. Precipitación observada (vector de calibración) y serie de tiempo sintética.....	104

Figura 14. Residuales del modelo SARIMA seleccionado para la serie de precipitación de la estación Momil.....	106
Figura 15. Gráfico de la serie original y el pronóstico de la estación Momil.....	108
Figura 16. Mapa de uso del suelo de la cuenca del río Sinú	124
Figura 17. Mapa de tipo del suelo de la cuenca del río Sinú	125
Figura 18. Mapa del grupo hidrológico del suelo de la cuenca del río Sinú.....	126
Figura 19. Número de Curva de la cuenca del río Sinú.....	127
Figura 20. Mapa de valores de Q (mm) para cada subcuenca..	132
Figura 21. Caudales simulados y observados de la estación 13037040 - Carrizola automática.....	150
Figura 22. Caudales simulados y observados de la estación 13067020 - Montería automática.....	150
Figura 23. Caudales simulados y observados de la estación 13077060 - Cotocá Abajo automática.....	150
Figura 24. Esquema de la demanda de la cuenca, dividida por (a) cuenca baja; (b) cuenca media y; (c) Cuenca alta.....	173
Figura 25. Evapotranspiración real, potencial y diferencial de ET.....	175
Figura 26. Política Nacional para la Gestión de los Recursos Hídricos - PNGIRH, sus objetivos y las respectivas estrategias de acción.....	184
Figura 27. Estrategias priorizadas en las fases I y II del PHN	185

1 Introducción

El agua es esencial para la vida, necesaria en el desarrollo del entorno, de los seres vivos y, por tanto, es un elemento indispensable para la subsistencia de la vida humana. Por esta razón, es importante el entendimiento de la dinámica espaciotemporal de las variables hidrometeorológicas y, en particular, el estudio de la precipitación como parámetro de entrada al ciclo hidrológico, dado que es la base para los estudios encaminados a la cuantificación y administración adecuada del recurso hídrico. Teniendo en cuenta que la precipitación es una variable que evoluciona en el tiempo y en el espacio, puede ser estudiada de manera temporal, por medio del análisis de series de tiempo generadas a partir de registros medidos en una estación climatológica en intervalos de tiempo dados (días, meses, años, etc.), o de manera espacial de forma que se pueda entender la distribución de las precipitaciones y los comportamientos climatológicos de una zona particular, a partir de características básicas como la intensidad, la duración y la frecuencia.

El presente documento se encuentra dividido en 12 capítulos, distribuidos como sigue, del capítulo 1 al 5 son consideraciones generales de la investigación. Los capítulos 6 al 10, se desarrollaron en forma de artículo científico con introducción, materiales y métodos, análisis de resultados y conclusiones. El capítulo 11 son las conclusiones generales y el 12 las referencias utilizadas en todo el documento. A continuación, se detallan cada uno de estos capítulos:

Capítulo 1. Introducción donde se indica la configuración del documento.

Capítulo 2: Antecedentes de los análisis estocásticos de la variable de precipitación y de la modelación hidrológica.

Capítulo 3: Objetivos generales y específicos del estudio adelantado.

Capítulo 4: Marco teórico e hipótesis de la investigación

Capítulo 5: Metodología general de la investigación

Capítulo 6: Fundamentación teórica de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) en las zonas urbanas y zonas rurales. Este capítulo se subdividió en dos: 1. Criterios de diseño para la planificación de los sistemas de aprovechamiento de agua en la agricultura: una revisión bibliográfica, el cual fue un artículo publicado en diciembre de 2019 en la revista científica Applied Science que es JCR; 2. Revisión de los parámetros de diseño para la recolección de agua lluvia en zonas urbanas: una solución en la gestión integral de los recursos hídricos, que se plantea su publicación posteriormente.

Capítulo 7: Análisis de estacionariedad y modelos autorregresivos, que fue publicado en la revista científica Atmosphere en junio del 2020 y es JCR.

Capítulo 8: Escurrimiento directo utilizando el método del Número de Curva.

Capítulo 9: Modelo hidrológico utilizando la herramienta WEAP para determinar los caudales y analizar la oferta y demanda del recurso hídrico.

Capítulo 10. Operatividad de la normatividad existente, haciendo un análisis de las normas relacionadas con el recurso hídrico en Colombia.

Capítulo 11. Conclusiones generales

Capítulo 12: Referencias

2 Antecedentes

Analizar el funcionamiento hidrológico en una zona es determinante ya que se debe conocer el correcto manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos. Con el conocimiento de los volúmenes de aguas disponibles en una zona se puede establecer cómo afectan al mismo la producción de energía hidroeléctrica, abastecimiento de aguas a poblaciones y la respectiva disposición de aguas residuales, uso del agua en actividades agropecuarias, entre otros.

En términos generales, la hidrología se encuentra regida por el clima, la vegetación, la geología y la topografía entre otras que hacen parte del funcionamiento natural del ciclo hidrológico y también lo pueden alterar por las variaciones que se puedan dar en el clima, en el cambio de uso del suelo, y otros factores como la intervención antrópica sobre la cuenca estudiada.

Aunque la cantidad de agua permanece constante, la distribución de esta varía continuamente en cuencas locales, regiones y continentes, lo cual ha llevado a hablar constantemente de la variabilidad climática y que como consecuencia genera problemas en la disponibilidad del agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la hidrología, para la mayoría de las variables climatológicas de los procesos del ciclo hidrológico, una de las herramientas más utilizadas son los modelos estocásticos del tipo autorregresivos ARMA(p,q), aplicados a problemas relacionados con el análisis del flujo subterráneo [1], y a los regímenes de lluvia y escurrimiento de una región. Por ejemplo, la predicción de la precipitación para los períodos secos puede modelarse utilizando cadenas de Markov y en general el método de Monte Carlo [2,3]. Además, diversos autores han utilizado los modelos autorregresivos en

conjunto con otras técnicas como las redes neuronales artificiales buscando mejorar la eficiencia de los resultados [4,5].

Los modelos autorregresivos por más de una década han ayudado en el estudio de las variables hidroclimatológicas, han permitido desde hace más de una década, el estudio que los hidrólogos utilizan para describir los procesos del ciclo hidrológico. De igual manera, los modelos autorregresivos permiten el estudio de los modelos conceptuales de los procesos lluvia-escorrentía para diversos climas [6,7], siendo importante tenerlo en cuenta para la presente investigación. Por lo tanto, es importante destacar que los modelos autorregresivos han sido utilizados en el análisis de las series de precipitación y temperatura, lo cual ha permitido que se realicen pronósticos que puedan utilizarse como herramientas para los modelos hidrológicos para posteriormente ser utilizados en la toma de decisiones encaminadas al aprovechamiento y protección de los recursos naturales [8].

Es por lo anterior, que se hace el análisis de las series de precipitación para la cuenca con el fin de ayudar en el proceso de datos faltantes a ingresar en el modelo hidrológico a desarrollar, esto es porque la precipitación es la variable de entrada más importante en el ciclo hidrológico.

Por otro lado, los modelos hidrológicos son la representación matemática del ciclo del agua en una cuenca con el fin de transformar la lluvia en escorrentía [9]. Los modelos pueden ser determinísticos y estocásticos. Los determinísticos establecen que dada una entrada se produce una salida, mientras que los estocásticos tienen salidas que son parcialmente aleatorias. En términos generales, la mayoría de

los modelos que involucran la precipitación son estocásticos, como se mencionó antes.

Los modelos determinísticos pueden ser agregados y distribuidos y ellos a su vez se dividen en flujo permanente de acuerdo a si cambia en el tiempo o en flujo no permanente [10].

La importancia de la elaboración de modelos hidrológicos radica en que son una herramienta que permite determinar los recursos hídricos a nivel local, departamental (o estatal) y nacional. Por lo tanto, crea las bases organizativas en el área de estudio, además del conocimiento necesario para garantizar la preservación y uso racional y eficiente del agua terrestre.

Para la modelación de los recursos hídricos se tiene diversos tipos de modelos: los hidráulicos que describen flujos en ríos, inundaciones, entre otros; los hidrológicos que relacionan el proceso precipitación - escorrentía; y los de planificación que son modelos de los sistemas de los recursos hídricos.

Dentro de los hidráulicos e hidrológicos están el conjunto HEC (Hydrological Engineering Center), donde está el modelo que analiza la lluvia - escorrentía (Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS por sus siglas en inglés)); el de la modelización del flujo en cauces para estudio de inundabilidad, transporte de sedimentos y calidad (Hydrological Engineering Center - River Analysis System - (HEC-RAS por sus siglas en inglés)) [11,12]; y, para la evaluación y planificación del recurso hídricos dentro del cual tenemos Soil and Water Assessment Tool (SWAT por sus

siglas en inglés) y el Water Evaluation And Planning System (WEAP por sus siglas en inglés) [13-16].

En este estudio se utiliza WEAP porque integra los procesos hidrológicos en la cuenca con el sistema de manejo de los recursos hídricos. Además, puede recibir la información climática de forma directa. Esto último permite acoplar los modelos autorregresivos al modelo. Finalmente, el modelo WEAP se encuentra basado en una visión holística e integrado de la administración de los recursos hídricos, involucrando la oferta y demanda del agua.

Adicional a lo anterior, WEAP ayuda en la investigación de políticas ya que se pueden involucrar aspectos de la distribución del agua, cambio climático, cambio de uso del suelo y planificación de la estructura, lo cual puede ser realizado de la mano con los distintos actores involucrados en la cuenca (gobierno, sector privado, sociedad civil, público general y granjeros).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

- Proponer un modelo de gestión integral del recurso hídrico que permita mitigar el déficit y superávit en poblaciones aledañas a la cuenca media del río Sinú.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis de consistencia de datos históricos mensuales multianuales de la precipitación para encontrar la tendencia de su variabilidad y estacionalidad.
- Estandarizar las series de tiempo de precipitación mensual de las estaciones climatológicas mediante la transformación Box-Cox para garantizar la estacionariedad.
- Definir y validar el modelo *SARIMA* óptimo para cada serie de tiempo de precipitación mensual usando el Criterio de Información de Akaike, para realizar pronósticos de lluvia mensuales.
- Obtener series sintéticas de precipitación mensual que conserven la estructura de las originales a partir de los modelos *SARIMA* seleccionados, para realizar pronósticos de lluvia mensuales.
- Estimar la demanda hídrica poblacional y agropecuaria teniendo en cuenta la normatividad colombiana para determinar la curva de masa.

- Calcular el balance hídrico considerando los componentes del ciclo hidrológico para estimar la disponibilidad del recurso en la cuenca media del río Sinú.
- Evaluar la factibilidad de aprovechamiento de agua superficial teniendo en cuenta la curva de masa y las características fisiográficas de la cuenca.
- Revisar la política existente de operación/preservación del recurso hídrico en la zona de estudio.

4 Marco teórico

Cuando se estudia el comportamiento hidrológico de una cuenca es de vital importancia analizar las características propias de la superficie terrestre con la finalidad de relacionarlas con la susceptibilidad que pueda tener dicha cuenca a una inundación durante un evento de precipitación. Para lograr esto, se utilizan los parámetros morfométricos que permiten expresar en términos numéricos las características de paisajes complejos [17].

Los parámetros morfométricos de forma y de red de drenaje son importantes porque definen el comportamiento de la escorrentía y ayudan a determinar qué tan bueno es el drenaje de la cuenca, es decir, la rapidez con la cual escurre en un evento de lluvia [18]. Por lo tanto las características litológicas y geológicas de la cuenca, así como la cobertura vegetal, pendiente y tipos de suelos tienen una alta incidencia en la evaluación del ciclo hidrológico [19].

Para realizar una modelación hidrológica es necesario realizar un análisis de la precipitación, por lo que el uso de los modelos estocásticos, son importantes para entender la dinámica temporal de las lluvias en la zona de estudio. En este ámbito, el uso de modelos tipo *SARIMA* han demostrado obtener buenos resultados cuando se analizan series de tiempo de precipitación mensual, permitiendo generar series sintéticas y realizar pronósticos de lluvia acertados [20]. Esto permite contar con mayor información del comportamiento de la precipitación en la zona de estudio y facilita la comprensión del fenómeno, lo cual resulta una herramienta útil para cualquier estudio desarrollar modelos hidrológicos en la cuenca [21].

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) se convierte entonces en una herramienta fundamental para el estudio de la morfometría de cuencas [22]. De igual manera, existen herramientas como el Water Evaluation and Planning System (WEAP por sus siglas en inglés) que permiten evaluar el ciclo hidrológico teniendo en cuenta todos los factores y características mencionados anteriormente, y además involucra el aspecto de la demanda de agua de los diversos sectores que se involucran en el manejo de una cuenca.

En conjunto estas herramientas ayudan a los tomadores de decisiones en el proceso de administración y planificación del recurso hídrico, considerando las zonas con mayor consumo y aquellas donde se presentan déficit del recurso, por lo tanto, se pueden focalizar los esfuerzos en esas zonas para reforzar las acciones en estos sitios.

4.1 Hipótesis

Las hipótesis de la presente investigación son:

1. La caracterización hidrológica mediante el uso del SIG logra representar la geometría y el relieve de la cuenca del río Sinú.
2. El uso de Modelos Digitales de Elevación en el SIG en conjunto con el análisis de la cartografía permite en conjunto con los parámetros morfométricos de la cuenca del río Sinú permiten caracterizar los escurrimientos superficiales de la zona de estudio.

3. Los modelos estocásticos tipo *SARIMA* son apropiados para la modelación de la precipitación mensual en la cuenca del río Sinú.

4. El modelo hidrológico de la cuenca del río Sinú, se convierte en una herramienta para los entes gubernamentales dentro de la gestión de políticas en el manejo de los recursos hídricos, además ayuda a la administración del recurso hídrico y la posterior toma de decisiones.

5. El conocimiento de las políticas relacionadas con el recurso hídrico permite determinar las deficiencias existentes y ayuda a generar mejoras hacia una adecuada Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH).

5 Metodología general

Para el desarrollo del documento, inicialmente se realizó una fundamentación teórica de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) en las zonas urbanas y en las zonas rurales. Para las zonas rurales se enfocó hacia su uso en la parte agrícola, la cual es la que junto con la pecuaria garantiza la seguridad alimentaria, uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En la parte urbana, se enfocó hacia su uso en viviendas y edificaciones, mostrando una manera de disminuir los escurrimientos de las ciudades y de garantizar el suministro de agua desde zonas áridas y semiáridas a las tropicales.

Luego se desarrollan modelos *SARIMA* para la variable más importante del ciclo hidrológico que es la precipitación. A continuación, en la Figura 1 se muestra la metodología general del desarrollo de los modelos *SARIMA*.

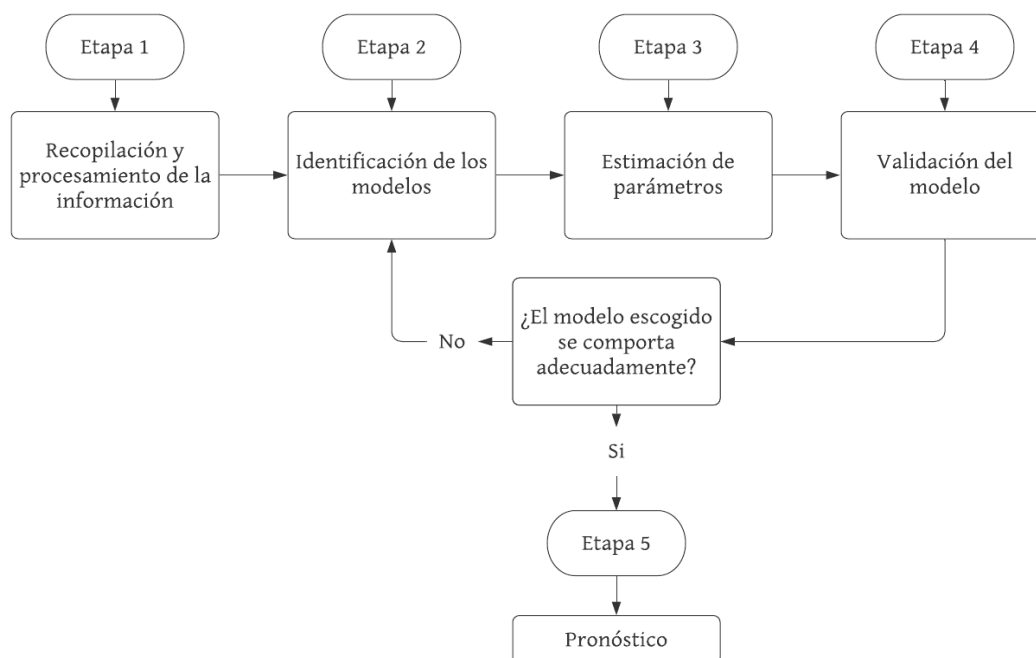


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología para obtener el modelo apropiado para cada estación climatológica

Una vez desarrollados los modelos, se realizó el cálculo del escurrimiento directo, para lo cual se muestra el flujograma de este en la Figura 2.

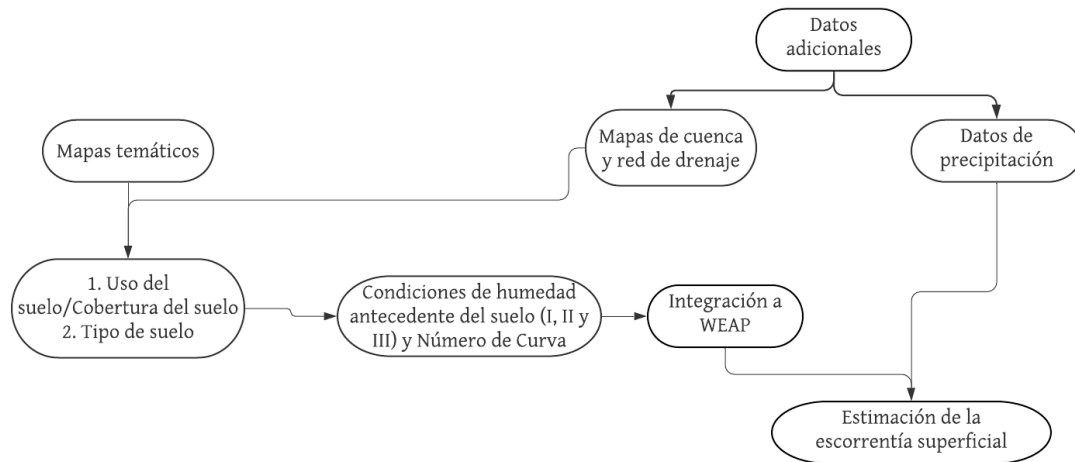


Figura 2. Diagrama de flujo de metodología para estimar el escurrimiento directo o escorrentía superficial

Con los anteriores procedimientos se procede a integrar la información al WEAP para determinar los caudales teniendo en cuenta las demandas y demás información para que el modelo sea desarrollado, lo cual se puede apreciar en la Figura 3.

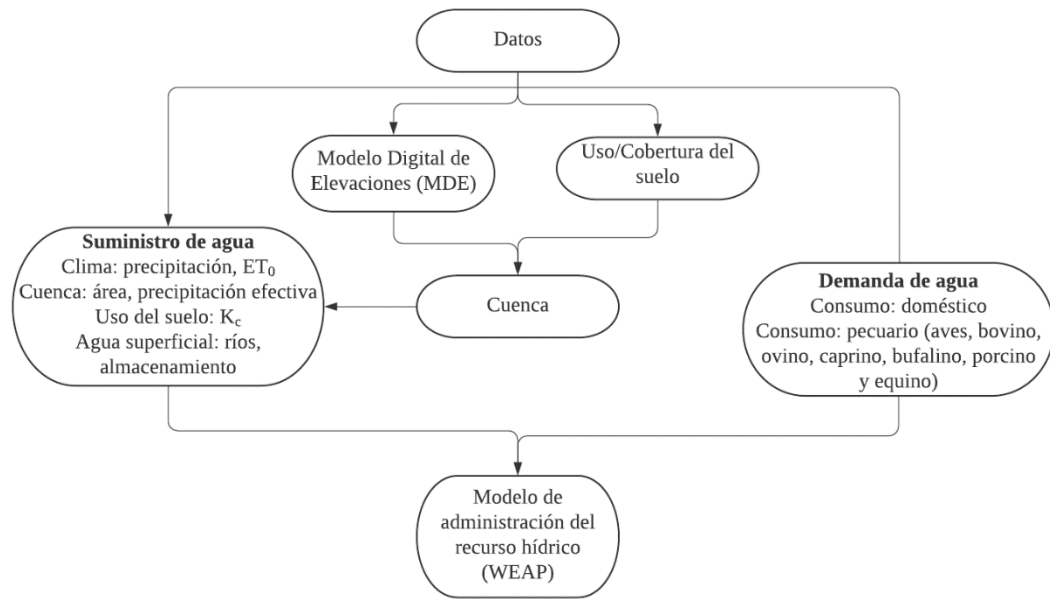


Figura 3. Diagrama de flujo de metodología para la modelación en WEAP

Finalmente, se hace un análisis de la norma colombiana, realizando un detallado análisis.

6 Fundamentación teórica de la gestión integral del recurso hídrico en zonas rurales y urbanas

6.1 Criterios de diseño para la planificación de los sistemas de aprovechamiento de agua en la agricultura: una revisión bibliográfica

6.1.1 Introducción

El efecto de la variabilidad climática se ha manifestado en diversas partes del mundo, observándose que poblaciones enteras tienen problemas de desabastecimiento de agua. Aunado a lo anterior, las políticas locales con relación a la gestión integral de los recursos hídricos han sido deficientes y ha conllevado a que la escasez de éstos en zonas urbanas y rurales se incremente.

Es de conocimiento general que el agua es un elemento indispensable para la vida humana desde la perspectiva biológica del organismo vivo, así como la base de la seguridad alimentaria y la biodiversidad. Sin embargo, el recurso actualmente se encuentra amenazado por las actividades antropogénicas, y a la presión anterior, se le suma el efecto del cambio climático [23-25], conllevando a una preocupación generalizada sobre la escasez del recurso hídrico y, ocasionando que investigadores se preocupen por indagar acerca de las alternativas que se pueden utilizar para obtenerlo y administrarlo de manera adecuada.

En general, los estudios se han enfocado hacia una gestión integral de los recursos hídricos, siempre buscando alternativas que permitan su uso eficiente y por lo tanto involucrando a todos los actores que puedan estar ejerciendo

una presión sobre el recurso. Los actores implicados en la gestión son las personas que utilizan el recurso para su subsistencia, tales como propietarios de tierras (agricultores, ganaderos), usuarios de consumo humano, industria, entre otros [26]; o incluso los entes gubernamentales que se encargan de su administración. Una vez se identifican las partes interesadas (actores) en una zona (cuenca hidrográfica), se observan posibles conflictos cuando se presenta la escasez del recurso hídrico por la inequitativa distribución de este a lo largo de un río o en una cuenca. De igual manera, los conflictos podrían incrementarse si a lo anterior se adicionan las deficiencias en la administración del recurso por parte de los entes gubernamentales, y si, además, se le suma el rechazo por parte de los usuarios a las posibles política locales en el manejo de estas fuentes hídricas por considerarlas inadecuadas [27].

A la anterior problemática se deben involucrar el crecimiento demográfico y el consecuente incremento de las actividades económicas que ha ocasionado una mayor demanda del recurso y por lo tanto un aumento en la presión del mismo [27-29].

Así mismo, con el cambio climático, se ha presentado una modificación en los patrones de ocurrencia de las precipitaciones, dando como resultado periodos secos con pocas lluvias o periodos húmedos con excesos de precipitaciones [30-33], generándose por un lado, condiciones de disminución en la disponibilidad del recurso, y por otro catástrofes en las cuales pueden haber pérdidas humanas y económicas causadas por las inundaciones debidas a los aumentos en las precipitaciones.

Buscando disminuir la problemática expuesta y las consecuencias generadas (disminución de la producción agropecuaria, interrupciones en el suministro de agua a poblaciones, entre otros), se presentan alternativas que plantean solucionar este tipo de inconvenientes. Sin embargo, para llevar a cabo un estudio de las cantidades de agua existentes en una zona, se debe hacer un análisis de la disponibilidad del recurso hídrico, y definir las condiciones del ciclo hidrológico, y en consecuencia del balance hídrico, el cual interrelaciona las variables de precipitación, interceptación, temperatura, escorrentía superficial, evapotranspiración potencial y real.

Dentro de estas variables, la precipitación es la más importante cuando se habla de clima e hidrometeorología, ya que es la responsable de los cambios a presentarse en los patrones relacionados con las inundaciones, sequías, pérdidas en la biodiversidad, problemas relacionados con la producción agropecuaria, así como los relacionados con daños en la infraestructura [34,35]. Dado lo anterior, esta variable y todas las que intervienen en el ciclo hidrológico, han sido estudiadas por investigadores, y concluyen que las mismas presentan un comportamiento estocástico y de igual manera se ven afectados por factores climatológicos, fisiográficos y antrópicos. Por lo tanto, se hace necesario que la precipitación y la escorrentía, involucradas en el balance hídrico, sean analizadas mediante el uso de modelos estadísticos que permitan realizar predicciones [36,37]. Además, es necesario estudiar exhaustivamente las cuencas considerando el aumento de las condiciones en la demanda de recursos, incluida su escasez y afectación en la

infraestructura hidráulica construida por el hombre alrededor de los cursos de agua.

Los estudios que pretenden estimar la cantidad de agua a generarse en avenidas o crecientes o aquéllos que buscan suplir las necesidades de agua, proponen alternativas que parten de la captación de aguas lluvias (llamadas también cosecha de agua, sistema de recolección de aguas lluvias, entre otros nombres), los cuales se han realizado en zonas geográficas con condiciones áridas (precipitación anual <100mm), semiáridas (precipitación anual 250 - 400 mm), monzónicas (precipitación mínima mensual entre 60 y 100 mm), y subhúmedas (la caracterización depende de la localización de la zona de estudio) [38]. En cada una de estas condiciones climatológicas se desarrollaron proyectos de captación de aguas lluvias para zonas urbanas y rurales teniendo en cuenta los usos para los cuales se vaya a destinar la utilización del recurso hídrico [39-41] así como la problemática a solucionar entre ellas inundaciones o sequías.

Entendida la problemática, investigadores han contemplado retomar los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia como una solución adecuada para la mitigación de las inundaciones y el abastecimiento. Estos sistemas se han utilizado ancestralmente en el mundo [42], y en la actualidad su uso se ha acentuado en zonas áridas y semiáridas, ya que éstas se han visto afectadas por el cambio en los patrones de las precipitaciones.

La recolección de agua Lluvia es un término generalmente utilizado para describir el almacenamiento y concentración de la escorrentía para diversos usos, incluyendo el uso agrícola y doméstico [43-45]; también es usado para describir la recolección y almacenamiento de agua ya sea directamente en

forma de precipitación y escorrentía superficial, o directamente de agua subterránea, subsuperficial o ríos [46,47].

De igual manera, dentro de los sistemas de captación del agua lluvia, la precipitación es la variable principal con la cual se puede obtener la cantidad del recurso hídrico, y, por lo tanto, las soluciones planteadas van a depender de la zona de estudio, es decir, de las características fisiográficas, y de la infraestructura existente (áreas urbanas y rurales). En el caso de los análisis desarrollados para las zonas urbanas, se plantea una problemática con el uso de las aguas lluvias, ya que las personas son escépticas a este tipo de suministro, especialmente en zonas con bajas cantidades de precipitación [48], sin embargo, ha tenido éxito cuando se capta el agua para ayudar a mantener el ciclo hidrológico y para utilizarse en actividades en las cuales no se requiera agua apta para el consumo humano [39,40,49].

En el caso de las zonas rurales, en donde se enfoca el presente estudio, las soluciones planteadas van a depender del tipo de abastecimiento requerido (poblacional o agropecuario), y de la zona donde se vaya a aplicar (árida, semi-árida, entre otros). Por lo tanto se proyectan soluciones desde la perspectiva de ofrecer el recurso hídrico a las actividades agropecuarias y a las necesidades domésticas del campo, permitiéndose presentar alternativas para contrarrestar la escasez del agua, entre las cuales se puede contar recolección en los tejados de las viviendas [41,48,50-54], las presas, cisternas, y estanques [55-58], crestas y surcos, entre otros. En muchos casos, estas aguas no son utilizadas para consumo humano, debido a sus condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas, ya que no cumplen con ninguna normatividad

internacional con relación a la potabilidad del agua, lo cual es ocasionado por la presencia de contaminantes en el agua lluvia e incluso al material del techo que sirve como captación para la recolección [59-65].

En el presente trabajo se realiza una revisión del estado del arte relacionado con los sistemas de recolección de agua lluvia en las zonas rurales. Primero, se identifican las metodologías empleadas para el RWH, considerando el tipo de estructura hidráulica utilizada para captar los escurrimientos superficiales según el área de la cuenca. Posteriormente; se identifica que el tipo de suelo, la precipitación promedio y características fisiográficas, constituyen los parámetros de diseño más relevantes para planeación y ubicación de las estructuras hidráulicas que garantizarán la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) en la agricultura.

6.1.2 Estructuras hidráulicas para el aprovechamiento de aguas lluvias

Las técnicas de aprovechamiento del recurso hídrico se encuentran focalizadas considerando el uso al cual se va a destinar el recurso y la zona en donde se va a aplicar la misma (urbana o rural). Las enfocadas a desarrollarse en zonas rural, se encaminan hacia el uso de sistemas de recolección de agua lluvia, cuya función principal es almacenar el agua en época de lluvias para ser utilizados en las épocas de sequía, cuando el recurso no se encuentra disponible. De igual manera, se asocian también a los usos a los cuales se va a destinar el agua, ya sea para cultivos o para abastecimiento doméstico en granjas [66]. A partir de la revisión de los planteamientos realizados por cada autor para el aprovechamiento del recurso hídrico para uso doméstico y agrícola; se realizan 5 clasificaciones o grupos.

El grupo 1, se denominó como macrocuencas, en donde se encuentran contempladas las presas [67], pequeñas presas [68], presas de control [69], embalses [69], cisternas [67] y nala bunds [69]. El grupo 2, se llamó microcuencas, y aquí se contemplaron jessour [69], tabias [69], excavación con dique (pits contour) [70], crestas de contorno [71], franjas de contorno (runoff strips) [69], Negarim [71], diques [70] y terrazas [70]. El grupo 3 se denominó recarga de acuíferos y está conformado por diques de barranco (gully plugs), recarga de acuíferos, diques subsuperficiales y tanques de percolación [72]. El grupo de 4, se denominó micro y macrocuencas y comprende los autores que utilizaron unas combinaciones de las estructuras involucradas en el primer, segundo y tercer grupo. Finalmente, se tiene un grupo 5, que se estableció con aquellos autores en los cuales el aprovechamiento del agua se realizó con labranza de reserva, del cual se deriva su nombre. En este último grupo se usa un dispositivo mecánico que desarrolla microembalses para la captación "in-situ" del agua lluvia con el objeto de aumentar la retención de humedad en el suelo y, además tiene como función adicional disminuir la erosión de los suelos y por lo tanto, es muy común usarlo en suelos sueltos, característicos de zonas semiáridas [73,74].

Una vez fueron divididas las metodologías en grupos, se procedió a establecer los parámetros de diseño que cada autor utilizó, como se pueden observar en las Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5. Se consideraron 22 parámetros de diseño, entre los cuales se encuentran las características fisiográficas (pendiente, red de drenaje, escorrentía y área de la cuenca), las características climatológicas (precipitación, humedad relativa (HR), velocidad y dirección del viento, radiación solar (RS) y evaporación), suelo (uso,

textura, cobertura y profundidad), características socioeconómicas (No de habitantes, entrevista a las partes interesadas, costo, tenencia de la tierra, características de la vivienda) y distancia a las viviendas, cultivos y cursos de agua. Además de los parámetros se establecieron las ventajas y desventajas de cada uno de estos grupos para hacer un análisis con mayor facilidad.

En la tabla 1, se presentan los parámetros de diseño considerados por cada autor para los sistemas de macrocuencas. Dichos parámetros pueden ser obtenidos directamente en el terreno o estimados de forma indirecta a partir del empleo de sensores remotos, para posteriormente conformar bases de datos que se gestionan mediante la utilización de los sistemas de información geográfica (GIS).

De igual manera el empleo de los GIS permite planificar las cuencas hidrográficas para establecer las zonas apropiadas que garanticen la eficiencia de los RWHS mediante el uso de presas y diques, así como de sus respectivos embalses.

Otros aspectos relevantes considerados en las metodologías que conforman el grupo 1, son las condiciones socioeconómicas y las características locales de la zona de estudio, tales como la distancia del área de recolección hasta el punto de aprovechamiento, así como la factibilidad técnica para la construcción y operación a largo plazo.

Finalmente, la aplicación de los procesos de jerarquía analítica, permiten dar pesos a los diferentes atributos que se involucran en el proyecto dándole una importancia diferente a cada uno, dependiendo de la idoneidad de los sistemas de recolección de agua lluvia. Aunque se disminuye la

subjetividad, sigue existiendo ya que los pesos para el proceso de jerarquía analítica van a depender de los involucrados en el proyecto.

Estas metodologías en general se limitan a la aplicación de soluciones de recolección de agua lluvia relacionadas con la construcción de diques, presas y embalses. De igual manera, en algunos casos no se socializan a las comunidades ubicadas en la zona para la selección de los sitios idóneos, ni se involucran los aspectos sociopolíticos que pueden influir en la realización y beneficio del proyecto. Sin embargo, la necesidad de realizar reuniones con partes interesadas, tiene el inconveniente de que la toma de decisiones se convierte en un desafío para buscar un consenso general en la obtención de la solución idónea [93].

A pesar de las ventajas y aplicabilidad de la metodología en otras partes del mundo, el modelo debe ser calibrado y validado para su uso.

Tabla 1. Grupo 1: Sistemas de macrocuencas

Autor	Características Climatológicas				Características fisiográficas					Suelo			Características socioeconómicas			Distancia a					
	Precipitación	Humedad Relativa	Dirección y velocidad del viento	Radiación Solar	Evaporación	Red de drenaje	Pendiente	Escorrentía	Área de la	Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	No. habitantes	Entrevista a partes	Costo	Tenencia de la	Característica de la vivienda	Viviendas	Cultivos	Corrientes
Gupta et al., 1997 [75]	X					X	X	X	X	X	X										
Srivastava, 2001 [76]	X				X															X	
Senay and Verdin, 2004 [77]	X							X	X					X							
de Winnaar, Jewitt, and Horan, 2007 [78]	X						X		X	X	X									X	X
Forzieri et al., 2008 [79]	X						X		X		X					X			X		X
Roy et al., 2009 [80]	X						X	X		X											
Sturm, Zimmermann et al. 2009 [81]	X							X	X												
Al-Daghastani, 2010 [82]	X					X			X		X										
Salih and Al-Tarif, 2012 [83]						X	X		X		X										
Ziadat et al., 2012 [84]							X		X	X	X	X					X	X			
Jayasuriya et al., 2014 [85]	X							X	X												
Jabr and El-Awar, 2004 [86]							X	X		X	X	X									
Mahmoud and Tang, 2015 [87]	X						X		X	X	X										
Adham et al., 2016 [88]	X						X			X		X				X			X		
Mekonnen et al., 2016 [47]	X					X	X	X	X	X	X				X						
Sayl et al., 2016 [89]	X	X	X	X	X		X							X							
Mahmood and Hossain, 2017 [90]	X							X	X	X											
Terêncio et al., 2017 [91]	X						X			X		X	X							X	X
Terêncio et al., 2018 [92]	X						X			X		X	X							X	X

Tabla 2. Grupo 2: Sistemas de microcuencas

Autor	Características climatológicas				Características fisiográficas				Suelo			Características socioeconómicas			Distancia a						
	Precipitación	Humedad Relativa	Dirección y velocidad del viento	Radiación Solar	Evaporación	Red de drenaje	Pendiente	Escorrentía	Área de la cuenca	Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	No. habitantes	Entrevista a partes interesadas	Costo	Tenencia de la tierra	Características de la vivienda	Viviendas	Cultivos	Corrientes
Bhatnagar et al., 1996 [94]	X								X												
Oweis et al., 1998 [95]	X						X		X	X	X	X									
Schiettecatte et al., 2005 [96]	X							X		X											
Ziadat et al., 2006 [97]							X		X	X	X	X									
Mbilinyi et al., 2007 [98]	X					X	X		X	X	X	X									
Al Ali et al., 2008 [99]	X						X														
Bakir and Xingnan, 2008 [100]	X						X		X	X	X										
Al-Seekh and Mohammad, 2009 [101]	X						X	X		X	X										
Bekele Awulachew et al., 2009 [102]	X						X		X	X	X										
Mechlia et al., 2009 [103]	X					X	X	X	X	X			X	X				X			
Previati et al., 2010 [104]										X			X								
Al-Shamiri and Ziadat, 2012 [105]	X						X			X			X								
Krois and Schulte, 2014 [106]	X						X		X	X	X	X									
Napoli et al., 2014 [58]	X	X	X	X			X		X	X	X										
Mahmoud and Alazba, 2015 [107]	X						X	X	X	X	X										

Autor	Características climatológicas	Características fisiográficas	Suelo	Características socioeconómicas	Distancia a
	Precipitación Humedad Relativa Dirección y velocidad del viento Radiación Solar Evaporación	Red de drenaje Pendiente Escorrentía Área de la cuenca	Uso Textura Cobertura Profundidad	No. habitantes Entrevista a partes interesadas Costo Tenencia de la tierra Características de la vivienda	Viviendas Cultivos Corrientes
Adham et al., 2016 [108]	X	X X			

El grupo 2, cuyos autores se indican en la Tabla 2, se enfoca a escala de granjas que requieren suministro de agua en sus cultivos para garantizar la seguridad alimentaria de los habitantes en zonas con precipitaciones que varían espacial y temporalmente. Así como en el caso del grupo 1, aquí el uso de los SIG para crear un MDE a partir de mapas topográficos y verificación en campo, se convierten en una herramienta útil para especificar sitios idóneos para la infraestructura de aprovechamiento de agua lluvia con una precisión aceptable. En algunos casos, al no disponerse de información de la caracterización de suelos, se usaron modelos de predicción del paisaje y suelo con resultados adecuados y usados para mejorar la resolución de los atributos que permitan optimizar la identificación de áreas idóneas.

Adicional al uso de los SIG se involucran en el proceso de selección de la ubicación de las estructuras hidráulicas para la recolección de agua lluvia los sensores remotos, el análisis y verificación en campo y puntajes de idoneidad de los parámetros físicos e hidrológicos, lo cual contribuye al incremento de la confiabilidad del proceso.

De igual manera, para determinar la viabilidad de la construcción de las estructuras de captación de agua lluvia en determinadas zonas, se tienen en cuenta el área de captación requeridas y las respectivas pérdidas en el proceso de conducción del agua, lo cual finalmente influirá en los costos de construcción de la estructura hidráulica. Así mismo, se determina la ubicación óptima teniendo en cuenta el costo de un sistema con un transporte eficiente y de la construcción del tanque en una zona menos económica.

En algunos casos la sencillez de la estructura hidráulica a construir incide en la cantidad de parámetros exigidos para

su localización y diseño. Además, el desarrollo de este tipo de suministro de agua se convertiría en la base para solucionar la problemática relacionada con la seguridad alimentaria y contribuirían disminuir los procesos erosivos en el suelo. Por lo tanto, al obtenerse una irrigación suplementaria para los cultivos, se tiene un uso eficiente del agua y un aumento en la productividad.

Sin embargo, en este grupo no se tienen en cuenta los aspectos socioeconómicos en el diseño e implementación de la infraestructura hidráulica para la recolección de agua lluvia. De igual manera algunos autores usan puntajes de idoneidad o ponderaciones [97,98], los cuales pueden generar sesgo en la toma de decisiones, a pesar del uso de metodologías para establecer las condiciones de selección en la evaluación de los parámetros a puntuarse [68,71,98,102,109,110].

En el caso específico del estudio de Senay y Verdin [77], la resolución de los datos no permite que esta metodología sea aplicable a la planificación y diseño de estanques agrícolas individuales, debido a que se obtiene una visión general de las diferencias relativas entre las regiones para realizar estudios de viabilidad en la evaluación y planificación de estanques de granja como una herramienta para la gestión del agua.

Como desventaja este grupo se usa para almacenar escorrentía y suministrar agua a huertos de pequeña escala, por lo cual es poco probable su uso para áreas grandes de recolección de escorrentía, sin embargo se podría replicar hacia soluciones de infraestructura hidráulica de mayor envergadura, pero se requiere una mayor cantidad de parámetros en la evaluación [76].

La metodología utilizada en el grupo 3 permite establecer zonas adecuadas para la ubicación de técnicas para la recarga de aguas subterráneas, garantizando el uso sostenible del recurso en zonas con poca disponibilidad de este [111].

Se demuestra que la detención remota, los SIG y el proceso de jerarquía analítica son poderosas herramientas para ubicar zonas potenciales que se puedan usar para recarga de agua subterránea [112].

Finalmente, los resultados y bases de datos encontrados en el estudio pueden ser usados como herramienta para llevar a cabo modelos conceptuales en zonas áridas que presenten características similares a las analizadas [111]

En la metodología, al asignar el peso para cada uno de los criterios, teniendo en cuenta la escala de calificación, se puede incurrir en subjetividades.

Tabla 3. Grupo 3: Sistemas para recarga de acuíferos

Autor	Características Climatológicas				Características fisiográficas				Suelo			Características Socioeconómicas			Distancia a						
	Precipitación	Humedad Relativa	Dirección y velocidad del viento	Radiación Solar	Evaporación	Red de drenaje	Pendiente	Escorrentía	Área de la	Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	No. habitantes	Entrevista a partes	Costo	Tenencia de la	Característica de las viviendas	Viviendas	Cultivos	Corrientes
Durbude and Venkatesh, 2004 [113]	X						X	X	X	X	X										
Bamne et al., 2014 [114]						X	X			X	X	X									
Sekar and Randhir, 2007 [115]	X							X		X	X	X			X						
Ramakrishnan et al., 2008 [116]	X					X	X			X	X	X									
Ramakrishnan et al., 2009 [117]	X						X	X	X												
Glendenning and Vervoort, 2010 [118]	X								X	X	X	X	X								
Glendenning and Vervoort, 2011 [119]	X				X					X	X		X								X
Kadam et al. 2012 [120]	X					X	X	X		X	X	X							X		
Mahmoud, 2014 [111]	X				X		X	X		X	X	X									

Tabla 4. Grupo 4: Sistemas de microcuencas y macrocuencas

Autor	Características climatológicas				Características fisiográficas				Suelo			Características socioeconómicas			Distancia a						
	Precipitación	Humedad Relativa	Dirección y velocidad del viento	Radiación Solar	Evaporación	Red de Drenaje	Pendiente	Escorrentía	Área de la	Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	No. habitantes	Entrevistas a las partes	Costo	Tenencia de la	Características de la vivienda	Viviendas	Cultivos	Corrientes
Banai-Kashani, 1989 [121]					X											X					
Oweis, 1999 [68]	X	X	X	X	X					X	X	X									
Prinz and Singh, 2000 [122]	X					X	X	X	X	X	X	X		X							
Mbilinyi et al., 2005 [123]									X	X				X							X
Mati et al., 2007 [124]	X								X	X	X	X	X								
Kahinda et al., 2008 [109]	X									X	X	X				X	X				
Kamel and Mohammed, 2010 [125]	X							X													
Ghani et al., 2013 [126]						X	X														X
Jha et al., 2014 [127]	X					X	X	X	X	X	X										
Grum et al., 2016 [93]	X					X			X	X	X	X		X							
Singh et al., 2017 [128]	X					X	X	X	X	X											

En general, en el grupo 4 se presentan varios tipos de estructuras que se pueden usar para la recolección del agua lluvia, tales como captación en techos, escurrimiento superficial hacia estanques y hacia presas con su respectivo embalse y sistemas de almacenamiento in situ.

Se usa una puntuación de idoneidad basada en atributos de mapas temáticos elaborados en un SIG y se superpone con la estructura hidráulica de aprovechamiento de agua lluvia propuesta para luego hacer una evaluación multicriterio. Finalmente, la selección de las zonas idóneas se realiza con las partes interesadas [93].

Al realizar reuniones con las partes interesadas, la elección de las herramientas de análisis para la situación que se presenta en cuanto a la selección de la estructura de aprovechamiento de agua lluvia adecuada se convierte en un desafío y ésta no debería ser compleja en tiempo, costos y cantidad de datos necesarios [129].

En algunos de los casos planteados no se incorporan los aspectos socioeconómicos, es decir, se limitaron a darles pesos a cada uno de los aspectos técnicos teniendo en cuenta una decisión política. De igual manera, cabe resaltar que la calidad de los datos de salida depende de las características de los datos de entrada al modelo, es decir, si son datos de terceros u obtenidos de fuentes de información confiable.

Con relación a los autores que se contemplan en el grupo 5 (ver tabla 5), este tipo de estructuras aportan humedad al suelo para obtener cultivos productivos. El aumento de la producción es significativo con el uso de estos métodos. Sin embargo, requieren mecanización, la cual no es necesariamente accesible para las personas en las zonas rurales y requiere

una inversión inicial de recursos que posiblemente el granjero no puede obtener.

Tabla 5. Grupo 5: Sistemas de labranza de reserva (o labranza de yacimiento)

Autor	Características Climatológicas					Características fisiográficas			Suelos				Características Socioeconómicas			Distance to					
	Precipitación	Humedad	Dirección y velocidad	Radiación	Evaporación	Red de	Pendiente	E scorrentía	Área de la	Uso	Textura	Cobertura	Profundidad	No.	Entrevista partes	Costo	Tenencia de	Características de la	Viviendas	Cultivos	Corrientes
Hackwell et al., 1991 [130]	X							X		X			X								
Rochester et al., 1994 [131]	X																				
Ventura et al., 2003 [132]	X									X											
Ventura et al., 2005 [133]	X																				
Patrick et al., 2007 [134]	X						X			X											
Botha et al., 2015 [135]	X								X	X	X	X									

6.1.3 Discusión:

La figura 1 muestra los parámetros de diseño usador por los autores, donde se concluye que la precipitación y la pendiente son los parámetros de diseño más relevantes a considerar, así como las características del suelo (uso, textura y cobertura) en las estructuras de recolección de agua lluvia.

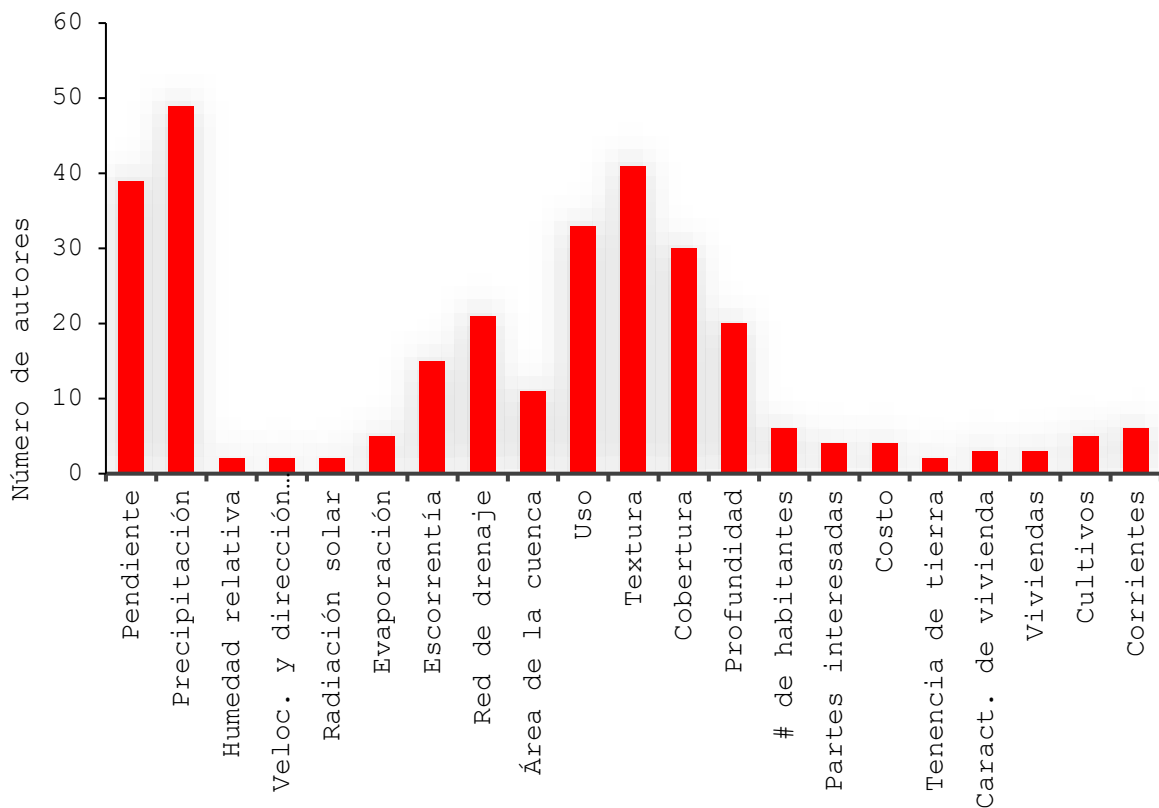


Figura 4. Número de parámetros de diseño por autor

Por otra parte, al hacer la división por estructuras, se encontró que las macrocuencas se caracterizan por estar ubicadas a una distancia considerable de las zonas de aprovechamiento, y por lo tanto se usa generalmente como irrigación suplementaria. Dentro de las ventajas de este tipo de estructuras es que su aprovechamiento se puede considerar

variable, es decir, puede ser usada para consumo humano, agrícola, control de inundaciones e inclusive para aprovechamiento hidroeléctrico. Este tipo de proyectos en la mayoría de los casos son desarrollados en zonas con potencial agrícola, y por lo tanto se ubican en zonas rurales donde se puedan contar con extensiones de suelo donde se almacenarían los volúmenes de agua requeridos. La desventaja más importante de las macrocuencas consiste en que al ser construidas en zonas alejadas del sitio de aplicación del agua, se hace necesario la construcción de la infraestructura necesaria para el transporte y distribución de esta.

En las macrocuencas es común el uso de los SIG y los análisis de decisión multicriterio usando el proceso de jerarquía analítica con el fin de priorizar las zonas donde se podrían ubicar las estructuras hidráulicas para la captación de las aguas lluvias, y dependiendo de la zona de estudio se determinan las principales características a tener en cuenta, como coeficiente de escorrentía, red de drenaje y pendiente [75] o en otros casos usando capas temáticas de precipitación, pendiente, número de curva, y cobertura, uso y textura del suelo [87]. También hay combinación de SIG, sensores remotos y mapas topográficos para localizar las zonas idóneas para almacenamiento de agua (embalses), con cuya información se pueden establecer los niveles óptimos y las áreas a obtenerse para así estimar el volumen de agua a recolectar [83]. Adicionalmente al uso del SIG y las consideraciones técnicas y sociales, se involucra la participación de los agricultores (partes interesadas) y encuestas de campo, donde se evalúa la idoneidad valorando los parámetros que establece en su metodología Ziadat et al. [84], los cuales se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Grupo 1, de igual manera el análisis multicriterio implementado en SIG con pesos flexibles y con criterios de idoneidad basados en variables físicas, ecológicas y socioeconómicas, pueden ser implementadas para diversos tipos de proyectos de captación de agua lluvia como proyectos agroforestales, agricultura a pequeña escala y manejo de la disponibilidad estacional de los recursos hídricos [91,92]. Si además de lo anterior, se involucra el proceso de jerarquía analítica para la localización de depósitos potenciales de agua, se establecen criterios que valoran la aptitud para la captación del agua y se obtiene un índice de idoneidad de reservorio que facilitan la toma de decisiones a los entes gubernamentales [86,88].

Tabla 1. Grupo 1: Sistemas de macrocuencas

Con el uso de imágenes de detección remota y modelo digital de elevaciones (MDE) se puede hacer un análisis de la red de drenaje y usando el número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos se realizan reducir la salinidad en las corrientes efímeras en las zonas semiáridas [82].

En esta misma línea, existen metodologías que utilizan modelos con pocos parámetros (ver Tabla 1), que pueden ser usados en países en vía de desarrollo empleando datos globales [77,89], para generar mapas con índices de captura de agua estimando la disponibilidad de escorrentía, las pérdidas por evaporación y el tamaño de la cuenca [77].

En términos generales, los almacenamientos contemplan diques o presas que permiten almacenar el agua o simplemente son zonas excavadas utilizadas para la captación del agua de escorrentía. Sin embargo, en algunos casos se construyen tanques de diferentes materiales, es decir, no se usa el

terreno natural como recipiente, obteniéndose su ubicación óptima estimando el costo del sistema de conducción y del tanque [76].

Agregando a lo anterior existen casos reportados de captación de agua de techos de viviendas para abastecer a la población, donde se evalúan los aspectos económicos teniendo en cuenta los beneficios que se pueden obtener y las características socioeconómicas de la población [81]; también se utiliza la percepción remota, la precipitación y balance hídrico para localizar zonas en las cuales se podría hacer recolección de agua doméstica para demanda doméstica potable (beber y cocinar) o como demanda doméstica (beber, cocinar y necesidades higiénicas) [90]. Además de uso doméstico, se ha implementado este sistema para huertas familiares, que pueden ser base alimentaria para los habitantes de la vivienda e incluso servir de soporte económico, donde las condiciones climáticas, el material y área del techo influyen en la evaluación de esta metodología de aprovechamiento de agua lluvia [85].

En suma, el uso de los SIG, la detección remota y los análisis de ponderación jerárquica y multicriterio son importantes para facilitar la toma de decisiones a los entes gubernamentales ya que a través de éstos se identifica, planifica y evalúa la capacidad de escorrentía que determina el potencial de aprovechamiento de agua lluvia en una zona [78], llegando incluso a la creación de programas computacionales con los cuales se determinan el tamaño de los embalses y la geometría que debería tener, pero que además tienen en cuenta los tamaños del campo y el sistema de cultivo que implementa el agricultor, así como un modelo de evapotranspiración [80].

Con relación a las microcuencas (grupo 2), la principal ventaja radica en ser utilizadas para cultivos, siendo la recolección de agua "in situ", es decir, ésta se realiza en el mismo campo donde se hace la plantación, ya sea dentro de la zona donde se encuentra la planta o con un área de impluvio que sirva como cuenca y sea posteriormente almacenada en cercanías a la zona del cultivo. Dentro de las desventajas, se encuentra que en diversos casos se requiere de irrigación suplementaria, como por ejemplo en Kharagpur, India, en donde se estudiaron los beneficios de la irrigación suplementaria en la productividad y se hizo un análisis económico de la rentabilidad para evaluar la producción de arroz [136]. En el grupo 2, es importante tener en cuenta las características del suelo porque se asocia a la productividad agrícola, la cual es necesaria para este tipo de aprovechamiento de agua. En cuanto a las desventajas, los tipos de estructuras de captación involucradas en este grupo no pueden ser destinadas a usos domésticos u otros ya que no cuenta con ningún reservorio para el almacenamiento del agua.

Las microcuencas pueden ser usadas en pequeñas granjas que requieren agua para la subsistencia de sus cosechas (por ejemplo, arroz), sin embargo se deben apoyar en la irrigación suplementaria, lo que permite que se presente un ahorro en la cantidad de agua requerida para el cultivo [94].

Así como en el grupo 1, en este grupo con el uso de SIG, imágenes satelitales (antes y después de la lluvia) se pueden establecer las ubicaciones de estructuras hidráulicas de captación de agua lluvia para usos agrícolas involucrando datos topográficos, suelos, vegetación, hidrología y meteorología [95,100,104]. Por otro lado Ziadat et al. [97] utiliza los SIG incorporando los aspectos socioeconómicos y

los criterios como pendiente, profundidad, textura y pedregosidad del suelo, mientras que Mbilinyi et al. [98], utiliza además la inspección de campo para localizar los sitios idóneos a través de ponderación de criterios y proceso de jerarquía analítica. Se pueden refinar haciendo la evaluación a nivel de cuenca, pero dándole énfasis a nivel de subcuenca y a lo largo del tiempo con el fin de comprender los procesos hidrológicos que se dan en el sistema de captación de agua lluvia al simular el balance hídrico, permitiendo dar opciones para su optimización [108].

En otros casos se pretende determinar la eficiencia de los sistemas de recolección de agua lluvia mediante la experimentación y usando imágenes satelitales para la planificación a gran escala de los recursos hídricos en el territorio, enfocándose en cultivos de oliva y contando con el acercamiento con las comunidades en la zona de estudio [96].

De igual manera, las microcuencas permiten monitorear el equilibrio del agua y de sedimentos [100], así como el comportamiento de la escorrentía, sedimentación y humedad del suelo [101] demostrándose que en estos aspectos influye el tipo y profundidad del suelo, la labranza y la gestión que el agricultor haga de la granja [104]. Identificar estos sitios y técnicas para la conservación de aguas en los suelos es una herramienta útil para la ejecución de programas de conservación de recursos involucrados dentro de la gestión integral de los recursos hídricos [106]

En términos generales, las metodologías de microcuencas pretenden seleccionar las zonas idóneas para ubicar los sitios de captación de aguas lluvias teniendo en cuenta el tipo de

estructura hidráulica a implementar [105], así como que ésta sea económica en el aspecto financiero y en tiempo [58].

En cuanto al grupo 3, que se encuentra relacionado con las estructuras para la recarga de acuíferos, éstas son importantes para zonas áridas y semiáridas, en donde las fuentes de agua son los acuíferos que son captados a través de pozos profundos. Considerando lo anterior, los parámetros que tienen más peso están relacionados con las características del suelo, ya que de éstos va a depender la permeabilidad de este y por lo tanto la capacidad de infiltración para así hacer la respectiva recarga.

En este grupo también se usa el SIG (con mapas temáticos) y la teledetección para identificar posibles zonas de escorrentía y sitios para la construcción de estructuras hidráulicas para la conservación de suelos y aguas, teniendo en cuenta como reglas para la toma de decisiones la pendiente, permeabilidad del suelo y la escorrentía e integrando los mapas de uso y textura del suelo [113]. Asimismo en otras metodologías se sigue un proceso de jerarquía analítica con reglas de decisión para posteriormente validar la información en campo y así verificar la idoneidad de implementación de los sitios seleccionados [111,116,117,120].

Además, algunos autores involucran la topografía y generan mapas de la red drenaje y grupo hidrológico del suelo, superponiéndolos para ubicar los sitios idóneos para las estructuras de recolección de aguas lluvias [114]. Otros involucran los costos de recolección y usufructo de ésta, por lo tanto, se contempla la capacidad del almacenamiento y el límite de localización de la zona urbana, así como el costo de la tierra y el de implementación del sistema de aprovechamiento de agua lluvia, para finalmente, determinar

el beneficio económico al compararlo con el costo de agua potable en la región [115]. Cabe resaltar que Sekar y Randhir [115] plantearon esta metodología para su uso en zonas rurales y zonas periurbanas, por lo cual determina el beneficio al compararlo con el costo del agua potable a suministrar en las viviendas o en las granjas.

Así como se establecen métodos para la selección del sitio adecuado para la construcción de estructuras de captación de agua lluvia en zonas rurales, se hacen estudios experimentales en campo con el fin de determinar el impacto de la recarga de aguas subterráneas en el área local (zona analizada), y en las sitios aledaños [118]. De igual modo, se verifica cómo estos tipos de estructuras para captación de agua impactan en la agricultura de riego, siendo necesario desarrollar un estudio a nivel de subcuenca; y se concluye que a medida que aumenta el área para el aprovechamiento del agua lluvia, ésta alcanza una capacidad límite donde estructuras hidráulicas adicionales no incrementan la reserva de las aguas subterráneas, pero reducen el flujo de las corrientes [119].

En el grupo 4 los autores se enfocan en los diferentes tipos de estructuras de captación de agua lluvia que existen (macrocuenca, microcuenca o recarga de acuíferos), no utilizan un tipo de estructura en específico, su enfoque va dirigido hacia dónde se ubica el lugar idóneo de construcción de cada una de ellas teniendo la puntuación de los parámetros de entrada para obtener el mejor rendimiento del sistema de recolección de agua lluvia.

Es así como Banai-Kashani [121] afirma que hay una deficiencia crítica en aquellas metodologías que requieren del juicio de expertos, cuando existen estándares para la valoración de los puntajes, no hay problemas al hacer las

ponderaciones, pero cuando son problemas nuevos y los puntajes aún no se han definido o incluso se desacreditan los existentes, se incurre en subjetividades. Teniendo en cuenta lo anterior, se utiliza el proceso de jerarquía analítica como una solución a las parcialidades presentes en la metodología de juicio de expertos para seleccionar los sitios idóneos independiente del tipo de estructura hidráulica para la captación que se pretenda implementar en el área de estudio [121]. También se utiliza el análisis multicriterio, en algunos casos restricciones de localización y mapas realizados con los SIG, para la superposición de los mismos y establecer las zonas idóneas de captación [109,124,127,128].

El proceso de jerarquía analítica se ve apoyado en los análisis de multicriterio basados en mapas desarrollados usando los SIG y sensores remotos para así localizar las diferentes zonas idóneas para la construcción de las estructuras para captación de agua lluvia siendo la metodología aplicable a cualquier zona debido a la flexibilidad de las puntuaciones [123].

En este grupo también se analiza la productividad del suelo y la cantidad del agua retenida en este, siendo acompañado de irrigación suplementaria, donde el éxito o fracaso de estos sistemas de captación de agua lluvia, viene marcado por las condiciones socioeconómicas de la población en cuanto a la implementación de la técnica y la percepción de riesgo y rentabilidad de los agricultores [68,122]. Asimismo, facilita su uso para la repoblación forestal, la plantación de árboles frutales , así como acrecentar la productividad de las tierras cultivables y de pastoreo, aumentando los rendimientos y reduciendo las pérdidas de los cultivos [122].

Del mismo modo, algunos autores tienen en consideración las características geométricas para determinar el volumen de agua a captar de acuerdo a un periodo de retorno específico [125] y la generación de escorrentía [126] e incluso la consulta a las partes interesadas para obtener la zona más adecuada teniendo en cuenta el conocimiento de la población con relación a la construcción de estos sistemas [93].

El quinto grupo (sistemas de labranza de reserva), hace uso de maquinarias construyendo huellas en la tierra. Es similar a la labranza de conservación, pero generando almacenamiento del agua obtenido mediante la formación de pequeños depósitos superficiales [131]. Esencialmente las ventajas de este método, consiste en mejorar la humedad en el suelo y aumentar la productividad agrícola, por lo cual va asociado a la textura del suelo y en consecuencia a la productividad de este. Asimismo, este sistema es utilizado para evitar problemas de erosión [73].

El grupo se consideró especialmente, ya que en su mayoría se realizan experimentos de campo para determinar la productividad, contemplando las características del cultivo, el suelo y la precipitación en el área de estudio. Adicionalmente, se obtiene como beneficio la disminución de la erosión en el suelo con este tipo de sistemas de captación de agua lluvia.

Los estudios experimentales se han enfocado hacia la determinación del efecto de la labranza de reservorio en la cantidad de agua contenida en el suelo, siendo los tratamientos realizados con baja y alta compactación del suelo [130,131]. Otros aspectos con los cuales se analiza además son la pendiente, densidad del suelo e intensidades de precipitación [134].

Con el fin de calcular la eficiencia de la labranza con reservorio, ésta fue comparada con la labranza sin reservorio o convencional [130,132,133], labranza cero, labranza mínima, recolección de agua lluvia en el campo y arado Daling [135]

6.1.4 Conclusiones

Los parámetros de diseño utilizados se identificaron a partir de las referencias sobre las metodologías realizadas para los sistemas de recolección de agua lluvia en zonas rurales. Los más relevantes son el tipo de suelo, la precipitación promedio y las características fisiográficas para la planificación y localización de los sitios potenciales para construir estructuras de recolección de agua de lluvia que garanticen la GIRH.

Por otro lado, el desafío de estas metodologías radica en la disponibilidad de los datos en el área de estudio. En el caso de la información de la precipitación, existe una problemática relacionada con la cantidad y calidad de los datos de las estaciones meteorológicas que se localizan dentro del área de estudio, y a veces la longitud de los registros no es la adecuada para realizar un análisis confiable de las variables. En cuanto a las características del suelo, la información es poca en países en vía de desarrollo, siendo necesario aplicar metodologías para su determinación como los sensores remotos, con la posterior verificación y validación en campo.

Con el uso de los SIG y la cartografía disponible para una zona de estudio se calculan los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, lo cual permite explicar la dinámica de los escurrimientos superficiales para posteriormente plantear los RWHS.

En general, las características fisiográficas y la distribución de las precipitaciones son fundamentales para explicar la ocurrencia de fenómenos como las inundaciones y los procesos erosivos, sin embargo, el impacto de este tipo de eventos dependerá en gran medida de la gestión territorial y del recurso hídrico que las autoridades establezcan en la cuenca hidrográfica.

La aplicación de los SIG en conjunto con el análisis multicriterio y los procesos de jerarquía analítica, constituyen un procedimiento robusto para la toma de decisiones, debido a que se asignan pesos a cada uno de los parámetros de diseño involucrados en la selección del RWHS, permitiendo ser asertivo en la selección de los sitios idóneos para la planificación y construcción de las estructuras hidráulicas requeridas en el aprovechamiento de los runoff.

Los modelos para el estudio del cambio climático son pertinentes al momento de planificar las estructuras hidráulicas que garanticen el aprovechamiento de los recursos hídricos al proponer los RWHS, debido a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

Finalmente, para que exista una implementación de los RWHS en las comunidades rurales para aumentar la productividad agrícola, se requiere políticas que garanticen el apoyo económico de las instituciones gubernamentales a los agricultores, así como la capacitación técnica para la construcción y la sostenibilidad de estos sistemas.

6.2 Revisión de los parámetros de diseño para la recolección de agua lluvia en zonas urbanas: una solución en la gestión integral de los recursos hídricos

6.2.1 Introducción

Las condiciones de cambio climático, el incremento desmedido de la población, la contaminación del agua, suelo y aire, la deforestación de las cuencas hidrográficas y el aumento de los conflictos por el uso de la tierra y de los recursos hídricos ha generado la consecuente escasez de agua. Asimismo, el progreso social, agrícola e industrial ha estado históricamente vinculado a la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos aumentando la importancia en el ciclo hidrológico [137], teniéndose que la agricultura requiere un 70% del agua dulce disponible, mientras que la industria y el uso municipal equivalen a un 20% y 10% respectivamente [138].

Teniendo en cuenta lo anterior, la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), se ha mostrado como la solución a estos problemas de distribución del recurso, dentro de la cual se deben involucrar una descripción completa de la cuenca hidrográfica, como lo son la demanda de agua (municipal, agrícola, industrial y ambiental) y la oferta del recurso (agua superficial, subterránea, lagos, acuíferos, entre otros) [139]. Por lo tanto, la asignación del recurso se debe realizar considerando las compensaciones entre el beneficio económico y los impactos ambientales de usos de la demanda de agua [140].

Dentro de la GIRH es importante tener un flujo ambiental para garantizar la provisión de servicio (comida y agua fresca), regulación de servicios (moderación de eventos extremos), servicios culturales (espíritu y sentido de paz, recreación y salud mental y apreciación estética e inspiración

cultural), y servicios de hábitat (diversidad genética) [141]. En la GIRH se deben integrar los sistemas sociales y económicos enmarcados dentro de un desarrollo sostenible y una administración adaptativa, donde el primero involucra la parte social, ecológica y de infraestructura (regulación de flujo para inundaciones usando almacenamientos y estructuras de protección a las fuentes) y la segunda la participación pública y el intercambio activo de conocimientos entre científicos y responsables políticos [138,142,143].

La GIRH se puede dividir en acciones que se realizan desde el ámbito rural y urbano. Desde lo rural, se plantean soluciones encaminadas a dar respuesta al abastecimiento de agua a las actividades agropecuarias [144,145], en cuanto a lo urbano el suministro de agua se asocia para los usos domésticos, potables y no potables [146-148], y en algunos casos se mezclan los dos aspectos, especialmente en las zonas periurbanas que bordean las ciudades [149].

En el caso de los RWHS urbanos, la GIRH debe implicar protección de inundaciones, de la salud pública y del medioambiente a través de la administración del ciclo urbano del agua [150]. El ciclo hidrológico debe ser evaluado mediante un estudio de la oferta de los recursos hídricos, demanda, analizar las escalas temporales y patrones, mediante la elaboración de una política que parta de los principios de equidad, integridad ecológica y eficiencia (ahorro y uso eficiente del agua) [151]. Además, la búsqueda de proveer el suministro de agua en las ciudades ha ocasionado que se originen políticas y acciones para adelantar una GIRH que permita garantizar dicho recurso para las generaciones actuales y futuras. Teniendo en cuenta lo anterior, los entes gubernamentales han evaluado los principios y gobernabilidad

de una adecuada gestión del agua, involucrando los estudios a nivel de cuenca hidrográfica y, considerando los principios de sostenibilidad y paz, aspectos de seguridad y acuerdo para el acceso, y la seguridad hídrica, todo esto enmarcado en una armonía institucional y de cooperación pacífica [152].

Por lo tanto, comprender los cambios futuros en la demanda de agua también se vincula con importantes debates de políticas sobre el desarrollo de estrategias de agua multisectoriales más sólidas, identificando compensaciones entre sectores competidores y apoyando oportunidades para la inversión colaborativa en infraestructura de agua [153].

Dentro de la GIRH, se realiza una evaluación en las zonas urbanas, por un lado, enmarcada en tres pilares fundamentales como son la sostenibilidad, equidad y economía, vistos desde el aspecto organizacional de los entes gubernamentales [151,152], y por otro, desde el aspecto técnico y aplicación en zonas urbanas involucrando consideraciones económicas [154,155].

En las zonas urbanas, las condiciones económicas son importantes en las propuestas para establecer una solución en el marco de la GIRH, debido esencialmente a que los costos influyen en el éxito o fracaso de las acciones tomadas para contribuir a la preservación del recurso hídrico. Otro aspecto importante se relaciona con el tipo de demanda a satisfacer y el ahorro y uso eficiente del agua, los cuales influyen en la cantidad del recurso que se gasta en los diversos sectores, en este caso, específicamente en las viviendas e instituciones comerciales y públicas que existen. Actualmente, las opciones más comunes para ayudar a la conservación del agua se encuentran el aprovechamiento del agua lluvia - RWH, la recirculación y/o reutilización de las aguas grises [156],

proyectos para recarga de acuíferos en las zonas urbanas buscando disminuir las inundaciones [157], sistemas híbridos que involucran RWH combinadas con la reutilización de las aguas grises [158]. De igual manera, estas alternativas para las zonas urbanas se plantean por un lado como soluciones individuales, para el caso de viviendas multifamiliares [159], en otros comunales para satisfacer la demanda de varias viviendas desde un tanque comunal que recolecta el agua lluvia de los techos de las viviendas involucradas en el proyecto [160], y finalmente, soluciones para universidades, instituciones públicas y comerciales [161-163]. Todas las anteriores soluciones están enfocadas a satisfacer la demanda de las personas (puede ser para usos potables o no potables) y en algunos otros casos a mantener la sostenibilidad del recurso hídrico en el marco del ciclo hidrológico y la gestión de la escorrentía urbana [164].

Los sistemas de recolección de agua lluvia - RWHS se han adoptado en los últimos 15 años en la búsqueda de disminuir la presión sobre la demanda de los servicios centralizados de agua debida al aumento de la población en las zonas urbanas y a los efectos del cambio climático [165].

El objetivo de la GIRH en las zonas urbanas es dar solución a la creciente demanda del recurso hídrico para garantizar la cantidad de este, involucrando aspectos económicos, minimizar el consumo de la red centralizada de agua y disminuir la demanda de la población urbana. Por tal motivo, el documento se enfoca en una revisión de literatura cuyo fin es determinar los factores que intervienen en la gestión del recurso hídrico en zonas urbanas, identificando los parámetros de diseño que se involucran en el dimensionamiento de las estructuras

hidráulicas planteadas para satisfacer la demanda de la población.

6.2.2 Factores que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico en zonas urbanas

Luego de una revisión de los autores cuyo tema de investigación se centró en los sistemas de aprovechamiento del recurso hídrico en las zonas urbanas, se establecieron cinco (5) categorías con el fin de facilitar el análisis de la información recolectada. La categoría 1 se denominó factibilidad y eficiencia del sistema; la categoría 2, cambio climático y percepción del uso de sistemas de recolección de agua lluvia, políticas e impactos; categoría 3, desarrollo de software para RWHS; categoría 4, potencial de ahorro de agua potable; y, categoría 5, almacenamiento (costos, ahorro de agua y capacidad). Estos grupos con sus respectivos parámetros y autores se muestran en las Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10.

Cada uno de estos autores, establecen herramientas para determinar la factibilidad del uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas, enfocándolas desde diferentes perspectivas que van desde la posibilidad de su uso teniendo en cuenta el aspecto económico a su uso bajo el fenómeno del cambio climático. Si se analiza el aprovechamiento de agua lluvia desde el punto de vista económico, se establecen las condiciones del costo de las instalaciones con el propósito de buscar un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento adecuada para satisfacer la demanda urbana con el valor de la inversión a realizarse [166-168]. En la óptica económica, también se pueden involucrar el ahorro en la cantidad de agua utilizada evitando el suministro

de la red de distribución de una localidad, factor por considerar para la recuperación de la inversión [169].

Por otro lado, al estudiarlo desde el enfoque del cambio climático, se pretende verificar la disponibilidad del recurso hídrico bajo las perspectivas de la variabilidad en la cantidad de precipitación, teniendo en cuenta escenarios futuros involucrando las posibles alternativas de cómo el cambio climático afectaría el clima y en especial a la precipitación [170-173].

Finalmente, se examina desde la perspectiva de la eficiencia del sistema, buscando determinar la forma en la cual el sistema puede abastecer a una comunidad o vivienda a lo largo de un período, generalmente asociado a un año [53,174].

Tabla 6. Grupo 1. Factibilidad del sistema y eficiencia del sistema

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de Recorrenzia	Área de captación	Socioeconómico				No de Viviendas	Pérdidas	ler volumen de descarga	Capacidad de almacenamiento
						No de	Datos	Demanda	Característ icas físicas área				
Appan, 2000 [39]	X	X											X
Chilton et al 2000 [53]	X				X								X
Villareal & Dixon, 2005[175]	X				X	X		X	X			X	
Cowden et al, 2008 [176]	X			X	X								
Furumai, 2008 [177]	X	X			X								
Zhang et al, 2009 [178]	X				X		X	X			X		X
Basinger et al, 2010 [50]	X				X			X					X
Jones & Hunt [179]	X				X			X					X
Imteaz et al, 2011 [180]	X				X			X		X			X
Mun & Han, 2012 [181]	X				X			X					X
Palla et al, 2012 [182]	X			X	X			X					
Ward et al, 2012 [183]	X				X	X		X					
Cook et al, 2013 [184]	X			X	X			X					X

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de Recurrencia	Área de captación	Socioeconómico				No de Viviendas	Pérdidas	Derivado del volumen de descarga	Capacidad de almacenamiento
						No de	Datos	Demanda	Características físicas área				
Ghisi & Schondermark, 2013 [185]	X												X
Imteaz et al, 2013 [186]	X				X			X					X
Matos et al, 2013 [187]	X				X	X		X	X				X
Rashidi Mehrabadi et al, 2013 [52]	X			X	X	X		X					X
Umapathi et al, 2013 [188]	X							X					
Cook et al, 2014 [189]	X				X			X					
Liaw & Chiang, 2014 [190]	X			X	X			X					
Mahmoud et al, 2014 [191]	X			X	X			X					
Morales-Pinzón et al, 2014 [192]	X			X	X								X
Zeleňáková et al, 2014 [193]	X				X			X					X
Akter & Ahmed, 2015 [194]	X			X	X								
An et al, 2015 [195]	X				X			X					X
De Gois et al, 2015 [196]	X			X	X	X		X					X
Karim et al, 2015 [197]	X			X	X			X		X			
Lizarraga-Mendiola et al, 2015 [198]	X			X	X	X		X					
Papafotiou & Katsifarakis, 2015 [199]	X												
Stec & Kordana, 2015 [200]	X				X			X					X
Betasolo & Smith, 2016 [201]	X				X								X
Chen et al, 2016 [202]	X												
Elgert et al, 2016 [203]	X				X	X		X					
Guizani, 2016 [204]	X			X	X		X	X					X
Melville-Shreeve et al, 2016 [205]	X			X	X						X		
Nachshon et al, 2016 [206]	X			X	X								
Notaro et al, 2016 [207]	X			X	X			X					
Peterson, 2016 [208]	X	X		X	X	X		X					
Rostad et al, 2016 [209]	X				X			X					X
Santos Silva & Ghisi, 2016 [210]	X			X	X	X		X					X
Siems & Sahin, 2016 [211]	X			X				X			X		
Yamashita et al, 2016 [212]	X					X							X
Dumit Gomez & Girard Teixeira, 2017 [213]	X			X	X	X	X	X					X
Fisher-Jeffes et al, 2017 [214]	X	X		X	X			X					X
Ghimire et al, 2017 [215]								X		X			X
Jing et al, 2017 [166]	X				X			X			X		X
Komeh et al, 2017 [216]	X			X	X	X		X	X				X
Lopes et al, 2017 [217]	X				X			X					
Ndiritu et al, 2017 [218]	X				X			X					X
Nguyen & Han, 2017 [219]	X			X	X			X			X		X
Oviedo-Ocaña et al, 2017 [220]	X				X								X

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de Recorrenria	Área de captación	Socioeconómico				No de Viviendas	Pérdidas	ler volumen de descarga	Capacidad de almacenamiento
						No de	Datos	Demanda	Característ icas físicas área				
Rosa Andrade et al, 2017 [221]	X				X								X
Stout et al, 2017 [222]	X			X	X	X	X	X					X
Bailey et al, 2018 [223]	X				X	X						X	X
Ennenbach et al, 2018 [224]	X				X			X					
Guo & Guo, 2018 [225]	X				X			X					X
Park & Um, 2018 [226]	X		X		X			X				X	
Petit-Boix et al, 2018 [227]	X				X	X		X					X
Sapkota et al, 2018 [228]	X				X	X		X		X			
Siddiqui & Siddiqui, 2018 [229]	X			X	X								
Soares Geraldi & Ghisi, 2018 [230]	X			X	X	X		X				X	
Stec & Sly, 2018 [231]	X			X	X	X	X	X					
Teston et al, 2018 [232]	X			X	X			X					X
Baby et al, 2019 [233]	X			X	X			X					
Soares Geraldi & Ghisi, 2019 [234]	X												
Ghimire et al, 2019 [235]	X				X			X					
Marinoski & Ghisi, 2019 [236]	X					X		X					X

En esta categoría, grupo 1 que se muestra en la Tabla 6, se encuentran aquellos autores que analizan la factibilidad del uso de los sistemas de aprovechamiento para satisfacer la demanda de agua lluvia para usos no potables determinando el porcentaje de confiabilidad del RWHS [39,176,180,181,209,224,226]. Además, se evalúa la eficiencia del RWHS, calculando los ahorros en los costos para establecer los tiempos de recuperación de la inversión [53]. En este grupo, se contemplan los sistemas duales (RWH y recirculación de las aguas residuales) con el uso de dispositivos de bajo consumo de agua para establecer una mejor eficiencia en el ahorro de agua [177,196,198,236], así como el manejo de la calidad del agua recolectada de las lluvias [175].

Los autores estiman la viabilidad económica de los sistemas de RWH en diferentes ciudades utilizando datos diarios de precipitación buscando disminuir los costos financieros y mejorar la eficiencia de los sistemas urbanos de agua potable [178]. Otros calculan la confiabilidad del sistema de recolección de agua lluvia mediante el uso de modelos generadores de precipitación estocástica para determinar la eficiencia del sistema y satisfacer la demanda; de igual manera, son usados para disminuir los volúmenes del agua de retorno que va hacia el alcantarillado y reducir los consumos de agua potable [50,217,219,225].

Además se debe verificar la eficiencia del sistema y realizar un análisis económico exhaustivo de costo - beneficio para calcular los tiempos de recuperación del capital [183,213]. Dentro de esta recuperación de capital, se ha encontrado que los RWHS evaluados son proyectos viables, en donde al existir mayor demanda, aumenta la perspectiva de implementación del sistema [185]. Por lo tanto, la configuración del sistema se realiza de acuerdo a los parámetros de diseño y la demanda de los diferentes usos no potables de agua [187,210,221]. De igual manera, autores realizan monitoreos en viviendas donde se tienen instalados RWHS para usos no potables con el fin de evaluar la confiabilidad del sistema en tiempo real. Esta confiabilidad del sistema ha sido constatada mediante el uso de encuestas de campo en zonas donde ya se han instalado este tipo de sistemas [223].

En términos generales, se utilizan los datos de precipitación diaria para llevar a cabo los balances hídricos del RWHS en las zonas urbanas, buscando la optimización de los tanques de almacenamiento para obtener un sistema eficiente

[186,231]. Normalmente para éstos análisis se utilizan series de tiempo de precipitación con longitudes de aproximadamente 30 años, sin embargo, se ha demostrado que series con menor cantidad de datos, pueden ser útiles en el diseño de RWHS en zonas urbanas [230,234].

Otro de los aspectos que se analizan es la eficiencia y la viabilidad de los RWHS para usos no potables en distintos tipos de clima, como son húmedo, mediterráneo y árido, [52,190,192,216], y en las zonas áridas se presentan como posible solución a la escorrentía que genera inundaciones, debido a los regímenes de lluvias [191]. Para realizar la selección de las zonas donde existe un potencial de recolección de agua lluvia se usa un proceso de jerarquía analítica [194], con el fin de mejorar las condiciones climáticas al interior de edificaciones [195].

Algunos autores proponen la construcción de jardines de agua lluvia y almacenamiento en tanques como RWHS con el propósito de incrementar la recarga de acuíferos y aumentar la cantidad de humedad contenida en los suelos, evitando que la escorrentía inunde las ciudades [199,212], otros llevan a cabo el uso de prototipos para RWH, con una metodología que garantice la eficiencia del suministro de agua en viviendas [201,215], así como también se evalúa el impacto que tienen los RWHS dentro del sistema hidrológico urbano [206] y en el ambiente [227].

Los estudios no se han limitado a la zona urbana, también se realizan en las áreas peri-urbanas, las cuales son zonas que se encuentran en cercanías a una ciudad, sin hacer parte de ésta y por lo tanto, tienen problemática con los servicios públicos, específicamente con el agua suministrada vía acueductos municipales, viéndose como una alternativa de

solución los RWHS [203]. En zonas con escasez de agua dulce superficial, se han comparado los costos entre los sistemas de recolección de agua lluvia y los sistemas de desalinización de agua de mar, determinándose que dependiendo de la zona y los costos asociados a la implementación de los sistemas sería más económico la construcción de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia [204].

De igual manera, para determinar la configuración óptima utilizada para la recolección de agua lluvia en viviendas multifamiliares se realiza un análisis multicriterio [205], combinando la confiabilidad de suministro de los RWHS con la selección del tamaño de almacenamiento buscando analizar el aspecto económico [207], así como la demanda de agua que se requiere en las viviendas [218]. Además, se usan los sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de medir el potencial de recolección a través de esta herramienta estimando el área de los techos, los cuales son considerados las cuencas (áreas de captación) en este tipo de sistemas de recolección de agua lluvia [233].

Finalmente, en este grupo, para evaluar el nivel de aprovechamiento de las estructuras e instalaciones se utilizan modelos computacionales que realiza el balance hídrico del sistema utilizando datos históricos de lluvia y la demanda anticipada de agua [179], y que además determinan la confiabilidad del sistema [197,237].

Tabla 7. Grupo 2. Cambio climático y percepción del uso de sistemas de recolección de agua lluvia, políticas e impactos ambientales

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de	Área de captación	Socioeconómico				No de Viviendas	Pérdidas	Primer volumen de	Capacidad de almacenamiento
						No de habitantes	Datos	Demanda de	Características físicas área de				
Mwenge Kahinda et al, 2007 [238]	X												X
Mwenge Kahinda et al, 2010 [239]	X		X										X
Domènech & Saurí, 2011[48]	X		X	X	X								
Ward et al, 2012 [240]	X						X						
Assayed et al, 2013 [241]	X		X	X									X
Ghimire & Johnston, 2013 [242]	X			X					X				X
Ward et al, 2013 [243]	X												
Willuweit & O'Sullivan, 2013 [244]	X		X	X	X	X			X				X
Gabarrell et al, 2014 [245]	X				X				X				X
Ghimire et al, 2014 [246]	X								X				X
Thomas et al, 2014 [247]	X			X			X						X
Imteaz et al, 2015 [248]	X			X									X
Vialle et al, 2015 [249]	X								X				X
Woltersdorf et al, 2015 [250]	X		X	X									X
Zhang et al, 2015 [251]							X						
Haque et al, 2016 [252]	X								X		X		X
Lee et al, 2016 [253]	X												
Tavakol-Davani et al, 2016 [254]	X			X						X			
Da Costa Pacheco et al, 2017 [255]	X					X							
Liu et al, 2017 [256]	X										X		
Ojwang et al, 2017 [257]	X	X	X	X	X	X			X				
Palla et al, 2017 [258]	X	X	X	X	X				X				
Alamdari et al, 2018 [66]	X			X									X
Castonguay et al 2018 [259]	X								X				X
Chubaka et al, 2018 [260]									X				
García Soler et al, 2018[261]					X								
Gleason Espíndola et al, 2018 [262]	X			X			X				X		X
Kisakye & Van der Bruggen, 2018 [263]	X	X		X					X				X
Musayev et al, 2018 [264]				X					X				
Teston et al, 2018 [265]	X												
Wanjiru & Xia, 2018 [266]	X						X	X					
Zhang et al, 2018 [267]	X		X	X				X			X		X
Forrest et al, 2019 [268]	X			X	X	X	X	X					
Zanni et al, 2019 [269]	X			X	X								X
Zhang et al, 2019 [270]	X	X		X	X	X		X			X		

En el grupo 2, cuyos parámetros de diseño se aprecia en la Tabla 7, se hace énfasis en la influencia del cambio climático sobre el diseño de los sistemas de recolección de

agua y su efecto en la escasez de los recursos hídricos, es decir, el impacto que el cambio climático tiene en el rendimiento de los RWHS [66,249,252]. Teniendo en cuenta lo anterior, la recolección de agua lluvia se toma como una medida de adaptación para enfrentar el cambio climático [239,250,263], además se implican los desafíos relacionados con los aspectos políticos, ambientales, económicos, sociales y técnicos [253]. Sin embargo, las medidas de adaptación deben estar apoyadas desde la perspectiva institucional generando un marco regulatorio y analizando la relevancia técnica de los RWHS, así como la receptividad social involucrando a los miembros de una comunidad para la instalación de los RWHS en las viviendas [240,241,243,257]. Por lo tanto, es importante que los gobiernos implementen mecanismos para exhortar a las personas a realizar instalaciones de tanques de almacenamiento de agua lluvia y con ello satisfacer parte de la demanda [251,255]. Con la finalidad de tener una comprensión del impacto de la recolección de agua lluvia sobre las comunidades se realizan encuestas en las cuales se responden a las preguntas relacionadas con la configuración del sistema, la motivación de los usuarios para su implementación, usos del agua y los tratamientos que le hacen a ésta, así como la periodicidad de pruebas físico-químicas y bacteriológicas realizadas al agua para determinar su calidad [247].

El análisis se amplía hacia la recolección para usos agrícolas como apoyo a la toma de decisiones en la sostenibilidad y gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca y la influencia de los patrones climáticos en su implementación [242], por tal motivo, se realizan pronósticos y evaluaciones usando los escenarios de cambio climático para observar su repercusión en la confiabilidad del suministro de

agua centralizada y descentralizada [244,267]. Además, se evalúan los impactos ambientales asociados a los RWHS con relación a la sostenibilidad de la cuenca como son la cantidad de contaminantes y disminución de las pérdidas de agua azul [246].

De igual manera, se determina la influencia del cambio climático en los RWHS en diversas soluciones planteadas como son en los diseñados para mitigar el impacto de las precipitaciones intensas sobre los sistemas de alcantarillados combinados existentes en ciudades [254]; techos verdes que ayudan a minimizar el efecto de las inundaciones producidas por las lluvias y retener el agua de escorrentía ocasionada por las áreas impermeables urbanas [256].

Finalmente, cabe destacar en este grupo que dentro de los gobiernos que incentivan y generan mecanismos reguladores para la instalación de RWHS en viviendas, se destaca el caso de Australia [260] y Alemania [261]. Asimismo, los países empiezan a implementar la economía circular, en la búsqueda de la preservación de los recursos hídricos [262]. La economía circular busca mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, extraer el máximo valor de ellos mientras están en uso, luego recuperar y regenerar los productos y materiales en el final de cada vida útil [262]. Teniendo en perspectiva lo anterior, se busca que el modelo del agua deje de ser lineal (se contamina constantemente haciendo su uso futuro) y se vuelva circular mediante el restablecimiento de las variables del ciclo del agua, mediante la restauración hidrológica aunque sea parcialmente [262].

Tabla 8. Grupo 3. Potencial de ahorro del agua

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de Escorrentía	Área de captación (tachos)	Socioeconómico			Número de Viviendas	Pérdidas	Primer volumen de	Capacidad de
						Número de habitantes	Datos económicos	Demanda de agua				
Ghisi, 2006 [271]	X				X	X						
Ghisi et al, 2006 [272]	X				X	X			X			
Ghisi & Ferreira, 2007 [273]	X				X	X			X			
Ghisi et al, 2007 [274]	X				X	X			X			X
Ghisi & Mengotti de Oliveira, 2007 [275]	X				X		X	X				X
Abdulla & Al-Shareef, 2009 [276]	X				X	X		X	X			
Li et al, 2010 [277]	X				X							X
Palla et al, 2011 [278]	X		X		X			X				X
Rahman et al, 2012 [279]	X			X	X	X				X		X
Steffen et al, 2013 [280]	X			X	X			X				
Campisano & Modica, 2014 [281]	X				X							X
Ghisi et al, 2014 [282]	X				X			X				
Hajani & Rahman, 2014 [283]	X							X				X
Gacía-Montoya et al, 2015 [284]	X				X		X	X				X
Matos Silva et al, 2015 [285]	X				X			X		X		X
Wanjiru & Xia, 2015 [286]	X				X							X
Wang & Zimmerman, 2015 [287]					X	X		X				
López-Zavala et al, 2016 [288]	X		X		X			X				X
Niehuns et al, 2016 [289]	X		X		X			X				
Campisano et al, 2017 [290]	X				X			X	X			X
Campisano & Lupia, 2017 [291]	X		X		X	X		X				X
Devkota et al, 2017 [292]	X				X			X				
Dos Santos & de Farias, 2017 [293]	X		X		X	X		X	X			X
Moniruzzaman & Imteaz, 2017 [294]	X				X			X		X		X
Cheng et al, 2018 [295]	X	X			X			X		X	X	X
López Zavala et al, 2018 [296]	X		X		X			X				X
Imteaz & Moniruzzaman, 2018 [297]	X		X		X			X				X
Shanableh et al, 2018 [298]												

Este tercer grupo (ver Tabla 8), se enfoca hacia los posibles ahorros de agua mediante el uso de RWHS en la zona urbana, especialmente en el sector residencial [271,272,290,291], en las zonas periurbanas [283], y además

involucran tamaños de almacenamiento [274]. En algunos casos se combinan las aguas lluvias y las aguas grises y se determina el potencial ahorro de agua potable [273,275], también se dan sugerencias en las mejoras para aumentar la cantidad (un ejemplo es que las aguas para el uso en inodoros, lavado y limpieza no necesitan ser potables), y mejorar la calidad del agua recolectada [276].

Los ahorros de agua potable se traducen en una disminución de la cantidad de dinero que los usuarios pagan en sus viviendas y además, minimizan la presión en los sistemas centralizados de agua, así como los costos empleados en su tratamiento [277]. También se determina que la longitud de 30 años de registros de datos de precipitación es suficiente para obtener un rendimiento óptimo de RWHS [278]. Además se analiza el potencial de ahorro teniendo en cuenta el balance hídrico con las dimensiones de tanque utilizados [279,280], el uso de pavimentos porosos para estimular la infiltración al subsuelo [289] y como medida para disminuir el riesgo por inundación, recolectando el agua lluvia para así evitar que se drene hacia las calles y genere inundaciones [298].

Finalmente, para que el ahorro de agua y la eficiencia volumétrica sea confiable, la simulación del balance hídrico se realiza con los datos de precipitación y demanda de agua a escala diaria [281], asimismo se involucran los indicadores basados en el consumo de energía y en el ahorro financiero [282,286] y valorar las emisiones de los gases efecto invernadero [292]. El ahorro se debe evaluar desde la perspectiva técnica y económica de los RWHS con los patrones de precipitación y demanda de agua como parámetros principales, para posteriormente, estimar el tiempo de recuperación económica del sistema [285,297].

Tabla 9. Grupo 4. Almacenamiento (costos, ahorro de agua, capacidad)

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de	Área de captación	Socioeconómico			Número de Viviendas	Pérdidas	Primer volumen de	Capacidad de
						Número de habitantes	Datos económicos	Demanda de agua				
Fewkes, 1999 [299]	X		X									X
Fewkes, 2000 [300]	X			X								X
Chiu et al, 2009 [301]	X		X	X		X						X
Su et al, 2009 [302]	X											X
Eroksuz & Rahman, 2010[303]	X			X								X
Khastagir & Jayasuriya, 2010 [304]	X		X	X						X		X
Tam et al, 2010 [305]	X			X								X
Farreny et al, 2011 [306]	X			X	X							X
Imteaz et al, 2011 [307]	X			X					X			X
Devkota et al, 2013 [308]	X				X			X				X
Hashim et al, 2013 [28]	X		X	X		X		X				X
Santos & Taveira-Pinto, 2013 [309]	X			X								X
Bocanegra-Martínez et al, 2014 [310]	X				X			X				
Gurung & Sharma, 2014 [54]	X			X	X			X				X
Hajani & Rahman, 2014 [311]	X			X								X
Kim et al, 2014 [312]	X			X								X
Liaw & Chiang, 2014 [313]	X			X								X
Raimondi & Becciu, 2014 [314]	X		X	X	X					X		X
Raimondi & Becciu, 2014 [315]	X			X								X
Walsh et al, 2014 [316]	X			X				X	X			X
Burns et al, 2015 [317]	X								X			X
Devkota et al, 2015 [318]	X			X								X
Londra et al, 2015 [319]	X		X	X								X
Martin et al, 2015 [320]	X			X	X							X
Matos et al, 2015 [321]												X
Morales-Pinzón et al, 2015 [322]	X		X	X								
Okoye et al, 2015 [323]	X		X	X	X	X						X
Sanches Fernandes et al, 2015 [324]	X		X									
Stratigea & Makropoulos, 2015 [325]	X	X	X	X								X
Campana et al, 2016 [326]				X								X
Campisano & Modica, 2016 [327]	X		X	X								X
Dallman et al, 2016 [328]	X	X		X		X						X
García-Montoya et al, 2016 [329]	X			X	X			X		X		
Pelak & Porporato, 2016 [330]	X		X	X					X			
Ursino, 2016 [331]	X		X	X								X
Blinco et al, 2017 [332]	X											
Fonseca et al, 2017 [333]	X		X	X								
Geraldi & Ghisi, 2017 [334]	X		X	X	X							X
Aduagna et al, 2018 [335]	X			X								
Amos et al, 2018 [336]	X					X						X

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de	Área de captación	Socioeconómico			Número de Viviendas	Pérdidas	Primer volumen de	Capacidad de
						Número de habitantes	Datos económicos	Demanda de agua				
Jing et al, 2018 [337]	X	X	X	X	X	X	X	X				X
Lani et al, 2018 [338]	X	X	X	X	X	X	X	X				X
Marinoski et al, 2018 [339]	X	X	X	X	X	X	X	X				
Pavolová et al, 2019 [340]	X	X	X	X	X	X	X	X				

El grupo 4 (ver Tabla 9), está conformado por los RWHS en donde las dimensiones del tanque de almacenamiento es crítico debido a los costos económicos [299,315,317], y por lo tanto, para su diseño se evalúa el comportamiento espacio temporal de la lluvia [300,334] y las características probabilísticas de la misma [301,302,320]. Igualmente se combinan la capacidad del almacenamiento con las áreas de los techos (área de captación) para captar la mayor la cantidad de agua lluvia y obtener como beneficio una disminución en los volúmenes de escorrentía [325,327].

El dimensionamiento del tanque se puede enlazar con el ahorro potencial de agua potable y la eficiencia del RWHS [303,328], ya que el tamaño determina la confiabilidad del sistema y en consecuencia ayuda a satisfacer la demanda de agua en unidades residenciales [304]. Además, el tamaño óptimo de tanque se encuentra influenciado por la cantidad de precipitación que cae en una zona y, por lo tanto en el costo de instalación y operación del sistema [305,307]. Se evalúan las alternativas con diferentes dimensiones de los tanques para determinar el adecuado teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas y de eficiencia de la recolección, así como

de la satisfacción de la demanda [311,337]. La eficiencia de la recolección se determina calculando cuántos días al año el sistema de RWH puede satisfacer la demanda domestica en los usos para los cuales fue planteado el sistema [311,337].

Es importante establecer el impacto económico y ambiental de los proyectos de recolección de agua lluvia, valorando las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI) [308] y la cantidad de agua recuperada [329]. Cuando se quiere obtener una eficiencia de recolección del 100% los volúmenes necesarios para el almacenamiento se vuelven insostenibles con relación a los costos, por lo tanto, los tiempos de recuperación económica son largos [309,324], por lo cual el principal inconveniente para la implementación de este tipo de RWHS es la capacidad de los tanques [312,330,335].

En este grupo 5, se desarrollan programas computacionales para el diseño de RWHS, las cuales realizan cálculos para determinar la capacidad de almacenamiento, costos estimados del sistema, análisis ambiental, e involucran la sostenibilidad del sistema [192,339,340]. En otros software se evalúan los costos totales de la construcción de almacenamiento en comparación con los costos de compra de agua dulce [323], en donde la confiabilidad del sistema se establece como una ventaja financiera [336].

Estas evaluaciones se realizan a escala de vivienda o de comunidad, por lo cual se requieren distintas consideraciones, para uno y otro caso. En el primer caso, ya se ha venido desarrollando a lo largo del documento, sin embargo, en el segundo caso se evalúa la rentabilidad desde la perspectiva de la infraestructura necesaria para el transporte de la lluvia desde los techos de las viviendas, almacenamiento comunal y distribución del agua [54,306,310], en algunos casos

para encontrar el dimensionamiento óptimo de tanque de almacenamiento y área de techo [28]. De igual manera, en el segundo caso se realiza el diseño del RWHS para zonas comunales y suplir la demanda de agua, buscando disminuir del consumo de energía y que ésta sea obtenida mediante el uso de energías renovables [326].

Los RWHS se utilizan también para la disminución de la escorrentía superficial, ya que al captar el agua lluvia se evitan posibles inundaciones, la contaminación puntual y la cantidad de agua que llega a los sistemas de alcantarilla de las ciudades [318,319].

Tabla 10. Grupo 5. Calidad y tratamiento de aguas de la recolección de agua lluvia

Nombre y autor del artículo	Temperatura	Precipitación	Evaporación	Coeficiente de	Área de captación	Socioeconómico			Número de Viviendas	Pérdidas	Primer volumen de	Capacidad de
						Número de habitantes	Datos económicos	Demanda de agua				
Nolde, 2007 [341]		X						X		X		
Sazakli et al, 2007 [342]		X			X							X
Mendez et al, 2011 [343]		X								X		
Farreny et al, 2011 [63]		X		X	X							
De Kwaadsteniet et al, 2013 [59]		X			X		X					
Naddeo et al, 2013 [344]		X										X
Silva Vieira et al, 2013 [345]		X										X
Dobrowsky et al, 2014 [346]		X										
Van der Sterren, 2014 [347]		X		X	X							X
Zhang et al, 2014 [348]		X										
Dobrowsky et al, 2015 [60]		X										
Sánchez et al, 2015 [349]		X								X		
Angrill et al, 2017 [350]	X	X		X	X			X				X
Leong et al, 2017 [61]		X										
Shaheed et al, 2017 [351]		X								X		
Leong et al, 2018 [352]		X										
Yan et al, 2018 [353]		X			X		X					X

El grupo 5 comprende los RWHS en donde el tema principal se enfoca en la calidad del agua recolectada y el tratamiento de las aguas lluvias para usos potables y no potables en la demanda doméstica. Al desviarse el agua lluvia desde las calles y los patios de las viviendas hacia las cisternas, éstas deben ser tratadas antes de su uso, proponiéndose filtros para su tratamiento [341], y en otros desinfección, todo lo anterior, debido a las fluctuaciones estacionales de los parámetros químicos y microbiológicos (demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, flúor, cloro, nitrito, coliformes totales, entre otros) [342]. Por otro lado, el material de construcción del techo influye en la calidad del agua, sin embargo, todos necesitarían en mayor o menor medida un tratamiento como filtración o desinfección si se quieren cumplir con los estándares de agua para consumo humano, siendo el techo de metal de Galvalume el que mejor mantiene la calidad del agua [343]. Se examinan también los techos convencionales (concreto, asfalto y techos cerámicos), comparándola con materiales no convencionales (techos verdes), siendo en este caso el cerámico el más adecuado porque tiene menos concentración de contaminantes lixiviantes y el techo verde no es adecuado, ya que producen concentraciones muy altas de carbono orgánico disuelto, lo que podría dar lugar a concentraciones elevadas de subproductos de desinfección. [348].

Así como se evalúa la calidad del agua en los diferentes materiales de techos, también se valora el coeficiente de escorrentía, ya que el coeficiente varía dependiendo del material en el cual esté construido el techo, pues cada uno tiene diferentes rugosidades que generan resistencia al escurrimiento superficial [63].

Dentro de las características analizadas para calidad del agua lluvia se encuentran los aspectos físico químicos y bacteriológicos, obteniéndose que para el agua recolectada se hace necesario la implementación de filtros, tratamiento térmico, entre otros, pero siempre se debe realizar desinfección, especialmente si el uso es para consumo humano [59,344,350]. También se han implementado tratamientos novedosos como una filtración de flujo ascendente con operación de lavado a contracorriente, demostrándose su eficacia a través de la construcción de un prototipo [345]. Generalmente, el tratamiento se realiza cuando el uso es para consumo humano, mientras se destine para usos no potables, puede en algunos casos ser utilizada directamente, de todas formas es importante realizar la caracterización fisicoquímica y bacteriológica del agua recolectada por los RWHS [346].

6.2.3 Discusión

El aprovechamiento de agua lluvia se presenta como una alternativa de solución al suministro de agua en las zonas urbanas, sin embargo, presenta algunas deficiencias y ventajas. Dentro de las desventajas se encuentra que el uso del agua lluvia recolectada se encuentra limitado en la mayoría de los casos a usos no potables y el costo económico elevado de la construcción de un sistema de abastecimiento en una vivienda o edificación para usos no potables.

A pesar de las desventajas, el uso de este tipo de sistemas de abastecimiento de recolección de las aguas lluvias se ha incrementado, siendo utilizado por universidades, centros comerciales, viviendas multifamiliares, esto debido a las ventajas de tener este tipo de sistemas. La ventaja más destacada radica en el ahorro que puede obtenerse en el pago

del servicio y que además se disminuye la escorrentía en la ciudad, evitando así la saturación de las redes de drenaje de aguas pluviales.

Tabla 11. Número de autores que utilizan cada uno de los parámetros

Parámetro	No de autores
Temperatura	2
Precipitación	181
Evaporación	11
Coeficiente de Escorrentía	65
Área de captación (techos)	144
Número de habitantes	45
Datos económicos	20
Socioeconómico	
Demanda	133
Características físicas área de recolección	7
Número de Viviendas	13
Pérdidas	13
Primer volumen de descarga	20
Capacidad de almacenamiento	110

De los autores totales revisados, según la Tabla 12, el parámetro en el cual todos los autores concuerda como principal en el diseño de los RWHS es la precipitación, lo cual es de esperarse teniendo en cuenta que es la variable de entrada en la ecuación de balance hídrico, y con ella se determinar la cantidad de agua que se puede almacenar para el suministro de agua en las viviendas. En importancia, le sigue el área de techo (área de cuenca) ya que con la precipitación se calcula la cantidad de agua que puede ser almacenada. Finalmente, la demanda es importante para estimar cuánta agua se requiere en la vivienda y con base en eso delimitar la cantidad de agua que debe ser almacenada para definir el tamaño

del tanque. Se recalca que la capacidad de almacenamiento es un parámetro determinante en el diseño de los sistemas de recolección de agua lluvia, debido a los costos económicos que implica su construcción.

Tabla 12. Número de autores de acuerdo con el sitio donde se destina el agua recolectada

Destino del RWH	No de Autores
Agricultura	5
Viviendas	131
Campus Universitarios y Escuelas	13
Centro Comerciales y Edificios Comerciales	13
Edificios Multifamiliares Residenciales	13
Beneficios Públicos y Urbanos	13
Sistemas Comunales	3

Teniendo en cuenta que los estudios determinan que la mayoría de los sistemas de RWH son usados para solucionar el abastecimiento de agua en viviendas, tienen la ventaja de tener una disminución en los costos del agua potable, al reemplazar los usos no potables (riego de jardines, lavado general y descarga de inodoros) por las aguas lluvias recolectadas y almacenadas.

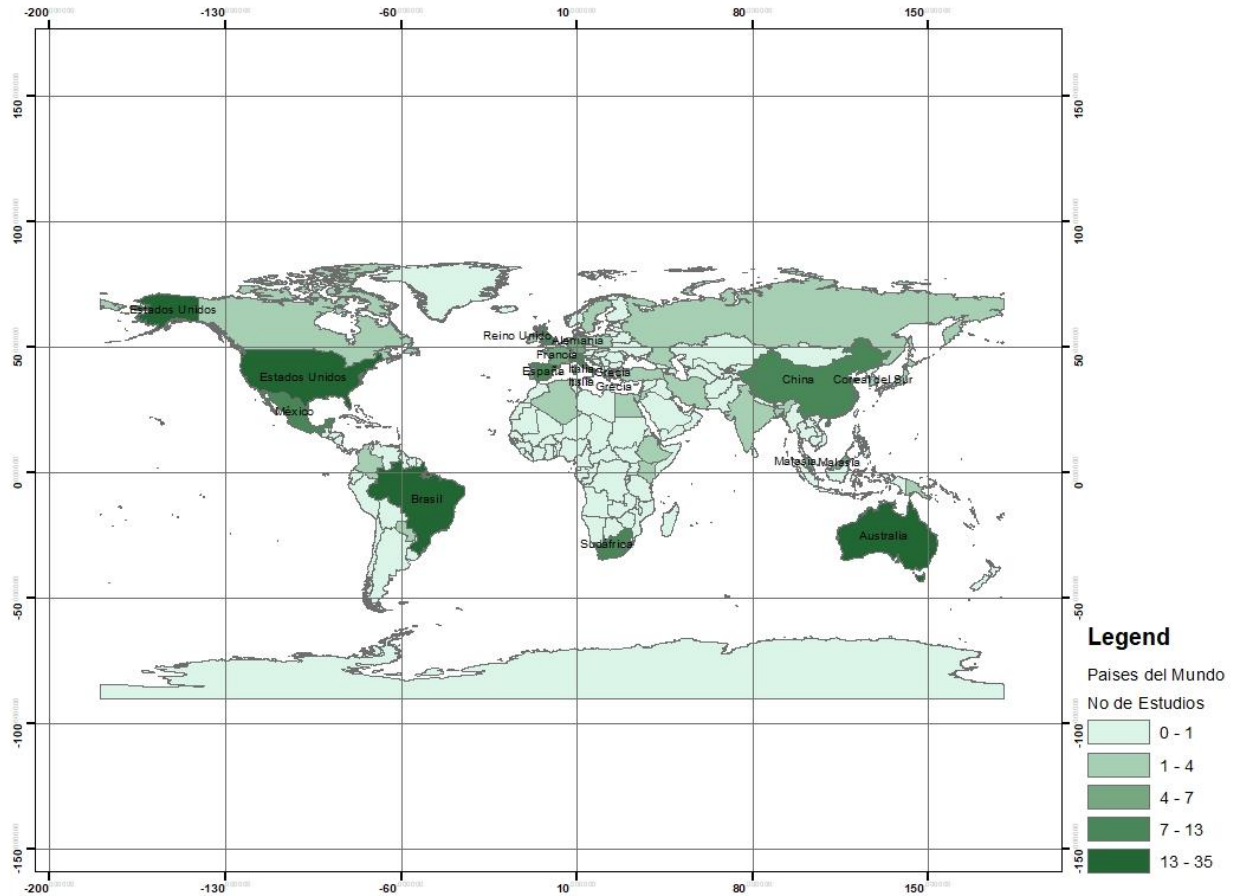


Figura 5. Países donde se realizaron los estudios reportados en la revisión bibliográfica

En la Figura 5, se observa un mapa donde se encuentran distribuidas las localizaciones de los países en donde se realizaron los estudios reportados en la revisión bibliográfica que se desarrolló, donde el país que tiene la mayor cantidad de estudios científicos reportados es Australia, lo cual puede estar relacionado con las condiciones de escasez del recurso hídrico en el país, la baja densidad de población (grandes distancias entre viviendas) y por último, el apoyo económico que el gobierno de Australia le ofrece a las personas interesadas en estas tecnologías para las viviendas.

Tabla 13. Número de estudio realizado por países

País	No Estudios
Argentina, Arabia Saudita, Bermuda, Botswana, Burkina Faso, Congo, Corea del Norte, Costa Rica, Cuba, Dinamarca, Emiratos Árabes, Estados Federados de Micronesia, Guatemala, Palestina, Honduras, Israel, Libia, Luxemburgo, Marruecos, Mongolia, Namibia, Nigeria, Países Bajos, Pakistán, Panamá, Serbia, Singapur, Sudán, Tailandia, Taiwán, Tayikistán, Tanzania, Uganda, Uruguay, Uzbekistán, Venezuela, Vietnam. Zambia, Zimbabwe	1
Canadá, Croacia, Egipto, Etiopía, India, Irán, Papua Nueva Guinea, Paraguay, Suecia, Turquía	2
Argelia, Bangladesh, Colombia, Eslovaquia, Japón, Jordania, Kenia, Polonia, Rusia	3
Corea del Sur, Irlanda	4
Francia, Grecia	5
Portugal	6
Alemania, Malasia	8
España, Reino Unido, Sudáfrica	10
México	11
Italia	13
China	14
Brasil	26
Estados Unidos	30
Australia	36

Apoyados en la figura 1 y la tabla 3, se encuentra Estados Unidos como segundo país con gran cantidad de investigaciones de este tipo, especialmente en las áreas donde se tiene escasez del recurso hídrico, en estados como California. Le sigue Brasil, en donde se han dedicado al estudio del suministro de agua en zonas urbanas donde existen deficiencias de los sistemas de abastecimiento municipal, así como problemas de la cantidad del recurso hídrico. De igual manera, en Brasil, existen algunas políticas e incentivos para ayudar a implementar este tipo de estructuras de RWHS.

6.2.4 Conclusiones

El aspecto del cambio climático y la disponibilidad del recurso hídrico, han originado la búsqueda de alternativas para el abastecimiento del agua en zonas urbanas debido a la escasez causada por las condiciones de la variabilidad en la precipitación, así como la constante contaminación del agua que impide la disponibilidad de agua a los seres humanos de manera segura. Dado anterior, se comienzan a plantear alternativas para la GIRH como es la recolección de aguas lluvias mediante el uso de techos de las viviendas, lo cual ha demostrado ser eficiente.

Además, teniendo en cuenta el aumento constante de la demanda de agua de las poblaciones, el uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias se convierte en una solución para mitigar la escasez actual del recurso hídrico, siendo importante tenerlo en cuenta para proyectos de urbanizaciones multifamiliares. En los multifamiliares su eficacia es importante porque el agua lluvia recolectada puede ser usada en las zonas comunes, evitando el desperdicio de agua potable, la cual viene tratada y tiene un costo asociado, debido a los químicos que se le han adicionado y las estructuras que se deben construir.

En la selección de parámetros se debe tener en cuenta la precipitación, el área de techo, la demanda y la capacidad de almacenamiento como los requisitos mínimos requeridos para obtener un sistema de recolección de agua lluvia del cual se obtengan los beneficios pretendidos en la vivienda. Además, sobresale que el apoyo gubernamental es primordial para incentivar a las familias en el uso de este tipo de abastecimiento, ya que los costos económicos son considerables.

7 Análisis de estacionariedad y modelos autorregresivos

Los modelos autorregresivos integrados de promedio móvil estacionales (*SARIMA* por sus siglas en inglés) se desarrollaron para series de tiempo de precipitación mensual. Se realizó la transformación Box-Cox a las series de tiempo de precipitación para que normalizar la serie. El modelo *SARIMA* seleccionado se basó en la Función de Autocorrelación (AFC por sus siglas en inglés), Autocorrelación Parcial (PACF por sus siglas en inglés), los valores mínimos del Criterio de Información de Akaike (AIC por sus siglas en inglés). El resultado de la prueba estadística de Ljung-Box muestra la aleatoriedad y homogeneidad de los residuales de cada modelo. El desempeño y validación de los modelos *SARIMA* fueron evaluados basados en varias mediciones estadísticas, entre ellas se encuentra la prueba de t-Student. Mediante los modelos *SARIMA*, es posible obtener registros sintéticos que preserven las características estadísticas del registro histórico. Finalmente, los resultados obtenidos pueden aplicarse a diversos estudios de gestión de recursos hídricos e hidrológicos; esto sin duda ayudará a los encargados de la formulación de políticas y la toma de decisiones a establecer estrategias, prioridades y el uso adecuado de los recursos hídricos en la cuenca del río Sinú.

7.1 Introducción

La precipitación es comúnmente una de las variables usadas para el estudio de la variabilidad climática. Ésta es el resultado de la interacción de varios fenómenos físicos y está caracterizada por su variación espacial y temporal, por lo tanto el análisis de los datos de la precipitación es esencial para la predicción de la información meteorológica así como

para la planificación y administración del recurso hídrico [354-357].

Los datos faltantes es un problema frecuente en climatología, su influencia en la calidad de los resultados que se obtendrán en los estudios hidrológicos, así como en la gestión de los recursos hídricos. En la literatura, se pueden encontrar algunos métodos para resolver el problema de confiabilidad de los resultados obtenidos del llenado de datos faltantes [358-361]. Dentro de estas técnicas, se destacan los modelos estocásticos que permiten hacer pronósticos de fenómenos, como la precipitación, que se caracterizan por comportarse de acuerdo con leyes probabilísticas. En consecuencia, se considera que la serie observada es sólo una de las posibles realizaciones del proceso estocástico y por ende, el pronóstico es un posible escenario y no es exacto [362]. Por ejemplo, los modelos autorregresivos de media móvil (ARMA) son modelos estocásticos basados en la teoría de probabilidad, por lo que pueden representar la incertidumbre temporal de los datos. Tienen su origen en las investigaciones de Yule [363,364], quién describió por primera vez los modelos autorregresivos (AR), Slutsky [365] que propuso los modelos de media móvil (MA) y Wold [366] que introdujo los modelos mixtos ARMA.

Adicionalmente, existen variaciones de los modelos autorregresivos como lo son los modelos periódicos PARMA, los modelos ARMA con entradas auxiliares ARMAX, los modelos autorregresivos integrados con promedios móviles ARIMA y los modelos ARIMA con componente estacional o SARIMA que permiten generar series sintéticas temporales teniendo en cuenta las variaciones cíclicas de los registros históricos [362,367].

Dentro de las aplicaciones de los modelos estocásticos para pronóstico de precipitaciones, es importante mencionar trabajos como el de Sanvicente-Sánchez y Solís-Alvarado [368] quienes proponen un método para generar series sintéticas de precipitación diaria buscando preservar la correlación espacial, temporal y de magnitud de lluvia en una red de estaciones climatológicas o en una cuenca dividida en subcuencas. Por su parte Lee [369] combinó las cadenas de Markov (modelos AR de orden uno donde se supone que las series históricas analizadas tienen una distribución normal) con modelos ARMA para generar series de tiempo sintética [370,371]. Se usaron modelos *SARIMA* para analizar datos de precipitación diarios y horarios. Bang et al. [372] compararon el desempeño de los modelos ARMA, *SARIMA* y ARMAX para predecir la precipitación y la temperatura en India, encontrándose que la temperatura tiene mejores predicciones con el modelo *SARIMA* y las exactitudes de las predicciones hechas para la lluvia con el modelo ARMA son mejores que con el modelo ARMAX.

Otra área de potencial avance es la mejora de las habilidades de los pronósticos del clima y fenómenos climáticos particulares, tales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en el Pacífico tropical y La Niña (efectos adversos de frío), tales eventos están relacionados con una variación de ± 0.5 ° C en la temperatura de la superficie del mar promediada durante tres meses consecutivos [351]. De acuerdo con Sun y Furbish [374] encontraron valores altos en los coeficientes de correlación entre los datos de temperatura de la superficie del mar y series de precipitación estudiadas utilizando modelos ARMA(0,1) concluyendo que los eventos del niño y la niña son responsables del 40% de las variaciones de la precipitación anual y cerca del 30% de las variaciones en los

caudales de los ríos en Florida. En este contexto, algunos estudios utilizaron los modelos autorregresivos de transición suave (STAR por sus siglas en inglés), para el modelado de series temporales no lineales en la dinámica del ENOS, resultando en un rendimiento superior de la predicción de la muestra de STAR sobre los modelos autorregresivos lineales [375]. Del mismo modo, Arganis et al. [23] propuso un procedimiento para determinar las temperaturas de la superficie del mar mediante la combinación de los métodos Fiering y Svanidze, superando las deficiencias que aparecieron en los modelos Svanidze y ARMA-Svanidze, permitiendo analizar el posible comportamiento a largo plazo de los valores de la temperatura de la superficie del mar y para modelar episodios de "El Niño" o "La Niña" en México.

A pesar de que los modelos no lineales como las redes neuronales artificiales, los modelos de inteligencia artificial, la programación genética y las técnicas de la teoría del caos se han utilizado con éxito como herramientas adecuadas para modelar y pronosticar información meteorológica como la precipitación y la escorrentía [376-379], se ha probado la versatilidad de los modelos estocástico, en consecuencia, se puede encontrar una amplia gama de mejoras a los procedimientos utilizados tradicionalmente [21,380-388].

En general, los modelos estocásticos han posibilitado el estudio de varias funciones de autocorrelación de las variables hidroclimáticas utilizadas para describir los procesos del ciclo hidrológico, además, muchos investigadores han confirmado que la modelación de series de tiempo hidrológicas usando modelos estocásticos, porque estos modelos son la elección adecuada para zonas donde solo se dispone de datos de series de tiempo hidrológicas [354]. Por lo tanto,

los modelos estocásticos siguen siendo adecuados para analizar y pronosticar variables del ciclo hidrológico, como la precipitación, de manera confiable [389-392].

Finalmente, la generación de datos es un importante en la hidrología estocástica y es utilizada por los hidrólogos para muchos propósitos, dentro de los cuales se encuentran, por ejemplo, el dimensionamiento de embalses, planificación y gestión de recursos hídricos y análisis de variabilidad climática.

El presente artículo propone un enfoque *SARIMA* para modelar y pronosticar la precipitación mensual en la cuenca del río Sinú, en Colombia. Los aspectos considerados son: identificación de la forma del modelo, técnicas de estimación de parámetros, modelado de series temporales estacionales y los efectos de diferentes incrementos de tiempo del modelo.

7.2 Materiales y métodos

7.2.1 Área de estudio

La cuenca del río Sinú se encuentra ubicada en la parte Noroeste de Colombia, entre los $9^{\circ}30'N$ a $7^{\circ}05'N$ y los $76^{\circ}35'O$ a $75^{\circ}15'O$ (Figura 6). Tiene un área de $13,972 \text{ km}^2$, en jurisdicción de los departamentos de Córdoba, Sucre y Antioquia. Según la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), está dividida de acuerdo a sus características físicas y bióticas en 3 zonas que son: Alto, Medio y Bajo Sinú [377]. Se debe destacar, que los principales centros poblados de la cuenca son: Tierralta y Valencia en la cuenca Alta, Montería (capital del departamento de Córdoba) en la Media y Lorica en el Bajo Sinú. Además, en

la cuenca alta también se encuentra la central hidroeléctrica URRÁ y el Parque Nacional Natural Paramillo [394].

Además, de acuerdo con la información extraída de las estaciones climatológicas a cargo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la cuenca del río Sinú se caracteriza por tener un régimen de precipitación unimodal con una temporada seca y una de lluvias al año. La temporada de lluvias inicia en el mes de abril y se extiende hasta noviembre, y durante este periodo se generan más del 80% de las precipitaciones anuales. Las máximas precipitaciones se presentan en el alto Sinú, alcanzando magnitudes superiores a los 4000 mm anuales, y va disminuyendo de sur a norte, encontrándose que en la parte del bajo Sinú (desembocadura) es del orden de los 1,300 mm. Del mismo modo, se evidenció que la temperatura media del aire está por encima de los 27°C y varía de sur a norte como lo hace la precipitación. De esta manera, en el alto Sinú se tienen temperaturas de hasta 17°C, mientras que en el resto de la cuenca la temperatura supera los 32°C.

Los datos utilizados para la modelación fueron extraídos de 75 estaciones climatológicas (Figura 7) de la base de datos del IDEAM seleccionadas de forma que contaran con al menos 20 años de registros de precipitación y verificando que tuvieran influencia en la zona de estudio mediante el uso de polígonos de Thiessen [395]. Del mismo modo, los datos faltantes en cada una de las estaciones se calcularon utilizando el modelo ClimGen [396,397]. Finalmente, con el fin de tener información que permita validar los modelos obtenidos, se divide la serie original de forma que se obtiene un vector de calibración que corresponde al primer 90% de los datos y uno de validación que equivale al 10% restante, dicho criterio se escogió teniendo

en cuenta lo reportado en la literatura por Dabral y Murry [398] y Nury et al. [399]. Esto permite hacer un pronóstico con el modelo seleccionado y comparar la precipitación observada y predicha durante el periodo correspondiente al vector de validación.

Para garantizar la normalidad de los vectores de calibración, se realizó una transformación para que los datos transformados se aproximen a un comportamiento Gaussiano y estabilizar la varianza de las series de tiempo. Aunque hay muchas familias de transformaciones que pueden usarse para tal propósito, la transformación de potencia de Box-Cox se encontró útil en varios campos, incluida la hidrología y la meteorología, según lo informado por Chatfield [400] y Dabral & Murry [398]. Box Cox es definida, dada una serie temporal observada, X_t , la serie transformada viene dada por:

$$Y_t = \begin{cases} \frac{X_t - 1}{\lambda} & \text{si } \lambda = 0 \\ \log X_t & \text{si } \lambda \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 1}$$

donde Y_t son los datos transformados de Box-Cox y λ denota el parámetro de potencia elegido para hacer que los datos transformados sean aproximadamente gaussianos.

Antes de determinar el modelo de pronóstico óptimo, se realizó un procedimiento de filtrado. Los vectores de calibración transformados se descompusieron en tres componentes: tendencia, estacionalidad y residuo. De acuerdo con Cleveland et al. [401] componente de tendencia es la variación de baja frecuencia en los datos, junto con cambios no estacionarios, a largo plazo en el nivel; componente estacional es la variación en los datos en o cerca de la

frecuencia estacional, normalmente un ciclo por año; y el componente residual, es la variación restante en los datos más allá de eso en los componentes estacionales y de tendencia [354,402]. La ecuación de la descomposición aditiva es:

$$X_t = T_t + S_t + R_t \quad \text{Ec. 2}$$

donde la serie de tiempo, el componente de la tendencia, el componente estacional, y el componente residual están denotados por X_t , T_t , S_t y R_t , respectivamente.

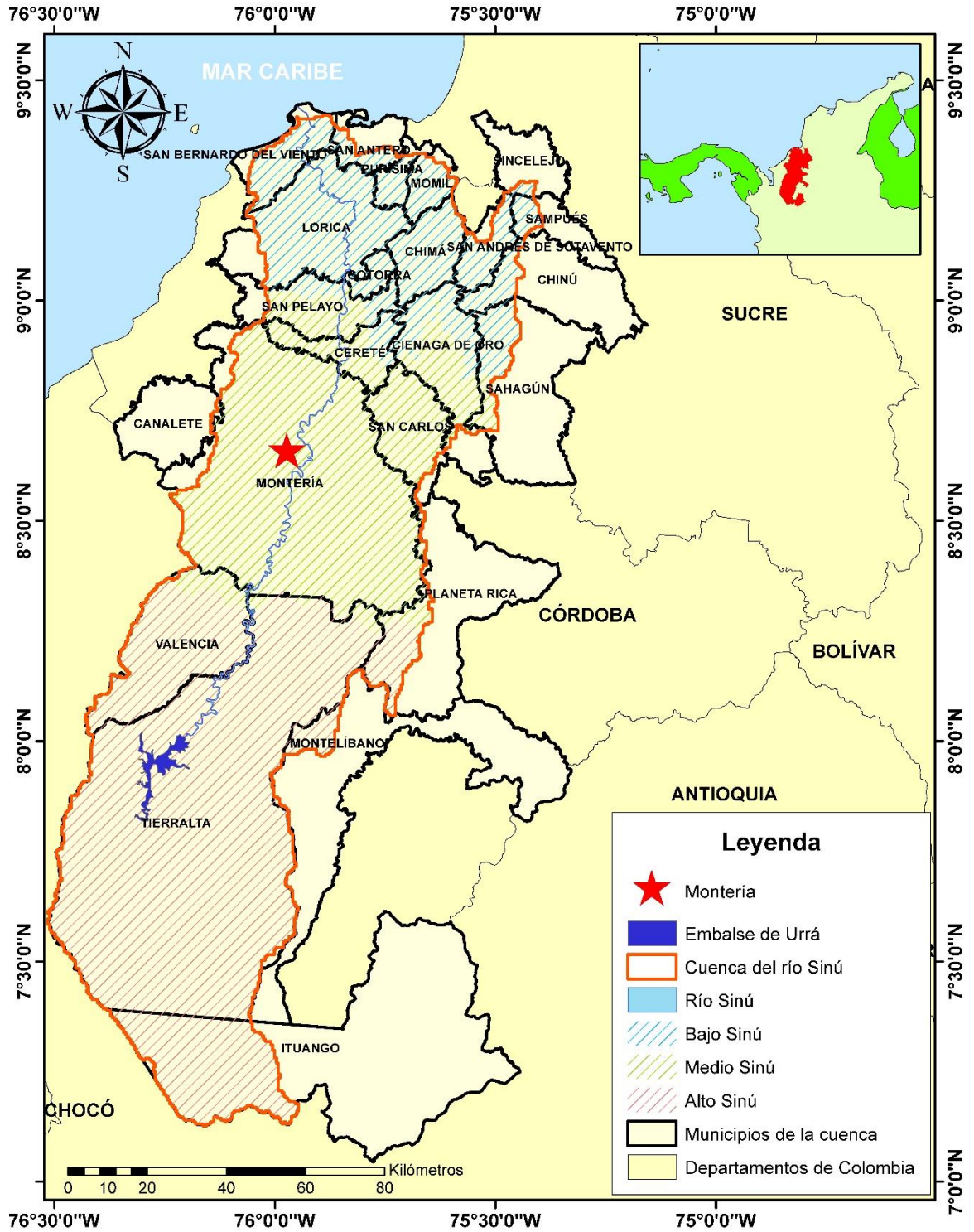


Figura 6. Localización de la cuenca del río Sinú en Colombia. Se observa la localización de la ciudad de Montería por ser el casco urbano más representativo, el río Sinú y el embalse de la hidroeléctrica Urrá

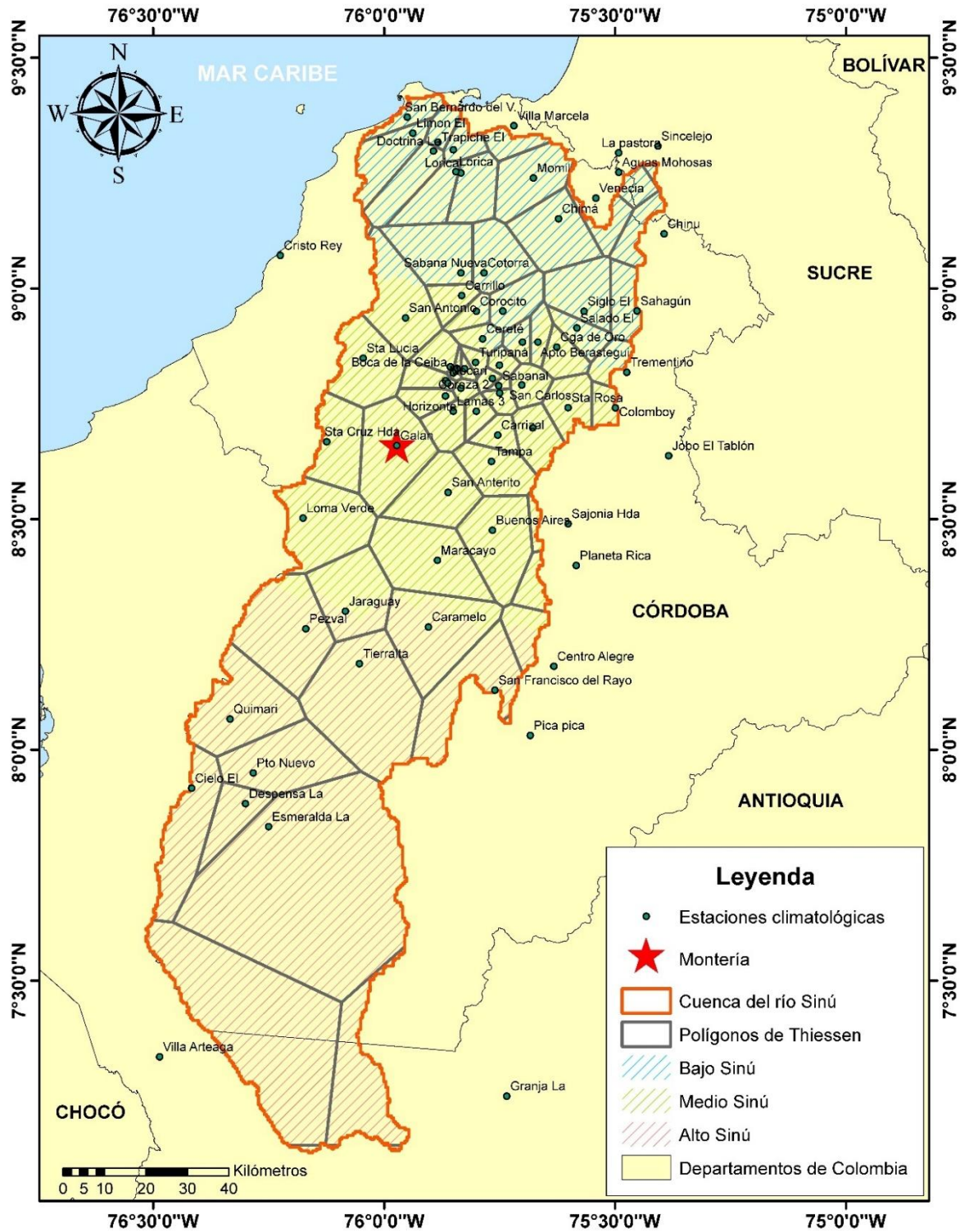


Figura 7. Polígonos de Thiessen de las 75 estaciones climatológicas seleccionadas en la cuenca del río Sinú (Colombia)

7.3 Modelos SARIMA

El modelo SARIMA se basa en la aplicación de modelos ARMA en series de tiempo transformadas, donde la estacionalidad y el comportamiento no estacionario ha sido eliminado.

Para series estacionales con s periodos por año, se utilizan los modelos SARIMA $(p, d, q) \times (P, D, Q)$. Entonces, teniendo un operador B^s tal que $B^s X_t = X_{t-s}$ y, dado que la diferencia estacional puede ser escrita como $(X_t - X_{t-s}) = (1 - B^s) X_t$, un modelo SARIMA con términos no estacionales de órdenes (p, d, q) y estacionales de órdenes (P, D, Q) , SARIMA $(p, d, q) \times (P, D, Q)$, tiene la siguiente estructura [403]:

$$\phi(B) \Phi(B^s) (1 - B)^d (1 - B^s)^D X_t = \theta(B) \Theta(B^s) Z_t \quad \text{Ec. 3}$$

donde $\Phi(B^s)$ y $\Theta(B^s)$ denotan polinomios en B^s de orden P y Q respectivamente, mientras que $\phi(B)$ y $\theta(B)$ son polinomios en B de orden p y q respectivamente.

Para la determinación del modelo de pronóstico óptimo en cada estación se seguirán cuatro etapas: identificación, estimación, verificación y aplicación o pronóstico tal como lo sugiere Box et al [404], Salas y Obeysekera [405] y Burlando et al. [406]. En primera instancia, se requiere verificar la estacionariedad de los datos y se estima la forma general o el orden del modelo. Luego, los parámetros del modelo se calculan utilizando el método de máxima verosimilitud y se lleva a cabo la verificación de la idoneidad del modelo por medio de la prueba estadística de Ljung-Box para comprobar que los residuales se comportan como ruido blanco [407]. El modelo óptimo será escogido de entre los que se ajusten satisfactoriamente a los datos. Existen diversas herramientas para determinar el mejor modelo, entre las que tenemos el criterio de información Bayesiana (BIC por sus siglas en

inglés) criterio Hannan-Quinn (H-Q) y el coeficiente de determinación (R^2) [354,399]. Sin embargo, en muchas de las investigaciones llevadas a cabo la función de autocorrelación (ACF por sus siglas en inglés) y la función de autocorrelación parcial (PACF por sus siglas en inglés) ha sido usado para seleccionar el modelo óptimo. Teniendo en cuenta lo anterior, el ACF y PACF fueron usados para determinar el mejor tipo de modelo, y el criterio de información de Akaike (AIC) de cada modelo se estimó y se escogió aquel AIC con el valor más bajo [354,399].

Finalmente, una vez se determina el modelo óptimo, se procede a hacer el pronóstico y a comparar los resultados con el vector de validación para evaluar el desempeño de este. Para todo lo anterior, se diseñó un algoritmo en el lenguaje de programación para análisis estadístico "R", que además permitió realizar la identificación del modelo de pronóstico más adecuado a partir del AIC, de esta forma se probaron distintas opciones de modelos AR, MA, ARMA, ARIMA y SARIMA, determinándose que los modelos que mejor desempeño mostraban dada la naturaleza de los datos eran los SARIMA.

7.4 Resultados y discusión

Para ilustrar la metodología utilizada para la determinación de los modelos de pronóstico óptimos se utilizarán como ejemplo los resultados de la estación Momil, en la Figura 8 se puede observar el vector de calibración que le corresponde. En primera instancia, con el fin de garantizar la normalidad de las series se realizó una transformación de los datos mediante Box-Cox (Figura 9) y se utilizó el test Dickey-Fuller Aumentado (ADF por sus siglas en inglés), que es una prueba de raíz unitaria que permite aceptar o rechazar

la hipótesis nula de estacionariedad en una serie de tiempo, para comprobarlo [408].

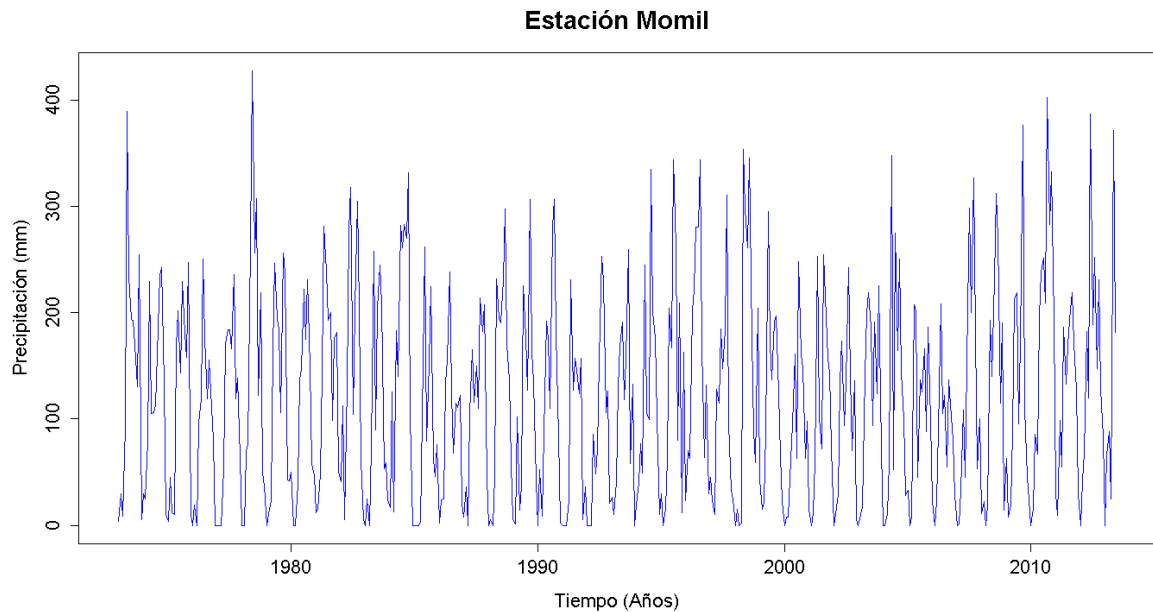


Figura 8. Vector de calibración de la serie de precipitación mensual de la estación Momil

En el gráfico de la serie transformada de la estación Momil (Figura 9) se observan picos aproximadamente una vez al año, que pueden ser indicadores de que la serie presenta un comportamiento estacional. Sin embargo, si bien gráficamente no es posible confirmar la presencia de la estacionalidad, si es posible mediante la descomposición de series de tiempo dado que permite determinar los componentes de la serie (tendencia, estacionalidad, componente aleatoria) y analizar la estructura de esta. De esta forma, en la Figura 10 se muestra la descomposición aditiva de la serie en mención, donde es posible identificar que la serie tiene una estacionalidad marcada que obedece principalmente al régimen de precipitación unimodal propio de la zona, y, además, se evidencia que no se mantiene una tendencia a lo largo de todo el periodo de la serie.

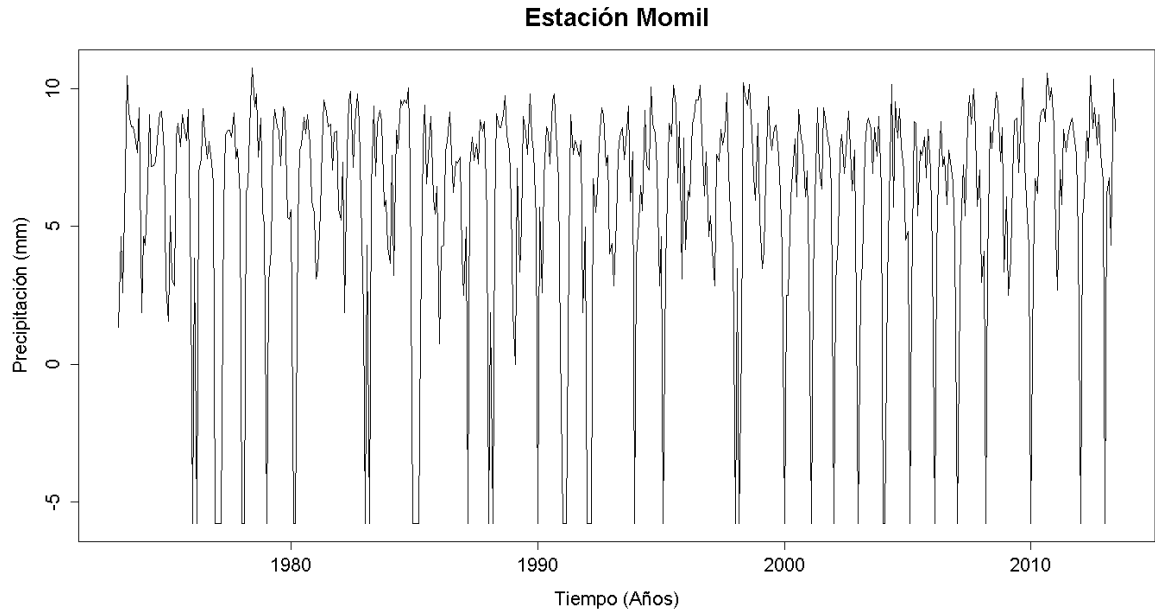


Figura 9. Vector de calibración de la serie de precipitación mensual de la estación Momil transformado usando Box-Cox

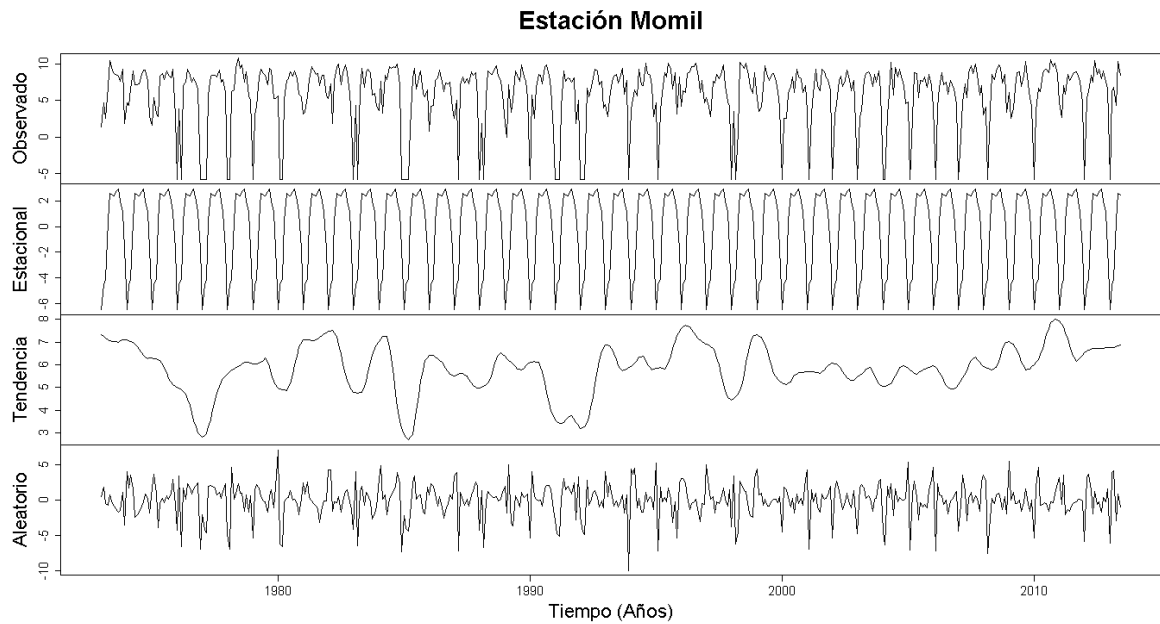


Figura 10. Descomposición del vector de calibración de la serie de precipitación de la estación Momil transformado usando Box-Cox (gráfica de la serie de tiempo con los componentes aleatorios, estacionalidad y tendencia)

Teniendo en cuenta todo lo anterior se infiere que $s=12$, es decir, que el número de periodos por año es 12 (un periodo

por mes). Para comprobar esto último, se calcularon los correlogramas de la serie a partir de la ACF y la PACF, tal como se muestra en la Figura 11 y la Figura 12, donde efectivamente, se pudo evidenciar que la mayor correlación se presenta cuando el retraso k es 12, lo que indica que los valores de un mes específico tienen mayor relación con los presentados en el mismo mes del año inmediatamente anterior.

Además, los correlogramas (Figura 11 y Figura 12) muestran una forma sinusoidal, lo cual sumado a todo lo dicho anteriormente sugiere que un modelo *SARIMA* es el más apropiado para representar la serie de precipitación de la estación Momil. Así, se procedió a ajustar distintos modelos hasta seleccionar el óptimo utilizando el AIC, determinando que el modelo $SARIMA(2,0,0) \times (2,1,0)_{12}$ es el adecuado con un AIC de 2433.6 (Tabla 14) y una ecuación general simplificada de la forma:

$$(1 - 0.1294B - 0.1484B^2)(1 + 0.6378B^{12} + 0.3567B^{24})(1 - B^{12})X_t = Z_t \quad \text{Ec. 4}$$

donde se observa los parámetros ϕ_p y Φ_p en la parte izquierda, multiplicando a los valores de X_t para diferentes retrasos, es decir, valores que tomó la variable antes del instante de tiempo de interés. En este caso, al haber 2 parámetros ϕ_p , implica que estarán multiplicando a los dos valores anteriores de X_t , lo cual quiere decir que retrocede dos meses en la componente no estacional, o lo que es lo mismo, el modelo utilizará los valores de precipitación de los dos meses inmediatamente anteriores para calcular la lluvia en un instante de tiempo dado. Por su parte, los dos parámetros Φ_p de la componente estacional implican que el modelo está teniendo en cuenta los valores de los 2 años anteriores para el mes analizado. Así, la ecuación del modelo

$SARIMA(2,0,0) \times (2,1,0)_{12}$ es la resultante tras resolver el producto de los polinomios que se muestran en la ecuación general simplificada hasta llegar a una expresión de la forma:

$$X_t = Z_t + 0.1294X_{t-1} + 0.1484X_{t-2} + X_{t-12} - 0.6378X_{t-12} - \dots - 0.0462X_{t-37} \quad \text{Ec. 5}$$

En la Figura 13, se observa la serie sintética generada (datos pronosticados), y se muestra que el modelo es capaz de representar tanto la magnitud de las precipitaciones registradas como su variación.

Tabla 14. AIC de algunos de los modelos de pronóstico probados en la estación Momil

Modelo	AIC
$SARIMA(2,0,0) \times (2,1,0)_{12}$	2433.599
$SARIMA(1,0,2) \times (2,1,0)_{12}$	2435.017
$SARIMA(3,0,0) \times (2,1,0)_{12}$	2435.188
$SARIMA(2,0,1) \times (2,1,0)_{12}$	2435.246

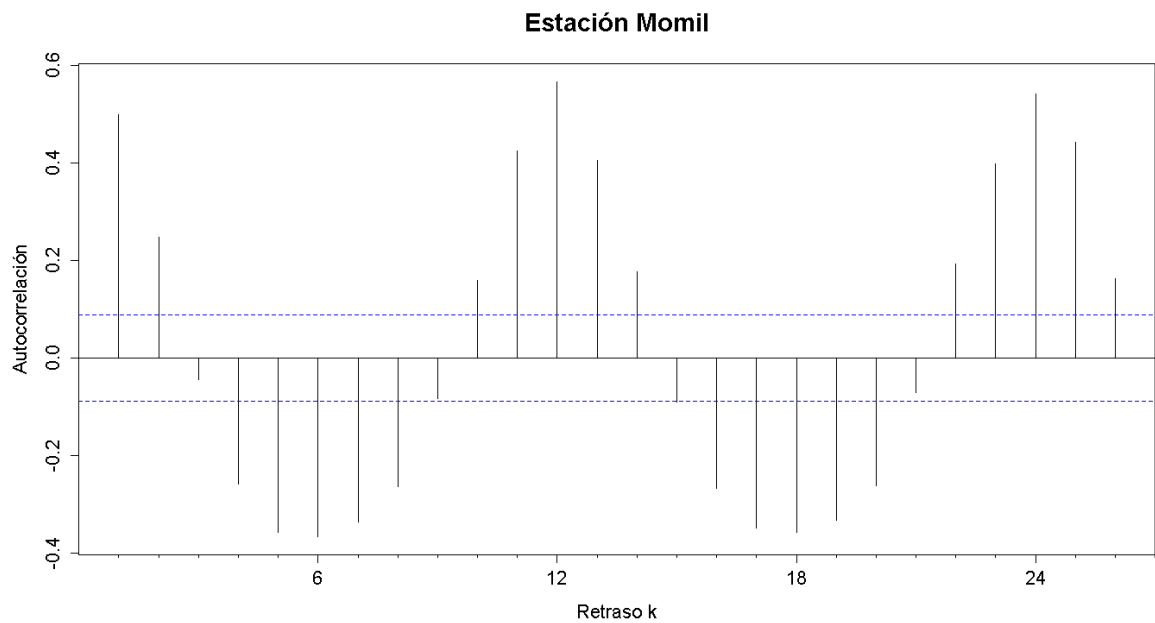


Figura 11. ACF del vector de calibración de la serie de tiempo de precipitación, transformada usando Box-Cox

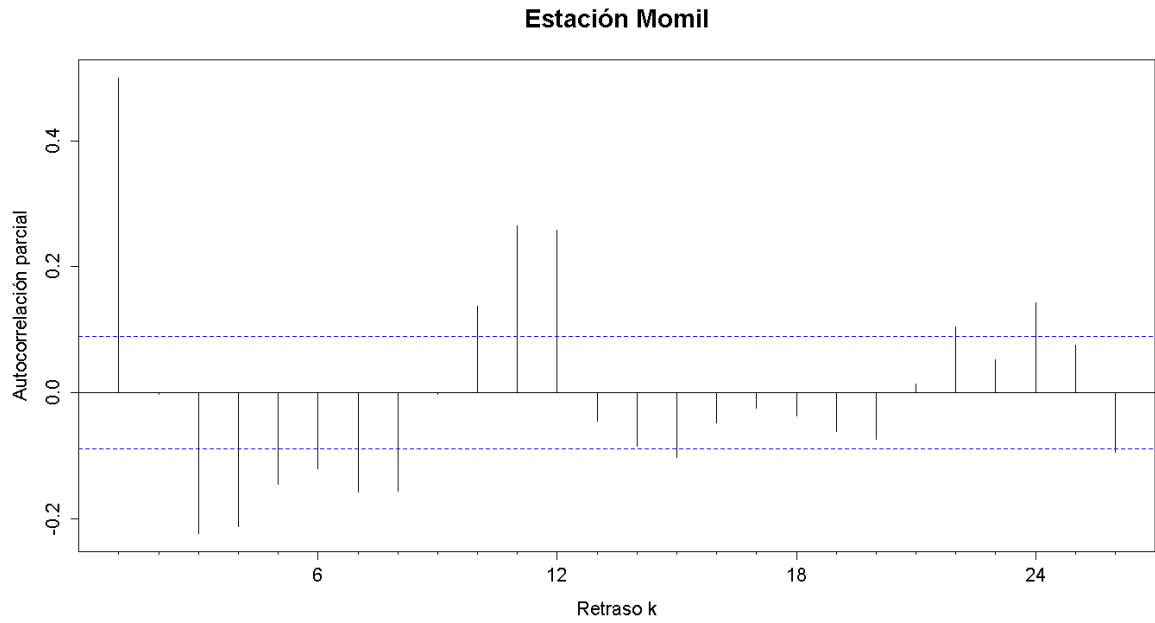


Figura 12. PACF del vector de calibración de la serie de tiempo de precipitación, transformada usando Box-Cox

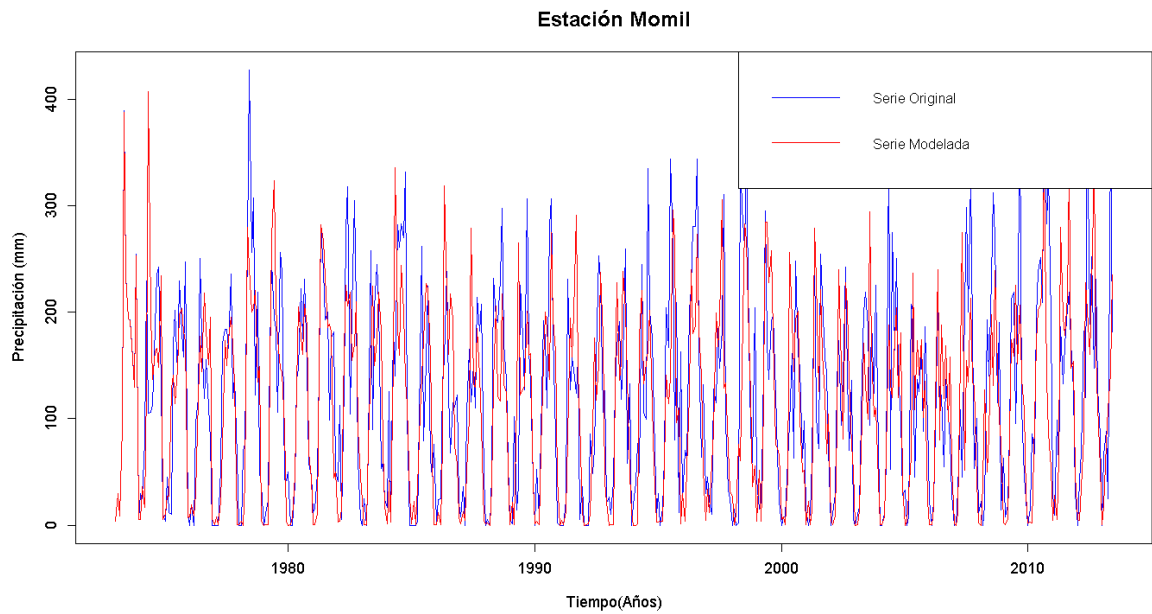


Figura 13. Precipitación observada (vector de calibración) y serie de tiempo sintética

Luego, se procedió a hacer el análisis de los residuales mediante la prueba Ljung-Box y los correlogramas (Figura 14). Los correlogramas muestran unos picos significativos en los retrasos 24 y 25, indicando que modelos de ese orden podrían representar en mayor medida la estructura de la serie. Sin embargo, usando el AIC que se basa en el principio de parsimonia y establece que: a mayor número de parámetros de un modelo se aumenta su complejidad, y, que se debe buscar una solución que permita mantener un equilibrio entre el ajuste del modelo y la complejidad, en otras palabras, escoger entre los modelos que tengan un buen ajuste, el que tenga menor número de parámetros; se concluye que el modelo óptimo es el seleccionado, dado que tiene un menor AIC y por ende utiliza un menor número de parámetros para generar una serie sintética que conserva la estructura de la original. De igual forma, la prueba Ljung-Box muestra que los residuales cumplen los supuestos de aleatoriedad y, por tanto, el modelo *SARIMA* es apropiado para pronóstico. En este punto es importante destacar que, si bien el análisis de los residuales se considera importante para el análisis del desempeño del modelo, podría darse el caso donde la prueba Ljung-Box indica que no son aleatorios para un nivel de significancia dado, aun así, si el modelo es capaz de representar adecuadamente el comportamiento de la serie y de conservar la media de los datos originales, se concluye que el modelo escogido es el más apropiado entre todos los ensayados y puede utilizarse para hacer pronósticos (Figura 15).

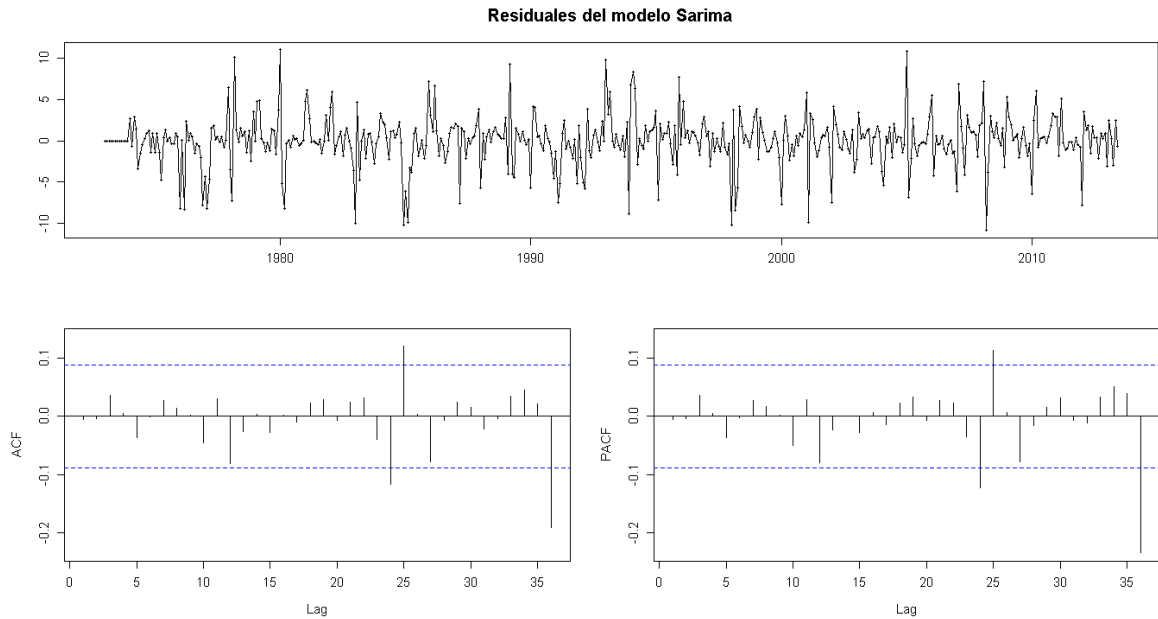


Figura 14. Residuales del modelo *SARIMA* seleccionado para la serie de precipitación de la estación Momil

Posteriormente, se utilizó una prueba de hipótesis respecto a la diferencia entre dos medias con la distribución *t* de Student, a fin de comparar la media del vector de calibración con la de la serie sintética, y del mismo modo comparar la media del vector de validación con la del pronóstico obtenido [409]. La hipótesis nula consiste en que la diferencia de medias de dos conjuntos de muestras es igual a cero (0), sin embargo, la hipótesis alternativa es que la diferencia en las medias no es igual a cero (0).

Para el caso de la estación Momil, en la Tabla 15 se puede apreciar que a un nivel de significancia de 5% no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias del vector de calibración y de la serie sintética. Esto se debe a que el valor *p* (0.15) es mayor a 0.05 y, además, a que el intervalo de confianza al 95% (-3.15, 20.4) incluye el valor de 0. Lo anterior implica que usando el modelo

$SARIMA(2,0,0) \times (2,1,0)_{12}$ se puede obtener una serie sintética estadísticamente igual a la original, y por tanto, es el modelo óptimo para la estación Momil.

Por último, al comparar las medias del vector de validación y el pronóstico, se concluyó que a un nivel de significancia de 2% no existe diferencia estadísticamente significativa, dado que el valor p (0.023) es mayor a 0.02 y a que el intervalo de confianza al 98% (-0.82, 79.65) incluye el valor de 0 (Tabla 15). La prueba fue desarrollada para un nivel de confianza del 98% para la comparación entre el vector de validación y el pronóstico, ya que de esta manera hubo una mayor probabilidad de que se cumpliera la hipótesis.

De esta forma, se determina que la serie de validación y el pronóstico son estadísticamente iguales. Por todo lo anterior, se considera que el modelo $SARIMA(2,0,0) \times (2,1,0)_{12}$ representa adecuadamente la estructura de los datos de la estación Momil y es apropiado para realizar pronósticos de precipitación. La Tabla 16 muestra los modelos óptimos para todas las estaciones climatológicas en el área de estudio.

Tabla 15. Prueba de hipótesis nula respecto a diferencia de dos medias de la estación Momil

Muestras	Media	Nivel de significancia	Lím. Inf. intervalo de confianza	Lím. Sup. intervalo de confianza	Valor p
Vector calibración	120.4084	5%	-3.146883	20.391518	0.1508
Serie sintética	111.7861				
Vector validación	107.9265	2%	-0.8160514	79.6505786	0.02259
Pronóstico	147.3437				

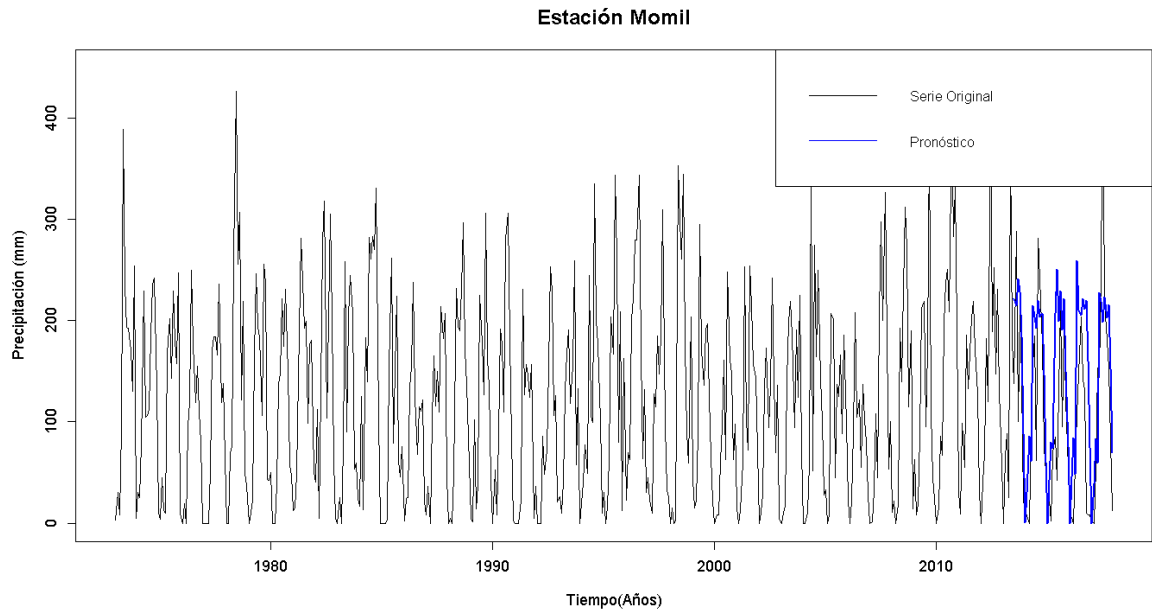


Figura 15. Gráfico de la serie original y el pronóstico de la estación Momil

Tabla 16. Modelos SARIMA para las estaciones de la cuenca del río Sinú

Estación	Modelo SARIMA	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3	Φ_1	Φ_2	Θ_1	Θ_2	μ_D
Loma Verde	(0,0,0) (0,1,1) [12]											-0.8834
El Siglo	(0,0,0) (0,1,2) [12]									-1.0793	0.2068	
California	(0,0,0) (2,1,0) [12]							-0.6461	-0.3850			
Colomboy	(0,0,0) (2,1,0) [12]							-0.6755	-0.2983			
Planeta Rica	(0,0,0) (2,1,0) [12]							-0.6189	-0.3164			
Sahagún	(0,0,0) (2,1,0) [12]							-0.682	-0.349			
Mocarí	(0,0,0) (2,1,0) [12]							-0.6398	-0.3180			
Cotorra	(0,0,0) (2,1,1) [12]							-0.0295	-0.0545	-0.8652		
San Francisco del Rayo	(0,0,0) (2,1,2) [12]							0.4976	-0.1149	-1.4319	0.4998	
Lorica [13080020]	(0,0,1) (0,1,1) [12]				0.2257							-0.7728
Aguas Mohosas	(0,0,1) (2,1,0) [12]				0.1256			-0.7689	-0.3523			
Ciénaga de Oro	(0,0,1) (2,1,0) [12]				0.2233			-0.7156	-0.3461			
Rabolargo	(0,0,1) (2,1,0) [12]				0.1902			-0.5654	-0.2140			
Sta Lucia	(0,0,1) (2,1,0) [12]				0.2207			-0.7197	-0.3296			
Sta Rosa	(0,0,1) (2,1,0) [12]				0.2514			-0.6611	-0.3805			
Cerro Bahía	(0,0,1) (2,1,2) [12]				0.2661			-0.8306	-0.2828	-0.1806	-0.5501	0.0012
Villa Marcela	(0,0,2) (0,1,1) [12]				0.2154	0.269						-0.7186
Cristo Rey	(0,0,2) (2,1,0) [12]				0.2167	0.1387		-0.7206	-0.3576			
Lorica_[13085020]	(0,0,2) (2,1,0) [12]				0.1615	0.1828		-0.6843	-0.3757			
Galan	(0,0,2) (2,1,0) [12]				0.1478	0.1158		-0.6043	-0.2768			
Berastegui	(0,0,3) (0,1,2) [12]				-0.0146	0.106	0.1564	-0.9694	0.0969			
La Doctrina	(0,0,3) (2,1,0) [12]				0.2198	0.1056	0.1546	-0.6658	-0.3496			
Apto Los Garzones	(0,0,3) (2,1,0) [12]				0.0402	0.0749	0.1227	-0.5984	-0.3440			
Turipaná	(0,0,3) (2,1,0) [12]				0.0707	0.0833	0.0861	-0.6659	-0.3591			
Centro Alegre	(1,0,0) (0,1,1) [12]	0.1299										-0.8857
San Antonio	(1,0,0) (0,1,1) [12]	0.1667										-0.8655
Caramelo	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.0657						-0.6017	-0.3545			

Estación	Modelo <i>SARIMA</i>	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3	Φ_1	Φ_2	Θ_1	Θ_2	μ_D
Buenos Aires	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.0999						-0.6416	-0.3361			
Carrillo	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.2737						-0.6719	-0.3577			
Chimá	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1147						-0.6356	-0.294			
Chinú	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1063						-0.7288	-0.3523			
La Esmeralda	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1934						-0.7593	-0.4226			
Jobo El Tablón	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1458						-0.6508	-0.3557			
Lamas 3	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1994						-0.6914	-0.4064			
Montería	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1859						-0.6725	-0.3422			
Sabana Nueva	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.2379						-0.6474	-0.346			
Sincelejo	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.2976						-0.6623	-0.3649			
Tierralta	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.193						-0.6672	-0.2934			
Venecia	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.2314						-0.6749	-0.3314			
Coroza 1	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1853						-0.5819	-0.3239			
Maracayo	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.0946						-0.6326	-0.3116			
San Carlos	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.2240						-0.7045	-0.3688			
Sta Cruz Hda	(1,0,0) (2,1,0) [12]	0.1214						-0.6337	-0.2864			
La Despensa	(1,0,0) (2,1,1) [12]	0.2429						-0.0524	-0.0393	-0.876		
Univ de Córdoba	(1,0,0) (2,1,1) [12]	0.1578						-0.0136	-0.0165	-0.8869		
Palma de Vino	(1,0,0) (2,1,2) [12]	0.2719						0.4669	-0.2038	-1.3881	0.5083	
Sabanal	(1,0,0) (2,1,2) [12]	0.1481						0.4505	-0.1412	-1.3249	0.408	
Pica Pica	(1,0,1) (0,1,2) [12]	0.8508	-0.7203							-1.0251	0.1244	
El Cielo	(1,0,1) (1,1,2) [12]	0.8734			-0.4547			0.5283		-1.6284	0.6619	0.0057
Boca de la Ceiba	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.6920			-0.5635			-0.6869	-0.3355			
Carrizal	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.8387			-0.7691			-0.7033	-0.2817			
Coroza 2	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.6065			-0.4798			-0.6835	-0.3534			
Horizonte	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.7063			-0.557			-0.6029	-0.2798			
Jaraguay	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.9261			-0.7508			-0.6285	-0.3626			
El Limón	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.6210			-0.5041			-0.6884	-0.3463			

Estación	Modelo SARIMA	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3	Φ_1	Φ_2	Θ_1	Θ_2	μ_D
San Anterito	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.8305			-0.6224			-0.6904	-0.3417			
Tampa	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.8516			-0.7476			-0.652	-0.3254			
El Trapiche	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.8098			-0.6725			-0.5771	-0.3797			
Villa Arteaga	(1,0,1) (2,1,0) [12]	0.804			-0.6505			-0.6582	-0.2823			
La Pastora	(1,0,2) (0,1,1) [12]	0.9727			-0.8175	-0.0911				-0.8712		
Sajonia Hda	(1,0,2) (0,1,1) [12]	0.9534			-0.7198	-0.1231				-0.8531		
Trementino	(1,0,2) (0,1,2) [12]	-0.9449			1.1363	0.2131				-0.9278	0.0373	
Callemar	(1,0,3) (0,1,1) [12]	0.9875			-0.7092	-0.0832	0.1580			-0.8647		
Apto Berastegui	(2,0,0) (2,1,0) [12]	0.1331	0.1471					-0.5945	-0.3333			
Flor del Sinú	(2,0,0) (2,1,0) [12]	0.0941	0.1483					-0.6181	-0.3056			
Momil	(2,0,0) (2,1,0) [12]	0.1294	0.1494					-0.6378	-0.3567			
San Bernardo	(2,0,0) (2,1,0) [12]	0.092	0.1452					-0.7489	-0.3671			
Salado El	(2,0,0) (2,1,0) [12]	0.1046	0.1261					-0.7196	-0.3762			
Pezval	(2,0,0) (2,1,1) [12]	0.1296	0.0843					-0.0191	-0.1493	-0.8849		
Puerto Nuevo	(2,0,0) (2,1,1) [12]	0.207	0.0079					-0.1806	-0.254	-0.7325		0.001
La Granja	(2,0,1) (2,1,0) [12]	-0.4645	0.2069		0.6187			-0.634	-0.3466			
Buenos Aires 1	(2,0,1) (2,1,0) [12]	-0.6891	0.1377		0.7795			-0.5973	-0.2836			
Corocito	(3,0,0) (2,1,0) [12]	0.322	-0.0043	0.1264				-0.6021	-0.2633			
Quimarí	(3,0,0) (2,1,0) [12]	0.0831	0.031	-0.1579				-0.7179	-0.3972			
Cereté	(3,0,0) (2,1,0) [12]	0.2795	0.0277	0.1427				-0.7331	-0.3709			

ϕ_1, \dots, ϕ_p : parámetros del modelo autorregresivo de orden p; $\theta_1, \dots, \theta_p$: parámetros del modelo de media móvil de orden q; Φ_1, \dots, Φ_p : parámetros del modelo estacional autorregresivo de orden P; $\Theta_1, \dots, \Theta_p$: parámetros del modelo de media móvil estacional de orden Q; μ_D : residuales

7.5 Conclusiones

Este estudio se enfoca en la modelación y pronóstico de las series de precipitación mensual utilizando modelos *SARIMA*. Los resultados obtenidos pueden ser aplicados para variados estudios hidrológicos y la administración de los recursos hídricos, lo cual ayudará a los tomadores de decisiones y a los encargados de proponer leyes a establecer estrategias, prioridades y el uso sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río Sinú. Un ejemplo para el uso de esta información consiste en que los modelos propuestos pueden usarse para determinar la aparición de fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur, identificar el potencial de recolección de agua lluvia y operar sistemas de riego.

Las series de precipitación mensual registradas en las estaciones de la zona de estudio presentan un comportamiento estacional, reflejando el régimen de lluvia unimodal característico de la cuenca. Del mismo modo, se determinó que no se mantiene una tendencia a lo largo del periodo de registro.

Mediante la transformación Box-Cox fue posible garantizar el supuesto de estacionariedad para las series de tiempo de precipitación registradas en la cuenca del río Sinú. Esto, permitió establecer que, dado el comportamiento estacional de las series analizadas, los modelos *SARIMA* permiten representar de forma satisfactoria la estructura temporal de la precipitación en la zona de estudio. El enfoque *SARIMA* mostró una mejora sobre la integración de la eliminación de la tendencia, la periodicidad y el enfoque de componentes estocásticos de la modelación de series de tiempo. Las diferentes estadísticas de rendimiento en el desarrollo del modelo y la fase de validación de este estudio también confirmaron una mayor precisión de predicción utilizando modelos *SARIMA*.

Por medio de modelos estocásticos de *SARIMA*, fue posible generar series temporales sintéticas de precipitación, sin perder datos que logren preservar el comportamiento y la estructura de los datos originales. Se demostró que las series sintéticas obtenidas son estadísticamente iguales a las precipitaciones observadas, y de la misma manera, que los pronósticos realizados utilizando los modelos *SARIMA* seleccionados para cada estación representan adecuadamente el comportamiento de la lluvia en el área. Según los resultados, los modelos estocásticos son una de las técnicas más apropiadas para predecir la lluvia.

Es importante destacar que si bien los pronósticos obtenidos con los modelos no permiten predecir la cantidad exacta de precipitación, si pueden revelar la tendencia probable de la lluvia futura y brindar información que puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones a establecer estrategias en ámbitos como la agricultura, donde es de suma importancia conocer el comienzo y fin de las temporadas de lluvias, la planificación de obras civiles y la elaboración de planes de mitigación para peligros naturales como las inundaciones y las sequías.

Por último, vale la pena destacar que la planificación racional y la gestión integral del recurso hídrico exigen prever los sucesos que puedan ocurrir en el futuro y, al mismo tiempo, la previsión suele basarse en acontecimientos del pasado. Por esta razón, el análisis de series de tiempo una herramienta importante dado que permite hacer inferencias sobre el futuro.

8 Escurrimiento directo

8.1 Introducción

El escurrimiento directo se puede definir como el efecto integrado de la precipitación, intercepción, infiltración, evapotranspiración, infiltración y escurrimiento en lámina sobre el terreno, en determinado punto de la cuenca [410]. La importancia realizar un cálculo de la escorrentía directa en una cuenca radica en considerarse un insumo primordial dentro de la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH), involucrando aspectos como evaluación de las inundaciones que permitan el desarrollo de una sistema de alerta temprana de advertencias en diferentes segmentos de una cuenca para mitigar el riesgo de inundaciones [411], así como el diseño de sistemas de recolección de agua lluvia en zonas urbanas y rurales [412]. De igual manera, el cálculo correcto de la escorrentía directa es determinante para un dimensionamiento adecuado y seguro de las estructuras de hidroingeniería [413], tales como proyectos de control de inundaciones e infraestructura verde [414,415].

En un modelo hidrológico la escorrentía directa es el parámetro más básico e importante en la planificación de las estrategias para la gestión del agua, y ésta depende de la lluvia, el tipo de suelo, la humedad del suelo, la densidad de drenaje, la topografía, el tamaño y forma de la cuenca, la cobertura del suelo, entre otros aspectos fisiográficos y morfológicos de la cuenca [416]. Por lo tanto, aspectos como el cambio en el uso del suelo afectan significativamente la escorrentía directa en una cuenca y en el caso del sistema hidrológico urbano se debe comprender la relación entre la superficie impermeable y la escorrentía directa [417,418]. Igualmente, los cambios hidrológicos se evaluaron teniendo en cuenta el cambio en el uso

del suelo en zonas urbanas, mostrándose que la escorrentía directa se encuentra significativamente relacionada con la urbanización, hallándose altos volúmenes y coeficientes de escorrentía en las diferentes zonas funcionales urbanas como lo son áreas residenciales, comerciales e industriales de alta densidad [418]. En cuanto al aspecto rural, la conversión de bosques a prácticas agrícolas intensivas produce cambios en la escorrentía superficial debido al cambio de uso ya que se disminuye la importante función de control de la escorrentía directa que cumplía la intercepción de dosel, suelo del bosque, manejo y del suelo y la infiltración [419]. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante establecer un modelo de simulación hidrológica adecuado que permita establecer una relación lluvia-escorrimento.

Los modelos de simulación hidrológica combinan las tecnologías espaciales como los sensores remotos, sistemas de información geográfica (SIG) y modelo digital de elevaciones (MDE), para preparar un modelo espacial y temporal que pueda pronosticar, por ejemplo, inundaciones [420,421]. Dentro de los modelos hidrológicos utilizados se encuentran Hidras, Hec-HMS, WEAP, SWAT, los cuales han demostrado buenos resultados en diversas investigaciones realizadas [11,422]

En este mismo contexto, se aplica el método del Número de Curva (CN por sus siglas en inglés) del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés), para estimar la escorrentía directa en las cuencas hidrográficas [412,415,416,423,424]. El CN es un índice desarrollado por el NRCS, que pretende representar el potencial de escorrentía de las aguas pluviales dentro de un área de drenaje, el cual se estima utilizando una combinación de uso del suelo, tipo de suelo y las condiciones antecedentes de humedad del suelo, y para tal efecto,

se utilizan las tecnologías espaciales mencionadas anteriormente [421,425].

El cálculo del número de curva se realiza mediante el empleo de mapas temáticos como son el uso o cobertura del suelo, la geología y la topografía. Además, se utiliza la precipitación promedio diaria calculada utilizando los polígonos de Thiessen, para obtener un resultado acorde a las condiciones hidrológicas que se encuentran en la cuenca en estudio [426]. Igualmente, se ha demostrado que la precisión de un modelo hidrológico en una cuenca aumenta en la medida de tener la mayor cantidad de estaciones pluviométricas disponible; estudios han estimado que al menos se debe contar con 3 estaciones para obtener datos razonables, cuando existen inconvenientes con la obtención de este tipo de información [427,428]. La respuesta del método del CN estima con precisión la escorrentía a una alta intensidad de la lluvia en zonas tropicales, sin embargo, a una baja intensidad subestimó la escorrentía superficial [422].

El número de curva ha demostrado ser eficiente para determinar la escorrentía directa en una cuenca hidrográfica, por tal motivo, el presente capítulo, pretende determinar el número de curva en la cuenca del río Sinú, en Colombia, utilizando los datos diarios de precipitación de las estaciones pluviométricas. Los resultados del escurrimiento se encontrarán el capítulo 4 del presente documento, donde los parámetros calculados en este capítulo serán ingresarán en la herramienta WEAP.

8.2 Materiales y métodos

8.2.1 Área de estudio

La cuenca del río Sinú se encuentra ubicada en la parte Noroeste de Colombia, entre los 9°30'N a 7°05'N y los 76°35'O a

75°15'0 (Figura 6). Tiene un área de 13972 km², en jurisdicción de los departamentos de Córdoba, Sucre y Antioquia. Según la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), está dividida de acuerdo a sus características físicas y bióticas en 3 zonas que son: Alto, Medio y Bajo Sinú [377]. Los principales centros poblados de la cuenca son: Tierralta y Valencia en la cuenca Alta, Montería (capital del departamento de Córdoba) en la Media y Lorica en el Bajo Sinú. Además, en la cuenca alta también se encuentra la central hidroeléctrica URRÁ y el Parque Nacional Natural Paramillo [394].

La cuenca del río Sinú se caracteriza por tener un régimen de precipitación unimodal con una temporada seca y una de lluvias al año. La temporada de lluvias inicia en el mes de abril y se extiende hasta noviembre, y durante este periodo se generan más del 80% de las precipitaciones anuales. Las máximas precipitaciones se presentan en el alto Sinú, alcanzando magnitudes superiores a los 4000 mm anuales, y va disminuyendo de sur a norte, encontrándose que en la parte del bajo Sinú (desembocadura) es del orden de los 1300 mm. Del mismo modo, se evidenció que la temperatura media del aire está por encima de los 27°C y varía de sur a norte como lo hace la precipitación. De esta manera, en el alto Sinú se tienen temperaturas de hasta 17°C, mientras que en el resto de la cuenca la temperatura supera los 32°C.

Los datos utilizados para la el cálculo del número de curva son 75 estaciones climatológicas (Figura 7) de la base de datos del IDEAM seleccionadas de forma que contaran con al menos 20 años de registros de precipitación y verificando que tuvieran influencia en la zona de estudio mediante el uso de polígonos de Thiessen [395]. Del mismo modo, los datos faltantes en cada una

de las estaciones se calcularon utilizando el modelo ClimGen [396,397].

En el área de estudio los cambios en el uso del suelo urbano y agrícola no son significativos, por lo tanto, se utilizó el mapa de uso y tipo del suelo desarrollado en el Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Córdoba por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), que es la entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia; elaborar el catastro nacional de la propiedad inmueble; realizar el inventario de las características de los suelos; adelantar investigaciones geográficas como apoyo al desarrollo territorial; capacitar y formar profesionales en tecnologías de información geográfica y coordinar la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales. El mapa de uso y tipo del suelo se muestra en la Figura 16 y Figura 17 respectivamente.

Inicialmente se estableció el límite de la cuenca con ayuda para lo cual se requirió el uso de un Modelo Digital de Elevación (MDE), los cuales, de acuerdo con Kozlov y Ghebrehiwot [429], son una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre. Es decir, son matrices resultantes de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda, por lo que son una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. El MDE utilizado en la presente investigación fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS, 430], validado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Modelo Integrado de Cambio Climático y Recursos Hídricos [431], y tiene una resolución (tamaño de celda) de 460mx460m. Una vez establecido el límite de la cuenca total, se subdividió ésta en 79 subcuencas para un estudio más detallado de la misma.

Posteriormente, con el mapa del tipo del suelo, se determinan los grupos hidrológicos del suelo de acuerdo con lo que se indica en la Tabla 17, tomada de Chow et al [10].

Tabla 17. Grupo hidrológico del suelo de acuerdo con el tipo de suelo

Grupo	Descripción	Potencial de escorrentía
A	Suelos profundos, bien drenados, predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil	Bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos
B	Suelos moderadamente profundos, con texturas moderadamente finas a gruesas	Moderadamente bajo cuando están completamente húmedos
C	Suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas.	El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos
D	Suelo que se expande significativamente cuando está húmedo, suelo plástico. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable	Suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas

Luego, se superponen el mapa de uso de la tierra y el de los grupos hidrológicos del suelo, identificando cada polígono de uso del suelo único y determinando su área. A cada polígono único se le asigna un número de curva de acuerdo con la tabla de números de curva del Soil Conservation Service (SCS) hoy el Natural Resources Conservation Service (NRCS). Una vez determinado el número de curva, se calcula para cada subcuenca el CN ponderado y la retención potencial máxima (S) y la abstracción inicial (I_a), los que se calcularon con las ecuaciones Ec. 11 y Ec. 8 respectivamente. Finalmente, se calcula la escorrentía directa usando la ecuación Ec. 10.

8.2.2 Método del número de curva del NRCS

En los años 50's el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) desarrollaron un método para estimar la escorrentía producida por la precipitación. Este método se refiere como el método CN.

El número de curva del NRCS está basado en la ecuación de balance hídrico, en donde existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, por lo tanto, la escorrentía potencial es $P-I_a$. La hipótesis del número de curva consiste en que las condiciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir, [10]:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{Ec. 6}$$

donde F_a es la abstracción continuada, P_e el exceso de precipitación o escorrentía directa, P la precipitación total, I_a y S fueron definidas anteriormente.

Del principio de continuidad, que indica que la cantidad de agua de entrada es igual a la de salida, se tiene:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad \text{Ec. 7}$$

Combinando (7) y (8) y resolviendo, para luego despejar se obtiene P_e :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Ec. 8}$$

La cual es considerada la ecuación básica para el cálculo de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método del SCS hoy NRCS [10].

Luego de estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ec. 9}$$

Con base en esto:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec. 10}$$

El número de curva es un número adimensional, tal que $0 \leq CN \leq 100$. Cuando se tienen superficies impermeables y superficies de agua $CN=100$; en cuanto a superficies naturales $CN < 100$ [10].

El CN y S se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ec. 11}$$

donde S está en pulgadas. El número de curva calculado con las tablas del NRCS se aplica para condiciones antecedentes de humedad (AMC, por sus siglas en inglés) normales (AMC II). En el caso de condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por [10]:

$$CN(I) = \frac{4.2 CN(II)}{10 - 0.058 CN(II)} \quad \text{Ec. 12}$$

$$CN(III) = \frac{23 CN(II)}{10 + 0.13 CN(II)} \quad \text{Ec. 13}$$

El CN (número adimensional que va en un rango de 0 a 100) es determinado de una tabla, basada en la cobertura del suelo, el grupo hidrológico del suelo y la AMC. El HSG está expresado en términos de grupos (A, B, C, D), como se indicó en la Tabla 17, de acuerdo con la tasa de infiltración del suelo. AMC está expresado en tres niveles como explicó arriba (I, II y III), de acuerdo con los límites de la lluvia para las estaciones inactivas y de crecimiento.

La cuenca del río Sinú se dividió en 79 subcuencas y a cada una de las subcuencas se le calculó el número de curva ponderado. La ecuación de CN ponderado se da a continuación.

$$CN_p = \frac{\sum (CN_i \times A_i)}{A} \quad \text{Ec. 14}$$

donde,

CN_p : número de curva ponderado

CN_i : número de curva de 1 al número que halla en la subcuenca

A_i : área con del número de curva CN_i

A : área total de la subcuenca donde se pondera el CN .

Siguiendo con la condición de humedad antecedente (AMC) se refiere al contenido de agua presente en el suelo en determinado tiempo. Es muy importante para determinar el valor actual del CN. SCS hoy NRCS, desarrolló tres condiciones antecedentes de humedad del suelo y denominadas como I, II y III, de acuerdo con los límites de la lluvia para estaciones inactivas y de crecimiento. La clasificación de la condición de humedad antecedente se muestra en la Tabla 18, tomada de Chow et al. [10]. En este estudio se realizó el cálculo de cada una de los CN teniendo en cuenta la humedad antecedente de los datos de precipitación diaria de cada una de las estaciones de la cuenca.

Tabla 18. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de la lluvia de SCS hoy NRCS

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

8.3 Resultados y discusión

El método del NRCS-CN, es ampliamente utilizado debido a la facilidad para su aplicación y a su adaptación en territorios pequeños. Partiendo del MDE, se delineó la cuenca principal y las subcuencas hidrográficas, obteniéndose en total 80 que discurre a lo largo del departamento de Córdoba en su gran mayoría.

La clasificación del grupo hidrológico del suelo se realizó teniendo en cuenta la clasificación mostrada en la Tabla 17. Los valores de CN se determinaron a partir del grupo hidrológico del suelo y el uso del suelo. Los valores del número de curva para AMC I y AMC III se obtuvieron a partir del CN de AMC II. En la Figura 18 se muestra el mapa de la clasificación del grupo hidrológico del suelo en la cuenca del río Sinú, a partir del tipo del suelo en la zona en estudio y en la Figura 19 se encuentran los números de curva.

En la Tabla 19 se describen cada una de las cuencas con el respectivo valor de la pendiente promedio y los CN ponderados, así como la precipitación total anual promedio, entre otras características. En la Figura 18 se observa el grupo hidrológico del suelo (HSG, por sus siglas en inglés), como se mencionó anteriormente, y el HSG que tiene mayor área en la cuenca es C representando un 54.1%, seguido del B con un 33.3%, luego el A con un 8.7% y finalmente por el grupo D con un 4%. Se encuentra que la mayor representación la tiene el grupo, lo cual implica que existe un potencial moderadamente alto en la cuenca, sin embargo, como hay una representación importante del grupo B (suelos francos), existen zonas con una escorrentía moderadamente baja, por lo tanto, existen zonas donde hay riesgo de experimentar escorrentías durante las tormentas, especialmente en la cuenca media y baja del río Sinú.

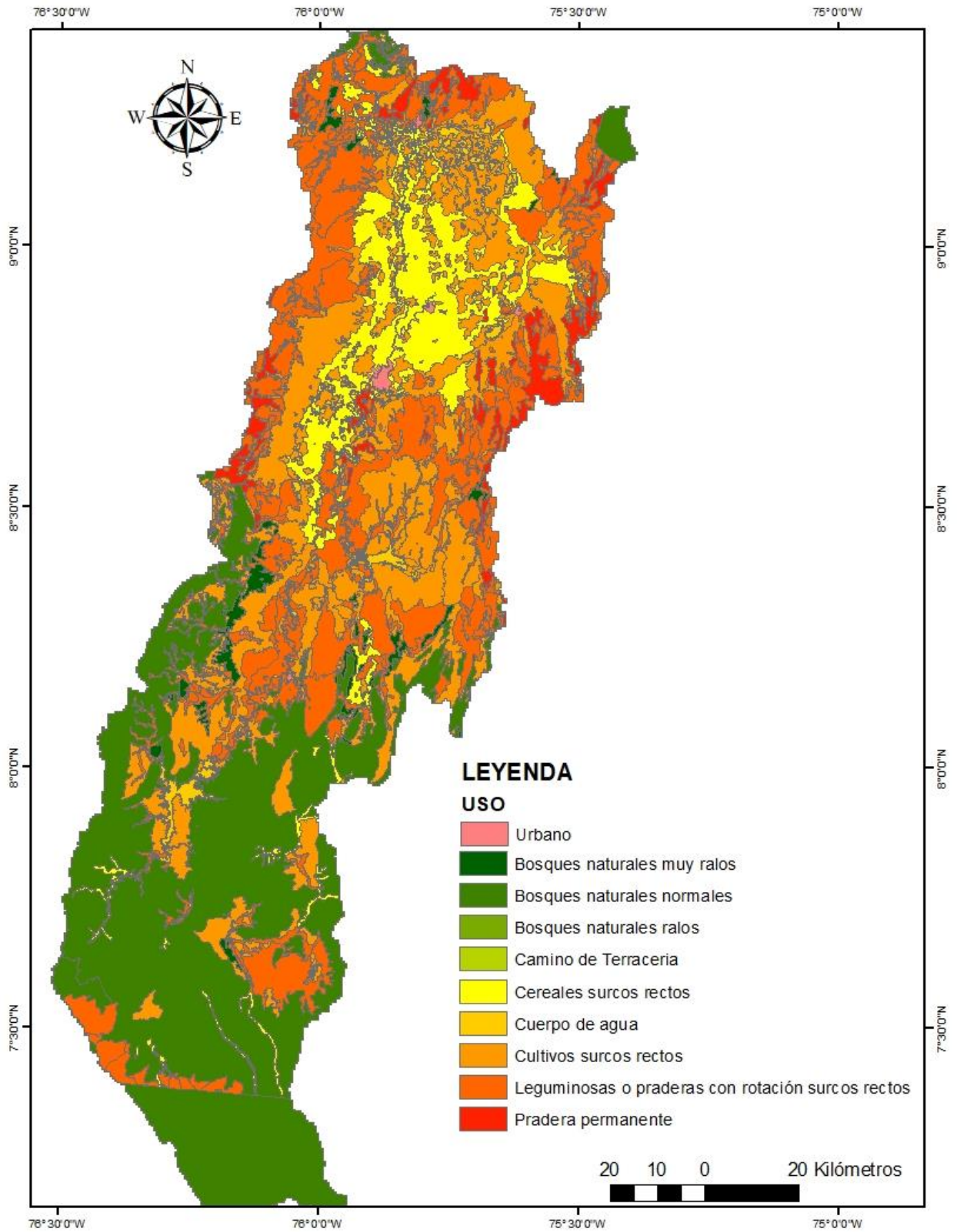


Figura 16. Mapa de uso del suelo de la cuenca del río Sinú

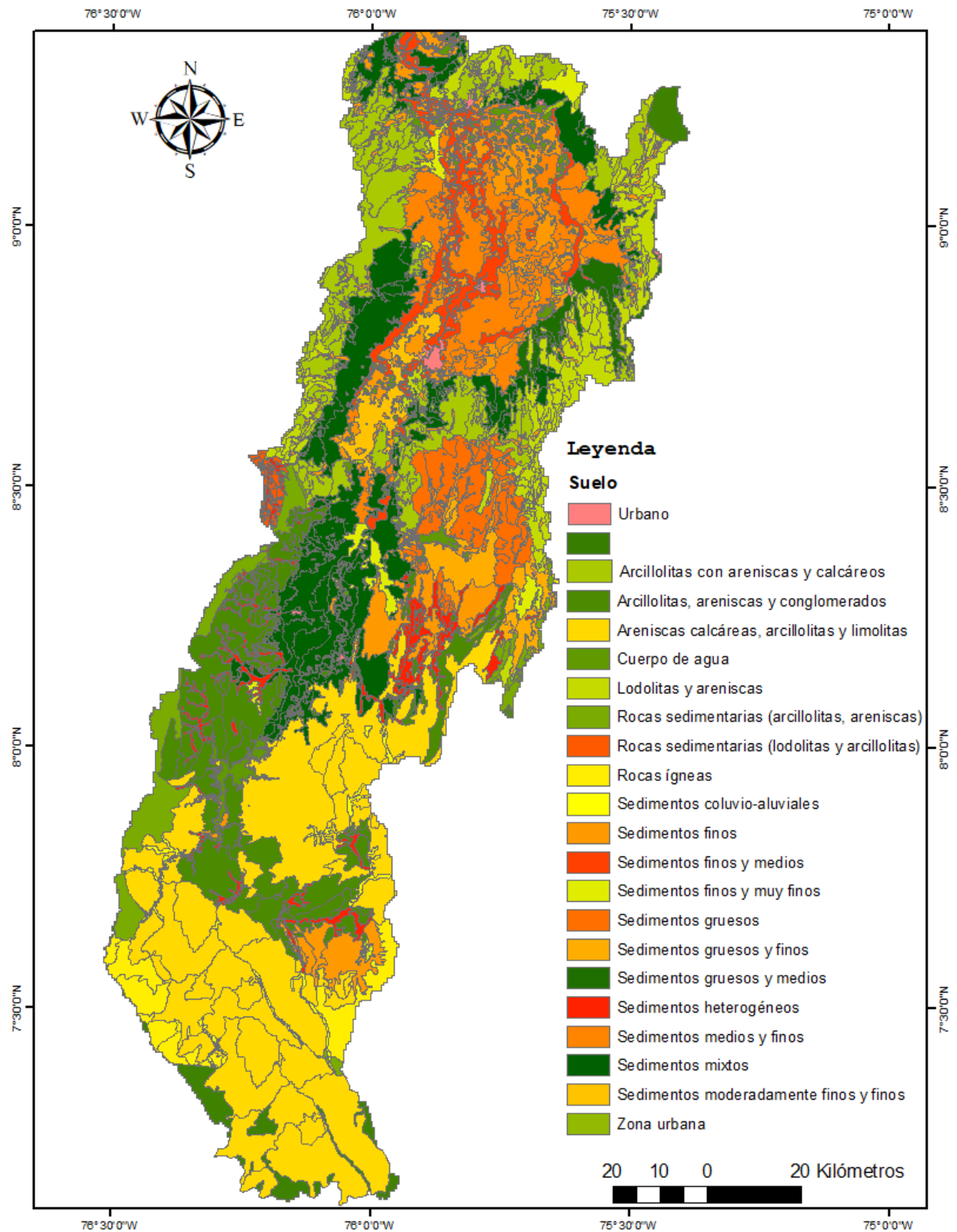


Figura 17. Mapa de tipo del suelo de la cuenca del río Sinú

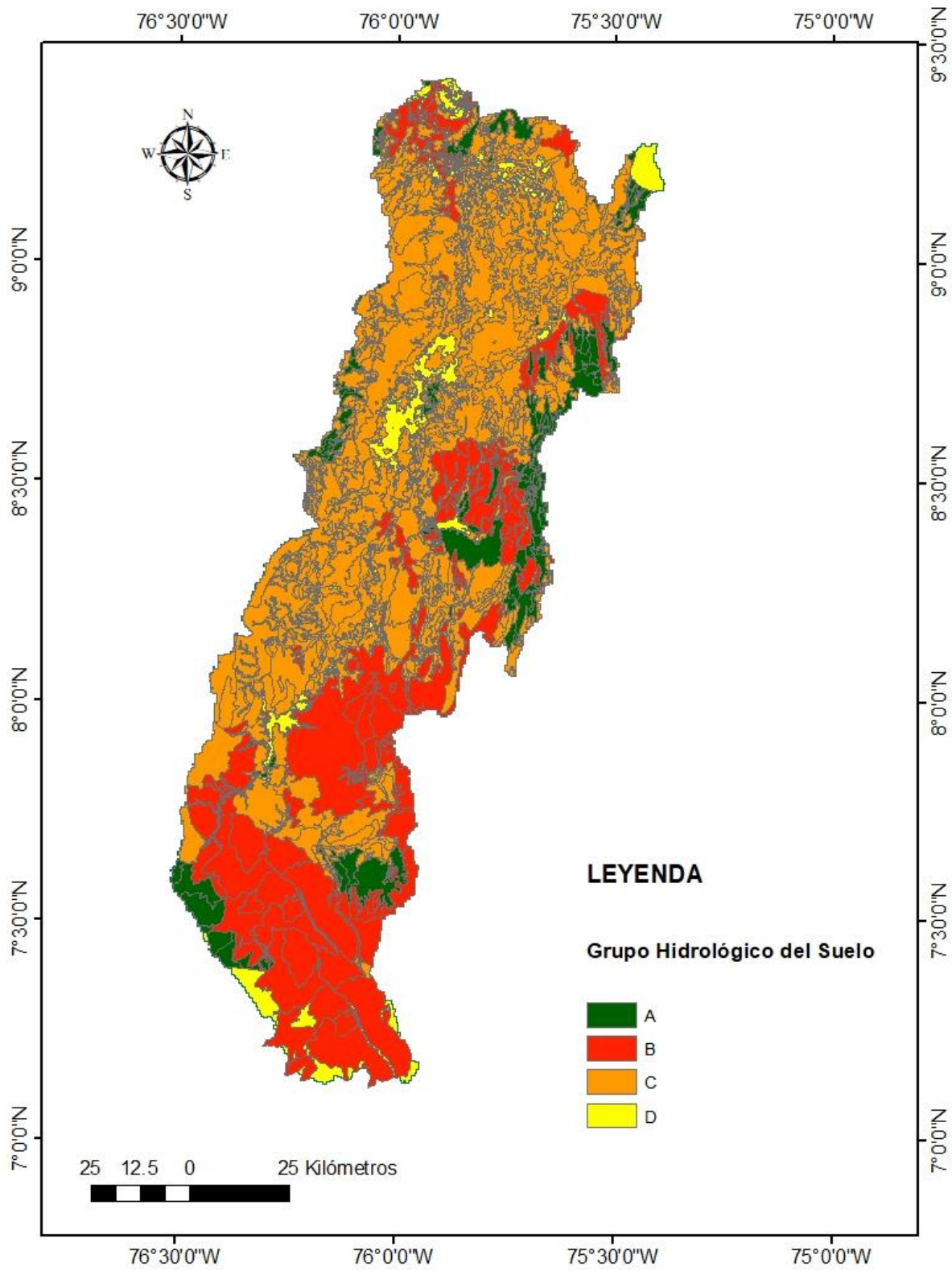


Figura 18. Mapa del grupo hidrológico del suelo de la cuenca del río Sinú

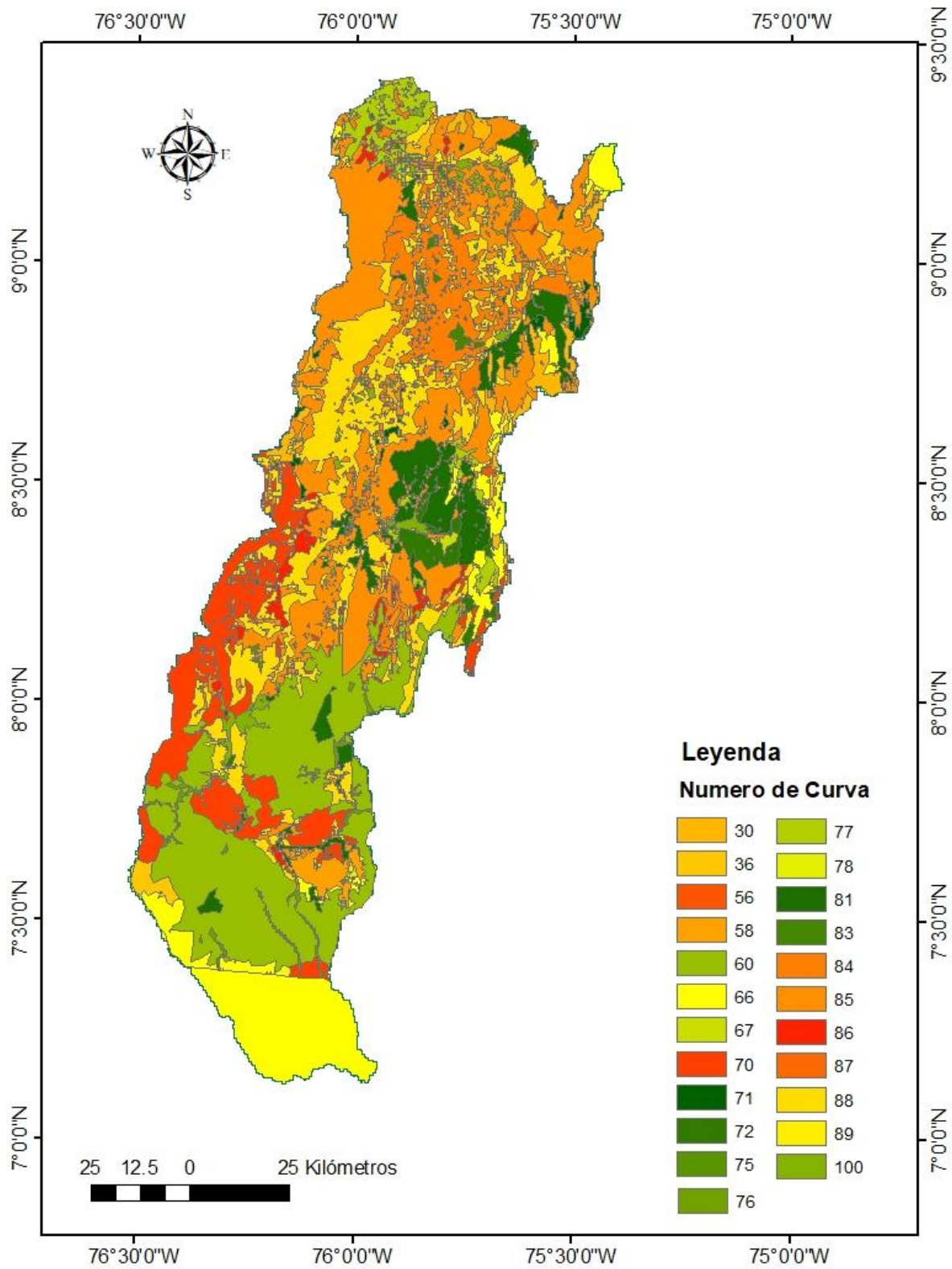


Figura 19. Número de Curva de la cuenca del río Sinú

Tabla 19. Valores de área, pendiente promedio, precipitación, CN, S, Ia y Q para cada subcuenca de la cuenca del río Sinú

No Cuenca	Área (Km ²)	Pendiente Promedio (%)	CN de la cuenca	Precipitación total anual promedio (mm)	Precipitación máxima diaria (mm)	S (mm)	Ia (mm)	Pe (mm)
1	84.2	26.18	60	5273	235	72.61	14.52	165.86
2	142.0	27.09	60	5273	235	72.61	14.52	165.86
3	41.6	26.33	60	5273	235	72.61	14.52	165.86
4	387.5	5.52	62	1109	205	31.42	13.57	164.44
5	0.5	0.24	78	1435	150	70.06	6.28	96.62
6	418.9	4.59	61	1109	205	72.61	14.01	138.38
7	65.9	30.26	60	1853	110	72.61	14.52	54.24
8	39.5	35.09	60	1853	110	72.61	14.52	54.24
9	27.7	27.03	60	1853	110	72.61	14.52	54.24
10	65.8	16.20	60	1853	110	72.61	14.52	54.24
11	120.6	19.65	60	2413	160	72.61	14.52	97.04
12	105.1	9.20	60	1845	169	73.26	14.65	104.67
13	136.3	12.30	61	1597	150	69.50	13.90	90.09
14	179.3	9.74	61	1109	205	72.61	13.97	138.42
15	73.8	29.85	60	3128	106	72.61	14.52	51.00
16	55.7	20.31	60	4901	207	72.31	14.46	139.97
17	55.9	18.76	60	5273	235	73.05	14.61	165.53
18	78.2	18.20	60	5273	235	72.31	14.46	166.08
19	81.2	6.30	73	1753	205	40.88	8.18	162.97
20	261.1	18.76	61	5273	235	71.28	14.26	166.86
21	484.6	15.50	60	4664	215	73.21	14.64	146.74
22	274.5	13.60	64	1736	172	62.27	12.45	114.76
23	315.7	12.20	61	4530	235	71.90	14.38	166.39
24	159.7	11.18	62	1109	205	68.97	13.79	140.52
25	141.4	8.90	73	1941	113	41.53	8.31	74.96
26	301.0	6.30	77	2043	160	33.86	6.77	125.50
27	92.2	11.90	63	2039	160	66.65	12.93	101.21
28	202.1	11.14	64	1109	205	62.97	12.59	144.97
29	187.1	6.60	67	1789	119	53.81	10.76	72.30
30	135.6	3.00	78	1794	144	30.80	6.16	112.67
31	102.4	4.10	72	1789	150	43.64	8.73	107.93
32	78.9	6.90	72	1786	150	43.92	8.78	107.72
33	124.2	2.00	78	1382	162	30.49	6.10	130.40
34	814.9	5.00	78	1577	136	30.82	6.16	104.93
35	98.4	1.90	78	1810	201	31.86	6.37	167.25
36	153.2	0.90	77	1604	159	32.33	6.47	125.85
37	956.1	1.20	80	1510	121	26.76	5.35	93.92
38	63.2	2.40	78	1303	170	30.73	6.15	137.97

No Cuenca	Área (Km ²)	Pendiente Promedio (%)	CN de la cuenca	Precipitación total anual promedio (mm)	Precipitación máxima diaria S (mm)	Ia (mm)	Pe (mm)
39	68.3	3.14	71	1479	130	45.61	87.76
40	83.5	3.88	70	1479	130	42.21	89.48
41	277.4	6.70	72	1779	142	42.41	101.33
42	62.4	3.40	75	1334	146	35.93	110.27
43	72.4	2.20	80	1378	124	28.26	95.54
44	77.8	3.30	81	1358	122	26.32	95.26
45	346.9	0.90	76	1529	136	34.39	101.96
47	24.6	28.10	86	1259	137	17.49	118.04
48	70.4	2.70	79	1400	138	28.67	108.71
49	15.1	0.13	87	1389	138	16.63	119.87
50	120.4	2.38	84	1292	138	21.48	115.19
51	125.3	4.51	79	1418	138	30.04	107.52
52	84.0	0.50	85	1330	120	18.74	100.11
53	35.2	2.43	86	1254	142	18.73	121.87
54	42.7	1.49	87	1253	141	16.95	122.52
55	82.7	0.51	87	1215	135	16.47	117.07
56	107.4	0.62	87	1354	138	16.62	119.89
57	5.6	0.41	88	1203	120	15.11	103.60
58	141.7	1.35	85	1320	173	18.91	152.21
59	916.5	0.47	85	1349	109	20.12	88.10
61	176.4	1.25	85	1291	125	19.65	104.16
62	89.1	2.05	81	1498	162	25.26	135.19
63	221.4	1.13	85	1498	121	19.41	100.47
64	506.1	1.65	82	1065	112	24.32	87.32
65	1142.8	1.10	81	1414	80	26.53	55.11
66	66.7	0.99	86	1445	123	18.37	103.41
67	76.9	0.43	86	1334	138	18.42	118.12
68	164.7	1.19	85	1233	103	19.40	82.90
69	149.1	1.23	86	1358	103	18.55	83.66
70	110.6	0.18	86	1381	120	17.87	100.94
71	63.0	1.00	85	1424	124	20.25	102.62
72	96.7	1.10	84	1425	124	20.26	102.62
73	64.9	0.99	85	1396	124	20.21	102.66
74	174.2	0.23	85	1311	109	20.09	88.12
75	54.0	1.23	84	1354	110	20.43	88.78
76	173.1	1.07	83	1330	126	22.73	102.30
77	162.0	0.82	82	1296	139	23.62	114.19
78	146.8	2.07	68	1329	177	51.08	127.68
79	233.2	0.52	84	1334	121	21.43	98.60
80	56.9	1.36	74	1288	135	38.15	98.01

No Cuenca	Área (Km ²)	Pendiente Promedio (%)	CN de la cuenca	Precipitación total anual promedio (mm)	Precipitación máxima diaria (mm)	S (mm)	Ia (mm)	Pe (mm)
81	89.7	1.56	82	1273	120	24.87	4.97	94.58
82	87.5	0.24	78	1395	150	31.42	6.28	117.94

Los valores del número de curva para cuenca del río Sinú se pueden apreciar en la Figura 19, y el número de curva ponderado para cada subcuenca se encuentra en la Tabla 19. Donde los valores de CN mayores a 80, pertenecen al 40% de las subcuencas y los valores de CN entre 60 y 80, corresponden al 60% restante. Los resultados indican que la litología subyacente tiene una permeabilidad de moderada a baja en la mayoría de los lugares, con una cobertura de vegetación regular en algunas zonas, lo cual genera una escorrentía de moderadamente baja a alta, con una tasa de infiltración media. EL CN ponderado de toda el área de estudio (cuenca del río Sinú), es de 75, lo que enfatiza lo anteriormente mencionado.

Con relación a las pendientes, se clasificaron en 3 clases, alta >20%; media entre 10 y 20; y baja <10%. Las pendientes altas se localizan en la parte alta de la cuenca y las pendientes bajas especialmente en la cuenca baja y algunos sectores de la media.

Otro aspecto compilado en la Tabla 19 es la precipitación total anual promedio, donde los valores mayores se observan en la cuenca alta (en la Figura 6, se observa la división de la cuenca en alta, media y baja). La cuenca alta presenta valores de precipitación que varían desde los 3000 mm a los 5300 mm, y estos valores disminuyen hacia las zonas de la cuenca baja y media con valores que se encuentran alrededor de los 1065 mm hasta los 2000 mm. Por otro lado también, se tienen los valores de la precipitación máxima diaria en cada una de las subcuencas, la cual varía desde los 80 mm a los 235 mm, dándose este último valor

en la cuenca alta del río Sinú, en cercanías a su nacimiento que es donde se presenta la mayor cantidad de precipitación.

En la Tabla 19, se encuentran los valores de la retención potencial máxima (S), y la esorrentía en cada subcuenca. En el caso de S , éste varía desde 73.26 hasta 15.11, siendo mayor en esencialmente en la cuenca alta y va disminuyendo hacia la parte media y baja de la cuenca. Esto quiere decir que la cuenca alta es donde se localiza la zona con mayor capacidad para la retención del agua lluvia en la cuenca de estudio.

Posteriormente, se encuentra la profundidad de exceso de precipitación o esorrentía directa anual, P_e , que ha sido calculada a partir de la precipitación máxima diaria. Se estimaron 5 rangos de esorrentía: muy baja (<51.00 mm), baja (74.97-104.93 mm), media (104.94-125.85 mm), alta (125.86-146.74 mm) y muy alta (>146.75 mm). La distribución de la esorrentía por cuencas se muestra en la Figura 20.

La esorrentía en la cuenca amenaza las zonas que pueden convertirse en áreas inundables, lo cual hace que se puedan ocasionar daños catastróficos a la infraestructura tanto pública como privada, así como afectaciones a todos los seres vivos con las consecuentes problemáticas tales como muertes que generen problemas en las personas y en la seguridad alimentaria. Este tipo de afectaciones se ha presentado esencialmente en la cuenca media y baja, esto se debe en gran medida a la degradación presente en las zonas aledañas al río, tales como la pérdida del bosque de galería y como consecuencia, la erosión en la ribera del río y sus tributarios.

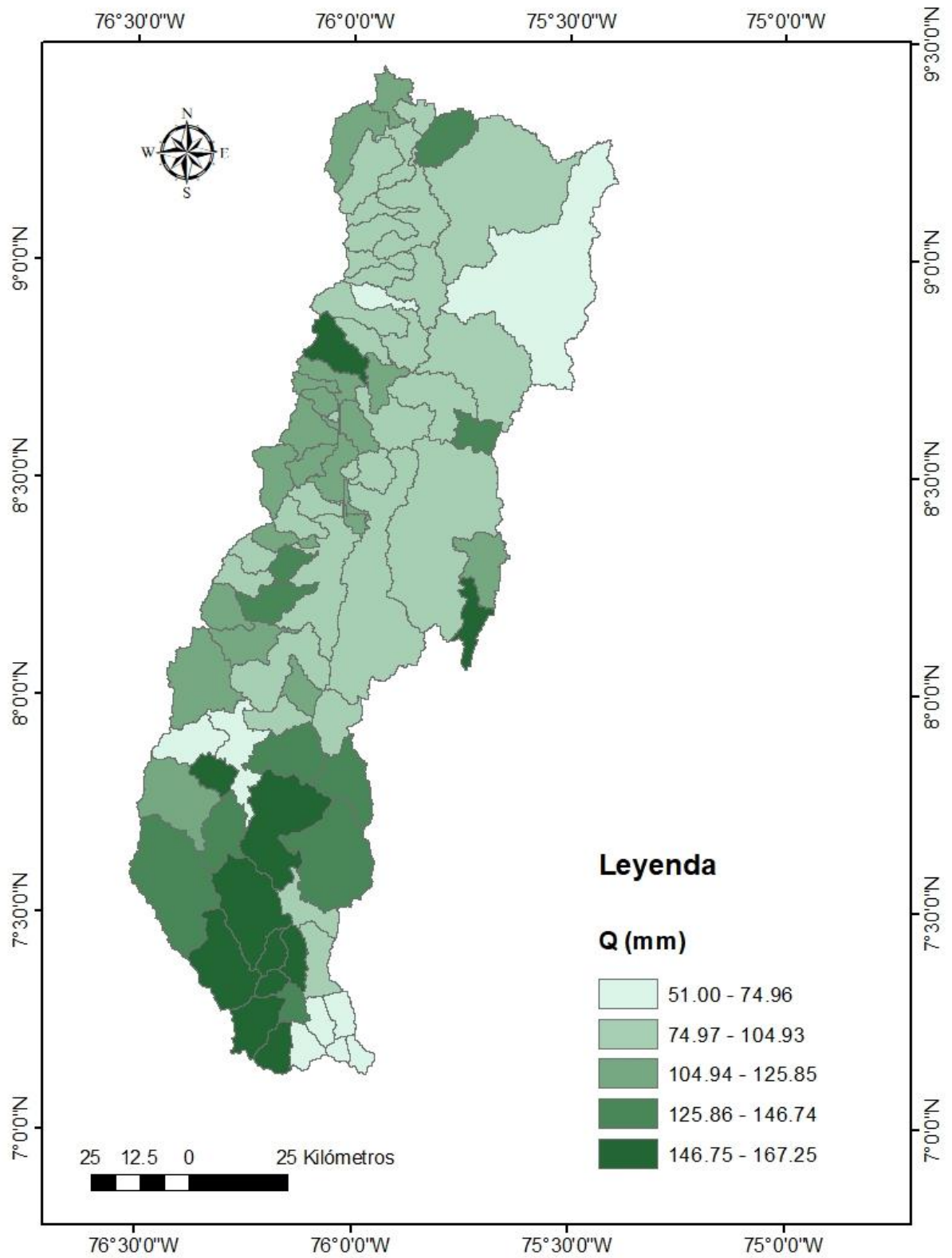


Figura 20. Mapa de valores de Q (mm) para cada subcuencia

8.4 Conclusiones

El cálculo del escurrimiento directo es fundamental para ayudar a la toma de decisiones en las zonas urbanas y rurales de una cuenca, ya que permite establecer acciones que, encaminadas hacia la planificación y organización de las cuencas en el marco de la gestión integral del recurso hídrico, por lo tanto, se convierte en un insumo esencial para desarrollar el modelo hidrológico de una cuenca, en especial en el balance hidrológico de la misma.

9 Modelo hidrológico

9.1 Introducción

En la evaluación para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), la modelación hidrológica juega un papel fundamental, ya que permite determinar la cantidad del recurso disponible en una cuenca, permitiendo establecer la posibilidad de satisfacer las demandas consuntivas y no consuntivas del recurso hídrico en una zona de estudio.

De igual manera, el recurso hídrico se ve amenazado en su disponibilidad debido al aumento generalizado de la población, la variabilidad climática, la acción antrópica en las cuencas tales como la deforestación, contaminación del recurso, entre otros factores, hacen que exista la necesidad de establecer políticas y acciones encaminadas a la preservación, conservación y administración del recurso hídrico [432].

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante destacar la importancia de la gobernanza del agua como pilar fundamental de la GIRH, donde se involucran 3 ejes principales como son el agua como fuente de vida, la relación agua-ciudad y por último la relación agua-productividad [433]. A pesar de lo cual, llegar a un consenso sobre la definición de la GIRH y de sus ejes principales no ha sido fácil, sin embargo, uno de los mayores desafíos es la modelación hidrológica que como se mencionó anteriormente, es importante y fundamental dentro de la GIRH, ya que se mejora el conocimiento del proceso hidrológico a evaluar; sistematiza e incrementa la información ambiental de la cuenca; puede simular condiciones a corto, mediano y largo plazo; permite evaluar escenarios involucrados en la gestión y ayudar a disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones.

Es por esto que la comunidad científica ha desarrollado diversas herramientas que permiten la modelación hidrológica de una cuenca y por lo tanto, los evaluadores y administradores del recurso hídrico se ven en la dificultad de seleccionar el modelo apropiado en su estudio [434]. Sin embargo, hay diversas recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar el modelo adecuado para el análisis a desarrollar, entre los cuales se encuentra identificar el propósito de la modelación, las variables de entrada disponibles así como la documentación requerida para la modelación y la facilidad de acceso a esta [435].

En el presente trabajo se seleccionó la herramienta WEAP ya que se ajusta al objetivo planteado en el estudio, el cual consiste en realizar la modelación hidrológica de la cuenca del río Sinú localizado en Córdoba, Colombia con el fin de estimar la disponibilidad del recurso hídricos teniendo en cuenta la demanda en los distintos sectores que se localizan dentro de la cuenca.

9.2 Materiales y métodos

9.2.1 Área de estudio

La cuenca del río Sinú se encuentra ubicada en la parte Noroeste de Colombia, entre los $9^{\circ}30'N$ a $7^{\circ}05'N$ y los $76^{\circ}35'O$ a $75^{\circ}15'O$ (Figura 6). Tiene un área de 13972 km^2 , en jurisdicción de los departamentos de Córdoba, Sucre y Antioquia. Según la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), está dividida de acuerdo a sus características físicas y bióticas en 3 zonas que son: Alto, Medio y Bajo Sinú [377]. Los principales centros poblados de la cuenca son: Tierralta y Valencia en la cuenca Alta, Montería (capital del departamento de Córdoba) en la Media y Lorica en el Bajo Sinú. Además, en la cuenca alta también se encuentra la central hidroeléctrica URRÁ y el Parque Nacional Natural Paramillo [394].

La cuenca del río Sinú es fundamental para la economía del departamento de Córdoba, ya que las principales actividades productivas dependen de sus aguas. En términos generales, el río y sus tributarios abastecen a los acueductos de 17 cabeceras municipales: Tierralta, Valencia, Montería (la capital del departamento), Cereté, Ciénaga de Oro, Sahagún, San Carlos, San Pelayo, Cotorra, Loricá, San Antero, Chimá, Momil, San Andrés de Sotavento, Tuchín, Purísima y San Bernardo del Viento. A estos municipios, para el año 2020 se le suman otros tres municipios más, que hacen parte del acueducto costanero y se pondrá en funcionamiento próximamente: Los Córdoba, Canalete y Puerto Escondido. En este sentido, se abastecerían directamente del río y sus afluentes 20 municipios de los 30 que conforman el departamento de Córdoba. En cuanto a las actividades económicas, esencialmente están relacionadas con cultivos de maíz, palma de aceite, arroz, entre otros a menor escala. Además, la ganadería ocupa un renglón importante, ya que el departamento es exportador de carne en pie y en canal del ganado vacuno esencialmente. A lo anterior, como se mencionó anteriormente, se suma la presencia de la hidroeléctrica URRÁ S.A. ESP en la parte alta de la cuenca, quien actualmente regula los caudales que se proveen hacia la parte media y baja del río.

En la zona de estudio se ha presentado una modificación en los caudales debida a la variabilidad climática, las acciones antrópicas que generan impactos significativos en los regímenes de caudales (en especial las obras hidráulicas como la hidroeléctrica) y la dinámica que se presenta en las zonas inundables.

Teniendo en cuenta, la importancia del recurso hídrico en el departamento, en especial la que provee la cuenca del río Sinú, se establecen las entradas y salidas de agua que se pueden dar en

la cuenca, por lo tanto, el análisis más importante que se debe realizar parte de la ecuación del balance hídrico:

$$P \pm E \pm R \pm \frac{I}{D} \pm \Delta S = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde P es la precipitación, E la evaporación, R la escorrentía, $\frac{I}{D}$ infiltración o drenaje profundo y ΔS el almacenamiento. Los signos positivos y negativos varían desde la perspectiva bajo la cual se desarrolle el balance hídrico y para lo que se necesite determinar. En la mayoría de los casos se establece para el cálculo del almacenamiento, ya que se busca solucionar los problemas de abastecimiento de aguas para los diferentes usos.

9.2.2 Datos hidroclimatológicos

Para realizar el desarrollo del modelo en WEAP es necesario conocer las características de la oferta y demanda de agua que hacen parte del balance hídrico. Dentro de este balance los componentes que hacen parte necesaria para el modelado son la evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial y flujo base. Por lo tanto, se requiere de datos hidro-climatológicos y cobertura vegetal.

Los datos hidro-climatológicos necesarios incluyen precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento. Adicionalmente, se requieren los caudales de las estaciones de medición para comparar el modelo y realizar las calibraciones del mismo. De igual manera, se debe identificar la infraestructura física existente para el aprovechamiento y control del recurso hídrico en la cuenca.

Los datos hidro-climatológicos fueron obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La información tiene resolución diaria con 75 estaciones que tienen

un rango variable desde 1968 hasta 2019, tal como se observa en la Tabla 20. Para la temperatura máxima y mínima 19 estaciones, de las cuales se muestra el promedio mensual multianual en la Tabla 21 y Tabla 22 respectivamente.

Tabla 20. Porcentaje de vacíos de la precipitación encontrado en las estaciones climatológicas de la cuenca del río Sinú, Colombia

No.	Estación	Código	Años	No datos	Datos Faltantes	Total datos	Porcentaje de vacíos
1	Lorica	13085020	41	14764	576	15340	3.75
2	Galán	13055030	35	10796	1988	12784	15.55
3	Lorica	13080020	14	2130	3349	5479	61.12
4	Chimá	13075010	46	15410	1852	17262	10.73
5	Carrillo	13070180	40	13817	428	14245	3.00
6	Sta Cruz Hda	13050020	46	15195	1726	16921	10.20
7	Mocarí	13070150	28	9511	1081	10592	10.21
8	Turipaná	13075030	59	16167	5018	21185	23.69
9	Apto Los Garzones	13085040	43	14210	1952	16162	12.08
10	Sabana Nueva	13070030	29	9302	1655	10957	15.10
11	Trapiche El	13070250	23	8720	1507	10227	14.74
12	Cereté	13070380	50	16480	1902	18382	10.35
13	Limón El	13070010	55	16522	2104	18626	11.30
14	Univ de Córdoba	13075050	40	11358	2156	13514	15.95
15	Sta Lucia	13050010	54	17214	1779	18993	9.37
16	Doctrina La	13085010	51	16631	2117	18748	11.29
17	California	13070130	28	9728	499	10227	4.88
18	Salado El	13075020	55	17202	1546	18748	8.25
19	Maracayo	13065020	40	13133	1597	14730	10.84
20	Coroza 1	13070140	28	10052	905	10957	8.26
21	Cotorra	13070210	23	8220	546	8766	6.23
22	Cerro Bahía	13070240	28	8287	2670	10957	24.37
23	Loma Verde	13050030	54	17681	701	18382	3.81
24	San Bernardo del V.	13085030	55	16527	1370	17897	7.65
25	Momil	13070020	46	16333	833	17166	4.85
26	Rabolargo	13070040	56	17626	756	18382	4.11
27	Villa Marcela	13070440	31	10300	1388	11688	11.88
28	Buenos Aires	13060020	54	18093	807	18900	4.27
29	Boca de la Ceiba	13070070	49	17313	704	18017	3.91
30	Pezval	13040030	29	9832	1124	10956	10.26
31	Carrizal	13070110	54	17885	863	18748	4.60
32	Buenos Aires 1	13070170	41	14240	854	15094	5.66
33	Callemar	13070120	56	17350	1032	18382	5.61
34	Sta Rosa	13070100	56	17312	1070	18382	5.82

No.	Estación	Código	Años	No datos	Datos Faltantes	Total datos	Porcentaje de vacíos
35	San Carlos	13070090	55	15851	2531	18382	13.77
36	Aguas Mohosas	13070450	51	11348	1039	12387	8.39
37	Apto Berastegui	13075040	33	8396	2927	11323	25.85
38	Berastegui	13070160	24	8485	646	9131	7.07
39	Caramelo	13060030	54	17766	861	18627	4.62
40	Centro Alegre	25015010	46	14346	2698	17044	15.83
41	Cga de Oro	13070060	61	18129	4332	22461	19.29
42	Chinú	25020730	46	16370	917	17287	5.30
43	Cielo El	13020020	29	7888	3069	10957	28.01
44	Colomboy	25025170	46	14882	2416	17298	13.97
45	Corocito	13070200	29	8362	404	8766	4.61
46	Coroza 2	13070190	45	14646	1910	16556	11.54
47	Cristo Rey	12045020	46	14548	1888	16436	11.49
48	Despensa La	13020010	46	7387	1744	9131	19.10
49	Esmeralda La	13025020	18	234	6706	6940	96.63
50	Flor del Sinú	13070220	28	8665	466	9131	5.10
51	Granja La	26220100	41	16138	206	16344	1.26
52	Horizonte	13070230	28	9485	742	10227	7.26
53	Jaraguay	13045010	22	5071	3330	8401	39.64
54	Jobo El Tablón	25020720	44	14748	1688	16436	10.27
55	La pastora	13090230	27	9196	1004	10200	9.84
56	Lamas 3	13070260	24	8332	799	9131	8.75
57	Montería	13070270	30	9168	2155	11323	19.03
58	Palma de vino	13070340	26	8016	1846	9862	18.72
59	Pica pica	25010080	46	15396	1678	17074	9.83
60	Planeta Rica	25025190	46	13881	2286	16167	14.14
61	Pto Nuevo	13035010	26	6351	3510	9861	35.59
62	Quimarí	13040010	29	9139	2183	11322	19.28
63	Sabanal	13070280	41	14420	675	15095	4.47
64	Sahagún	25020140	61	22113	642	22755	2.82
65	Sajonia Hda	25021450	37	11161	2719	13880	19.59
66	San Anterito	13060010	46	16003	1163	17166	6.78
67	San Antonio	13080010	54	17829	553	18382	3.01
68	San Francisco del Rayo	25010100	46	15578	401	15979	2.51
69	Siglo El	13070080	34	5776	433	6209	6.97
70	Sincelejo	25020130	52	17302	960	18262	5.26
71	Tampa	13070290	41	11412	2102	13514	15.55
72	Tierralta	13030010	60	17722	4632	22354	20.72
73	Trementino	25021210	46	16171	903	17074	5.29
74	Venecia	13070430	32	10518	1290	11808	10.92
75	Villa Arteaga	12015010	47	11511	5899	17410	33.88

Tabla 21. Promedio mensual multianual de la temperatura máxima

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	31.5	32.1	32.7	32.6	31.9	31.3	31.3	31.4	31.3	31.1	31.1	30.9
Planeta Rica	33.6	34.5	34.7	33.6	32.3	32.2	32.3	32.3	32.0	31.9	31.9	32.4
Colomboy	32.2	32.1	32.2	32.2	32.3	32.3	32.3	32.3	32.2	32.2	32.2	32.2
Centro Alegre	33.9	34.2	34.2	33.6	33.1	33.2	33.1	33.1	33.0	32.8	32.7	33.1
Villa Arteaga	30.3	30.6	30.4	30.6	30.2	29.9	30.0	30.0	30.2	30.1	29.7	29.6
Cristo Rey	31.0	31.0	31.0	31.1	31.0	31.1	31.1	31.1	30.8	30.7	30.8	31.0
Jaraguay	31.4	33.2	33.4	34.2	33.0	32.9	32.9	33.8	33.0	33.3	33.7	33.5
San Bernardo del V	31.2	31.3	31.3	31.4	31.4	31.5	31.5	31.3	31.1	31.0	31.0	31.3
Lorica	33.3	33.8	34.0	33.6	32.3	32.5	32.6	32.5	31.9	31.4	31.7	32.5
La Doctrina	32.2	32.3	32.4	32.4	31.9	32.1	32.2	31.9	31.4	31.1	31.5	32.0
Chimá	33.0	33.6	33.8	33.6	32.7	32.4	32.7	32.4	31.9	31.8	31.8	32.2
Univ Córdoba	33.1	33.6	33.7	33.3	32.3	32.7	32.3	32.4	32.5	32.0	31.9	32.1
Galán	33.7	34.4	34.4	34.2	33.0	33.1	33.2	33.3	32.7	32.7	32.7	33.2
El Salado	34.4	34.9	34.8	34.2	32.7	32.7	33.0	32.8	32.5	32.4	32.7	33.4
Turipaná	33.4	34.0	34.3	33.6	32.6	32.3	32.6	32.6	32.0	31.9	32.0	32.6
Maracayo	33.8	34.2	34.1	33.9	33.4	33.6	33.5	33.3	33.0	33.2	33.1	33.5
Apto Los Garzones	33.8	34.3	34.2	33.9	32.9	33.0	33.2	33.0	32.6	32.3	32.5	33.1
Universidad de Sucre	33.4	34.1	33.9	33.1	31.8	31.8	32.2	32.0	31.4	30.9	31.2	32.2
El Palmar	30.8	31.5	31.2	31.5	29.6	33.1	31.0	29.6	30.1	29.7	29.7	29.7

Tabla 22. Promedio mensual multianual de la temperatura mínima

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	22.4	22.7	22.8	23.6	23.5	23.0	22.7	22.7	22.6	22.5	22.4	22.7
Planeta Rica	22.9	23.0	23.6	23.8	23.7	23.4	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.0
Colomboy	23.4	23.4	23.4	23.4	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.4	23.5
Centro Alegre	22.7	23.2	22.9	22.9	22.8	22.8	22.6	22.7	22.6	22.6	22.7	22.8
Villa Arteaga	22.5	22.6	22.8	22.7	22.7	22.4	22.4	22.3	22.5	22.3	22.5	22.5
Cristo Rey	27.7	28.0	28.1	30.3	28.0	27.9	27.8	27.7	27.4	27.3	27.4	27.6
Jaraguay	19.9	21.4	21.4	22.7	22.1	21.7	22.0	21.6	22.5	22.3	21.1	21.4

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
San Bernardo del V	22.8	22.8	22.9	22.9	22.7	22.8	22.4	22.5	22.5	22.5	22.6	22.6
Lorica	23.2	23.6	24.1	24.5	24.2	23.9	23.6	23.6	23.4	23.5	23.8	23.6
La Doctrina	23.7	24.0	24.6	25.0	24.9	24.5	24.3	24.2	24.0	24.2	24.2	24.0
Chimá	22.4	22.7	22.9	23.1	23.2	23.0	22.9	22.8	22.6	22.8	22.8	22.7
Univ Córdoba	22.8	23.1	23.7	24.2	24.0	23.9	23.6	23.5	23.3	23.4	23.5	23.2
Galán	22.1	22.3	22.7	23.3	23.4	23.3	23.2	23.2	23.0	23.0	22.8	22.6
El Salado	23.0	23.4	24.0	24.4	24.1	23.8	23.5	23.5	23.3	23.5	23.6	23.4
Turipaná	22.5	22.7	23.4	24.0	23.9	23.7	23.7	23.5	23.4	23.6	23.3	22.9
Maracayo	22.4	22.5	22.4	22.5	22.7	22.5	22.3	22.2	22.3	22.2	22.4	22.6
Apto Los Garzones	22.6	22.8	23.1	23.6	23.7	23.5	23.6	23.4	23.3	23.1	23.1	23.2
Universidad de Sucre	22.5	22.7	23.2	23.5	23.6	23.4	23.1	22.8	23.0	23.1	23.2	22.7
El Palmar	21.3	21.5	21.4	21.6	20.9	21.0	20.1	20.5	20.5	21.1	21.1	21.7

9.2.3 Evapotranspiración de referencia

En el caso de la evapotranspiración de referencia, se realizó el cálculo teniendo en cuenta la metodología de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), descrita en su documento No 56 [436]. Por lo tanto, la ecuación utilizada para realizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia se muestra en la ecuación 16

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²-día)

G : flujo del calor de suelo ((MJ/m²-día)

T : temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (°C)

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ : pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T (kPa/°C)

γ : constante psicrométrica (kPa/°C)

Para el cálculo de la constante psicrométrica γ , se calcula primero la presión P , con la Ec. 17, y posteriormente, γ con la Ec. 18:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 (\text{altitud})}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde P es la presión atmosférica (kPa) y *altitud* es la altitud en metros sobre el nivel del mar a la cual se encuentra instalada la estación hidrométrica.

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

γ : constante psicrométrica (kPa/°C)

C_p : calor específico, (MJ/Kg-°C)

P : presión atmosférica (kPa)

ε : cociente entre los pesos moleculares del vapor de agua/aire seco (0.622)

λ : calor latente de vaporización (MJ/Kg)

El cálculo de Δ se realiza con la Ec. 19:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.618 \times \exp \left(\frac{12.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde,

T : temperatura del aire (°C)

$\exp[...]$: 2.7183 (base de logaritmo natural) elevado a la potencia [...]

La presión real de vapor e_a , derivada de la temperatura de rocío se calcula con la Ec. 20:

$$e_a = e^0(T_{\text{rocío}}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\text{rocío}}}{T_{\text{rocío}} + 237.3} \right] \quad \text{Ec. 20}$$

Donde $e^0(T_{\text{rocío}})$ es la presión de saturación de vapor a la temperatura del punto de rocío (kPa).

En cuanto al déficit de vapor, para su cálculo se requiere determinar la presión de saturación de vapor e_s , mediante la Ec. 21:

$$e_s = \left[\frac{e^0(T_{\min}) + e^0(T_{\max})}{2} \right] \quad \text{Ec. 21}$$

Con:

$$e^0(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right] \text{ y } e^0(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right] \quad \text{Ec. 22}$$

Donde $e^0(T_{\min})$ y $e^0(T_{\max})$ son la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima T_{\min} y máxima T_{\max} (kPa).

La radiación neta en la superficie del cultivo, Ec. 23

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde, R_{ns} es la radiación neta solar o de onda corta (MJ/m²-día) y R_{nl} es la radiación de onda larga (MJ/m²-día), las cuales se calcula con la Ec. 24 y la Ec. 30 respectivamente.

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

α : albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0.23 para el cultivo hipotético de referencia (adimensional)

R_s : radiación solar entrante (MJ/m²-día)

Y R_s es calculada con Ec. 25

$$R_s = K_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad \text{Ec. 25}$$

R_a : radiación extraterrestre (MJ/m²-día)

- T_{\max} : temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{\min} : temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- K_{Rs} : coeficiente de ajuste (0.16 a 0.19) ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$)

La radiación extraterrestre, R_a , es calculada a partir de la Ec. 26.

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega)] \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

G_{sc} : constante solar = 0.082 MJ/m²-min

d_r : distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ec. 27)

ω_s : ángulo de radiación a la puerta de sol (Ec. 29)

φ : latitud (rad) [*radianes*] = $\frac{\pi}{180}$ [*grados decimales*]

δ : declinación solar (rad) (Ec. 28)

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, d_r , y la declinación solar, δ , se calculan con la Ec. 27 y Ec. 28 respectivamente.

$$d_r = 1 + 0.0033 \cos\left(\frac{2\pi}{265} J\right) \quad \text{Ec. 27}$$

$$\delta = 0.409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{265} J - 1.39\right) \quad \text{Ec. 28}$$

Con J como el número del día en el año entre 1 (enero 1) y 365 (31 de diciembre).

Para el cálculo del ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s , se utiliza la Ec. 29.

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad \text{Ec. 29}$$

R_{nl} se calcula con la Ec. 30:

$$R_{nl} = \left(\frac{\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4}}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

σ : constante de Stefan-Boltzmann (4.903×10^9 MJ/K⁴-m²-día)

T_{\max, K^4} : Temperatura máxima absoluta durante el periodo de 24 horas (K=°C+273.16)

T_{\min, K^4} : Temperatura mínima absoluta durante el periodo de 24 horas (K=°C+273.16)

$\frac{R_s}{R_{so}}$: radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1.0)

R_s : radiación solar medida o calculada (MJ/m²-día) (Ec. 25)

R_{so} : radiación en un día despejado (MJ/m²-día) (Ec. 31)

R_{so} se calcula con la Ec. 31:

$$R_{so} = \left[0.75 + \frac{2(\text{altitud})}{100,000} \right] R_a \quad \text{Ec. 31}$$

T_{\max, K^4} y T_{\min, K^4} se calculan como sigue:

$$\sigma T_{\max, K^4} = \sigma (T_{\max} + 273.16)^4 \quad \text{y} \quad \sigma T_{\min, K^4} = \sigma (T_{\min} + 273.16)^4 \quad \text{Ec. 32}$$

9.2.4 Demanda poblacional y pecuaria

Como se mencionó anteriormente, el río Sinú abastecerá al año 2020 19 cabeceras municipales. Para determinar la cantidad de agua que cada uno de estos municipios toma del río, se utilizó el

volumen captado mensualmente y se dividió entre el número de habitantes (Ec. 33), ya que de igual manera se desea comparar la demanda poblacional con la recomendada en la norma colombiana, la resolución 0330 de 2017. El dato poblacional se obtiene del censo poblacional 2018 realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), entidad oficial encargada del tratamiento de los datos estadísticos en Colombia.

$$Demanda \left(\frac{m^3}{hab} \right) = \frac{Volumen \text{ captado } mes}{hab. \text{ del municipio}} \quad Ec. 33$$

En cuanto a la demanda pecuaria, se consideraron las especies que son utilizadas para el sustento, entre ellas los bovinos, porcinos, aves (gallinas y pollos), caprinos y bufalinos.

$$D_p = C_v + C_s + C_{ua} \quad Ec. 34$$

Donde:

D_p : demanda pecuaria

C_v : consumo vital en la fase de cría

C_s : consumo en sacrificio

C_{ua} : consumo en lugares de manejo y alojamiento animal

Cada uno de estos consumos varía para cada tipo de animal y los datos de las cantidades que hay por zona para poder establecer el valor de m3 consumido por animal, se obtuvo de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) realizada por el DANE en el año 2019. Esta encuesta es actualizada cada trimestre.

9.2.5 Información en WEAP

Antes de iniciar el proceso de desarrollar el modelo en WEAP, se debe definir el marco temporal del mismo, los límites

espaciales, que en este caso corresponde a la cuenca del río Sinú, y los componentes que harán parte del sistema, como es el caso de las captaciones de agua y de las estructuras existentes y que influyen en la corriente principal del río (hidroeléctrica Urrá).

Una vez establecidos los límites anteriores, se deben incluir las variables hidrológicas de la cuenca del río Sinú, como son las climatológicas e hidrológicas, cobertura del suelo y modelo digital de elevaciones (MDE). A partir del MDE se obtienen la red de drenaje y las subcuencas, así como el cauce principal.

Posteriormente, se debe caracterizar la demanda de agua, como lo son la demanda poblacional, la demanda pecuaria y la requerida para la generación de energía hidroeléctrica. Cada una de estas demandas deben asociarse a una fuente de agua, demanda anual, y cómo varía ésta en el año, así como su tasa de uso. Se debe realizar la caracterización de la infraestructura física, control o aprovechamiento, en donde se incluyan los datos técnicos que se encuentre en la zona de estudio.

Finalmente, se realiza la calibración del modelo con el registro histórico de los caudales del río. El modelo WEAP usa como indicadores de bondad de ajuste para el modelo el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) y la desviación relativa de caudales o Bias o sesgo. Se utilizó como función objetivo para la calibración ambos, ya que son los usados habitualmente en la calibración de modelos hidrológicos. Uno de los parámetros más sensibles es el número de curva que en WEAP viene asociado a la precipitación efectiva, por lo cual éste se varió hasta obtener el ajuste adecuado con los datos observados.

9.3 Resultados y discusión

En primer lugar, se seleccionaron los parámetros hidrológicos del modelo WEAP, para calibrarlos con 3 estaciones de la cuenca que tenían datos suficientes en el periodo analizado. Las estaciones escogidas corresponden a los datos diarios durante el periodo 2000 - 2018 ubicada en 3 diferentes zonas de la cuenca, en la alta, media y baja. En la cuenca alta se tiene la estación 13037040 - Carrizola automática, en la media 13067020 - Montería automática y en la baja 13077060 - Cotocá Abajo automática (ver Figura 24).

Para calibrar estas estaciones que se localizan a lo largo de la cuenca, se realizaron múltiples iteraciones y se obtuvo que se cumplieron con los dos parámetros analizados, tal como se observa en la Tabla 23. Teniendo en cuenta la literatura revisada y los valores de los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y del sesgo, se puede considerar que el resultado de la calibración fue satisfactorio [437,438]. En la figura 8, se puede observar la comparación de las series de datos observados (registrados en cada una de las estaciones hidrométricas) con los datos simulados tras la calibración del modelo.

Tabla 23. Valores de BIAS y NSE para las estaciones calibradas

Estación	BIAS (%)	NSE
13037040 - Carrizola automática	5.08	0.72
13067020 - Montería automática	-13.92	0.62
13077060 - Cotocá Abajo automática	-13.10	0.61

Con relación al BIAS los valores resultantes indican que el ajuste es bueno [437], valores positivos indican sobre estimación y negativos subestimación de caudales [439].

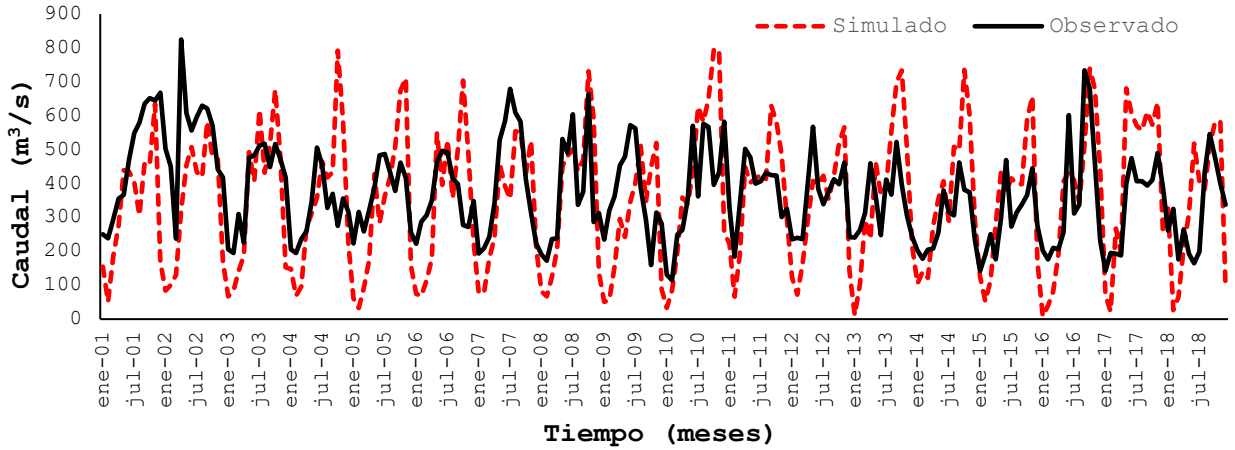


Figura 21. Caudales simulados y observados de la estación 13037040 - Carrizola automática

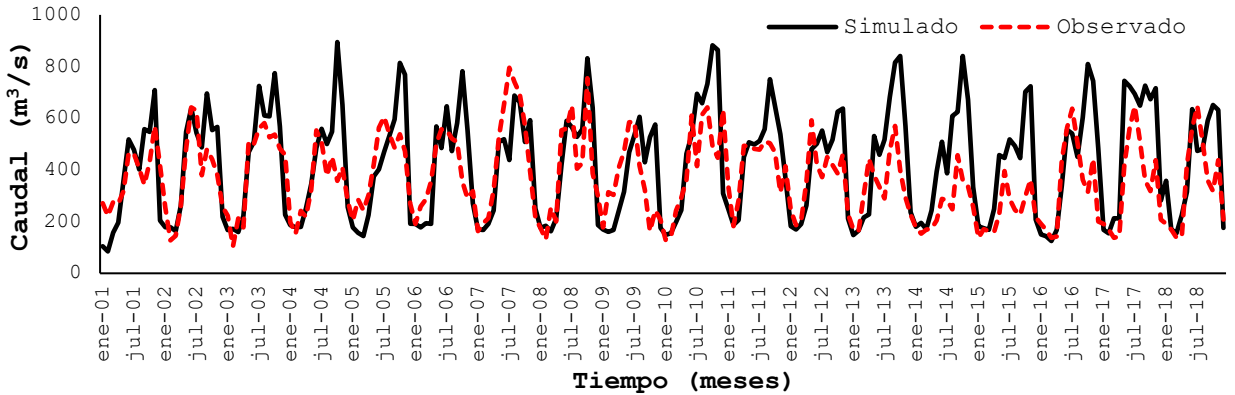


Figura 22. Caudales simulados y observados de la estación 13067020 - Montería automática

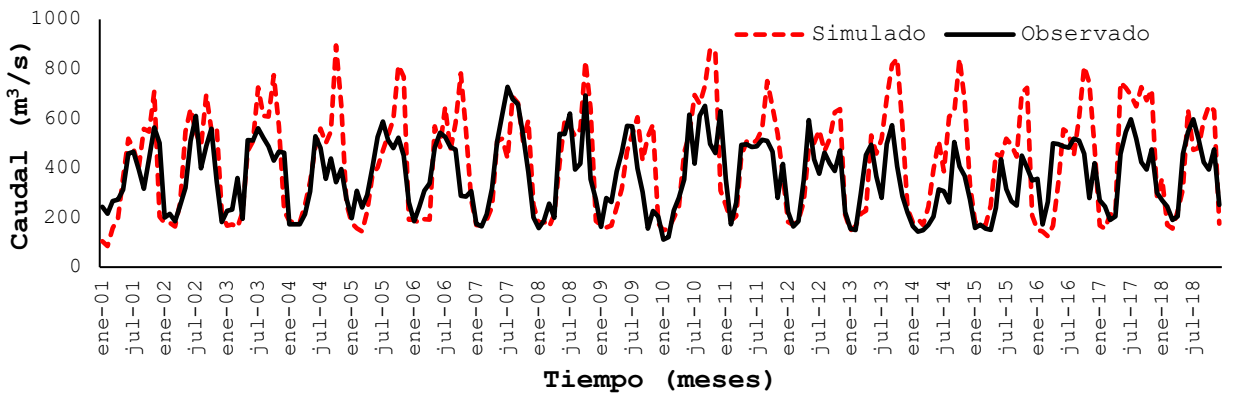


Figura 23. Caudales simulados y observados de la estación 13077060 - Cotocá Abajo automática

Para el cálculo de la evapotranspiración se siguieron los pasos indicados en la metodología. La información climatológica utilizada fueron la temperatura máxima (Tabla 21), temperatura mínima (Tabla 22), velocidad del viento (Tabla 26), punto de rocío (Tabla 27) y brillo solar (Tabla 28). Las estaciones utilizadas fueron 19 solamente, ya que eran las que se encontraban disponibles en la zona de estudio con los datos requeridos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

En la Tabla 24 se muestran los valores calculados de la presión y la constante psicrométrica. De igual manera se muestran los resultados de cada uno de los parámetros que se calcularon para determinar la ET_o , la cual es necesaria para el cálculo de los requerimientos de los cultivos existentes en la zona. En la Tabla 29: pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, Δ en kPa/°C; Tabla 30: Presión real de vapor, e_a en kPa; Tabla 31: presión de saturación de vapor, e_s (kPa); Tabla 32: radiación solar entrante, R_s en MJ/m²-día; Tabla 33: radiación en un día despejado, R_{so} en MJ/m²-día;

Tabla 34 radiación neta solar o de onda corta, R_{ns} en MJ/m²-día; Tabla 35: radiación de onda larga, R_{nl} , en MJ/m²-día; Tabla 36: radiación neta en la superficie del cultivo, R_n , en MJ/m²-día y finalmente en la

Tabla 37: se encuentra la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o en mm/día.

En la

Tabla 37 la ET_o es mayor a 4 mm/día en 10 de las 19 estaciones, indicando un mayor consumo de agua de los ecosistemas y el desarrollo de la vegetación en las zonas aledañas a dichas

estaciones. De igual manera en las zonas donde se localizan estas estaciones es donde se ubican gran parte de los cultivos en la cuenca.

Tabla 24. Presión y constante psicrométrica de cada estación

Estación	Altitud (msnm)	Latitud (grados)	Presión (kPa)	Constante psicrométrica γ (kPa/°C)
Puerto Nuevo	145	7.950	99.6	0.066 kPa
Planeta Rica	90	8.399	100.2	0.067 kPa
Colomboy	125	8.741	99.8	0.066 kPa
Centro Alegre	170	8.181	99.3	0.066 kPa
Villa Arteaga	132	7.335	99.8	0.066 kPa
Cristo Rey	15	9.071	101.1	0.067 kPa
Jaraguay	70	8.300	100.5	0.067 kPa
San Bernardo del V	22	9.371	101.0	0.067 kPa
Lorica	80	9.250	100.4	0.067 kPa
La Doctrina	20	9.297	101.1	0.067 kPa
Chimá	20	9.151	101.1	0.067 kPa
Univ Córdoba	15	8.794	101.1	0.067 kPa
Galán	30	8.659	100.9	0.067 kPa
El Salado	40	8.914	100.9	0.067 kPa
Turipaná	20	8.840	101.1	0.067 kPa
Maracayo	25	8.411	101.0	0.067 kPa
Apto Los Garzones	20	8.826	101.1	0.067 kPa
Universidad Sucre	160	9.316	99.4	0.066 kPa
El Palmar	580	7.117	94.6	0.063 kPa

Posteriormente al cálculo de ET_o , se definieron los K_c del cultivo obtenidos a partir del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), lo cuales se indican en la Tabla 25 [436].

Tabla 25. Valores de K_c para la zona de estudio

Cultivo	K_c
Agricultura	0.79 ^a
Bosques	0.60 ^a
Pastizales	1.01 ^b

Humedales	1.01 ^b
Urbano	0.20 ^a
Matorrales	0.60 ^a
Vegetación dispersa o estéril	0.60 ^b
Agua abierta	1.05 ^b
Nieve y hielo	1.00 ^b

^a SGC; ^b FAO

Tabla 26. Velocidad del viento promedio mensual multianual (m/s)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	1.54	1.72	1.91	1.80	1.57	1.48	1.53	1.50	1.46	1.54	1.51	1.36
Planeta Rica	1.50	1.79	1.95	1.81	1.33	1.30	1.36	1.36	1.34	1.35	1.29	1.16
Colomboy	1.25	1.65	1.78	1.55	1.17	1.11	1.11	1.12	1.09	1.09	1.06	1.02
Centro Alegre	1.50	1.79	1.95	1.81	1.33	1.30	1.36	1.36	1.34	1.35	1.29	1.16
Villa Arteaga	1.54	1.72	1.91	1.80	1.57	1.48	1.53	1.50	1.46	1.54	1.51	1.36
Cristo Rey	2.67	3.09	3.17	2.98	2.20	1.91	1.96	2.00	1.90	1.87	1.83	1.87
Jaraguay	1.54	1.72	1.91	1.80	1.57	1.48	1.53	1.50	1.46	1.54	1.51	1.36
San Bernardo del V	2.67	3.09	3.17	2.98	2.20	1.91	1.96	2.00	1.90	1.87	1.83	1.87
Lorica	2.67	3.09	3.17	2.98	2.20	1.91	1.96	2.00	1.90	1.87	1.83	1.87
La Doctrina	2.67	3.09	3.17	2.98	2.20	1.91	1.96	2.00	1.90	1.87	1.83	1.87
Chimá	2.67	3.09	3.17	2.98	2.20	1.91	1.96	2.00	1.90	1.87	1.83	1.87
Univ Córdoba	2.03	2.39	2.53	2.32	1.85	1.76	1.81	1.90	1.76	1.79	1.71	1.72
Galán	2.03	2.39	2.53	2.32	1.85	1.76	1.81	1.90	1.76	1.79	1.71	1.72
El Salado	1.25	1.65	1.78	1.55	1.17	1.11	1.11	1.12	1.09	1.09	1.06	1.02
Turipaná	1.25	1.65	1.78	1.55	1.17	1.11	1.11	1.12	1.09	1.09	1.06	1.02
Maracayo	1.54	1.72	1.91	1.80	1.57	1.48	1.53	1.50	1.46	1.54	1.51	1.36
Apto Los Garzones	1.50	1.79	1.95	1.81	1.33	1.30	1.36	1.36	1.34	1.35	1.29	1.16
Universidad de Sucre	1.97	2.34	2.26	1.96	1.65	1.70	1.78	1.66	1.57	1.49	1.69	1.65
El Palmar	5.10	5.95	5.03	4.11	3.67	3.23	3.34	3.34	3.34	3.34	3.45	4.24

Tabla 27. Punto de rocío promedio mensual multianual (°C)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	23.1	22.9	22.9	23.2	23.8	23.9	23.7	23.8	23.5	23.4	23.6	23.4
Planeta Rica	24.0	24.0	24.0	23.9	24.2	24.3	24.2	24.3	24.3	24.0	24.3	24.3
Colomboy	23.1	23.1	23.2	23.9	24.5	24.5	24.5	24.3	24.3	24.2	24.4	23.9
Centro Alegre	24.0	24.0	24.0	23.9	24.2	24.3	24.2	24.3	24.3	24.0	24.3	24.3
Villa Arteaga	23.1	22.9	22.9	23.2	23.8	23.9	23.7	23.8	23.5	23.4	23.6	23.4
Cristo Rey	24.2	24.2	24.5	24.9	25.1	25.1	24.9	24.8	24.7	24.7	24.7	24.6
Jaraguay	23.0	22.7	23.2	22.8	23.0	23.8	23.9	23.1	23.0	22.5	22.6	23.1
San Bernardo del V	24.8	24.7	24.8	24.9	25.1	25.1	25.1	25.1	25.0	24.9	25.0	25.0

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Lorica	24.2	24.2	24.5	24.9	25.1	25.1	24.9	24.8	24.7	24.7	24.7	24.6
La Doctrina	24.2	24.2	24.5	24.9	25.1	25.1	24.9	24.8	24.7	24.7	24.7	24.6
Chimá	24.3	24.2	24.4	24.7	24.8	24.9	24.9	24.8	24.7	24.8	24.8	24.6
Univ Córdoba	23.6	23.5	23.6	24.3	24.6	24.7	24.5	24.5	24.4	24.3	24.3	24.2
Galán	23.1	23.0	23.2	23.8	24.1	24.2	24.1	24.0	24.0	23.9	23.8	23.7
El Salado	24.6	24.5	24.6	24.9	25.1	25.2	25.1	25.0	24.9	24.9	24.9	24.7
Turipaná	23.1	23.1	23.2	23.9	24.5	24.5	24.5	24.3	24.3	24.2	24.4	23.9
Maracayo	24.5	24.2	24.4	24.5	24.6	24.6	24.6	24.6	24.6	24.3	24.6	24.7
Apto Los Garzones	23.2	23.1	23.4	24.0	24.5	24.5	24.3	24.3	24.2	24.1	24.1	23.8
Universidad de Sucre	21.4	22.0	20.8	21.3	21.8	22.0	21.8	21.8	22.4	21.9	22.0	21.1
El Palmar	21.3	21.5	21.4	21.6	20.9	21.0	20.1	20.5	20.5	21.1	21.1	21.7

Tabla 28. Brillo solar promedio mensual multianual

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	141.5	131.9	108.6	96.4	115.3	130.4	149.4	143.2	120.7	130.3	138.5	139.3
Planeta Rica	223.9	186.4	157.0	126.9	128.5	140.0	175.1	159.5	135.6	147.3	153.2	192.8
Colomboy	223.9	186.4	157.0	126.9	128.5	140.0	175.1	159.5	135.6	147.3	153.2	192.8
Centro Alegre	159.6	155.6	111.3	111.2	130.0	125.6	169.3	137.3	113.9	139.1	151.2	168.8
Villa Arteaga	141.5	131.9	108.6	96.4	115.3	130.4	149.4	143.2	120.7	130.3	138.5	139.3
Cristo Rey	222.8	193.8	179.9	150.5	133.3	138.1	171.9	160.1	133.3	135.3	148.3	191.2
Jaraguay	159.6	155.6	111.3	111.2	130.0	125.6	169.3	137.3	113.9	139.1	151.2	168.8
San Bernardo del V	229.1	247.8	219.2	201.8	168.9	164.3	203.8	166.4	146.5	164.3	181.3	207.6
Lorica	222.8	193.8	179.9	150.5	133.3	138.1	171.9	160.1	133.3	135.3	148.3	191.2
La Doctrina	222.8	193.8	179.9	150.5	133.3	138.1	171.9	160.1	133.3	135.3	148.3	191.2
Chimá	214.7	210.5	186.1	145.6	141.5	154.7	198.0	169.2	136.3	128.0	173.5	207.6
Univ Córdoba	235.5	200.8	189.7	156.3	143.2	158.6	188.2	179.0	150.5	160.7	178.3	189.2
Galán	235.5	200.8	189.7	156.3	143.2	158.6	188.2	179.0	150.5	160.7	178.3	189.2
El Salado	214.7	210.5	186.1	145.6	141.5	154.7	198.0	169.2	136.3	128.0	173.5	207.6
Turipaná	223.9	186.4	157.0	126.9	128.5	140.0	175.1	159.5	135.6	147.3	153.2	192.8
Maracayo	159.6	155.6	111.3	111.2	130.0	125.6	169.3	137.3	113.9	139.1	151.2	168.8
Apto Los Garzones	223.9	186.4	157.0	126.9	128.5	140.0	175.1	159.5	135.6	147.3	153.2	192.8

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Universidad de Sucre	222.8	193.8	179.9	150.5	133.3	138.1	171.9	160.1	133.3	135.3	148.3	191.2
El Palmar	141.5	131.9	108.6	96.4	115.3	130.4	149.4	143.2	120.7	130.3	138.5	139.3

Tabla 29. Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, Δ (kPa/°C)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	0.67	0.67	0.67	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.68
Planeta Rica	0.69	0.68	0.68	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70
Colomboy	0.70	0.68	0.67	0.68	0.70	0.71	0.71	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71
Centro Alegre	0.69	0.68	0.67	0.68	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70	0.70
Villa Arteaga	0.67	0.66	0.65	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Cristo Rey	0.65	0.63	0.63	0.65	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Jaraguay	0.66	0.67	0.66	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69
San Bernardo del V	0.62	0.60	0.60	0.61	0.64	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66
Lorica	0.64	0.63	0.63	0.63	0.66	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67
La Doctrina	0.63	0.62	0.62	0.63	0.66	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67
Chimá	0.63	0.62	0.62	0.62	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Univ Córdoba	0.66	0.65	0.65	0.66	0.67	0.68	0.67	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67
Galán	0.66	0.65	0.65	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
El Salado	0.70	0.69	0.69	0.70	0.71	0.71	0.71	0.71	0.70	0.71	0.71	0.71
Turipaná	0.70	0.68	0.68	0.69	0.70	0.70	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71
Maracayo	0.68	0.68	0.67	0.67	0.68	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69
Apto Los Garzones	0.69	0.68	0.67	0.68	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70
Universidad de Sucre	0.66	0.65	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
El Palmar	0.52	0.50	0.53	0.56	0.56	0.60	0.58	0.57	0.57	0.57	0.57	0.54

Tabla 30. Presión real de vapor, e_a (kPa)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	2.82	2.79	2.80	2.84	2.95	2.97	2.93	2.94	2.90	2.88	2.91	2.87
Planeta Rica	2.98	2.98	2.98	2.97	3.02	3.04	3.02	3.04	3.03	2.99	3.04	3.04
Colomboy	2.83	2.82	2.85	2.96	3.07	3.08	3.07	3.05	3.03	3.01	3.05	2.96
Centro Alegre	2.98	2.98	2.98	2.97	3.02	3.04	3.02	3.04	3.03	2.99	3.04	3.04
Villa Arteaga	2.82	2.79	2.80	2.84	2.95	2.97	2.93	2.94	2.90	2.88	2.91	2.87
Cristo Rey	3.01	3.01	3.07	3.14	3.18	3.18	3.14	3.13	3.12	3.11	3.11	3.09
Jaraguay	2.81	2.76	2.85	2.78	2.80	2.95	2.96	2.83	2.82	2.73	2.74	2.83
San Bernardo del V	3.13	3.11	3.13	3.15	3.19	3.19	3.18	3.18	3.16	3.15	3.16	3.17
Lorica	3.01	3.01	3.07	3.14	3.18	3.18	3.14	3.13	3.12	3.11	3.11	3.09
La Doctrina	3.01	3.01	3.07	3.14	3.18	3.18	3.14	3.13	3.12	3.11	3.11	3.09
Chimá	3.04	3.02	3.06	3.10	3.13	3.15	3.16	3.13	3.11	3.12	3.14	3.09
Univ Córdoba	2.92	2.89	2.92	3.04	3.09	3.11	3.08	3.07	3.05	3.03	3.04	3.01
Galán	2.83	2.81	2.85	2.95	3.00	3.02	2.99	2.99	2.97	2.96	2.95	2.93
El Salado	3.10	3.07	3.09	3.14	3.18	3.20	3.18	3.16	3.14	3.15	3.15	3.11
Turipaná	2.83	2.82	2.85	2.96	3.07	3.08	3.07	3.05	3.03	3.01	3.05	2.96
Maracayo	3.07	3.03	3.05	3.07	3.09	3.09	3.10	3.10	3.09	3.04	3.08	3.12
Apto Los Garzones	2.84	2.82	2.88	2.98	3.07	3.08	3.04	3.04	3.03	3.00	3.00	2.95
Universidad de Sucre	2.54	2.64	2.46	2.53	2.62	2.64	2.62	2.61	2.71	2.62	2.64	2.50
El Palmar	2.53	2.56	2.54	2.59	2.48	2.49	2.35	2.41	2.42	2.50	2.50	2.60

Tabla 31. Presión de saturación de vapor, e_s (kPa)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	3.66	3.77	3.86	3.90	3.80	3.69	3.66	3.67	3.66	3.61	3.62	3.61
Planeta Rica	4.00	4.15	4.22	4.07	3.89	3.85	3.84	3.84	3.81	3.79	3.79	3.84
Colomboy	3.84	3.83	3.85	3.85	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86	3.85	3.85	3.86
Centro Alegre	4.03	4.11	4.08	4.00	3.92	3.94	3.90	3.90	3.89	3.86	3.85	3.91
Villa Arteaga	3.52	3.57	3.56	3.57	3.53	3.47	3.47	3.47	3.50	3.48	3.44	3.43
Cristo Rey	4.11	4.13	4.14	4.42	4.13	4.14	4.13	4.12	4.04	4.03	4.05	4.09

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Jaraguay	3.46	3.83	3.84	4.07	3.84	3.79	3.83	3.93	3.87	3.90	3.87	3.86
San Bernardo del V	3.65	3.68	3.68	3.70	3.68	3.70	3.67	3.65	3.62	3.61	3.62	3.66
Lorica	3.99	4.09	4.16	4.14	3.93	3.93	3.92	3.91	3.80	3.75	3.82	3.90
La Doctrina	3.86	3.92	3.98	4.02	3.94	3.93	3.93	3.87	3.79	3.76	3.82	3.88
Chimá	3.87	3.98	4.03	4.01	3.90	3.84	3.86	3.82	3.74	3.73	3.73	3.79
Univ Córdoba	3.91	4.01	4.08	4.06	3.91	3.96	3.88	3.88	3.87	3.81	3.81	3.81
Galán	3.95	4.07	4.11	4.12	3.96	3.95	3.97	3.98	3.87	3.87	3.86	3.92
El Salado	4.13	4.24	4.28	4.22	3.98	3.95	3.95	3.94	3.87	3.88	3.93	4.00
Turipaná	3.93	4.03	4.14	4.09	3.95	3.89	3.92	3.90	3.82	3.82	3.81	3.86
Maracayo	3.99	4.06	4.03	4.02	3.96	3.96	3.94	3.90	3.86	3.88	3.89	3.96
Apto Los Garzones	4.00	4.09	4.11	4.10	3.97	3.96	4.00	3.96	3.89	3.84	3.86	3.94
Universidad de Sucre	3.93	4.05	4.07	3.98	3.81	3.79	3.82	3.77	3.70	3.65	3.69	3.79
El Palmar	3.48	3.58	3.55	3.61	3.31	3.78	3.43	3.27	3.34	3.33	3.33	3.39

Tabla 32. Radiación solar entrante, R_s (MJ/m²-día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	15.84	17.33	18.69	18.13	17.19	16.69	17.11	17.55	17.54	16.69	15.70	14.69
Planeta Rica	17.09	19.02	19.76	18.91	17.45	17.32	17.66	18.07	17.67	16.80	15.56	15.61
Colomboy	15.39	16.49	17.60	17.94	17.61	17.27	17.39	17.76	17.50	16.67	15.63	14.90
Centro Alegre	17.46	18.65	19.91	19.73	19.04	18.80	18.89	19.20	19.19	18.13	16.82	16.33
Villa Arteaga	14.81	15.98	16.49	16.92	16.12	15.82	15.94	16.49	16.52	15.92	14.35	13.79
Cristo Rey	9.41	9.63	10.02	5.20	10.46	10.48	10.74	11.04	10.82	10.40	9.68	9.29
Jaraguay	17.72	19.31	20.52	20.58	19.64	19.43	19.37	20.82	19.25	18.84	18.83	17.74
San Bernardo del V	14.92	16.18	17.12	17.68	17.59	17.32	17.75	17.80	17.34	16.41	15.18	14.81
Lorica	16.39	17.75	18.56	18.26	17.03	17.21	17.69	17.88	17.34	15.90	14.78	15.00
La Doctrina	15.02	16.05	16.48	16.45	15.83	16.22	16.66	16.67	16.09	14.80	14.11	14.17
Chimá	16.82	18.38	19.56	19.61	18.41	18.02	18.43	18.61	18.10	16.92	15.74	15.56
Univ Córdoba	16.68	18.09	18.77	18.27	17.20	17.33	17.38	17.81	17.99	16.55	15.25	15.07
Galán	17.70	19.51	20.27	19.94	18.49	18.29	18.60	18.90	18.43	17.65	16.58	16.51

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
El Salado	17.48	18.92	19.45	18.94	17.52	17.52	18.11	18.24	17.95	16.87	15.86	15.97
Turipaná	17.14	18.77	19.50	18.76	17.55	17.22	17.59	17.96	17.44	16.38	15.49	15.70
Maracayo	17.62	19.16	20.34	20.44	19.49	19.44	19.62	19.94	19.51	18.82	17.37	16.82
Apto Los Garzones	17.40	18.98	19.74	19.44	18.11	18.04	18.18	18.57	18.16	17.19	16.06	15.85
Universidad de Sucre	17.01	18.80	19.39	18.79	17.13	17.11	17.78	18.16	17.20	15.82	14.81	15.43
El Palmar	16.34	17.95	18.75	18.97	17.33	20.06	19.16	17.92	18.39	16.78	15.75	14.67

Tabla 33. Radiación en un día despejado, R_{so} (MJ/m²-día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	24.71	26.50	27.97	28.44	27.90	27.32	27.46	28.02	27.99	26.81	25.05	24.09
Planeta Rica	24.52	26.35	27.88	28.43	27.94	27.39	27.52	28.03	27.93	26.69	24.87	23.89
Colomboy	24.42	26.29	27.87	28.47	28.03	27.50	27.62	28.09	27.94	26.64	24.78	23.78
Centro Alegre	24.64	26.46	27.97	28.48	27.96	27.40	27.53	28.06	27.99	26.79	24.99	24.02
Villa Arteaga	24.91	26.64	28.03	28.39	27.77	27.16	27.31	27.94	28.00	26.92	25.23	24.30
Cristo Rey	24.23	26.13	27.75	28.41	28.00	27.50	27.61	28.05	27.84	26.50	24.60	23.59
Jaraguay	24.54	26.36	27.88	28.41	27.91	27.36	27.48	28.00	27.92	26.69	24.89	23.91
San Bernardo del V	24.13	26.06	27.72	28.43	28.06	27.58	27.68	28.08	27.83	26.44	24.51	23.49
Lorica	24.21	26.13	27.78	28.47	28.08	27.59	27.69	28.11	27.88	26.51	24.59	23.57
La Doctrina	24.16	26.08	27.73	28.42	28.05	27.56	27.66	28.07	27.83	26.45	24.53	23.51
Chimá	24.21	26.11	27.75	28.42	28.03	27.53	27.63	28.06	27.84	26.49	24.58	23.57
Univ Córdoba	24.33	26.20	27.78	28.39	27.95	27.43	27.55	28.02	27.85	26.55	24.69	23.70
Galán	24.39	26.24	27.81	28.40	27.94	27.41	27.53	28.01	27.87	26.59	24.74	23.75
El Salado	24.30	26.19	27.79	28.42	27.99	27.48	27.59	28.05	27.87	26.55	24.67	23.67
Turipaná	24.32	26.19	27.78	28.40	27.97	27.45	27.56	28.03	27.85	26.55	24.68	23.68
Maracayo	24.47	26.29	27.83	28.38	27.89	27.35	27.48	27.98	27.88	26.64	24.82	23.84
Apto Los Garzones	24.32	26.19	27.78	28.40	27.96	27.45	27.56	28.02	27.85	26.55	24.68	23.69
Universidad de Sucre	24.15	26.07	27.73	28.42	28.05	27.56	27.66	28.08	27.83	26.45	24.53	23.50
El Palmar	24.91	26.61	27.96	28.29	27.65	27.03	27.18	27.83	27.92	26.88	25.22	24.31

Tabla 34. Radiación neta solar o de onda corta, R_{ns} (MJ/m²-día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	12.19	13.34	14.39	13.96	13.24	12.85	13.17	13.51	13.51	12.85	12.09	11.31
Planeta Rica	13.16	14.65	15.22	14.56	13.44	13.33	13.60	13.91	13.60	12.93	11.98	12.02
Colomboy	11.85	12.70	13.55	13.82	13.56	13.30	13.39	13.67	13.47	12.84	12.04	11.47
Centro Alegre	13.45	14.36	15.33	15.19	14.66	14.48	14.55	14.79	14.78	13.96	12.95	12.57
Villa Arteaga	11.40	12.30	12.70	13.03	12.42	12.18	12.27	12.70	12.72	12.26	11.05	10.61
Cristo Rey	7.25	7.42	7.71	4.01	8.05	8.07	8.27	8.50	8.33	8.01	7.45	7.15
Jaraguay	13.64	14.87	15.80	15.84	15.12	14.96	14.92	16.03	14.82	14.50	14.50	13.66
San Bernardo del V	11.49	12.46	13.18	13.62	13.54	13.34	13.67	13.71	13.35	12.63	11.69	11.40
Lorica	12.62	13.67	14.29	14.06	13.11	13.25	13.62	13.77	13.35	12.24	11.38	11.55
La Doctrina	11.56	12.36	12.69	12.67	12.19	12.49	12.83	12.84	12.39	11.40	10.86	10.91
Chimá	12.95	14.16	15.06	15.10	14.18	13.88	14.19	14.33	13.93	13.03	12.12	11.98
Univ Córdoba	12.84	13.93	14.45	14.07	13.25	13.34	13.38	13.72	13.85	12.75	11.74	11.60
Galán	13.63	15.02	15.61	15.35	14.24	14.08	14.32	14.55	14.19	13.59	12.77	12.71
El Salado	13.46	14.57	14.98	14.58	13.49	13.49	13.94	14.04	13.82	12.99	12.21	12.30
Turipaná	13.20	14.46	15.01	14.45	13.52	13.26	13.54	13.83	13.43	12.62	11.93	12.09
Maracayo	13.57	14.75	15.66	15.74	15.01	14.97	15.11	15.35	15.02	14.49	13.37	12.95
Apto Los Garzones	13.40	14.61	15.20	14.97	13.95	13.89	14.00	14.30	13.98	13.23	12.37	12.21
Universidad de Sucre	13.10	14.48	14.93	14.47	13.19	13.18	13.69	13.98	13.24	12.18	11.40	11.88
El Palmar	12.58	13.82	14.44	14.61	13.35	15.45	14.75	13.80	14.16	12.92	12.13	11.29

Tabla 35. Radiación de onda larga, R_{nl} , (MJ/m²-día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	2.15	2.27	2.35	2.15	1.93	1.87	1.96	1.97	2.01	2.00	2.00	1.93
Planeta Rica	2.35	2.51	2.45	2.20	1.93	1.94	2.01	2.01	1.95	1.97	1.90	2.05
Colomboy	2.11	2.09	2.10	2.00	1.90	1.89	1.91	1.94	1.92	1.93	1.93	1.98
Centro Alegre	2.42	2.41	2.45	2.34	2.23	2.23	2.25	2.22	2.23	2.23	2.15	2.20
Villa Arteaga	1.87	1.94	1.87	1.87	1.71	1.70	1.73	1.76	1.79	1.81	1.67	1.68

Cristo Rey	0.69	0.59	0.54	-0.39	0.57	0.61	0.66	0.69	0.66	0.69	0.69	0.70
Jaraguay	2.57	2.75	2.67	2.73	2.55	2.43	2.39	2.75	2.46	2.64	2.92	2.74
San Bernardo del V	1.78	1.81	1.78	1.79	1.78	1.79	1.86	1.82	1.78	1.77	1.76	1.81
Lorica	2.22	2.24	2.14	1.94	1.72	1.80	1.90	1.90	1.82	1.72	1.73	1.93
La Doctrina	1.91	1.89	1.74	1.62	1.51	1.63	1.72	1.68	1.61	1.52	1.60	1.76
Chimá	2.26	2.35	2.32	2.20	2.00	1.97	2.02	2.02	1.96	1.90	1.89	2.04
Univ Córdoba	2.34	2.41	2.31	2.03	1.83	1.89	1.91	1.94	2.01	1.90	1.86	1.98
Galán	2.66	2.80	2.68	2.43	2.15	2.15	2.23	2.23	2.16	2.18	2.22	2.39
El Salado	2.37	2.43	2.30	2.07	1.82	1.85	1.96	1.95	1.93	1.88	1.92	2.12
Turipaná	2.54	2.63	2.53	2.19	1.91	1.89	1.96	1.99	1.92	1.89	1.91	2.18
Maracayo	2.39	2.48	2.46	2.39	2.26	2.31	2.32	2.31	2.24	2.33	2.25	2.26
Apto Los Garzones	2.60	2.68	2.55	2.31	2.01	2.06	2.11	2.12	2.06	2.05	2.08	2.23
Universidad de Sucre	2.84	2.85	2.92	2.59	2.17	2.21	2.36	2.39	2.12	2.07	2.09	2.55
El Palmar	2.47	2.58	2.56	2.53	2.31	3.10	2.95	2.48	2.57	2.28	2.28	2.08

Tabla 36. Radiación neta en la superficie del cultivo, R_n , (MJ/m²-día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	10.04	11.07	12.04	11.82	11.31	10.98	11.21	11.54	11.50	10.85	10.09	9.38
Planeta Rica	10.81	12.14	12.77	12.36	11.51	11.39	11.58	11.91	11.66	10.97	10.08	9.97
Colomboy	9.74	10.60	11.45	11.82	11.66	11.40	11.48	11.73	11.55	10.90	10.11	9.49
Centro Alegre	11.03	11.95	12.88	12.85	12.43	12.25	12.29	12.57	12.55	11.74	10.80	10.38
Villa Arteaga	9.53	10.37	10.83	11.16	10.71	10.49	10.54	10.94	10.93	10.45	9.39	8.94
Cristo Rey	6.55	6.83	7.18	4.40	7.48	7.46	7.61	7.81	7.67	7.32	6.76	6.45
Jaraguay	11.07	12.12	13.13	13.12	12.58	12.53	12.53	13.28	12.36	11.86	11.58	10.93
San Bernardo del V	9.71	10.64	11.40	11.83	11.76	11.55	11.81	11.89	11.57	10.86	9.93	9.59
Lorica	10.40	11.43	12.15	12.12	11.40	11.45	11.72	11.87	11.52	10.52	9.66	9.61
La Doctrina	9.65	10.47	10.95	11.05	10.68	10.86	11.11	11.15	10.78	9.88	9.27	9.15
Chimá	10.69	11.80	12.73	12.90	12.17	11.91	12.17	12.31	11.97	11.13	10.22	9.94
Univ Córdoba	10.50	11.52	12.14	12.04	11.42	11.45	11.47	11.77	11.84	10.85	9.87	9.62

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Galán	10.97	12.22	12.93	12.92	12.09	11.93	12.09	12.33	12.04	11.41	10.54	10.32
El Salado	11.09	12.14	12.68	12.51	11.67	11.64	11.98	12.10	11.90	11.11	10.30	10.18
Turipaná	10.66	11.83	12.48	12.26	11.61	11.37	11.59	11.84	11.51	10.73	10.02	9.91
Maracayo	11.18	12.27	13.20	13.35	12.75	12.66	12.79	13.04	12.78	12.16	11.12	10.69
Apto Los Garzones	10.80	11.94	12.65	12.66	11.93	11.84	11.89	12.19	11.92	11.18	10.29	9.98
Universidad de Sucre	10.26	11.63	12.01	11.88	11.03	10.97	11.33	11.59	11.12	10.11	9.32	9.33
El Palmar	10.11	11.24	11.88	12.08	11.03	12.34	11.81	11.32	11.59	10.64	9.85	9.22

Tabla 37. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o (mm/día)

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Puerto Nuevo	3.58	4.08	4.50	4.41	3.98	3.73	3.81	3.88	3.90	3.71	3.47	3.26
Planeta Rica	3.98	4.61	4.93	4.60	3.99	3.89	3.98	4.04	3.94	3.77	3.46	3.44
Colomboy	3.58	3.96	4.23	4.14	3.93	3.84	3.87	3.96	3.91	3.72	3.46	3.34
Centro Alegre	4.07	4.51	4.80	4.65	4.29	4.22	4.23	4.29	4.27	4.06	3.72	3.62
Villa Arteaga	3.30	3.66	3.81	3.83	3.50	3.35	3.41	3.50	3.57	3.45	3.09	2.96
Cristo Rey	3.34	4.66	4.71	4.18	3.81	3.62	3.74	3.82	3.63	3.52	3.35	3.39
Jaraguay	3.64	4.45	4.70	5.02	4.50	4.27	4.31	4.73	4.42	4.43	4.29	3.96
San Bernardo del V	3.29	3.64	3.80	3.89	3.74	3.70	3.74	3.73	3.63	3.44	3.19	3.14
Lorica	4.18	4.73	4.95	4.74	4.03	3.99	4.10	4.14	3.91	3.58	3.42	3.54
La Doctrina	3.79	4.19	4.35	4.28	3.84	3.82	3.94	3.90	3.70	3.43	3.31	3.39
Chimá	4.02	4.62	4.90	4.79	4.25	4.03	4.12	4.14	3.95	3.70	3.44	3.49
Univ Córdoba	4.04	4.60	4.87	4.59	4.03	4.05	4.02	4.13	4.13	3.81	3.52	3.49
Galán	4.33	4.98	5.21	5.02	4.38	4.28	4.39	4.49	4.27	4.12	3.86	3.89
El Salado	3.99	4.56	4.78	4.54	3.95	3.89	4.00	4.04	3.93	3.71	3.50	3.54
Turipaná	3.91	4.50	4.83	4.51	3.98	3.84	3.94	4.01	3.86	3.65	3.40	3.46
Maracayo	4.00	4.47	4.71	4.70	4.40	4.35	4.36	4.39	4.27	4.19	3.86	3.74
Apto Los Garzones	4.11	4.66	4.89	4.71	4.14	4.09	4.19	4.23	4.10	3.86	3.62	3.59
Universidad de Sucre	4.43	5.00	5.33	4.94	4.26	4.22	4.41	4.39	4.05	3.78	3.65	3.89
El Palmar	4.70	5.33	5.21	5.07	4.32	5.40	4.92	4.39	4.57	4.16	4.00	3.93

Luego, se calculó la demanda poblacional con los datos obtenidos de las empresas de servicios públicos de la zona, las cuales se disgregan como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38. Empresas prestadoras de servicios públicos en las cabeceras municipales de la cuenca

Municipio	Empresa
Valencia	Empresas varias de Valencia, Córdoba, EMPOVALCO
Tierralta	Empresas Públicas Municipales de Tierralta, EPM
Montería	Veolia
Cereté	
Ciénaga de Oro	Anteriormente operaba Uniaguas, hoy Aqualia
Sahagún	
San Carlos	
San Pelayo	Empresas públicas de San Pelayo
Cotorra	Empresa regional de administración pública Cooperativa comunitaria de "Aguas del Sinú A.P.C".
Lorica	
San Antero	
Chimá	
Momil	Aqualia
San Andrés de Sotavento	
Tuchín	
Purísima	
San Bernardo del Viento	Cooperativa de servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo de San Bernardo del Viento, Aguas del viento
Los Córdoba	
Canalete	Aguas de Córdoba
Puerto Escondido	

Utilizando la Ec. 33, y los datos obtenidos de cada una de los informes realizados por la Superintendencia de Servicios Públicos (Superservicios) en cada una de las empresas de las cabeceras municipales [440-446]. Los resultados se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Demanda poblacional y pérdidas del sistema en las cabeceras municipales de la cuenca

Municipio	Demanda (m ³ /habitante- mes)	Demanda (l/habitante- día)	Pérdidas del sistema (%)
Canalete	13.66	455.33	69
Cereté	12.30	410.00	66
Chimá	8.59	286.33	51
Ciénaga de Oro	12.17	405.67	65
Cotorra	13.94	464.67	70
Lorica	11.33	377.67	63
Los Córdoba	13.66	455.33	69
Momil	8.59	286.33	51
Montería	6.14	204.67	32
Puerto Escondido	13.66	455.33	69
Purísima	8.59	286.33	51
Sahagún	7.32	244.00	43
San Andrés de Sotavento	8.59	286.33	51
San Antero	9.69	323.00	57
San Bernardo del Viento	5.71	190.33	26
San Carlos	10.80	360.00	61
San Pelayo	11.39	379.67	63
Tierralta	6.13	204.33	31
Tuchín	8.59	286.33	51
Valencia	7.90	263.33	47

Las dotaciones de cada uno de los municipios al ser comparadas con la dotación bruta máxima permitida por la resolución 0330 de 2017, cuyo valor es 186.67 l/hab-día, son todas superiores. Lo anterior se debe a las pérdidas del sistema en cada una de las cabeceras municipales, lo cual hace que se aumente esta dotación que establece la norma. Si se toma la dotación neta 140 l/hab-día (la cual es la utilizada para poblaciones ubicadas en zonas menores a 100 msnm), y se utiliza la ecuación de la resolución 0330 de 2017 (Ec. 35), se pueden calcular las pérdidas de cada uno de los sistemas de acueducto de las cabeceras municipales, y esto se puede apreciar en la Tabla 39.

$$D_n = \frac{D_b}{1 - \%P}$$

Ec. 35

Una vez calculada la demanda poblacional, se realizó el cálculo de la demanda pecuaria en m³/animal-mes, utilizando la Ec. 34. A continuación, se detallan uno a uno los procedimientos realizados en el sector pecuario.

En el caso del sector de aves se toma el inventario de las aves en sitios de crianza y aves de traspatio con la cual se obtiene el valor total de aves por municipio, y con el módulo de consumo establecido en el Estudio Nacional del Agua del IDEAM (ENA) con un valor de 240 l/día-100 animales se obtiene el consumo en esta primera etapa como se observa en la Tabla 42. Posteriormente, se obtiene la cantidad de agua en la fase sacrificio con su módulo de consumo de 16 l/día-100 animales y el consumo en los lugares de manejo y beneficio cuyo módulo de consumo es 20 l/día-100 animales [447-449].

Siguiendo con el sector porcino, calcula como consumo en la fase de cría y terminación, de sacrificio y en lugares de mantenimiento y beneficio animal. En este caso, las demandas varían teniendo en cuenta la edad de los cerdos o marranos, las cuales se listan en la Tabla 40, asimismo se listan las dotaciones en la etapa de sacrificio y beneficio animal. Los resultados del consumo hídrico para este sector se encuentran en la Tabla 43.

Tabla 40. Demanda de agua del sector porcino¹

Descripción	Dotación (l/día-cabeza)
Cerdas madres	18
Cerdas para reposición	18
Cerdos en ceba	8
Cerdos no clasificados	8
Cerdos en levante	5
Lechones lactantes y precebos	1.8
Reproductores	16
Sacrificio machos y hembras	300
En lugares de manejo y beneficio animal	10

¹ Información obtenida del ENA [447-449]

El sector bovino, así como el porcino debe ser analizado teniendo en cuenta la edad del ganado vacuno en el período de cría, levante y terminación. En la Tabla 41 se muestran las demandas para la ganadería bovina y en la Tabla 44 se muestra el consumo bovino para la zona en estudio.

Tabla 41. Demanda de agua para el ganado vacuno¹

Descripción	Dotación (l/día-cabeza)
Machos y hembras de 0 a 12 meses	20-30
Machos y hembras de 12 a 24 meses	45
Machos y hembras de 24 a 36 meses	80-110
Machos y hembras mayores a 36 meses	80-115
Sacrificio registrado y no	500
En lugares de manejo y beneficio	40

¹ Información obtenida del ENA [447-449]

De igual manera se calcularon los consumos de agua para los búfalos y equino, cuyos resultados están en la Tabla 45 y para los caprinos y ovinos en la Tabla 46.

Dentro del grupo pecuario, se observa que de todos los analizados el de mayor consumo m³/mes-cabeza es el sector de la ganadería vacuna, seguidos por los búfalos y los equinos. Sin embargo, por consumo total de acuerdo con los sectores estudiados, la mayor cantidad la representa el ganado vacuno, con un valor superior por mucho a los demás sectores, con un valor de 5,644,611.42 m³/mes en toda la cuenca, seguido por el consumo bovino y equino con 209,238 m³/mes, en siguiente posición están las aves, el sector porcino, y, por último, el caprino y ovino.

Una vez obtenida la demanda, la evapotranspiración de referencia, los datos de número de curva en las cuencas, información hidrometeorológica, todo es ingresado al WEAP para su modelación y obtener la información de caudales y problemas o no en el suministro de los caudales y realizar un análisis profundo de las condiciones hidrológicas de la cuenca. En la Figura 20 se

muestran las demandas poblacionales y pecuaria de la cuenca del río Sinú.

Tabla 42. Consumo de agua pecuario - aves

Municipio	Total aves capacidad ocupada más aves de traspatio	Número de aves para sacrificio	Consumo fase de cría (m ³ /mes)	Consumo en sacrificio (m ³ /mes)	Consumo en lugares de manejo y beneficio animal (m ³ /mes)	Demanda pecuaria total (m ³ /mes)	Demanda pecuaria por animal (m ³ /mes-ave)
Cereté	45,088	541,056	3,246.34	2,597.07	114	5,957.40	0.13
Chimá	36,960	443,520	2,661.12	2,128.90	0	4,790.02	0.13
Chinú	82,221	986,652	5,919.91	4,735.93	102.6	10,758.44	0.13
Ciénaga de Oro	271,283	3,255,396	19,532.38	15,625.90	1,086.96	36,245.24	0.13
Cotorra	21,058	252,696	1,516.18	1,212.94	0	2,729.12	0.13
Ituango	3,013	36,156	216.94	173.55	0	390.48	0.13
Lorica	216,500	2,598,000	15,588.00	12,470.40	489	28,547.40	0.13
Momil	22,070	264,840	1,589.04	1,271.23	0	2,860.27	0.13
Montería	96,361	1,156,332	6,937.99	5,550.39	183	12,671.39	0.13
Purísima	39,050	468,600	2,811.60	2,249.28	0	5,060.88	0.13
Sahagún	163,820	1,965,840	11,795.04	9,436.03	531.24	21,762.31	0.13
San Andrés de Sotavento	79,624	955,488	5,732.93	4,586.34	0	10,319.27	0.13
San Antero	29,631	355,572	2,133.43	1,706.75	0	3,840.18	0.13
San Bernardo del Viento	50,352	604,224	3,625.34	2,900.28	0	6,525.62	0.13
San Carlos	25,191	302,292	1,813.75	1,451.00	0	3,264.75	0.13
San Pelayo	59,433	713,196	4,279.18	3,423.34	0	7,702.52	0.13
Tierralta	93,330	1,119,960	6,719.76	5,375.81	0	12,095.57	0.13
Tuchín	38,228	458,736	2,752.42	2,201.93	0	4,954.35	0.13
Valencia	65,031	780,372	4,682.23	3,745.79	0	8,428.02	0.13
Total	1,438,244	10,821,120	103,553.57	82,842.85	2,506.8	188,903.22	2.48

Tabla 43. Consumo de agua pecuario - porcino

Municipio	Total porcinos	Sacrificio Total	Demanda hídrica en fase de cría, levante y terminación (m ³ /mes)	Demanda hídrica en fase de sacrificio registrado (m ³ /mes)	Demanda hídrica en lugares de manejo y beneficio (m ³ /mes)	Demanda pecuaria (m ³ /mes)	Demanda pecuaria por animal (m ³ /mes-cabeza)
Cereté	14,358.00	70.20	3,443.19	631.80	4,307.40	8,382.39	0.58
Chimá	15,334.00	75.40	3,680.16	678.60	4,600.20	8,958.96	0.58
Chinú	11,919.00	58.50	2,860.56	526.50	3,575.70	6,962.76	0.58
Ciénaga de Oro	15,918.00	78.00	3,813.19	702.00	4,775.40	9,290.59	0.58
Cotorra	8,108.00	39.00	1,933.64	351.00	2,432.40	4,717.04	0.58
Ituango	1,290.00	65.00	258.68	585.00	387.00	1,230.68	0.95
Lorica	39,039.00	189.80	9,369.36	1,708.20	11,711.70	22,789.26	0.58
Momil	8,011.00	39.00	1,922.64	351.00	2,403.30	4,676.94	0.58
Montería	35,926.00	175.50	8,581.94	1,579.50	10,777.80	20,939.24	0.58
Purísima	7,771.00	37.70	1,865.04	339.30	2,331.30	4,535.64	0.58
Sahagún	28,219.00	137.80	6,668.80	1,240.20	8,465.70	16,374.70	0.58
San Andrés de Sotavento	16,413.00	80.60	3,939.12	725.40	4,923.90	9,588.42	0.58
San Antero	6,169.00	29.90	1,444.95	269.10	1,850.70	3,564.75	0.58
San Bernardo del Viento	8,577.00	41.60	2,071.98	374.40	2,573.10	5,019.48	0.59
San Carlos	18,017.00	88.40	4,196.42	795.60	5,405.10	10,397.12	0.58
San Pelayo	18,709.00	91.00	4,490.16	819.00	5,612.70	10,921.86	0.58
Tierralta	15,561.00	75.40	3,734.64	678.60	4,668.30	9,081.54	0.58
Tuchín	12,138.00	59.80	2,913.12	538.20	3,641.40	7,092.72	0.58
Valencia	9,530.00	46.80	2,287.20	421.20	2,859.00	5,567.40	0.58
Total	291,007.00	1,479.40	69,474.80	13,314.60	87,302.10	170,091.50	11.45

Tabla 44. Consumo de agua pecuario - Bovino

Municipio	Total Bovinos	Consumo fase de cría, levante y terminación - todo (m ³ /mes)	No de bovinos sacrificados	Consumo fase de sacrificio registrado (m ³ /mes)	Consumo fase de sacrificio total (m ³ /mes)	Consumo lugares de manejo Y beneficio (m ³ /mes)	Demanda pecuaria (m ³ /mes)	Demanda pecuaria por animal (m ³ /animal-mes)
Cereté	40,544	89,038.17	4,974	74,610.00	82,071.00	960.00	172,069.17	4.24
Chimá	29,694	64,453.86	3,643	54,645.00	60,109.50	843.60	125,406.96	4.22
Chinú	81,018	176,046.99	9,940	149,100.00	164,010.00	1,939.20	341,996.19	4.22
Ciénaga de Oro	81,251	180,063.24	9,968	149,520.00	164,472.00	1,820.40	346,355.64	4.26
Cotorra	9,304	20,145.45	1,141	17,115.00	18,826.50	387.60	39,359.55	4.23
Ituango	38,639	85,848.72	1,585	23,775.00	26,152.50	1,213.20	113,214.42	2.93
Lorica	110,500	240,797.61	13,556	203,340.00	223,674.00	2,449.20	466,920.81	4.23
Momil	16,174	35,342.76	1,984	29,760.00	32,736.00	382.80	68,461.56	4.23
Montería	392,290	876,204.66	48,127	721,905.00	794,095.50	4,825.20	1,675,125.36	4.27
Purísima	13,091	29,609.85	1,606	24,090.00	26,499.00	482.40	56,591.25	4.32
Sahagún	140,858	307,777.71	17,281	259,215.00	285,136.50	2,822.40	595,736.61	4.23
San Andrés de Sotavento	24,321	51,394.05	2,984	44,760.00	49,236.00	1,128.00	101,758.05	4.18
San Antero	14,685	32,076.48	1,802	27,030.00	29,733.00	420.00	62,229.48	4.24
San Bernardo del Viento	31,169	68,522.25	3,824	57,360.00	63,096.00	711.60	132,329.85	4.25
San Carlos	61,074	133,068.45	7,493	112,395.00	123,634.50	1,228.80	257,931.75	4.22
San Pelayo	58,384	126,706.23	7,163	107,445.00	118,189.50	1,459.20	246,354.93	4.22
Tierralta	121,736	268,514.91	14,935	224,025.00	246,427.50	2,205.60	517,148.01	4.25
Tuchín	6,968	15,560.13	855	12,825.00	14,107.50	523.20	30,190.83	4.33
Valencia	68,932	154,354.50	8,457	126,855.00	139,540.50	1,536.00	295,431.00	4.29
Total	1,340,632	2,955,526.02	161,318	2,419,770.00	2,661,747.00	27,338.40	5,644,611.42	79.37

Tabla 45. Consumo de agua pecuario - búfalos y equinos

Municipio	Total búfalos	Consumo hídrico total (m³/mes)	Consumo hídrico total por animal (m³/mes-cabeza)	Total equinos	Consumo hídrico total (m³/mes)	Consumo hídrico total por animal (m³/mes-cabeza)
Cereté	7	17	2.4	1,386	4,158	3.0
Chimá	310	744	2.4	1,929	5,787	3.0
Chinú	369	886	2.4	4,616	13,848	3.0
Ciénaga de Oro	1,964	4,714	2.4	3,409	10,227	3.0
Cotorra	0	0	0.0	319	957	3.0
Ituango	25	60	2.4	6,455	19,365	3.0
Lorica	1,028	2,467	2.4	4,941	14,823	3.0
Momil	13	31	2.4	862	2,586	3.0
Montería	10,246	24,590	2.4	17,486	52,458	3.0
Purísima	8	19	2.4	565	1,695	3.0
Sahagún	867	2,081	2.4	7,118	21,354	3.0
San Andrés de Sotavento	0	0	0.0	1,889	5,667	3.0
San Antero	0	0	0.0	491	1,473	3.0
San Bernardo del Viento	704	1,690	2.4	1,130	3,390	3.0
San Carlos	684	1,642	2.4	2,420	7,260	3.0
San Pelayo	1,278	3,067	2.4	3,361	10,083	3.0
Tierralta	5,703	13,687	2.4	7,155	21,465	3.0
Tuchín	0	0	0.0	697	2,091	3.0
Valencia	906	2,174	2.4	3,517	10,551	3.0
Total	24,112	57,869	36.0	69,746	209,238	57.0

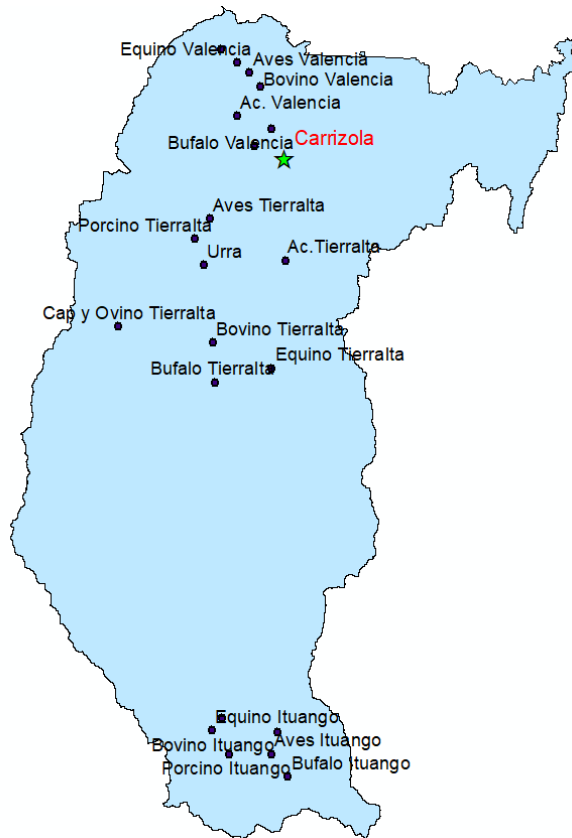
Tabla 46. Consumo de agua pecuario - caprinos y ovinos

Municipio	Total caprinos	Consumo hídrico total (m ³ /mes)	Consumo hídrico total por animal (m ³ /mes-cabeza)	Total ovinos	Consumo hídrico total (m ³ /mes)	Consumo hídrico total por animal (m ³ /mes-cabeza)
Cereté	10	5.40	0.54	2,055	1,109.70	0.54
Chimá	68	36.72	0.54	2,964	1,600.56	0.54
Chinú	97	52.38	0.54	6,175	3,334.50	0.54
Ciénaga de Oro	81	43.74	0.54	4,040	2,181.60	0.54
Cotorra	12	6.48	0.54	130	70.20	0.54
Ituango	5	2.70	0.54	115	62.10	0.54
Lorica	419	226.26	0.54	8,646	4,668.84	0.54
Momil	16	8.64	0.54	826	446.04	0.54
Montería	480	259.20	0.54	11,844	6,395.76	0.54
Purísima	15	8.10	0.54	545	294.30	0.54
Sahagún	241	130.14	0.54	10,483	5,660.82	0.54
San Andrés de Sotavento	8	4.32	0.54	3,955	2,135.70	0.54
San Antero	119	64.26	0.54	665	359.10	0.54
San Bernardo del Viento	113	61.02	0.54	1,042	562.68	0.54
San Carlos	121	65.34	0.54	2,062	1,113.48	0.54
San Pelayo	286	154.44	0.54	4,630	2,500.20	0.54
Tierralta	45	24.30	0.54	3,727	2,012.58	0.54
Tuchín	0	0.00	0.00	993	536.22	0.54
Valencia	36	19.44	0.54	1,294	698.76	0.54
Total	2,172	1,172.88	9.72	66,191	35,743.14	10.26



(a)

(b)



(c)

Figura 24. Esquema de la demanda de la cuenca, dividida por (a) cuenca baja; (b) cuenca media y; (c) Cuenca alta

La demanda en la cuenca por mes se encuentra en la Tabla 47, donde se aprecia que el mes con mayor consumo es marzo, debido a que se localiza dentro de los meses calurosos, lo cual hace que sea mayor el consumo de agua en la cuenca.

Tabla 47. Consumo de agua y demanda no satisfecha en la cuenca mensualmente

Mes	Consumo (m³)	Demanda no satisfecha (m³)
Ene-18	1,034,388.83	33,892.71
feb-18	932,762.04	32,648.10
mar-18	1,032,890.62	37,144.44
Abr 2018	987,794.33	28,420.31
may-18	1,030,081.85	33,935.17
jun-18	1,014,740.94	33,690.52
jul-18	1,007,041.94	28,664.96
Ago 2018	1,014,589.75	28,664.96
Set 2018	995,607.73	28,420.31
oct-18	1,028,661.58	28,664.96
nov-18	983,034.12	28,420.31
Dic 2018	1,014,589.75	28,734.80
Total	12,076,183.48	371,301.55

A pesar de existir caudales importantes en el río a lo largo del año, existe déficit en el mismo en algunas zonas debido a que no hay acceso al recurso por lo alejado que se encuentra de la corriente o simplemente que allí la demanda supera a la oferta del recurso hídrico. Los valores mensualizados de esta demanda no cubierta se encuentran en la Tabla 47.

En la Figura 25 se muestran los resultados del promedio mensual multianual de la evapotranspiración potencial y real, así como la diferencia entre estas dos. Se observa que el mayor valor de la evapotranspiración real se presenta en el mes de agosto con un valor de 14 m³/s.

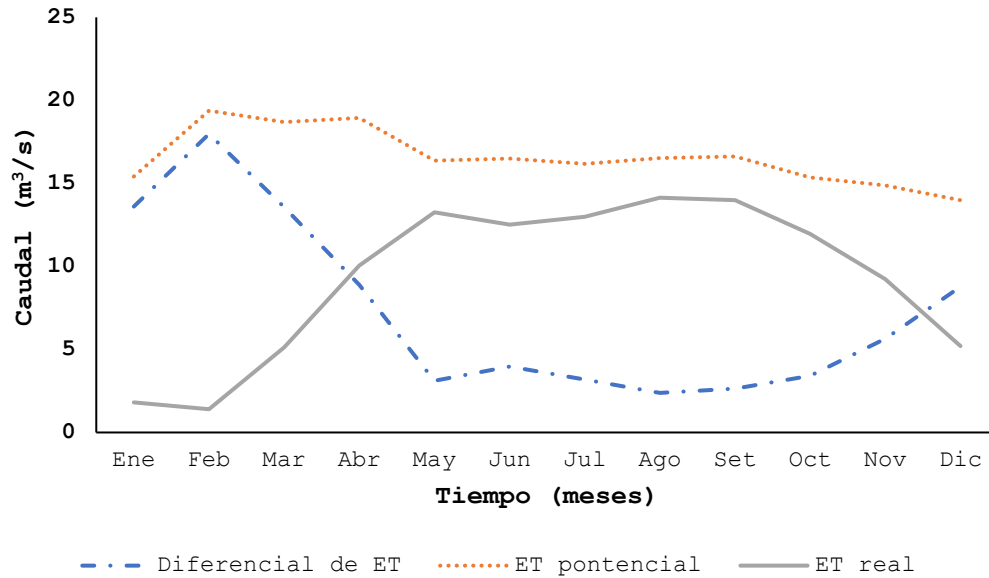


Figura 25. Evapotranspiración real, potencial y diferencial de ET

Teniendo en cuenta los meses de demanda no satisfecha, es importante ubicar dichos sitios para buscar alternativas de solución que permitan garantizar el suministro de agua para todos los usos en los municipios pertenecientes a la cuenca. Los municipios que se encuentran con estos problemas de suministro son Ciénaga de Oro, Chimá, Chinú, San Carlos, Sahagún y San Antero ya que se ubican en extremos alejados del cauce del río. Por otro lado, Montería, Valencia y Tierralta tienen menos problemas de suministro, pero se deben plantear estrategias para el abastecimiento de agua para todos estos municipios.

9.4 Conclusiones

En el desarrollo de acciones para llevar a cabo una GIRH, uno de los insumos más importantes es un modelo hidrológico que involucre las variables principales de aportes y demandas de agua presentes en la cuenca de estudio.

El río Sinú a pesar de ser una cuenca muy estudiada, requiere la toma de acciones encaminadas a resolver la problemática de las zonas que presentan escasez de suministro del recurso. Estas dificultades en el suministro vienen relacionadas con la variabilidad de las lluvias en la zona y que se pueden resolver mediante el aprovechamiento del agua lluvia.

Sin embargo, para que se puedan tomar acciones deben existir incentivos gubernamentales a los granjeros que implementen metodologías de aprovechamiento de agua. Estos incentivos pueden ser el acceso a recursos económicos o disminución en el pago de los impuestos.

Además, deben existir estrategias de educación a los usuarios del recurso hídrico, especialmente a los que se encuentran en las zonas aledañas al río y que sobreexplotan el recurso y están legalizados como usuarios frente a las entidades competentes.

Otro aspecto que perjudica la cuenca es el cambio en el uso del suelo, donde zonas de bosques se han convertido en pastoreo para la tenencia de ganado bovino, el cual se observó consume grandes cantidades de agua.

Finalmente, este modelo puede ser usado para realizar modelaciones a futuro bajo diferentes condiciones de consumo como el aumento de la población, escenarios de cambio climático y cambios en la demanda agrícola y pecuaria.

10 Operatividad de la normatividad existente

10.1 Introducción

La gestión integral del recurso hídrica (GIRH), se define como la integración y la gestión de los recursos hídricos integrando los aspectos sociales, ecológicos e infraestructura en la búsqueda del desarrollo sostenible. Para una GIRH, los entes gubernamentales requieren de un componente normativo para ser aplicada en las cuencas hidrográficas. Por otro lado, la inadecuada gestión de los recursos hídricos ha conllevado a una serie de problemas relacionados con la salud, los aspectos socioeconómicos y el ambiente, que deben ser resueltos y por lo tanto involucrarse en las políticas [142,450].

Dentro del proceso de la GIRH es importante identificar los actores principales como son grupo de expertos, organizaciones internacionales y partes interesadas, para la difusión de las políticas gubernamentales, promover el concepto de la GIRH y la generación e intercambio de conocimiento [451]. La finalidad de la GIRH es proteger los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, siempre sobre la base de una cuenca hidrográfica [452]. Sin embargo, las reformas y políticas sobre la GIRH han sido criticadas ya que no consideran el contexto de las realidades locales o su legitimación al implementarla, lo cual conlleva a conflictos sociales, y por lo tanto se deben involucrar aspectos como la paz y la seguridad [152].

Adicional a lo anterior, la GIRH se ha visto afectada por las crisis que se han generado a causa del crecimiento demográfico contaminación (agua, aire y suelo), deforestación de las cuencas hidrográficas (contempladas como unidad de estudios esencial en la GIRH), y el aumento de los conflictos derivados del uso del

suelo y del agua [453]. Lo anterior se ha visto exacerbado por la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y el cambio climático al que se encuentra sometido el mundo y genera problemas de inundaciones y escasez del recurso hídrico en diferentes zonas y épocas [453-455].

En el marco de la GIRH, se debe propiciar la participación de las partes interesadas, y por lo tanto, se ha establecido la importancia de los comités de cuenca, sin embargo es insuficiente para que exista una interacción entre todas las partes interesadas en la búsqueda de mejorar la implementación de las políticas del agua [456]. De igual manera, existe la necesidad de vincular el alcance institucional, las influencias hidrológicas y respuestas hidrológicas en el marco de la GIRH [457]. Asimismo, dentro de un proceso de toma de decisiones por consenso entre partes interesadas en la gestión del recurso hídrico, debe existir un actor dominante que coordine y establezca la agenda política, buscando equilibrar los puntos de vista, a pesar de que esto tiende a aumentar la complejidad de las negociaciones que se estén dando en la cuenca hidrográfica para sugestión [458,459].

Teniendo en cuenta todo lo anterior, es importante identificar y establecer una clasificación prioritaria de los factores fundamentales de las reformas que afecten las reformas en el marco de la gestión integral del recurso hídrico, para lo cual la matriz DOFA (debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas), ha resultado ser una buena estrategia de implementación para la planificación de la GIRH [460]. Es por lo cual se deben seguir con políticas y soluciones pragmáticas a los muchos desafíos individuales que se abordan desde la gestión del agua en el mundo [432].

Dentro de las opciones para una GIRH, se encuentran los RWHS, ya que pueden ser utilizados para el suministro en los sitios donde los recursos hídricos han sido sobreexplotados o existen problemas de escasez, ya que pueden ser considerados como fuentes alternativas de agua y se diseñaría una red de distribución óptima mediante el uso de fuentes naturales y los RWHS para que funcionen como un sistema integrado [155].

El principal inconveniente para la gestión de los recursos hídricos ha sido la vaguedad que existe en el concepto de la GIRH y las dificultades existentes con relación a su implementación operativa, ya se considera que define objetivos ambiciosos, que solamente pueden darse en un mundo ideal, pero que en la realidad no puede ser factible de cumplirse [461]. Siendo consecuentes con esto, se debe entonces, pensar en planificar y gestionar el almacenamiento, así como el uso de las aguas superficiales, subterráneas y RWHS, y por lo tanto, debe ser promovida por organizaciones e instituciones de gestión del agua, las cuales deben ser apoyadas por un fuerte liderazgo de los gobiernos [462].

En este orden de ideas, el presente capítulo analiza las políticas colombianas en la búsqueda de definir la importancia de estas y establecer si con ellas se logra la GIRH en el país.

10.2 Políticas en Colombia

Con el fin de determinar si la estructuración de de las políticas en Colombia conlleva a una adecuada planificación y gestión del recurso hídrico, se comienza con la determinación de las políticas existentes para este fin.

Dentro de la normatividad colombiana existen, leyes, decretos y resoluciones. Las leyes son normas hechas exclusivamente por el Congreso de la República que tiene aplicación en todo el país y

rigen los derechos y deberes de cualquier ciudadano [463]. El decreto es un tipo de acto administrativo emanado habitualmente del poder ejecutivo, y que generalmente posee un contenido normativo reglamentario, por lo que su rango es jerárquicamente inferior a las leyes [464]. Finalmente, la resolución puede ser creada por un tribunal, jefe de servicio o una autoridad, que tiene un carácter general, permanente y obligatorio. Sirven para reforzar las leyes.

En este orden de ideas, en el marco del recurso hídrico, existen 4 leyes, 21 decretos y 6 resoluciones que se listan y describen en la Tabla 48, Tabla 49 y Tabla 50.

Tabla 48. Leyes del sector recurso hídrico en Colombia

Ley	Año	Descripción
23	1973	Se crea Código de los Recursos Naturales con el objeto de prevenir y controlar la contaminación del ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos.
10	1978	Enfocado hacia el mar territorial, como zona económica exclusiva, la plataforma continental y la soberanía del territorio.
99	1993	Creación del Ministerio de Ambiente y reordenación del sector público, es una política ambiental.
373	1997	Programa de uso eficiente y ahorro del agua dirigido a las entidades encargadas de la prestación de servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico

Tabla 49. Decretos del sector del recurso hídrico en Colombia

Decreto	Año	Descripción
2811	1974	Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de protección del medio ambiente para la reglamentación y uso de las aguas.
1499	1977	Los predios rurales cumplen con las disposiciones de calidad, cantidad y protección de la cuenca hidrográfica.
1541	1978	Prevención de la contaminación en el medio marino.
1875	1979	
1594	1984	Usos del agua y residuos líquidos, específicamente sustancias de interés, destinación del recurso y su calidad, concesiones, vertimientos de residuos líquido, sus permisos, vigilancia, control y sanciones.
1600	1994	Reglamenta el Sistema Nacional Ambiental (SINA) que comprende los datos, estadísticas sistemas, modelos, información

Decreto	Año	Descripción
		documental y los reglamentos y protocolos para el acopio y manejo de la información.
1933	1994	Del manejo de las regalías obtenidas de empresas públicas, privadas o mixtas, propietarias de plantas de generación de energía eléctrica o termoeléctrica.
1929	2002	Proceso a seguir para la elaboración del plan de ordenamiento de cuencas.
1604	2002	Se establecen comisiones para la elaboración del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMC).
3100	2003	Reglamentación de las tasas retributivas por uso directo del agua como receptor de vertimientos puntuales. Además, se habla de la priorización de las corrientes.
155	2004	Tasas por uso de aguas superficiales, estuarinas y subterráneas (acuíferos litorales).
1443	2004	Medidas ambientales para el manejo de plaguicidas y prevención y manejo seguro de los desechos y residuos peligrosos provenientes de estos.
3440	2004	Cobro de tasa retributiva, pero además involucra el ordenamiento de los recursos hídricos.
4742	2005	Cálculo del monto de la tasa retributiva.
2570	2006	Acreditación de los laboratorios para aceptar la información cuantitativa física, química y biótica de las aguas.
1900	2006	Regla la destinación del 1% del valor de todos los proyectos para la protección de cuencas, en aquellos donde se requiera el uso del agua de las fuentes naturales y necesiten licencia ambiental.
1323	2007	Se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) para monitoreo de la cantidad y calidad del agua.
1324	2007	Se crea el registro de usuarios del recurso hídrico para inventario de los usuarios que lo usan y aprovechan.
1480	2007	Priorización nacional del ordenamiento e intervención de algunas cuencas hidrográficas (entre las cuales se encuentra el río Sinú)
1575	2007	Sistema para la protección y control de calidad del agua para consumo humano, caracterización y criterios de calidad del agua y sistema de control y vigilancia.
3930	2010	Uso, ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos al recurso hídrico, suelo y alcantarillados.
1640	2012	Reglamentación de los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos.
1075	2015	Habla sobre el ordenamiento de las cuencas hidrográficas, aspectos de calidad del recurso hídrico y otras consideraciones ambientales.
2245	2017	Establece los criterios técnicos con base en los cuales las autoridades ambientales competentes realizarán los estudios para el acotamiento de las rondas hídricas.

Tabla 50. Resoluciones del sector recurso hídrico en Colombia

Resolución	Año	Descripción
104	2003	Establece parámetros y criterios para la clasificación y priorización de cuencas hidrográficas con fines de ordenación (hidrológicos, físicos/bióticos y socioculturales).
2145	2005	Presentación de planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), ante la autoridad ambiental.
872	2006	Cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas.

Resolución	Año	Descripción
2115	2007	Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
75	2011	Estado de cumplimiento de la norma de vertimiento puntual al alcantarillado público.
509	2013	Conformación de los consejos de cuenca y su participación y su participación en las fases del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA).
1907	2013	Guía para la formulación de los planes de ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas
631	2015	Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
751	2018	Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico continental superficial - PORH.
957	2018	Se adopta la guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia.
958	2018	Se incorpora a la resolución 751 de 2018 la Guía Técnica para la formulación de Planes de Ordenamientos del Recurso Hídrico continental superficial - PORH.

Además de estas leyes, decretos y resoluciones, la Constitución Política Colombiana de 1991 es considerada una constitución ecológica, ya que en los artículos 79 y 80, dentro de los deberes y derechos, se contemplan diversos puntos del aspecto ambiental, siendo importante resaltar la planificación, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales. Sin embargo, es la ley 23 de 1973 donde se inician las primeras nociones de protección del agua tratando de evitar su contaminación. Luego, en la ley 23 de 1993, es donde se puede decir que comienzan las acciones de regulación al crearse la conformación de diversas instituciones dependientes del Estado Colombiano para la administración y protección del medio ambiente. En esta ley, se dan entonces, las directivas para la creación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente, en adelante) y las Corporaciones Ambientales Regionales (CAR, en adelante). Con ambas instituciones Minambiente y CAR se pretende el manejo ambiental descentralizado, democrático y participativo, enfocándolo hacia un desarrollo sostenible.

En términos generales, el conjunto de leyes, decretos y resoluciones, pretenden establecer un ordenamiento del recurso hídrico que involucre la cantidad y calidad, los actores que participen de la administración y uso del agua en la búsqueda de tener una GIRH que permita su conservación. Teniendo en cuenta estas leyes, decretos y resoluciones y buscando una organización que permita a los actores gubernamentales, públicos y privados, tener una metodología que permita guiarlos hacia una GIRH, para el año 2010, se desarrolla la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), la cual tiene una vigencia de 12 años (2010-2022), lo cual significa que la política se encuentra por expirar.

10.3 Política Nacional para la GIRH (PNGIRH)

El principal inconveniente en los países al intentar desarrollar un procedimiento para la gestión del recurso hídrico consiste en sí mismo en establecer una definición para la GIRH. En Colombia, se ha adoptado la definición del Global Water Partnership (GWP), quien la define como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas globales” [465].

El objetivo principal de la PNGIRH es garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, con una gestión y uso eficiente y eficaz conservando los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, y considerando el agua como factor de desarrollo económico y bienestar social siendo participativos e inclusivos. Para obtener la meta de este objetivo principal, se plantearon seis objetivos específicos relacionados con la oferta, demanda, calidad, riesgos (asociados a la oferta y disponibilidad del

agua), fortalecimiento institucional y gobernabilidad. Dentro de cada uno de estos objetivos específicos se plantearon estrategias para su obtención y que se muestran en la Figura 26.

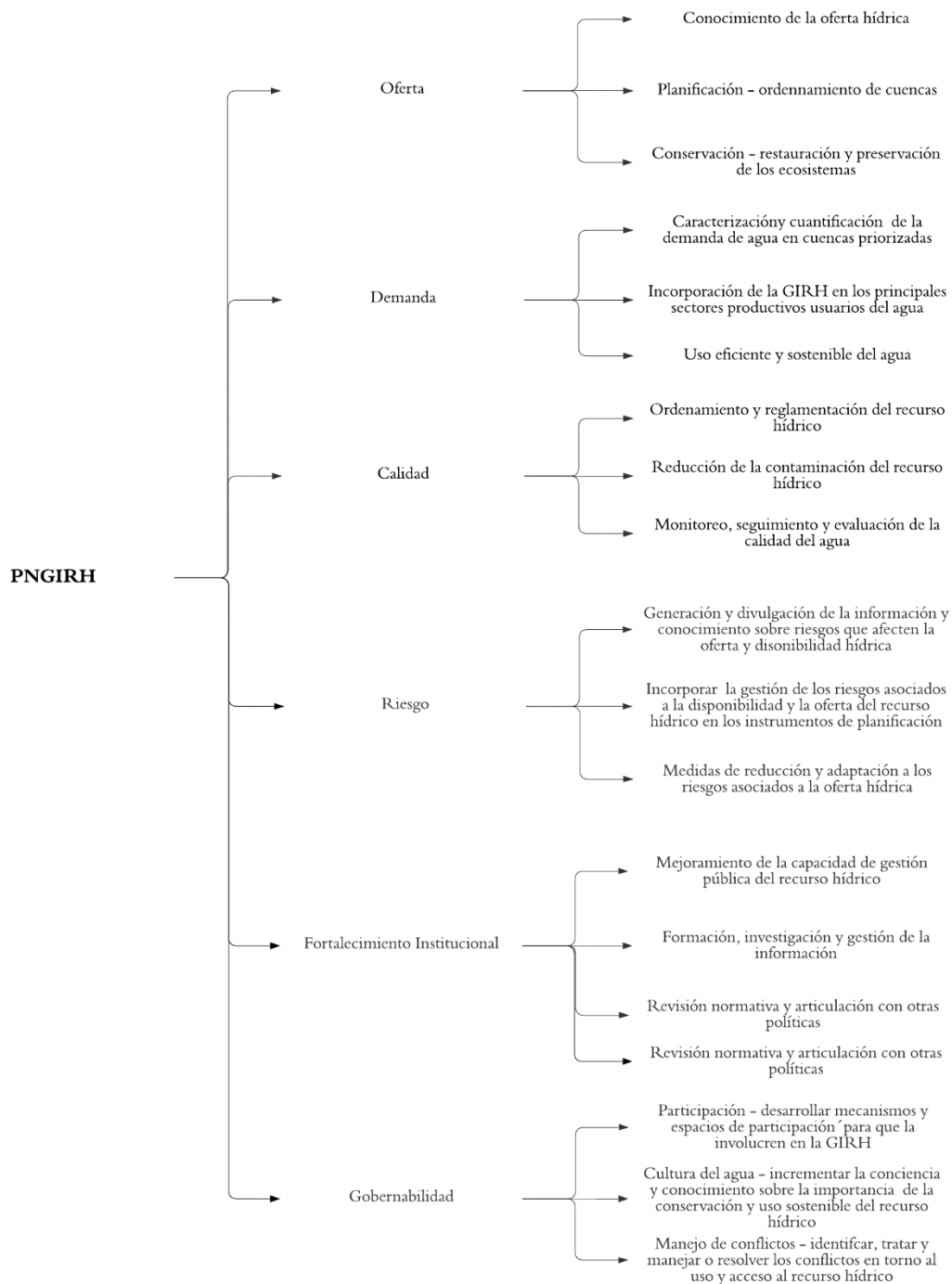


Figura 26. Política Nacional para la Gestión de los Recursos Hídricos - PNGIRH, sus objetivos y las respectivas estrategias de acción

Con el fin de alcanzar los objetivos y metas de la PNGIRH, se crea el Plan Hídrico Nacional (PHN) fase I y fase II, y ambas fases pretenden priorizar los programas, proyectos y actividades. Para realizar esta priorización, se realizaron talleres con los representantes de las cuatro (4) dimensiones de la gobernanza del agua: ambiental (autoridad ambiental), social (comunidad), territorial (legisladores y entes territoriales), y económico (sectores productivos).

El PNH prioriza 10 estrategias entre los 6 objetivos de la PNGIRH, distribuidos así: en oferta se tienen 3 estrategias; 2 en calidad y fortalecimiento institucional, dos estrategias y una en los otros 3 objetivos (demanda, riesgos y gobernabilidad), tal como se muestra en la Figura 27.

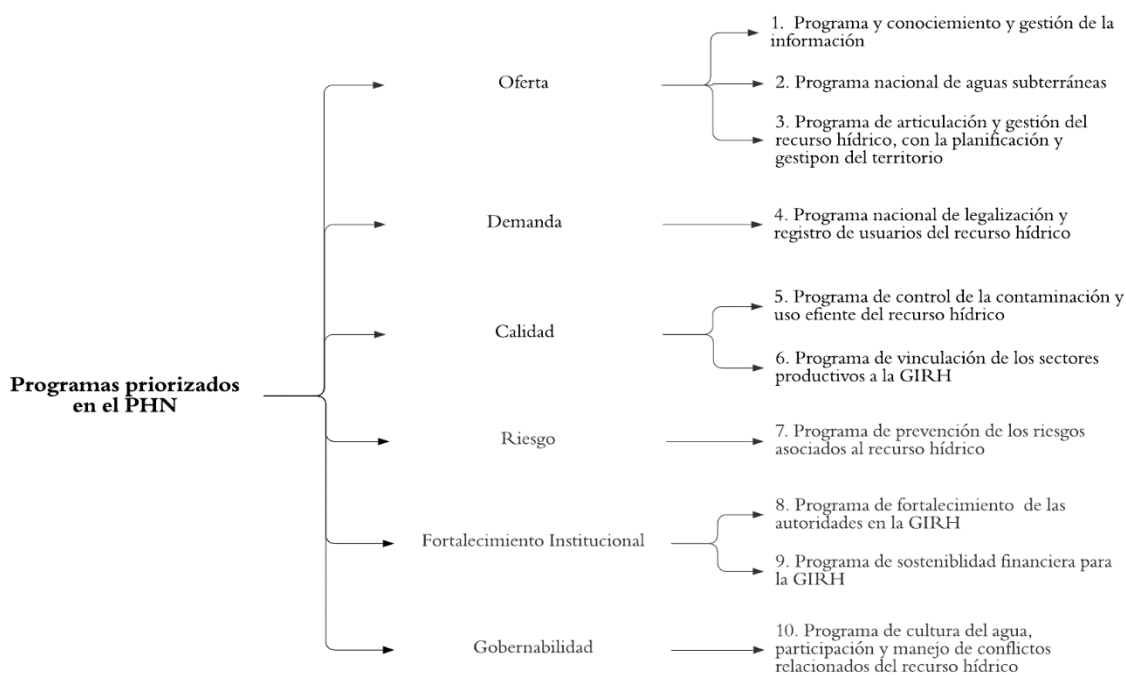


Figura 27. Estrategias priorizadas en las fases I y II del PHN

La priorización pretende orientar las acciones encaminadas hacia una GIRH, siendo importante conservar los servicios

ecosistémicos, tales como los servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte.

Para complementar la PNGIRH y PHN, se crea en el 2018 una guía técnica denominada Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), la cual está regida por las resoluciones 751 y 958 de 2018. Estas resoluciones se encuentran amparadas en uno de los decretos más importantes sobre los recursos naturales, el decreto 2811 de 1974, también se apoya en el decreto 1076 de 2015.

El PORH tiene como fin primordial fijar la destinación y uso de los cuerpos de agua continentales superficiales y marinos, establece normas, condiciones y programas de seguimiento para alcanzar y mantener los usos potenciales, además de conservar los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies, en un horizonte de 10 años [466]. Se deben tener cuatro (4) fases para la elaboración del PORH: Fase 1: declaratoria del ordenamiento del cuerpo de agua; Fase 2: diagnóstico de la cuenca priorizada; Fase 3: identificación de los usos potenciales del recurso hídrico; Fase 4: elaboración del PORH [466].

Paralelo a la creación del PORH, en 2018, se publica el documento plan de formación para la gestión integral del recurso hídrico, cuyo objetivo es promover el fortalecimiento de capacidades en los actores del agua, mediante un proceso sistemático de educación que propenda por la gobernanza del agua [467]. Este plan de formación se apoya en normas ambientales como son decreto 1076 de 2015, decreto 2811 de 1974 y ley 99 de 1993 y en normas relacionadas con la educación ley 115 de 1994 (estructuración del sistema educativo formal), ley 1064 de 2006 (estructuración de educación no formal), ley 1549 de 2012 (política nacional de educación ambiental), decreto 4904 de 2009

(educación no formal) y decreto 1075 de 2015 /desarrollar el proyecto ambiental escolar) [467].

El plan de formación para la GIRH sirve como ayuda para contribuir y dar cumplimiento a la PNGIRH y es una herramienta fundamental para fomentar procesos que buscan la promoción de una formación efectiva para la gobernanza del agua buscando generar un cambio de actitud en los usuarios y así lograr un manejo adecuada y conservación del recurso hídrico [467].

Las políticas nacionales en Colombia son consideradas adecuadas para permitir a los entes gubernamentales y todos aquellos sectores usuarios del agua a realizar una adecuada gestión integral del recurso hídrico en cada una de las cuencas del territorio colombiano.

Es importante destacar que dentro de las cuencas priorizadas para que se desarrollen estas políticas se encuentra la cuenca del río Sinú. En dicha cuenca se ha tratado de llevar a cabo cada uno de los 10 programa establecidos en el PHN, los cuales se pueden apreciar en la Figura 27. En este sentido, cada uno de estos aspectos del programa han sido desarrollados por la Corporación Autónoma de los valles del Sinú y San Jorge, sin embargo, aún se requieren acciones para mejorar la calidad de la información e incitar a los usuarios del recurso a que legalicen sus extracciones de agua en la cuenca, ya que en recorrido realizado en el marco del proyecto de tesis y al compararse con los datos de las concesiones de agua, no todas se encontraban legalizadas.

Uno de los problemas más frecuentes en la cuenca del río Sinú, es la apatía de los usuarios que mayor consumo de agua tienen, a asistir a las reuniones que realizan acerca de gobernanza del

agua, razón por la cual el desarrollo de los proyectos no llega a las conclusiones realmente necesarias.

10.4 Conclusiones

En Colombia se cuentan con las políticas necesarias y documentos que permiten desarrollar un adecuado marco para la gestión integral del recurso hídrico, sin embargo, se debe analizar su implementación, ya que no se obtienen los resultados esperados de la aplicación de estas.

Otro factor que influye en la implementación de las políticas y programas está relacionado con las condiciones de orden público en ciertas zonas de la cuenca, espacialmente en la parte alta donde existen grupos al margen de la ley que impiden que las labores de acompañamiento social se desarrollen satisfactoriamente y con todas las partes interesadas pertenecientes a la zona.

A lo anterior, se suma el flagelo que afecta a todos los países suramericanos y es la corrupción, ya que en gran medida los recursos económicos de las entidades gubernamentales no son destinados y dirigidos eficaz y eficientemente o los consultores no desarrollan a cabalidad la ejecución de las tareas que deberían abordar en este tipo de proyectos.

11 Conclusiones

El presente trabajo permitió en su capítulo 6, realizar un recorrido por las opciones que tienen los usuarios de las cuencas para llevar a cabo una Gestión Integral de los Recursos Hídrico en las zonas urbanas y rurales, concluyéndose que la captación del agua lluvia es una alternativa eficiente para mitigar los problemas de escasez del recurso, por un lado, y de abundancia por el otro.

Por otro lado, los modelos estocásticos permitieron aumentar el tamaño de las series de tiempo de precipitación que no tenían la longitud de las demás estaciones hasta el año de la modelación hidrológica. Se demostró que los modelos *SARIMA* pronosticaban adecuadamente la precipitación de cada una de las estaciones que se encuentran en la cuenca.

De igual manera, se analizó la escorrentía superficial, así como la demanda existente del recurso hídrico para desarrollar un modelo en WEAP que permita obtener las condiciones de suministro de agua en los diferentes sectores que se estudiaron.

Dentro de todos los planes para realizar una GIRH en una cuenca, juega un papel muy importante los entes gubernamentales y las posibles políticas que se desarrollen para mejorar las condiciones de cantidad del recurso hídrico. Sin embargo, aunque es importante el establecimiento de políticas, es mucho más importante la ejecución de estas.

Se observó que la mayor cantidad de agua se va hacia los sectores agropecuarios y que en las zonas donde había problemas de suministro de agua a poblaciones, ésta se genera por la deficiencia en la infraestructura de los sistemas de acueducto,

así como la gran cantidad de pérdidas que se generan en dicho sistema.

Finalmente, la concientización de las personas, es decir, educarlas para que se preocupen por el ahorro y uso eficiente del agua conlleva a mejorar las opciones de cantidad del suministro.

12 Referencias

1. Elfeki, A.M.M. Reducing concentration uncertainty using the coupled Markov chain approach. *Journal of Hydrology* **2006**, 317, 1-16, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.04.029.
2. Sanso, B.; Guenni, L. A Stochastic Model for Tropical Rainfall at a Single Location 1 Introduction. *Journal of Hydrology* **1999**, 214, 64-73.
3. Thyer, M.; Kuczera, G. A hidden Markov model for modelling long-term persistence in multi-site rainfall time series. 2. Real data analysis. *Journal of Hydrology* **2003**, 275, 27-48, doi:10.1016/S0022-1694(02)00411-0.
4. Toth, E.; Brath, A.; Montanari, A. Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology* **2000**, 239, 132-147, doi:10.1016/S0022-1694(00)00344-9.
5. Ochoa-Rivera, J.C. Prospecting droughts with stochastic artificial neural networks. *Journal of Hydrology* **2008**, 352, 174-180, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.01.006.
6. Lidén, R.; Harlin, J. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of Hydrology* **2000**, 238, 231-247, doi:10.1016/S0022-1694(00)00330-9.
7. Fathian, F.; Fard, A.F.; Ouarda, T.B.M.J.; Dinpashoh, Y.; Nadoushani, S.S.M. Modeling stream flow time series using nonlinear SETAR-GARCH models. *Journal of Hydrology* **2019**, 573, 82-97, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.03.072.
8. Dabral, P.P.; Saring, T.; Jhajharia, D. Time series models of monthly rainfall and temperature to detect climate change for Jorhat (Assam), India. *Global Nest Journal* **2016**, 18, 494-507.
9. Clark, D.B.; Mercado, L.M.; Sitch, S.; Jones, C.D.; Gedney, N.; Best, M.J.; Pryor, M.; Rooney, G.G.; Essery, R.L.H.; Blyth, E.; et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description - Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. *Geoscientific Model Development* **2011**, 4, 701-722, doi:10.5194/gmd-4-701-2011.
10. Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Applied hydrology*; Mc Graw Hill, Ed.; New York, NY, 1988; ISBN 0-07-010810-2.
11. Akay, H.; Koçyiğit, M.B.; Yanmaz, A.M. A Case Study for Determination of Hydrological Parameters in HEC-HMS in Computing Direct Runoff. In Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering; Turkey, 2016; pp. 1-7.
12. Akay, H.; Koçyiğit, M.B.; Yanmaz, A.M. A Case Study for Determination of Hydrological Parameters in HEC-HMS in Computing Direct Runoff. In Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering; Turkey, 2016; pp. 1-7.
13. Ahmadzadeh, H.; Morid, S.; Delavar, M.; Srinivasan, R. Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural Water Management* **2015**, 175, 15-28, doi:10.1016/j.agwat.2015.10.026.
14. Bressiani, D. de A.; Gassman, P.W.; Fernandes, J.G.; Garbossa, L.H.P.; Srinivasan, R.; Bonumá, N.B.; Mendiando, E.M. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* **2015**, 8, 1-27, doi:10.3965/j.ijabe.20150803.1765.
15. Dimova, G.; Tzanov, E.; Ninov, P.; Ribarova, I.; Kossida, M. Complementary use of the WEAP model to underpin the development of SEEAW physical water

- use and supply tables. *Procedia Engineering* **2014**, 70, 563-572, doi:10.1016/j.proeng.2014.02.062.
16. Salinas Villafañe, A.A.; Paz Rada, O. Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. *Revista Tecnología, Investigación y Docencia* **2011**, 6, 13.
 17. Londoño Arango, C. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales, caracterización, administración, Universidad del Tolima: Ibagué, 2001.
 18. Pareta, K.; Pareta, U. Quantitative Morphometric Analysis of a Watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) Data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences* **2011**, 2, 248-269.
 19. Wilson, J.; Chandrasekar, N.; Magesh, N.S. Morphometric Analysis of Major Sub-Watersheds in Aiyar & Karai Pottanar Basin, Central Tamil Nadu, India Using Remote Sensing & GIS Techniques. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science* **2012**, 2, 8-15.
 20. Mahmud, I.; Bari, S.H.; Ur Rahman, M.T. Monthly rainfall forecast of Bangladesh using autoregressive integrated moving average method. *Environmental Engineering Research* **2017**, 22, 162-168, doi:10.4491/eer.2016.075.
 21. Keller, D.E.; Fischer, A.M.; Frei, C.; Liniger, M.A.; Appenzeller, C.; Knutti, R. Stochastic modelling of spatially and temporally consistent daily precipitation time-series over complex topography. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **2014**, 11, 8737-8777, doi:10.5194/hessd-11-8737-2014.
 22. Sreedevi, P.D.; Owais, S.; Khan, H.H.; Ahmed, S. Morphometric Analysis of a Watershed of South India Using SRTM Data and GIS. *Journal Geological Society of India* **2009**, 73, 543-552, doi:10.1007/s12594-009-0038-4.
 23. Vörösmarty, C.J.; McIntyre, P.B.; Gessner, M.O.; Dudgeon, D.; Prusevich, a; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S.E.; Sullivan, C. a; Liermann, C.R.; et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* **2010**, 467, 555-561, doi:10.1038/nature09549.
 24. Koehler, A. Water use in LCA: Managing the planet's freshwater resources. *International Journal of Life Cycle Assessment* **2008**, 13, 451-455, doi:10.1007/s11367-008-0028-6.
 25. Medeiros, A.S.; Wood, P.; Wesche, S.D.; Bakaic, M.; Peters, J.F. Water security for northern peoples: review of threats to Arctic freshwater systems in Nunavut, Canada. *Reg Environ Change* **2017**, 17, 635-647, doi:10.1007/s10113-016-1084-2.
 26. Petersen-Perlman, J.D.; Veilleux, J.C.; Wolf, A.T. International water conflict and cooperation: challenges and opportunities. *Water International* **2017**, 42, 105-120, doi:10.1080/02508060.2017.1276041.
 27. Sainz Santamaría, J.; Becerra, M. Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica* **2002**, 67, 61-68.
 28. Hashim, H.; Hudzori, A.; Yusop, Z.; Ho, W.S. Simulation based programming for optimization of large-scale rainwater harvesting system: Malaysia case study. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, 80, 1-9, doi:10.1016/j.resconrec.2013.05.001.
 29. Dos Santos, S.; Adams, E.A.; Neville, G.; Wada, Y.; de Sherbinin, A.; Mullin Bernhardt, E.; Adamo, S.B. Urban growth and water access in sub-Saharan Africa: Progress, challenges, and emerging research directions. *Science of the Total Environment* **2017**, 607-608, 497-508, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.157.
 30. Allen, M.R.; Ingram, W.J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* **2002**, 419, 224-32, doi:10.1038/nature01092.
 31. Miranda, J.D. Cambio climático y patrones de precipitación: efecto sobre las comunidades vegetales semiáridas. *Ecosistemas* **2008**, 17, 161-165.

32. Garrote, L. Managing Water Resources to Adapt to Climate Change: Facing Uncertainty and Scarcity in a Changing Context. *Water Resources Management* **2017**, *31*, 2951-2963, doi:10.1007/s11269-017-1714-6.
33. Kristvik, E.; Muthanna, T.M.; Alfredsen, K. Assessment of future water availability under climate change, considering scenarios for population growth and ageing infrastructure. *Journal of Water and Climate Change* **2018**, 1-11, doi:10.2166/wcc.2018.096.
34. Dimri, A.P.; Thayyen, R.J.; Kibler, K.; Stanton, A.; Jain, S.K.; Tullos, D.; Singh, V.P. A review of atmospheric and land surface processes with emphasis on flood generation in the Southern Himalayan rivers. *Science of the Total Environment* **2016**, *556*, 98-115, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.02.206.
35. Rigo, T.; Llasat, M.C. A methodology for the classification of convective structures using meteorological radar: Application to heavy rainfall events on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula. *Natural Hazards and Earth System Science* **2004**, *4*, 59-68, doi:10.5194/nhess-4-59-2004.
36. De Paola, F.; Giugni, M.; Cornacchia, M.E.; Libralato, G.; Lofrano, G. A rainfall data analysis for the archeological drawing of the Augustan aqueduct route. *Journal of Cultural Heritage* **2016**, *19*, 395-401, doi:10.1016/j.culher.2016.01.006.
37. Domínguez-Mora, R.; Arganis-Juárez, M.L.; Mendoza-Reséndiz, A.; Carrizosa-Elizondo, E.; Echavarría-Soto, B. Storms Generator Method That Preserves Their Historical Statistical Characteristics. Application To Mexico City Basin Daily Rainfall Fields. *Atmósfera* **2013**, *26*, 27-43, doi:10.1016/S0187-6236(13)71060-9.
38. Köppen, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle). *Petermanns geographische Mitteilungen* 1918, *64*, 193-203.
39. Appan, A. A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water* **2000**, *1*, 317-321, doi:10.1016/S1462-0758(00)00025-X.
40. Vohland, K.; Barry, B. A review of in situ rainwater harvesting (RWH) practices modifying landscape functions in African drylands. *Agriculture , Ecosystems and Environment* **2009**, *131*, 119-127, doi:10.1016/j.agee.2009.01.010.
41. Gikas, G.D.; Tsihrintzis, V.A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology* **2012**, 466-467, 115-126, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.08.020.
42. Nachshon, U.; Netzer, L.; Livshitz, Y. Land cover properties and rain water harvesting in urban environments. *Sustainable Cities and Society* **2016**, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.008.
43. Oweis, T.; Hachum, A. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management* **2006**, *80*, 57-73, doi:10.1016/j.agwat.2005.07.004.
44. Salem, H.M.; Valero, C.; Muñoz, M.Á.; Gil-Rodríguez, M. Effect of integrated reservoir tillage for in-situ rainwater harvesting and other tillage practices on soil physical properties. *Soil and Tillage Research* **2015**, *151*, 50-60, doi:10.1016/j.still.2015.02.009.
45. Resources, A.O. of the U.N.S.; Service, C.; Land, A.O. of the U.N.; Division, W.D. *Soil tillage in Africa: needs and challenges*; Food & Agriculture Org.: Rome, Italy, 1993;
46. Pacey, A.; Cullis, A. *Rainwater harvesting: the collection of rainfall and runoff in rural areas.*; Intermediate technology publications, 1986;
47. Mekonnen, M.; Melesse, A.M.; Keesstra, S.D. Spatial Runoff Estimation and Mapping of Potential Water Harvesting Sites: A GIS and Remote Sensing Perspective, Northwest Ethiopia. In *Landscape Dynamics, Soils and*

- Hydrological Processes in Varied Climates*; Melesse, A.M., Abtew, W., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2016; pp. 565-584 ISBN 978-3-319-18786-0.
48. Domènech, L.; Saurí, D. A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production* **2011**, *19*, 598-608, doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.010.
 49. Zeng, B.; Tan, H. qiao; Wu, L. Juan A New Approach to Urban Rainwater Management. *Journal of China University of Mining and Technology* **2007**, *17*, 82-84, doi:10.1016/S1006-1266(07)60018-2.
 50. Basinger, M.; Montalto, F.; Lall, U. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology* **2010**, *392*, 105-118, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.039.
 51. Lara, J.; Torres, A.; Campos, M.; Duarte, L.; Echeverri, J.; Villegas, P. Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá) Using Rainwater for Irrigation , Hard Surface & Façade Cleaning at Pontificia Universidad Javeriana ' s. *Pontificia Universidad Javeriana* **2007**, *11*, 193-202, doi:10.1144/929.
 52. Rashidi Mehrabadi, M.H.; Saghafian, B.; Haghghi Fashi, F. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *73*, 86-93, doi:10.1016/j.resconrec.2013.01.015.
 53. Chilton, J.C.; Maidment, G.G.; Marriott, D.; Francis, A.; Tobias, G. Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water* **2000**, *1*, 345-354, doi:10.1016/S1462-0758(00)00032-7.
 54. Gurung, T.R.; Sharma, A. Communal rainwater tank systems design and economics of scale. *Journal of Cleaner Production* **2014**, *67*, 26-36, doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.020.
 55. Karpouzoglou, T.; Barron, J. A global and regional perspective of rainwater harvesting in sub-Saharan Africa's rainfed farming systems. *Physics and Chemistry of the Earth* **2014**, *72*, 43-53, doi:10.1016/j.pce.2014.09.009.
 56. de Simon, E.; Ripoll, Ma A.; Bocio, I.; Navarro, F. B.; Gallego, E. Aprovechamiento de escorrentías superficiales, mediante la formación de microcuencas, en repoblaciones de zonas semiáridas. *Congresos-CARGA ...* **2001**.
 57. Taddele Dile, Y.; Karlberg, L.; Daggupati, P.; Srinivasan, R.; Wiberg, D.; Rockström, J. Assessing the implications of water harvesting intensification on upstream-downstream ecosystem services: A case study in the Lake Tana basin. *Science of the Total Environment* **2016**, *542*, 22-35, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.10.065.
 58. Napoli, M.; Cecchi, S.; Orlandini, S.; Zanchi, C.A. Determining potential rainwater harvesting sites using a continuous runoff potential accounting procedure and GIS techniques in central Italy. *Agricultural Water Management* **2014**, *141*, 55-65, doi:10.1016/j.agwat.2014.04.012.
 59. De Kwaadsteniet, M.; Dobrowsky, P.H.; Van Deventer, A.; Khan, W.; Cloete, T.E. Domestic rainwater harvesting: Microbial and chemical water quality and point-of-use treatment systems. *Water, Air, and Soil Pollution* **2013**, *224*, doi:10.1007/s11270-013-1629-7.
 60. Dobrowsky, P.H.; Carstens, M.; De Villiers, J.; Cloete, T.E.; Khan, W. Efficiency of a closed-coupled solar pasteurization system in treating roof harvested rainwater. *Science of the Total Environment* **2015**, *536*, 206-214, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.126.
 61. Leong, J.Y.C.; Chong, M.N.; Poh, P.E.; Hermawan, A.; Talei, A. Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in

- enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *143*, 64-75, doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.149.
62. Lee, J.Y.; Bak, G.; Han, M. Quality of roof-harvested rainwater - Comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution* **2012**, *162*, 422-429, doi:10.1016/j.envpol.2011.12.005.
 63. Farreny, R.; Morales-Pinzón, T.; Guisasola, A.; Tayà, C.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research* **2011**, *45*, 3245-3254, doi:10.1016/j.watres.2011.03.036.
 64. Lee, M.; Kim, M.; Kim, Y.; Han, M. Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes: A case study in rural Vietnam. *Journal of Environmental Management* **2017**, *200*, 400-406, doi:10.1016/j.jenvman.2017.05.072.
 65. Nosrati, K. Identification of a water quality indicator for urban roof runoff. *Sustainability of Water Quality and Ecology* **2017**, doi:10.1016/j.swaqe.2017.07.001.
 66. Alamdari, N.; Sample, D.J.; Liu, J.; Ross, A. Assessing climate change impacts on the reliability of rainwater harvesting systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *132*, 178-189, doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.013.
 67. FAO *Feasibility study of rainwater harvesting for agriculture in the Caribbean subregion*; FAO, 2014;
 68. Oweis, T.; Hachum, A.; Kijne, J. *Water harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas*; International Water Management Institute: Colombo, Sri Lanka, 1999; ISBN 9290903783.
 69. Oweis, T.; Prinz, D.; Hachum, A.Y. *Rainwater harvesting for agriculture in the dry areas*; Taylor & Francis: London, UK, 2012; ISBN 0415621143.
 70. FAO *Strengthening agricultural water efficiency and productivity on African and global level*; FAO: Rome, 2016; ISBN 9789251093504.
 71. Critchley, W.; Siegert, K.; Chapman, C.; Finkel, M. *Water harvesting: A manual for design and construction of water harvesting schemes for plant production*; First.; FAO: Rome, 1991; ISBN 9783905835359.
 72. Steenbergen, F. van; Tuinhof, A. *Managing the water buffer for development and climate change adaptation: groundwater recharge, retention, reuse and rainwater storage*; Michael van der Valk, Ed.; 3rd ed.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2010; ISBN 9781604138795.
 73. Norton, L.D.; Chaudhari, K.; Flanagan, D. Erosion Control Using Soil Amendments and Other Low Cost Methods Prior to Establishment of Vegetation. In *Proceedings of the 12th ISCO Conference*; Beijing, 2002; p. 6.
 74. Ventura, E.; Norton, D.; Ward, K.; López-Bautista, M.; Tapia-Naranjo, A. "In Situ" water harvesting for crop production in semiarid regions. In *Proceedings of the Proc., XI IRCSA CONFERENCE*; International Conference on Rainwater Catchment Systems Association: Texcoco, México, 2003; pp. 1-23.
 75. Gupta, K.K.; Deelstra, J.; Sharma, K.D. Estimation of water harvesting potential for a semiarid area using GIS and remote sensing. *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems (Proceedings of the Rabat Symposium S3)*. *IAHS Publ* **1997**, No. 242, 53-62.
 76. Srivastava, R.C. Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas. *Agricultural Water Management* **2001**, *47*, 37-53, doi:10.1016/S0378-3774(00)00095-0.
 77. Senay, G.B.; Verdin, J.P. Developing index maps of water-harvest potential in Africa. *Applied Engineering in Agriculture* **2004**, *20*, 789-800.
 78. de Winnaar, G.; Jewitt, G.P.W.; Horan, M. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin,

- South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* **2007**, *32*, 1058-1067, doi:10.1016/j.pce.2007.07.009.
79. Forzieri, G.; Gardenti, M.; Caparrini, F.; Castelli, F. A methodology for the pre-selection of suitable sites for surface and underground small dams in arid areas: A case study in the region of Kidal, Mali. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2008**, *33*, 74-85, doi:10.1016/j.pce.2007.04.014.
 80. Roy, D.; Panda, S.N.; Panigrahi, B. Water balance simulation model for optimal sizing of on-farm reservoir in rainfed farming system. *Computers and Electronics in Agriculture* **2009**, *65*, 114-124, doi:10.1016/j.compag.2008.08.005.
 81. Sturm, M.; Zimmermann, M.; Schütz, K.; Urban, W.; Hartung, H. Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth* **2009**, *34*, 776-785, doi:10.1016/j.pce.2009.07.004.
 82. Al-Daghastani Water harvesting search in Ninevah governorate using remote sensing data. **2010**.
 83. Salih, S.A.; Mehdi Al-Tarif, A.S. Using of GIS Spatial Analyses to Study the Selected Location for Dam Reservoir on Wadi Al-Jirnaf, West of Shirqat Area, Iraq. *Journal of Geographic Information System* **2012**, *04*, 117-127, doi:10.4236/jgis.2012.42016.
 84. Ziadat, F.; Bruggeman, A.; Oweis, T.; Haddad, N.; Mazahreh, S.; Sartawi, W.; Syuof, M. A Participatory GIS Approach for Assessing Land Suitability for Rainwater Harvesting in an Arid Rangeland Environment. *Arid Land Research and Management* **2012**, *26*, 297-311, doi:10.1080/15324982.2012.709214.
 85. Jayasuriya, N.; Navaratne, C.M.; Nandasiri Weerasignhe, K.D.; Nawarathna, B.; Adams, R. Roof Runoff Capture for Home Garden Crop Cultivation in Sri Lanka. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **2014**, *140*, 05014004-1 a 05014004-8, doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000711.
 86. Jabr, W.M.; El-Awar, F.A. Gis and analytic hierarchy process for siting water harvesting reservoirs. *Water* **2015**, *122*, 515-523.
 87. Mahmoud, S.H.; Tang, X. Monitoring prospective sites for rainwater harvesting and stormwater management in the United Kingdom using a GIS-based decision support system. *Environmental Earth Sciences* **2015**, *73*, 8621-8638, doi:10.1007/s12665-015-4026-2.
 88. Adham, A.; Riksen, M.; Ouessar, M.; Ritsema, C.J. A methodology to assess and evaluate rainwater harvesting techniques in (semi-) arid regions. *Water (Switzerland)* **2016**, *8*, 1-23, doi:10.3390/w8050198.
 89. Sayl, K.N.; Muhammad, N.S.; Yaseen, Z.M.; El-shafie, A. Estimation the Physical Variables of Rainwater Harvesting System Using Integrated GIS-Based Remote Sensing Approach. *Water Resources Management* **2016**, *30*, 3299-3313, doi:10.1007/s11269-016-1350-6.
 90. Mahmood, A.; Hossain, F. Feasibility of managed domestic rainwater harvesting in South Asian rural areas using remote sensing. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *125*, 157-168, doi:10.1016/j.resconrec.2017.06.013.
 91. Terêncio, D.P.S.; Sanches Fernandes, L.F.; Cortes, R.M.V.; Pacheco, F.A.L. Improved framework model to allocate optimal rainwater harvesting sites in small watersheds for agro-forestry uses. *Journal of Hydrology* **2017**, *550*, 318-330, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.05.003.
 92. Terêncio, D.P.S.; Sanches Fernandes, L.F.; Cortes, R.M.V.; Moura, J.P.; Pacheco, F.A.L. Rainwater harvesting in catchments for agro-forestry uses: A study focused on the balance between sustainability values and storage capacity. *Science of the Total Environment* **2018**, *613-614*, 1079-1092, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.198.

93. Grum, B.; Hessel, R.; Kessler, A.; Woldearegay, K.; Yazew, E.; Ritsema, C.; Geissen, V. A decision support approach for the selection and implementation of water harvesting techniques in arid and semi-arid regions. *Agricultural Water Management* **2016**, *173*, 35-47, doi:10.1016/j.agwat.2016.04.018.
94. Bhatnagar, P.R.; Srivastava, R.C.; Bhatnagar, V.K. Management of runoff stored in small tanks for transplanted rice production in the mid-hills of Northwest Himalaya. *Agricultural Water Management* **1996**, *30*, 107-118, doi:10.1016/0378-3774(95)01204-4.
95. Oweis, T.; Oberle, A.; Prinz, D. Determination of potential sites and methods for water harvesting in Central Syria. *Advances in GeoEcology* **1998**, 83-88.
96. Schiettecatte, W.; Ouassar, M.; Gabriels, D.; Tanghe, S.; Heirman, S.; Abdelli, F. Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: A case study on a micro catchment in southeastern Tunisia. *Journal of Arid Environments* **2005**, *61*, 297-313, doi:10.1016/j.jaridenv.2004.09.022.
97. Ziadat, F.M.; Mazahreh, S.S.; Oweis, T.Y.; Bruggeman, A. A GIS-based Approach for Assessing Water Harvesting Suitability in a Badia Benchmark Watershed in Jordan. In Proceedings of the 14th International Soil Conservation Organization Conference; ISCO: Marrakech, Morocco, 2006; Vol. 2006, pp. 1-4.
98. Mbilinyi, B.P.; Tumbo, S.D.; Mahoo, H.F.; Mkiramwinyi, F.O. GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth* **2007**, *32*, 1074-1081, doi:10.1016/j.pce.2007.07.014.
99. Al Ali, Y.; Touma, J.; Zante, P.; Nasri, S.; Albergel, J. Water and sediment balances of a contour bench terracing system in a semi-arid cultivated zone (El Gouazine, central Tunisia). *Hydrological Sciences Journal* **2008**, *53*, 883-892, doi:10.1623/hysj.53.4.883.
100. Bakir, M.; Xingnan, Z. GIS and remote sensing applications for rainwater harvesting in the syrian desert (al-badia). In Proceedings of the 12th International Water Technology Conference, ...; 2008; pp. 1-10.
101. Al-Seekh, S.H.; Mohammad, A.G. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties. *Environmental Management* **2009**, *44*, 37-45, doi:10.1007/s00267-009-9310-z.
102. Bekele Awulachew, S.; Lemperiere, P.; Tulu, T. *Training manual on agricultural water management*; 2009;
103. Mechlia, N. Ben; Oweis, T.; Masmoudi, M.; Khatteli, H.; Ouassar, M.; Sghaier, N.; Anane, M.; Sghaier, M. *Assessment of supplemental irrigation and water harvesting potential: Methodologies and case studies from Tunisia.*; ICARDA: Aleppo, 2009; ISBN 92 9127 222-1.
104. Previati, M.; Bevilacqua, I.; Canone, D.; Ferraris, S.; Haverkamp, R. Evaluation of soil water storage efficiency for rainfall harvesting on hillslope micro-basins built using time domain reflectometry measurements. *Agricultural Water Management* **2010**, *97*, 449-456, doi:10.1016/j.agwat.2009.11.004.
105. Al-Shamiri, A.; Ziadat, F.M. Soil-landscape modeling and land suitability evaluation: The case of rainwater harvesting in a dry rangeland environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2012**, 157-164, doi:10.1016/j.jag.2012.01.005.
106. Krois, J.; Schulte, A. GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography* **2014**, *51*, 131-142, doi:10.1016/j.apgeog.2014.04.006.
107. Mahmoud, S.H.; Alazba, A.A. The potential of in situ rainwater harvesting in arid regions: developing a methodology to identify suitable areas using

- GIS-based decision support system. *Arab J Geosci* **2015**, *8*, 5167-5179, doi:10.1007/s12517-014-1535-3.
108. Adham, A.; Wesseling, J.G.; Riksen, M.; Ouassar, M.; Ritsema, C.J. A water harvesting model for optimizing rainwater harvesting in the wadi Oum Zessar watershed, Tunisia. *Agricultural Water Management* **2016**, *176*, 191-202, doi:10.1016/j.agwat.2016.06.003.
 109. Mwenge Kahinda, J. marc; Lillie, E.S.B.; Taigbenu, A.E.; Taute, M.; Boroto, R.J. Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* **2008**, *33*, 788-799, doi:10.1016/j.pce.2008.06.047.
 110. Tumbo, S.D.; Mbilinyi, B.P.; Mahoo, H.F.; Mkiramwinyi, F.O. Determination of suitability levels for important factors for identification of potential sites for rainwater harvesting. *7th WaterNet-WARFSA-GWP-SA symposium* **2006**, 15.
 111. Mahmoud, S.H. Delineation of potential sites for groundwater recharge using a GIS-based decision support system. *Environmental Earth Sciences* **2014**, *72*, 3429-3442, doi:10.1007/s12665-014-3249-y.
 112. Chowdhury, A.; Jha, M.K.; Chowdary, V.M.; Mal, B.C. Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing* **2008**, *30*, 231-250, doi:10.1080/01431160802270131.
 113. Durbude, D.G.; Venkatesh, B. Site suitability analysis for soil and water conservation structures. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* **2004**, *32*, 399-405, doi:10.1007/BF03030865.
 114. Bamne, Y.; Patil, K. a; Vikhe, S.D. Selection of Appropriate Sites for Structures of Water Harvesting in a Watershed using Remote Sensing and Geographical Information System. **2005**, *2025*, 270-275.
 115. Sekar, I.; Randhir, T.O. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology* **2007**, *334*, 39-52, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.024.
 116. Ramakrishnan, D.; Durga Rao, K.H.V.; Tiwari, K.C. Delineation of potential sites for water harvesting structures through remote sensing and GIS techniques: A case study of Kali watershed, Gujarat, India. *Geocarto International* **2008**, *23*, 95-108, doi:10.1080/10106040701417246.
 117. Ramakrishnan, D.; Bandyopadhyay, A.; Kusuma, K.N. SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science* **2009**, *118*, 355-368, doi:10.1007/s12040-009-0034-5.
 118. Glendenning, C.J.; Vervoort, R.W. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1. Field-scale impacts. *Agricultural Water Management* **2010**, *98*, 331-342, doi:10.1016/j.agwat.2010.09.003.
 119. Glendenning, C.J.; Vervoort, R.W. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 2. Catchment-scale impacts. *Agricultural Water Management* **2011**, *98*, 715-730, doi:10.1016/j.agwat.2010.11.010.
 120. Kadam, A.K.; Kale, S.S.; Pande, N.N.; Pawar, N.J.; Sankhua, R.N. Identifying Potential Rainwater Harvesting Sites of a Semi-arid, Basaltic Region of Western India, Using SCS-CN Method. *Water Resources Management* **2012**, *26*, 2537-2554, doi:10.1007/s11269-012-0031-3.
 121. Banai-Kashani, R. A new method for site suitability analysis: The analytic hierarchy process. *Environmental Management* **1989**, *13*, 685-693.
 122. Prinz, D.; Singh, A.K. *Technological Potential for Improvements of Water Harvesting: Study for the World Commission on Dams, Cape Town, South Africa*; Cape Town, 2000;
 123. Mbilinyi, B.P.; Tumbo, S.D.; Mahoo, H.F.; Senkondo, E.M.; Hatibu, N. Indigenous knowledge as decision support tool in rainwater harvesting.

- Physics and Chemistry of the Earth* **2005**, *30*, 792-798, doi:10.1016/j.pce.2005.08.022.
124. Mati, B.; Bock, T. De; Malesu, M.; Khaka, E.; Oduor, A.; Nyabenge, M.; Oduor, V. *Mapping the Potential of Rainwater Harvesting Technologies in Africa A GIS overview on development domains for*; Nairobi, 2007;
 125. Kamel, A.; Mohammed, A. Determination of water harvesting regions in Iraqi western desert using GIS system. *Iraqi Journal of Desert Studies* **2010**, *2*, 33-42.
 126. Ghani, M.W.; Arshad, M.; Shabbir, A.; Shakoor, A.; Mehmood, N.; Ahmad, I. Investigation of Potential Water Harvesting Sites At Potohar Using Modeling Approach. *Pak. J. Agri. Sci* **2013**, *50*, 723-729.
 127. Jha, M.K.; Chowdary, V.M.; Kulkarni, Y.; Mal, B.C. Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *83*, 96-111, doi:10.1016/j.resconrec.2013.12.003.
 128. Singh, L.K.; Jha, M.K.; Chowdary, V.M. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *142*, 1436-1456, doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.163.
 129. Schwilch, G.; Bachmann, F.; de Graaff, J. Decision support for selecting SLM technologies with stakeholders. *Applied Geography* **2012**, *34*, 86-98, doi:10.1016/j.apgeog.2011.11.002.
 130. Hackwell, S.G.; Rochester, E.W.; Yoo, K.H.; Burt, E.C.; Monroe, G.E. Impact of reservoir tillage on water intake and soil erosion. *Transactions of the ASAE* **1991**, *34*, 436-442.
 131. Rochester, E.W.; Hill, D.T.; Yoo, K.H. Impact of reservoir tillage on runoff quality and quantity. *Transactions of the ASAE* **1994**, *37*, 1183-1186.
 132. Ventura, E.; Norton, L.D.; Ward, K.; López-Bautista, M. A New Reservoir Tillage System for Crop Production in Semiarid Areas. In Proceedings of the 2003 ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE; ASAE: Las Vegas, Nevada, 2003; pp. 1-19.
 133. Ventura, E.Jr.; Acosta Gallegos, J.A.; Dominguez, M.; Ward, K. Captacion de agua de lluvia. In *Prácticas parala conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas*; Loredo Osti, C., Ed.; INIFAP-CIRNE-Campo Exp.: San Luis Potosí, México, 2005; pp. 111-142.
 134. Patrick, C.; Kechavarzi, C.; James, I.T.; O'Dogherty, M.; Godwin, R.J. Developing reservoir tillage technology for semi-arid environments. *Soil Use and Management* **2007**, *23*, 185-191, doi:10.1111/j.1475-2743.2006.00069.x.
 135. Botha, J.J.; Anderson, J.J.; Van Staden, P.P. Rainwater harvesting and conservation tillage increase maize yields in South Africa. *Water Resources and Rural Development* **2015**, *6*, 66-77, doi:10.1016/j.wrr.2015.04.001.
 136. Panigrahi, B.; Panda, S.N.; Mull, R. Simulation of water harvesting potential in rainfed ricelands using water balance model. *Agricultural Systems* **2001**, *69*, 165-182, doi:10.1016/S0308-521X(01)00013-0.
 137. Santamarta, J.C.; Ritter, A.; Neris, J.; Rodríguez-Martín, J.; García, J.L.; Lario-Bascones, R.J.; Arraiza, M.P.; Ioras, F. University Studies and Professional Skills in the Field of Integrated Water Resources Management: The Case of Spain. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **2015**, *191*, 2747-2752, doi:10.1016/j.sbspro.2015.04.522.
 138. Gourbesville, P. Challenges for integrated water resources management. *Physics and Chemistry of the Earth* **2008**, *33*, 284-289, doi:10.1016/j.pce.2008.02.002.
 139. Safavi, H.R.; Golmohammadi, M.H.; Sandoval-Solis, S. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology* **2015**, *528*, 773-789, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.014.

140. Ye, Q.; Li, Y.; Zhuo, L.; Zhang, W.; Xiong, W.; Wang, C.; Wang, P. Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China. *Water Research* **2018**, *129*, 264-276, doi:10.1016/j.watres.2017.11.036.
141. Liu, S.; Crossman, N.D.; Nolan, M.; Ghirmay, H. Bringing ecosystem services into integrated water resources management. *Journal of Environmental Management* **2013**, *129*, 92-102, doi:10.1016/j.jenvman.2013.06.047.
142. Varady, R.G.; Zuniga-Teran, A.A.; Garfin, G.M.; Martín, F.; Vicuña, S. Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2016**, *21*, 70-77, doi:10.1016/j.cosust.2016.11.001.
143. Fu, Z.H.; Zhao, H.J.; Wang, H.; Lu, W.T.; Wang, J.; Guo, H.C. Integrated planning for regional development planning and water resources management under uncertainty: A case study of Xining, China. *Journal of Hydrology* **2017**, *554*, 623-634, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.08.022.
144. Singhai, A.; Das, S.; Kadam, A.K.; Shukla, J.P.; Bundela, D.S.; Kalashetty, M. GIS-based multi-criteria approach for identification of rainwater harvesting zones in upper Betwa sub-basin of Madhya Pradesh, India. *Environment, Development and Sustainability* **2019**, *21*, 777-797, doi:10.1007/s10668-017-0060-4.
145. Terêncio, D.P.S.; Sanches Fernandes, L.F.; Cortes, R.M.V.; Moura, J.P.; Pacheco, F.A.L. Rainwater harvesting in catchments for agro-forestry uses: A study focused on the balance between sustainability values and storage capacity. *Science of The Total Environment* **2018**, *613-614*, 1079-1092, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.198.
146. Behzadian, K.; Kapelan, Z.; Mousavi, S.J.; Alani, A. Can smart rainwater harvesting schemes result in the improved performance of integrated urban water systems? *Environmental Science and Pollution Research* **2018**, *25*, 19271-19282, doi:10.1007/s11356-017-0546-5.
147. Campisano, A.; Lupia, F. A dimensionless approach for the urban-scale evaluation of domestic rainwater harvesting systems for toilet flushing and garden irrigation. *Urban Water Journal* **2017**, *14*, 883-891, doi:10.1080/1573062X.2017.1279192.
148. Wurthmann, K. Assessing storage requirements, water and energy savings, and costs associated with a residential rainwater harvesting system deployed across two counties in Southeast Florida. *Journal of Environmental Management* **2019**, *252*, 109673, doi:10.1016/j.jenvman.2019.109673.
149. Norman, M.; Shafri, H.Z.M.; Mansor, S.B.; Yusuf, B. Review of remote sensing and geospatial technologies in estimating rooftop rainwater harvesting (RRWH) quality. *International Soil and Water Conservation Research* **2019**, *7*, 266-274, doi:10.1016/j.iswcr.2019.05.002.
150. Fletcher, T.D.; Andrieu, H.; Hamel, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* **2013**, *51*, 261-279, doi:10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
151. Savenije, H.H.G.; Van der Zaag, P. Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth* **2008**, *33*, 290-297, doi:10.1016/j.pce.2008.02.003.
152. Al-Saidi, M. Conflicts and security in integrated water resources management. *Environmental Science and Policy* **2017**, *73*, 38-44, doi:10.1016/j.envsci.2017.03.015.
153. Knox, J.W.; Haro-Monteagudo, D.; Hess, T.; Morris, J. *Forecasting Changes in Agricultural Irrigation Demand to Support a Regional Integrated Water Resources Management Strategy*; Elsevier Ltd, 2018; Vol. 3; ISBN 2468-9289.
154. Melgarejo-Moreno, J.; López-Ortiz, M.I.; Fernández-Aracil, P. Water distribution management in South-East Spain: A guaranteed system in a

- context of scarce resources. *Science of the Total Environment* **2019**, 648, 1384-1393, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.263.
155. Pérez-Uresti, S.I.; Ponce-Ortega, J.M.; Jiménez-Gutiérrez, A. A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Computers and Chemical Engineering* **2019**, 121, 158-173, doi:10.1016/j.compchemeng.2018.10.003.
 156. Stec, A.; Kordana, S. Analysis of profitability of rainwater harvesting, gray water recycling and drain water heat recovery systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, 105, 84-94, doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.006.
 157. Senanayake, I.P.; Dissanayake, D.M.D.O.K.; Mayadunna, B.B.; Weerasekera, W.L. An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers* **2016**, 7, 115-124, doi:10.1016/j.gsf.2015.03.002.
 158. Domínguez, I.; Ward, S.; Mendoza, J.G.; Rincón, C.I.; Oviedo-Ocaña, E.R. End-user cost-benefit prioritization for selecting rainwater harvesting and greywater reuse in social housing. *Water (Switzerland)* **2017**, 9, doi:10.3390/w9070516.
 159. Ojwang, R.O.; Dietrich, J.; Anebagilu, P.K.; Beyer, M.; Rottensteiner, F. Rooftop Rainwater Harvesting for Mombasa: Scenario Development with Image Classification and Water Resources Simulation. *Water* **2017**, 9, 359, doi:10.3390/w9050359.
 160. Gurung, T.R.; Sharma, A. Communal rainwater tank systems design and economies of scale. *Journal of Cleaner Production* **2014**, 67, 26-36, doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.020.
 161. de Gois, E.H.B.; Rios, C.A.S.; Costanzi, R.N. Evaluation of water conservation and reuse: a case study of a shopping mall in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2015**, 96, 263-271, doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.097.
 162. Adugna, D.; Jensen, M.; Lemma, B.; Gebrie, G. Assessing the Potential for Rooftop Rainwater Harvesting from Large Public Institutions. *IJERPH* **2018**, 15, 336, doi:10.3390/ijerph15020336.
 163. Angrill, S.; Petit-Boix, A.; Morales-Pinzón, T.; Josa, A.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Urban rainwater runoff quantity and quality - A potential endogenous resource in cities? *Journal of Environmental Management* **2017**, 189, 14-21, doi:10.1016/j.jenvman.2016.12.027.
 164. Mahmoud, W.H.; Elagib, N.A.; Gaese, H.; Heinrich, J. Rainfall conditions and rainwater harvesting potential in the urban area of Khartoum. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, 91, 89-99, doi:10.1016/j.resconrec.2014.07.014.
 165. Cook, S.; Sharma, A.; Chong, M. Performance Analysis of a Communal Residential Rainwater System for Potable Supply: A Case Study in Brisbane, Australia. *Water Resour Manage* **2013**, 27, 4865-4876, doi:10.1007/s11269-013-0443-8.
 166. Jing, X.; Zhang, S.; Zhang, J.; Wang, Y.; Wang, Y. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, 126, 74-85, doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.027.
 167. Londra, P.A.; Theocharis, A.T.; Baltas, E.; Tsihrintzis, V.A. Optimal Sizing of Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece. *Water Resour Manage* **2015**, 29, 4357-4377, doi:10.1007/s11269-015-1064-1.
 168. Sanches Fernandes, L.F.; Terêncio, D.P.S.; Pacheco, F.A.L. Rainwater harvesting systems for low demanding applications. *Science of The Total Environment* **2015**, 529, 91-100, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.05.061.

169. Eroksuz, E.; Rahman, A. Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 1449–1452, doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.010.
170. Haque, M.M.; Rahman, A.; Samali, B. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *137*, 60–69, doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.038.
171. Imteaz, M.A.; Paudel, U.; Ahsan, A.; Santos, C. Climatic and spatial variability of potential rainwater savings for a large coastal city. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *105*, 143–147, doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.023.
172. Kisakye, V.; Van der Bruggen, B. Effects of climate change on water savings and water security from rainwater harvesting systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *138*, 49–63, doi:10.1016/j.resconrec.2018.07.009.
173. Willuweit, L.; O'Sullivan, J.J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the Dynamic Urban Water Simulation Model. *Water Research* **2013**, *47*, 7206–7220, doi:10.1016/j.watres.2013.09.060.
174. Villarreal, E.L.; Dixon, A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment* **2005**, *40*, 1174–1184, doi:10.1016/j.buildenv.2004.10.018.
175. Villarreal, E.L.; Dixon, A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment* **2005**, *40*, 1174–1184, doi:10.1016/j.buildenv.2004.10.018.
176. Cowden, J.R.; Watkins, D.W.; Mihelcic, J.R. Stochastic rainfall modeling in West Africa: Parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. *Journal of Hydrology* **2008**, *361*, 64–77, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.025.
177. Furumai, H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth* **2008**, *33*, 340–346, doi:10.1016/j.pce.2008.02.029.
178. Zhang, Y.; Chen, D.; Chen, L.; Ashbolt, S. Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities. *Journal of Environmental Management* **2009**, *91*, 222–226, doi:10.1016/j.jenvman.2009.08.008.
179. Jones, M.P.; Hunt, W.F. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 623–629, doi:10.1016/j.resconrec.2009.11.002.
180. Imteaz, M.A.; Ahsan, A.; Naser, J.; Rahman, A. Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, *56*, 80–86, doi:10.1016/j.resconrec.2011.09.008.
181. Mun, J.S.; Han, M.Y. Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: Definition, sensitivity and verification. *Journal of Environmental Management* **2012**, *93*, 147–153, doi:10.1016/j.jenvman.2011.08.024.
182. Palla, A.; Gnecco, I.; Lanza, L.G.; La Barbera, P. Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling* **2012**, *62*, 71–80, doi:10.1016/j.resconrec.2012.02.006.
183. Ward, S.; Memon, F.A.; Butler, D. Performance of a large building rainwater harvesting system. *Water Research* **2012**, *46*, 5127–5134, doi:10.1016/j.watres.2012.06.043.
184. Cook, S.; Sharma, A.; Chong, M. Performance Analysis of a Communal Residential Rainwater System for Potable Supply: A Case Study in Brisbane, Australia. *Water Resources Management* **2013**, *27*, 4865–4876, doi:10.1007/s11269-013-0443-8.

185. Ghisi, E.; Schondermark, P.N. Investment Feasibility Analysis of Rainwater Use in Residences. *Water Resources Management* **2013**, *27*, 2555-2576, doi:10.1007/s11269-013-0303-6.
186. Imteaz, M.A.; Ahsan, A.; Shanableh, A. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *77*, 37-43, doi:10.1016/j.resconrec.2013.05.006.
187. Matos, C.; Santos, C.; Pereira, S.; Bentes, I.; Imteaz, M. Rainwater storage tank sizing: Case study of a commercial building. *International Journal of Sustainable Built Environment* **2013**, *2*, 109-118, doi:10.1016/j.ijse.2014.04.004.
188. Umaphathi, S.; Chong, M.N.; Sharma, A.K. Evaluation of plumbed rainwater tanks in households for sustainable water resource management: A real-time monitoring study. *Journal of Cleaner Production* **2013**, *42*, 204-214, doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.006.
189. Cook, S.; Sharma, A.K.; Gurung, T.R. Evaluation of alternative water sources for commercial buildings: A case study in Brisbane, Australia. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *89*, 86-93, doi:10.1016/j.resconrec.2014.05.003.
190. Liaw, C.H.; Chiang, Y.C. Framework for assessing the rainwater harvesting potential of residential buildings at a national level as an alternative water resource for domestic water supply in Taiwan. *Water (Switzerland)* **2014**, *6*, 3224-3246, doi:10.3390/w6103224.
191. Mahmoud, W.H.; Elagib, N.A.; Gaese, H.; Heinrich, J. Rainfall conditions and rainwater harvesting potential in the urban area of Khartoum. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *91*, 89-99, doi:10.1016/j.resconrec.2014.07.014.
192. Morales-Pinzón, T.; Lurueña, R.; Gabarrell, X.; Gasol, C.M.; Rieradevall, J. Financial and environmental modelling of water hardness - Implications for utilising harvested rainwater in washing machines. *Science of the Total Environment* **2014**, *470-471*, 1257-1271, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.101.
193. Zeleňáková, M.; Markovič, G.; Kaposztásová, D.; Vranayová, Z. Rainwater management in compliance with sustainable design of buildings. *Procedia Engineering* **2014**, *89*, 1515-1521, doi:10.1016/j.proeng.2014.11.442.
194. Akter, A.; Ahmed, S. Potentiality of rainwater harvesting for an urban community in Bangladesh. *Journal of Hydrology* **2015**, *528*, 84-93, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.06.017.
195. An, K.J.; Lam, Y.F.; Hao, S.; Morakinyo, T.E.; Furumai, H. Multi-purpose rainwater harvesting for water resource recovery and the cooling effect. *Water Research* **2015**, *86*, 116-121, doi:10.1016/j.watres.2015.07.040.
196. de Gois, E.H.B.; Rios, C.A.S.; Costanzi, R.N. Evaluation of water conservation and reuse: a case study of a shopping mall in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *96*, 263-271, doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.097.
197. Karim, M.R.; Ibne Bashar, M.Z.; Imteaz, M.A. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *104*, 61-67, doi:10.1016/j.resconrec.2015.09.010.
198. Lizárraga-Mendiola, L.; Vázquez-Rodríguez, G.; Blanco-Piñón, A.; Rangel-Martínez, Y.; González-Sandoval, M. Estimating the rainwater potential per household in an urban area: Case study in Central Mexico. *Water (Switzerland)* **2015**, *7*, 4622-4637, doi:10.3390/w7094622.
199. Papafotiou, E.; Katsifarakis, K.L. Ecological Rainwater Management in Urban Areas. Preliminary Considerations for the City of Corinth, Greece. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* **2015**, *4*, 383-391, doi:10.1016/j.aaspro.2015.03.043.

200. Stec, A.; Kordana, S. Analysis of profitability of rainwater harvesting, gray water recycling and drain water heat recovery systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *105*, 84-94, doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.006.
201. Betasolo, M.L.; Smith, C.A. Axiomatic Design Process in Developing a model Prototype Rainwater Harvesting Infrastructure. *Procedia CIRP* **2016**, *53*, 187-192, doi:10.1016/j.procir.2016.09.004.
202. Chen, Y.; Samuelson, H.W.; Tong, Z. Integrated design workflow and a new tool for urban rainwater management. *Journal of Environmental Management* **2016**, *180*, 45-51, doi:10.1016/j.jenvman.2016.04.059.
203. Elgert, L.; Austin, P.; Picchione, K. Improving water security through rainwater harvesting: a case from Guatemala and the potential for expanding coverage. *International Journal of Water Resources Development* **2016**, *32*, 765-780, doi:10.1080/07900627.2015.1104499.
204. Guizani, M. Storm Water Harvesting in Saudi Arabia: a Multipurpose Water Management Alternative. *Water Resources Management* **2016**, *30*, 1819-1833, doi:10.1007/s11269-016-1255-4.
205. Melville-Shreeve, P.; Ward, S.; Butler, D. Rainwater harvesting typologies for UK houses: A multi criteria analysis of system configurations. *Water (Switzerland)* **2016**, *8*, 1-18, doi:10.3390/w8040129.
206. Nachshon, U.; Netzer, L.; Livshitz, Y. Land cover properties and rain water harvesting in urban environments. *Sustainable Cities and Society* **2016**, *27*, 398-406, doi:10.1016/j.scs.2016.08.008.
207. Notaro, V.; Liuzzo, L.; Freni, G. Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Systems in Southern Italy. *Procedia Engineering* **2016**, *162*, 373-380, doi:10.1016/j.proeng.2016.11.077.
208. Peterson, E.L. Transcontinental assessment of secure rainwater harvesting systems across Australia. *Resources, Conservation and Recycling* **2016**, *106*, 33-47, doi:10.1016/j.resconrec.2015.11.002.
209. Rostad, N.; Foti, R.; Montalto, F.A. Harvesting rooftop runoff to flush toilets: Drawing conclusions from four major U.S. cities. *Resources, Conservation and Recycling* **2016**, *108*, 97-106, doi:10.1016/j.resconrec.2016.01.009.
210. Santos Silva, A.; Ghisi, E. Uncertainty analysis of daily potable water demand on the performance evaluation of rainwater harvesting systems in residential buildings. *Journal of Environmental Management* **2016**, *180*, 82-93, doi:10.1016/j.jenvman.2016.05.028.
211. Siems, R.; Sahin, O. Energy intensity of residential rainwater tank systems: Exploring the economic and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *113*, 251-262, doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.020.
212. Yamashita, S.; Watanabe, R.; Shimatani, Y. Smart adaptation activities and measures against urban flood disasters. *Sustainable Cities and Society* **2016**, *27*, 175-184, doi:10.1016/j.scs.2016.06.027.
213. Dumit Gomez, Y.; Girard Teixeira, L. Residential rainwater harvesting: Effects of incentive policies and water consumption over economic feasibility. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *127*, 56-67, doi:10.1016/j.resconrec.2017.08.015.
214. Fisher-Jeffes, L.; Armitage, N.; Carden, K. The viability of domestic rainwater harvesting in the residential areas of the liesbeek river catchment, Cape Town. *Water SA* **2017**, *43*, 81-90, doi:10.4314/wsa.v43i1.11.
215. Ghimire, S.R.; Johnston, J.M.; Ingwersen, W.W.; Sojka, S. Life cycle assessment of a commercial rainwater harvesting system compared with a municipal water supply system. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *151*, 74-86, doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.025.
216. Komeh, Z.; Memarian, H.; Tajbakhsh, S.M. Reservoir volume optimization and performance evaluation of rooftop catchment systems in arid regions: A

- case study of Birjand, Iran. *Water Science and Engineering* **2017**, *10*, 125-133, doi:10.1016/j.wse.2017.05.003.
217. Lopes, V.A.R.; Fernandes Marques, G.; Dornelles, F.; Medellin-Azuara, J. Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *148*, 304-313, doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.132.
 218. Ndiritu, J.; Moodley, Y.; Guliwe, M. Generalized storage-yield-reliability relationships for analysing shopping centre rainwater harvesting systems. *Water (Switzerland)* **2017**, *9*, doi:10.3390/w9100771.
 219. Nguyen, D.C.; Han, M.Y. Proposal of simple and reasonable method for design of rainwater harvesting system from limited rainfall data. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *126*, 219-227, doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.033.
 220. Oviedo-Ocaña, E.R.; Dominguez, I.; Ward, S.; Rivera-Sanchez, M.L.; Zaraza-Peña, J.M. Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science and Pollution Research* **2017**, *25*, 19200-19216, doi:10.1007/s11356-017-8710-5.
 221. Rosa Andrade, L.; Maia, A.G.; Lucio, P.S. Relevance of hydrological variables in water-saving efficiency of domestic rainwater tanks: Multivariate statistical analysis. *Journal of Hydrology* **2017**, *545*, 163-171, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.12.027.
 222. Stout, D.T.; Walsh, T.C.; Burian, S.J. Ecosystem services from rainwater harvesting in India. *Urban Water Journal* **2017**, *14*, 561-573, doi:10.1080/1573062X.2015.1049280.
 223. Bailey, R.T.; Beikmann, A.; Kottermair, M.; Taboroši, D.; Jenson, J.W. Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities. *Journal of Hydrology* **2018**, *557*, 137-146, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.12.016.
 224. Ennenbach, M.W.; Concha Larrauri, P.; Lall, U. County-Scale Rainwater Harvesting Feasibility in the United States: Climate, Collection Area, Density, and Reuse Considerations. *Journal of the American Water Resources Association* **2018**, *54*, 255-274, doi:10.1111/1752-1688.12607.
 225. Guo, R.; Guo, Y. Stochastic modelling of the hydrologic operation of rainwater harvesting systems. *Journal of Hydrology* **2018**, *562*, 30-39, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.04.062.
 226. Park, D.; Um, M.J. Sustainability index evaluation of the rainwater harvesting System in six US urban cities. *Sustainability (Switzerland)* **2018**, *10*, 1-16, doi:10.3390/su10010280.
 227. Petit-Boix, A.; Devkota, J.; Phillips, R.; Vargas-Parra, M.V.; Josa, A.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J.; Apul, D. Life cycle and hydrologic modeling of rainwater harvesting in urban neighborhoods: Implications of urban form and water demand patterns in the US and Spain. *Science of the Total Environment* **2018**, *621*, 434-443, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.206.
 228. Sapkota, M.; Arora, M.; Malano, H.; Moglia, M.; Sharma, A.; Pamminger, F. Understanding the Impact of Hybrid Water Supply Systems on Wastewater and Stormwater Flows. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *130*, 82-94, doi:10.1016/j.resconrec.2017.11.025.
 229. Siddiqui, R.; Siddiqui, S. Assessing the rooftop rainwater harvesting potential in urban residential areas of Pakistan: a case study of Model Town, Lahore, Pakistan. *Int. J. Econ. Geol.* **2018**, *9*, 11-19.
 230. Soares Geraldi, M.; Ghisi, E. Assessment of the length of rainfall time series for rainwater harvesting in buildings. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *133*, 231-241, doi:10.1016/j.resconrec.2018.02.007.
 231. Stec, A.; Sły, D. The impact of rainwater harvesting system location on their financial efficiency: A case study in Poland. In *Water Management*

- and the Environment: Case Studies; Springer International Publishing AG: Switzerland, 2018; pp. 43-63 ISBN 9783319790145.
232. Teston, A.; Azambuja Teixeira, C.; Ghisi, E.; Benincá Cardoso, E. Impact of rainwater harvesting on the drainage system: Case study of a condominium of houses in Curitiba, Southern Brazil. *Water (Switzerland)* **2018**, *10*, 1-16, doi:10.3390/w10081100.
 233. Baby, S.N.; Arrowsmith, C.; Al-Ansari, N. Application of GIS for Mapping Rainwater-Harvesting Potential: Case Study Wollert, Victoria. *Engineering* **2019**, *11*, 14-21, doi:10.4236/eng.2019.111002.
 234. Soares Geraldi, M.; Ghisi, E. Short-term instead of long-term rainfall time series in rainwater harvesting simulation in houses: An assessment using Bayesian Network. *Resources, Conservation and Recycling* **2019**, *144*, 1-12, doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.017.
 235. Ghimire, S.R.; Johnston, J.M.; Garland, J.; Edelen, A.; Ma, X. (Cissy); Jahne, M. Life cycle assessment of a rainwater harvesting system compared with an AC condensate harvesting system. *Resources, Conservation and Recycling* **2019**, *146*, 536-548, doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.043.
 236. Marinoski, A.K.; Ghisi, E. Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings. *Resources, Conservation and Recycling* **2019**, *144*, 100-114, doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.035.
 237. Jing, X.; Zhang, S.; Zhang, J.; Wang, Y.; Wang, Y. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *126*, 74-85, doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.027.
 238. Mwenge Kahinda, J.; Taigbenu, A.E.; Boroto, J.R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2007**, *32*, 1050-1057, doi:10.1016/j.pce.2007.07.007.
 239. Mwenge Kahinda, J.; Taigbenu, A.E.; Boroto, R.J. Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* **2010**, *35*, 742-751, doi:10.1016/j.pce.2010.07.004.
 240. Ward, S.; Barr, S.; Butler, D.; Memon, F.A. Rainwater harvesting in the UK: Socio-technical theory and practice. *Technological Forecasting and Social Change* **2012**, *79*, 1354-1361, doi:10.1016/j.techfore.2012.04.001.
 241. Assayed, A.; Hatokay, Z.; Al-Zoubi, R.; Azzam, S.; Qbailat, M.; Al-Ulayyan, A.; Saleem, M.A.; Bushnaq, S.; Maroni, R. On-site rainwater harvesting to achieve household water security among rural and peri-urban communities in Jordan. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *73*, 72-77, doi:10.1016/j.resconrec.2013.01.010.
 242. Ghimire, S.R.; Johnston, J.M. Impacts of domestic and agricultural rainwater harvesting systems on watershed hydrology: A case study in the Albemarle-Pamlico river basins (USA). *Ecohydrology and Hydrobiology* **2013**, *13*, 159-171, doi:10.1016/j.ecohyd.2013.03.007.
 243. Ward, S.; Barr, S.; Memon, F.; Butler, D. Rainwater harvesting in the UK: exploring water-user perceptions. *Urban Water Journal* **2013**, *10*, 112-126, doi:10.1080/1573062X.2012.709256.
 244. Willuweit, L.; O'Sullivan, J.J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the dynamic urban water simulation model. *Water Research* **2013**, *47*, 7206-7220, doi:10.1016/j.watres.2013.09.060.
 245. Gabarrell, X.; Morales-Pinzón, T.; Rieradevall, J.; Rovira, M.R.; Villalba, G.; Josa, A.; Martínez-Gasol, C.; Dias, A.C.; Martínez-Aceves, D.X. Plugrisost: A model for design, economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting in urban systems. *Water Practice and Technology* **2014**, *9*, 243-255, doi:10.2166/wpt.2014.028.

246. Ghimire, S.R.; Johnston, J.M.; Ingwersen, W.W.; Hawkins, T.R. Life cycle assessment of domestic and agricultural rainwater harvesting systems. *Environmental Science and Technology* **2014**, *48*, 4069–4077, doi:10.1021/es500189f.
247. Thomas, R.B.; Kirisits, M.J.; Lye, D.J.; Kinney, K.A. Rainwater harvesting in the United States: A survey of common system practices. *Journal of Cleaner Production* **2014**, *75*, 166–173, doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.073.
248. Imteaz, M.A.; Paudel, U.; Ahsan, A.; Santos, C. Climatic and spatial variability of potential rainwater savings for a large coastal city. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *105*, 143–147, doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.023.
249. Vialle, C.; Busset, G.; Tanfin, L.; Montrejaud-Vignoles, M.; Huau, M.C.; Sablayrolles, C. Environmental analysis of a domestic rainwater harvesting system: A case study in France. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *102*, 178–184, doi:10.1016/j.resconrec.2015.07.024.
250. Woltersdorf, L.; Liehr, S.; Döll, P. Rainwater harvesting for small-holder horticulture in Namibia: Design of garden variants and assessment of climate change impacts and adaptation. *Water (Switzerland)* **2015**, 1402–1421, doi:10.3390/w7041402.
251. Zhang, F.; Polyakov, M.; Fogarty, J.; Pannell, D.J. The capitalized value of rainwater tanks in the property market of Perth, Australia. *Journal of Hydrology* **2015**, *522*, 317–325, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.12.048.
252. Haque, M.M.; Rahman, A.; Samali, B. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *137*, 60–69, doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.038.
253. Lee, K.E.; Mokhtar, M.; Mohd Hanafiah, M.; Abdul Halim, A.; Badusah, J. Rainwater harvesting as an alternative water resource in Malaysia: Potential, policies and development. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *126*, 218–222, doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.060.
254. Tavakol-Davani, H.; Goharian, E.; Hansen, C.H.; Tavakol-Davani, H.; Apul, D.; Burian, S.J. How does climate change affect combined sewer overflow in a system benefiting from rainwater harvesting systems? *Sustainable Cities and Society* **2016**, *27*, 430–438, doi:10.1016/j.scs.2016.07.003.
255. da Costa Pacheco, P.R.; Dumit Gómez, Y.; Ferreira de Oliveira, I.; Girard Teixeira, L.C. A view of the legislative scenario for rainwater harvesting in Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *141*, 290–294, doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.097.
256. Liu, C.; Li, Y.; Li, J. Geographic information system-based assessment of mitigating flash-flood disaster from green roof systems. *Computers, Environment and Urban Systems* **2017**, *64*, 321–331, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.04.008.
257. Ojwang, R.O.; Dietrich, J.; Anebagilu, P.K.; Beyer, M.; Rottensteiner, F. Rooftop rainwater harvesting for Mombasa: Scenario development with image classification and water resources simulation. *Water (Switzerland)* **2017**, *9*, doi:10.3390/w9050359.
258. Palla, A.; Gnecco, I.; La Barbera, P. The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. *Journal of Environmental Management* **2017**, *191*, 297–305, doi:10.1016/j.jenvman.2017.01.025.
259. Castonguay, A.C.; Iftekhar, M.S.; Urich, C.; Bach, P.M.; Deletic, A. Integrated modelling of stormwater treatment systems uptake. *Water Research* **2018**, *142*, 301–312, doi:10.1016/j.watres.2018.05.037.
260. Chubaka, C.E.; Whiley, H.; Edwards, J.W.; Ross, K.E. A Review of Roof Harvested Rainwater in Australia. *Journal of environmental and public health* **2018**, *2018*, 1–14.

261. García Soler, N.; Moss, T.; Papasozomenou, O. Rain and the city: Pathways to mainstreaming rainwater harvesting in Berlin. *Geoforum* **2018**, *89*, 96-106, doi:10.1016/j.geoforum.2018.01.010.
262. Gleason Espíndola, J.A.; Cordova, F.; Casiano Flores, C. The importance of urban rainwater harvesting in circular economy: the case of Guadalajara city. *Management Research Review* **2018**, *41*, 533-553, doi:10.1108/MRR-02-2018-0064.
263. Kisakye, V.; Van der Bruggen, B. Effects of climate change on water savings and water security from rainwater harvesting systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *138*, 49-63, doi:10.1016/j.resconrec.2018.07.009.
264. Musayev, S.; Burgess, E.; Mellor, J. A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *132*, 62-70, doi:10.1016/j.resconrec.2018.01.023.
265. Teston, A.; Soares Geraldi, M.; Müller Colasio, B.; Ghisi, E. Rainwater harvesting in buildings in Brazil: A literature review. *Water (Switzerland)* **2018**, *10*, doi:10.3390/w10040471.
266. Wanjiru, E.; Xia, X. Sustainable energy-water management for residential houses with optimal integrated grey and rain water recycling. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *170*, 1151-1166, doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.212.
267. Zhang, S.; Zhang, J.; Jing, X.; Wang, Y.; Wang, Y.; Yue, T. Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *196*, 1341-1355, doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.133.
268. Forrest, N.; Stein, Z.; Wiek, A. Water-independent residential properties as a transformational solution to achieve water sustainability in desert cities? *Journal of Cleaner Production* **2019**, *214*, 1038-1049, doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.309.
269. Zanni, S.; Cipolla, S.S.; Fusco, E. di; Lenci, A.; Altobelli, M.; Currado, A.; Maglionico, M.; Bonoli, A. Modeling for sustainability: Life cycle assessment application to evaluate environmental performance of water recycling solutions at the dwelling level. *Sustainable Production and Consumption* **2019**, *17*, 47-61, doi:10.1016/j.spc.2018.09.002.
270. Zhang, S.; Zhang, J.; Yue, T.; Jing, X. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems. *Science of The Total Environment* **2019**, *665*, 262-274, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.135.
271. Ghisi, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment* **2006**, *41*, 1544-1550, doi:10.1016/j.buildenv.2005.03.018.
272. Ghisi, E.; Montibeller, A.; Schmidt, R.W. Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. *Building and Environment* **2006**, *41*, 204-210, doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.014.
273. Ghisi, E.; Ferreira, D.F. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment* **2007**, *42*, 2512-2522, doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.019.
274. Ghisi, E.; Lapolli Bressan, D.; Martini, M. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment* **2007**, *42*, 1654-1666, doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.007.
275. Ghisi, E.; Mengotti de Oliveira, S. Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. *Building and Environment* **2007**, *42*, 1731-1742, doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.001.

276. Abdulla, F.A.; Al-Shareef, A.W. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination* **2009**, *243*, 195-207, doi:10.1016/j.desal.2008.05.013.
277. Li, Z.; Boyle, F.; Reynolds, A. Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination* **2010**, *260*, 1-8, doi:10.1016/J.DESAL.2010.05.035.
278. Palla, A.; Gnecco, I.; Lanza, L.G. Non-dimensional design parameters and performance assessment of rainwater harvesting systems. *Journal of Hydrology* **2011**, *401*, 65-76, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.009.
279. Rahman, A.; Keane, J.; Imteaz, M.A. Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling* **2012**, *61*, 16-21, doi:10.1016/j.resconrec.2011.12.002.
280. Steffen, J.; Jensen, M.; Pomeroy, C.A.; Burian, S.J. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. *Journal of the American Water Resources Association* **2013**, *49*, 810-824, doi:10.1111/jawr.12038.
281. Campisano, A.; Modica, C. Selecting time scale resolution to evaluate water saving and retention potential of rainwater harvesting tanks. *Procedia Engineering* **2014**, *70*, 218-227, doi:10.1016/j.proeng.2014.02.025.
282. Ghisi, E.; Rupp, R.F.; Triska, Y. Comparing indicators to rank strategies to save potable water in buildings. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *87*, 137-144, doi:10.1016/j.resconrec.2014.04.001.
283. Hajani, E.; Rahman, A. Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water (Switzerland)* **2014**, *6*, 945-960, doi:10.3390/w6040945.
284. García-Montoya, M.; Bocanegra-Martínez, A.; Nápoles-Rivera, F.; Serna-González, M.; Ponce-Ortega, J.M.; El-Halwagi, M.M. Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering* **2015**, *76*, 104-116, doi:10.1016/j.compchemeng.2015.02.011.
285. Matos Silva, C.; Sousa, V.; Carvalho, N.V. Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. *Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *94*, 21-34, doi:10.1016/j.resconrec.2014.11.004.
286. Wanjiru, E.M.; Xia, X. Energy-water optimization model incorporating rooftop water harvesting for lawn irrigation. *Applied Energy* **2015**, *160*, 521-531, doi:10.1016/j.apenergy.2015.09.083.
287. Wang, R.; Zimmerman, J.B. Economic and environmental assessment of office building rainwater harvesting systems in various U.S. Cities. *Environmental Science and Technology* **2015**, *49*, 1768-1778, doi:10.1021/es5046887.
288. López Zavala, M.Á.; Castillo Vega, R.; López Miranda, R.A. Potential of rainwater harvesting and greywater reuse for water consumption reduction and wastewater minimization. *Water (Switzerland)* **2016**, *8*, 1-18, doi:10.3390/W8060264.
289. Niehuns Antunes, L.; Padilha Thives, L.; Ghisi, E. Potential for potable water savings in buildings by using stormwater harvested from porous pavements. *Water (Switzerland)* **2016**, *8*, doi:10.3390/w8040110.
290. Campisano, A.; D'Amico, G.; Modica, C. Water saving and cost analysis of large-scale implementation of domestic rain water harvesting in minor Mediterranean islands. *Water (Switzerland)* **2017**, *9*, doi:10.3390/w9120916.
291. Campisano, A.; Lupia, F. A dimensionless approach for the urban-scale evaluation of domestic rainwater harvesting systems for toilet flushing and garden irrigation. *Urban Water Journal* **2017**, *14*, 883-891, doi:10.1080/1573062X.2017.1279192.
292. Devkota, J.P.; Burian, S.J.; Tavakol-Davani, H.; Apul, D.S. Introducing demand to supply ratio as a new metric for understanding life cycle

- greenhouse gas (GHG) emissions from rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *163*, 274-284, doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.073.
293. dos Santos, S.M.; de Farias, M.M.M.W.E.C. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *164*, 1007-1015, doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.251.
294. Moniruzzaman, M.; Imteaz, M.A. Generalized equations, climatic and spatial variabilities of potential rainwater savings: A case study for Sydney. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *125*, 139-156, doi:10.1016/j.resconrec.2017.06.001.
295. Cheng Leong, J.Y.; Chong, M.N.; Poh, P.E.; Vieritz, A.; Talei, A.; Chow, M.F. Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *176*, 946-958, doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.020.
296. López Zavala, M.Á.; Cruz Prieto, M.J.; Rojas Rojas, C.A. Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress. *Water Science and Technology: Water Supply* **2018**, *18*, 1946-1955, doi:10.2166/ws.2018.018.
297. Imteaz, M.A.; Moniruzzaman, M. Spatial variability of reasonable government rebates for rainwater tank installations: A case study for Sydney. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *133*, 112-119, doi:10.1016/j.resconrec.2018.02.010.
298. Shanableh, A.; Al-Ruzouq, R.; Gokhan Yilmaz, A.; Siddique, M.; Merabtene, T.; Imteaz, M.A. Effects of Land Cover Change on Urban Floods and Rainwater Harvesting: A Case Study in Sharjah, UAE. *Water (Switzerland)* **2018**, *10*, 1-17, doi:10.3390/w10050631.
299. Fewkes, A. The use of rainwater for WC flushing: The field testing of a collection system. *Building and Environment* **1999**, *34*, 765-772, doi:10.1016/S0360-1323(98)00063-8.
300. Fewkes, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban Water* **2000**, *1*, 323-333, doi:10.1016/S1462-0758(00)00026-1.
301. Chiu, Y.R.; Liaw, C.H.; Chen, L.C. Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy* **2009**, *34*, 492-498, doi:10.1016/j.renene.2008.06.016.
302. Su, M.-D.; Lin, C.-H.; Chang, L.-F.; Kang, J.-L.; Lin, M.-C. A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling* **2009**, *53*, 393-399, doi:10.1016/j.resconrec.2009.03.005.
303. Eroksoz, E.; Rahman, A. Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 1449-1452, doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.010.
304. Khastagir, A.; Jayasuriya, N. Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology* **2010**, *381*, 181-188, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.11.040.
305. Tam, V.W.Y.; Tam, L.; Zeng, S.X. Cost effectiveness and tradeoff on the use of rainwater tank: An empirical study in Australian residential decision-making. *Resources, Conservation and Recycling* **2010**, *54*, 178-186, doi:10.1016/j.resconrec.2009.07.014.
306. Farreny, R.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J. Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, *55*, 686-694, doi:10.1016/j.resconrec.2011.01.008.
307. Imteaz, M.A.; Shanableh, A.; Rahman, A.; Ahsan, A. Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne,

- Australia. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, *55*, 1022-1029, doi:10.1016/j.resconrec.2011.05.013.
308. Devkota, J.; Schlachter, H.; Anand, C.; Phillips, R.; Apul, D. Development and application of EEAST: A life cycle based model for use of harvested rainwater and composting toilets in buildings. *Journal of Environmental Management* **2013**, *130*, 397-404, doi:10.1016/j.jenvman.2013.09.015.
309. Santos, C.; Taveira-Pinto, F. Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *71*, 1-6, doi:10.1016/j.resconrec.2012.11.004.
310. Bocanegra-Martínez, A.; Ponce-Ortega, J.M.; Nápoles-Rivera, F.; Serna-González, M.; Castro-Montoya, A.J.; El-Halwagi, M.M. Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *84*, 44-56, doi:10.1016/j.resconrec.2014.01.001.
311. Hajani, E.; Rahman, A. Rainwater utilization from roof catchments in arid regions: A case study for Australia. *Journal of Arid Environments* **2014**, *111*, 35-41, doi:10.1016/j.jaridenv.2014.07.007.
312. Kim, B.; Anderson, K.; Lee, S.; Kim, H. A Real Option Perspective to Value the Multi-Stage Construction of Rainwater Harvesting Systems Reusing Septic Tank. *Water Resources Management* **2014**, *28*, 2279-2291, doi:10.1007/s11269-014-0613-3.
313. Liaw, C.H.; Chiang, Y.C. Dimensionless analysis for designing domestic rainwater harvesting systems at the regional level in Northern Taiwan. *Water (Switzerland)* **2014**, *6*, 3913-3933, doi:10.3390/w6123913.
314. Raimondi, A.; Becciu, G. Probabilistic modeling of rainwater tanks. *Procedia Engineering* **2014**, *89*, 1493-1499, doi:10.1016/j.proeng.2014.11.437.
315. Raimondi, A.; Becciu, G. Probabilistic design of multi-use rainwater tanks. *Procedia Engineering* **2014**, *70*, 1391-1400, doi:10.1016/j.proeng.2014.02.154.
316. Walsh, T.C.; Pomeroy, C.A.; Burian, S.J. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. *Journal of Hydrology* **2014**, *508*, 240-253, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.10.038.
317. Burns, M.J.; Fletcher, T.D.; Duncan, H.P.; Hatt, B.E.; Ladson, A.R.; Walsh, C.J. The performance of rainwater tanks for stormwater retention and water supply at the household scale: an empirical study. *Hydrological Processes* **2015**, *29*, 152-160, doi:10.1002/hyp.10142.
318. Devkota, J.; Schlachter, H.; Apul, D. Life cycle based evaluation of harvested rainwater use in toilets and for irrigation. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *95*, 311-321, doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.021.
319. Londra, P.A.; Theocharis, A.T.; Baltas, E.; Tsihrintzis, V. Optimal Sizing of Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece. *Water Resources Management* **2015**, 4357-4377, doi:10.1007/s11269-015-1064-1.
320. Martin, E.A.; Buchberger, S.G.; Chakraborty, D. Reliability of harvested rainfall as an auxiliary source of non-potable water. *Procedia Engineering* **2015**, *119*, 1119-1128, doi:10.1016/j.proeng.2015.08.954.
321. Matos, C.; Bentes, I.; Santos, C.; Imteaz, M.; Pereira, S. Economic Analysis of a Rainwater Harvesting System in a Commercial Building. *Water Resources Management* **2015**, *29*, 3971-3986, doi:10.1007/s11269-015-1040-9.
322. Morales-Pinzón, T.; Rieradevall, J.; Gasol, C.M.; Gabarrell, X. Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *87*, 613-626, doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.021.
323. Okoye, C.O.; Solyali, O.; Akintug, B. Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach.

- Resources, Conservation and Recycling* **2015**, *104*, 131-140, doi:10.1016/j.resconrec.2015.08.015.
324. Sanches Fernandes, L.F.; Terêncio, D.P.S.; Pacheco, F.A.L. Rainwater harvesting systems for low demanding applications. *Science of the Total Environment* **2015**, *529*, 91-100, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.05.061.
325. Stratigea, D.; Makropoulos, C. Balancing water demand reduction and rainfall runoff minimisation: Modelling green roofs, rainwater harvesting and greywater reuse systems. *Water Science and Technology: Water Supply* **2015**, *15*, 248-255, doi:10.2166/ws.2014.105.
326. Campana, P.E.; Quan, S.J.; Robbio, F.I.; Lundblad, A.; Zhang, Y.; Ma, T.; Yan, J. Spatial optimization of residential urban district - Energy and water perspectives. *Energy Procedia* **2016**, *88*, 38-43, doi:10.1016/j.egypro.2016.06.011.
327. Campisano, A.; Modica, C. Rain water harvesting as source control option to reduce roof runoff peaks to downstream drainage systems. *Journal of Hydroinformatics* **2016**, *18*, 23-32, doi:10.2166/hydro.2015.133.
328. Dallman, S.; Chaudhry, A.M.; Muleta, M.K.; Lee, J. The Value of Rain: Benefit-Cost Analysis of Rainwater Harvesting Systems. *Water Resources Management* **2016**, *30*, 4415-4428, doi:10.1007/s11269-016-1429-0.
329. García-Montoya, M.; Sengupta, D.; Nápoles-Rivera, F.; Ponce-Ortega, J.M.; El-Halwagi, M.M. Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *130*, 82-91, doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.109.
330. Pelak, N.; Porporato, A. Sizing a rainwater harvesting cistern by minimizing costs. *Journal of Hydrology* **2016**, *541*, 1340-1347, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.08.036.
331. Ursino, N. Risk Analysis Approach to Rainwater Harvesting Systems. *Water* **2016**, *337*, doi:10.3390/w8080337.
332. Blinco, L.J.; Simpson, A.R.; Lambert, M.F.; Marchi, A. Formulation of the pump operations optimization problem for a harvested stormwater system. *Procedia Engineering* **2017**, *186*, 1-8, doi:10.1016/j.proeng.2017.03.228.
333. Fonseca, C.R.; Hidalgo, V.; Díaz-Delgado, C.; Vilchis-Francés, A.Y.; Gallego, I. Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *145*, 323-335, doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.057.
334. Geraldi, M.S.; Ghisi, E. Influence of the length of rainfall time series on rainwater harvesting systems: A case study in Berlin. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *125*, 169-180, doi:10.1016/j.resconrec.2017.06.011.
335. Adugna, D.; Jensen, M.B.; Lemma, B.; Gebrie, G.S. Assessing the potential for rooftop rainwater harvesting from large public institutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2018**, *15*, 1-11, doi:10.3390/ijerph15020336.
336. Amos, C.C.; Rahman, A.; Gathenya, J.M. Economic analysis of rainwater harvesting systems comparing developing and developed countries: A case study of Australia and Kenya. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *172*, 196-207, doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.114.
337. Jing, X.; Zhang, S.; Zhang, J.; Wang, Y.; Wang, Y.; Yue, T. Analysis and Modelling of Stormwater Volume Control Performance of Rainwater Harvesting Systems in Four Climatic Zones of China. *Water Resources Management* **2018**, *32*, 2649-2664, doi:10.1007/s11269-018-1950-4.
338. Lani, N.H.M.; Syafiuddin, A.; Yusop, Z.; Adam, U. binti; Amin, M.Z. bin M. Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. *Science of the Total Environment* **2018**, *636*, 1171-1179, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.418.

339. Marinoski, A.K.; Rupp, R.F.; Ghisi, E. Environmental benefit analysis of strategies for potable water savings in residential buildings. *Journal of Environmental Management* **2018**, *206*, 28-39, doi:10.1016/j.jenvman.2017.10.004.
340. Pavolová, H.; Bakalár, T.; Kudelas, D.; Puškárová, P. Environmental and economic assessment of rainwater application in households. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *209*, 1119-1125, doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.308.
341. Nolde, E. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination* **2007**, *215*, 1-11, doi:10.1016/j.desal.2006.10.033.
342. Sazakli, E.; Alexopoulos, A.; Leotsinidis, M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research* **2007**, *41*, 2039-2047, doi:10.1016/j.watres.2007.01.037.
343. Mendez, C.B.; Klenzendorf, J.B.; Afshar, B.R.; Simmons, M.T.; Barrett, M.E.; Kinney, K.A.; Kirisits, M.J. The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research* **2011**, *45*, 2049-2059, doi:10.1016/j.watres.2010.12.015.
344. Naddeo, V.; Scannapieco, D.; Belgiorno, V. Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. *Journal of Hydrology* **2013**, *498*, 287-291, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.012.
345. Silva Vieira, A.; Weeber, M.; Ghisi, E. Self-cleaning filtration: A novel concept for rainwater harvesting systems. *Resources, Conservation and Recycling* **2013**, *78*, 67-73, doi:10.1016/j.resconrec.2013.06.008.
346. Dobrowsky, P.H.; Mannel, D.; De Kwaadsteniet, M.; Prozesky, H.; Khan, W.; Cloete, T.E. Quality assessment and primary uses of harvested rainwater in Kleinmond, South Africa. *Water SA* **2014**, *40*, 401-406, doi:10.4314/wsa.v40i3.2.
347. Van der Sterren, M.; Rahman, A.; Ryan, G. Modeling of a lot scale rainwater tank system in XP-SWMM: A case study in Western Sydney, Australia. *Journal of Environmental Management* **2014**, *141*, 177-189, doi:10.1016/j.jenvman.2014.02.013.
348. Zhang, Q.; Wang, X.; Hou, P.; Wan, W.; Li, R.; Ren, Y.; Ouyang, Z. Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China. *Journal of Environmental Management* **2014**, *132*, 178-187, doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.009.
349. Sánchez, A.S.; Cohim, E.; Kalid, R.A. A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology* **2015**, *6*, 119-137, doi:10.1016/j.swaqe.2015.04.002.
350. Angrill, S.; Petit-Boix, A.; Morales-Pinzón, T.; Josa, A.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. Urban rainwater runoff quantity and quality - A potential endogenous resource in cities? *Journal of Environmental Management* **2017**, *189*, 14-21, doi:10.1016/j.jenvman.2016.12.027.
351. Shaheed, R.; Wan Mohtar, W.H.M.; El-Shafie, A. Ensuring water security by utilizing roof-harvested rainwater and lake water treated with a low-cost integrated adsorption-filtration system. *Water Science and Engineering* **2017**, *10*, 115-124, doi:10.1016/j.wse.2017.05.002.
352. Cheng Leong, J.Y.; Chong, M.N.; Poh, P.E. Assessment of greywater quality and performance of a pilot-scale decentralised hybrid rainwater-greywater system. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *172*, 81-91, doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.172.
353. Yan, X.; Ward, S.; Butler, D.; Daly, B. Performance assessment and life cycle analysis of potable water production from harvested rainwater by a decentralized system. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *172*, 2167-2173, doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.198.

354. Dastorani, M.; Mirzavand, M.; Dastorani, M.T.; Sadatinejad, S.J. Comparative study among different time series models applied to monthly rainfall forecasting in semi-arid climate condition. *Natural Hazards* **2016**, *81*, 1811-1827, doi:10.1007/s11069-016-2163-x.
355. Venkata Ramana, R.; Krishna, B.; Kumar, S.R.; Pandey, N.G. Monthly Rainfall Prediction Using Wavelet Neural Network Analysis. *Water Resources Management* **2013**, *27*, 3697-3711, doi:10.1007/s11269-013-0374-4.
356. Li, Y.P.; Nie, S.; Huang, C.Z.; McBean, E.A.; Fan, Y.R.; Huang, G.H. An Integrated Risk Analysis Method for Planning Water Resource Systems to Support Sustainable Development of An Arid Region. *Journal of Environmental Informatics* **2017**, *29*, 1-15, doi:10.3808/jei.201700359.
357. Radhakrishnan, P.; Dinesh, S. An alternative approach to characterize time series data: Case study on Malaysian rainfall data. *Chaos, Solitons and Fractals* **2006**, *27*, 511-518, doi:10.1016/j.chaos.2005.04.030.
358. Wang, S.; Feng, J.; Liu, G. Application of seasonal time series model in the precipitation forecast. *Mathematical and Computer Modelling* **2013**, *58*, 677-683, doi:10.1016/j.mcm.2011.10.034.
359. Chang, T.J.; Kavvas, M.L.; Delleur, J.W. Daily precipitation modelling by discrete autoregressive moving average processes. *Water Resources Research* **1984**, *20*, 565-580.
360. Ben Alaya, M.A.; Chebana, F.; Ouarda, T.B.M.J. Probabilistic multisite statistical downscaling for daily precipitation using a Bernoulli-generalized pareto multivariate autoregressive model. *Journal of Climate* **2015**, *28*, 2349-2364, doi:10.1175/JCLI-D-14-00237.1.
361. Kim, J.W.; Kim, K.Y.; Kim, M.K.; Cho, C.H.; Lee, Y.; Lee, J. Statistical multisite simulations of summertime precipitation over South Korea and its future change based on observational data. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **2013**, *49*, 687-702, doi:10.1007/s13143-013-0061-7.
362. Chatfield, C. *The analysis of time series an introduction*; Third.; 1984; ISBN 9780412260308.
363. Yule, G.U. Why do we Sometimes get Nonsense-Correlations between Time-Series?--A Study in Sampling and the Nature of Time-Series. *Journal of the Royal Statistical Society* **1926**, *89*, 1, doi:10.2307/2341482.
364. Yule, G.U. On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with special reference to Wolfer's Sunspot Numbers. *Journal of the Royal Statistical Society* **1927**, *226*, 267-298.
365. Slutsky, E. The Summation of Random Causes as the Source of Cyclic Processes. *Econometrica* **1937**, *5*, 105-146.
366. Wold, H.O. *The analysis of stationary time series*; 1954;
367. Cox, D.R.; Miller, H.D. *The theory of stochastic processes*; Chapman & Hall/CRC, 1977; ISBN 0412151707.
368. Sanvicente-Sánchez, H.; Solís-Alvarado, Y. Generator of Synthetic Rainfall Time Series through Markov Hidden States. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2008*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2008; Vol. 5073 LNCS, pp. 959-969 ISBN 354069840X.
369. Lee, T. Stochastic simulation of precipitation data for preserving key statistics in their original domain and application to climate change analysis. *Theoretical and Applied Climatology* **2015**, *124*, 91-102, doi:10.1007/s00704-015-1395-0.
370. Papalaskaris, T.; Panagiotidis, T.; Papadopoulos, S.; Pantrakis, A. Stochastic Generation of Daily Rainfall, in Kavala City Station, North-Eastern Greece. *Procedia Engineering* **2016**, *162*, 162-171, doi:10.1016/j.proeng.2016.11.032.
371. Cantet, P.; Arnaud, P. Gains from modelling dependence of rainfall variables into a stochastic model: application of the copula approach at several sites. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **2012**, *9*, 11227-11266, doi:10.5194/hessd-9-11227-2012.

372. Bang, S.; Bishnoi, R.; Chauhan, A.S.; Dixit, A.K.; Chawla, I. Fuzzy Logic based Crop Yield Prediction using Temperature and Rainfall parameters predicted through ARMA, SARIMA, and ARMAX models. In Proceedings of the 2019 Twelfth International Conference on Contemporary Computing (IC3); IEEE: Noida, India, 2019; pp. 1-6.
373. NOAA (National Centers for Environmental Information) Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures Available online: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php> (accessed on Sep 29, 2017).
374. Sun, H.; Furbish, D.J. Annual precipitation and river discharges in Florida in response to El Niño- and La Niña-sea surface temperature anomalies. *Journal of Hydrology* **1997**, *199*, 74-87, doi:10.1016/S0022-1694(96)03303-3.
375. Ubilava, D.; Helmers, C.G. Forecasting ENSO with a smooth transition autoregressive model. *Environmental Modelling & Software* **2013**, *40*, 181-190, doi:10.1016/j.envsoft.2012.09.008.
376. Babovic, V. Data mining in hydrology. *Hydrological Processes* **2005**, *19*, 1511-1515, doi:10.1002/hyp.5862.
377. Babovic, V.; Keijzer, M. Forecasting of River Discharges in the Presence of Chaos and Noise. *Flood Issues in Contemporary Water Management* **2000**, 405-419, doi:10.1007/978-94-011-4140-6_42.
378. Sun, Y.; Babovic, V.; Chan, E.S. Multi-step-ahead model error prediction using time-delay neural networks combined with chaos theory. *Journal of Hydrology* **2010**, *395*, 109-116, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.020.
379. Yu, X.; Liang, S.Y.; Babovic, V. EC-SVM approach for real-time hydrologic forecasting. *Journal of Hydroinformatics* **2004**, *6*, 209-223, doi:10.2166/hydro.2004.0016.
380. Breinl, K.; Turkington, T.; Stowasser, M. Simulating daily precipitation and temperature: A weather generation framework for assessing hydrometeorological hazards. *Meteorological Applications* **2015**, *22*, 334-347, doi:10.1002/met.1459.
381. Chapman, T.G. Stochastic models for daily rainfall in the Western Pacific. *Mathematics and Computers in Simulation* **1997**, *43*, 351-358, doi:10.1016/S0378-4754(97)00019-0.
382. Sharma, A.; Lall, U. A nonparametric approach for daily rainfall simulation. *Mathematics and Computers in Simulation* **1999**, *48*, 361-371, doi:10.1016/S0378-4754(99)00016-6.
383. Carvajal Escobar, Y.; Segura, J.B.M. Modelos multivariados de predicción de caudal mensual utilizando variables macroclimáticas. Caso de estudio Río Cauca, Colombia. *Revista Ingeniería y competitividad* **2005**, *7*, 18-32.
384. Mohammadi, K.; Eslami, H.R.; Kahawita, R. Parameter estimation of an ARMA model for river flow forecasting using goal programming. *Journal of Hydrology* **2006**, *331*, 293-299, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.05.017.
385. Chao, Z.; Hua-sheng, H.; Wei-min, B.; Luo-ping, Z. Robust recursive estimation of auto-regressive updating model parameters for real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology* **2008**, *349*, 376-382, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.011.
386. Akpanta, A.C.; Okorie, I.E.; Okoye, N.N. SARIMA Modelling of the Frequency of Monthly Rainfall in Umuahia , Abia State of Nigeria. *American Journal of Mathematics and Statistics* **2015**, *5*, 82-87, doi:10.5923/j.ajms.20150502.05.
387. Mahmud, I.; Bari, S.H.; Ur Rahman, M.T. Monthly rainfall forecast of Bangladesh using autoregressive integrated moving average method. *Environmental Engineering Research* **2017**, *22*, 162-168, doi:10.4491/eer.2016.075.
388. Etuk, E.H.; Moffat, I.U.; Chims, B.E. Modelling Monthly Rainfall Data of Port Harcourt , Nigeria by Seasonal Box-Jenkins Methods. *International Journal of Sciences* **2013**, *2*, 1-8.

389. Lata, K.; Misra, A.K. The influence of forestry resources on rainfall: A deterministic and stochastic model. *Applied Mathematical Modelling* **2020**, *81*, 673-689, doi:10.1016/j.apm.2020.01.009.
390. Berhane, T.; Shibabaw, N.; Awgichew, G.; Kebede, T. Option pricing of weather derivatives based on a stochastic daily rainfall model with Analogue Year component. *Heliyon* **2020**, *6*, e03212, doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03212.
391. Cujia, A.; Agudelo-Castañeda, D.; Pacheco-Bustos, C.; Teixeira, E.C. Forecast of PM10 time-series data: A study case in Caribbean cities. *Atmospheric Pollution Research* **2019**, *10*, 2053-2062, doi:10.1016/j.apr.2019.09.013.
392. Jing, Z.; An, W.; Zhang, S.; Xia, Z. Flood control ability of river-type reservoirs using stochastic flood simulation and dynamic capacity flood regulation. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *257*, 120809, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120809.
393. Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS) *Fases de prospección y formulación del plan de ordenamiento y manejo integral de la cuenca hidrográfica del río Sinú (POMCA-RS)*; Montería, 2006;
394. Valbuena, D.L. Geomorfología y condiciones hidráulicas del sistema fluvial del río Sinú. Integración multiescalar. 1945-1999-2016, Universidad Nacional de Colombia, 2017.
395. Chow, V. Te; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Hidrología Aplicada*; Mc Graw Hill, Ed.; Santafé de Bogotá-Colombia, 1994; ISBN 958-600-171-7.
396. Esquivel, G.; Cerano, J.; Sánchez, I.; López, A.; Gutiérrez, O.G. Validación del modelo ClimGen en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos. *Tecnología y Ciencias del Agua* **2015**, *VI*, 117-130.
397. Mckague, K.; Rudra, R.; Ogilvie, J. ClimGen - A Convenient Weather Generation Tool for Canadian Climate Stations. In Proceedings of the Meeting of the CSAE/SCGR Canadian Society for Engineering in Agricultural Food and Biological Systems; Montreal, QC, Canada, 2003; pp. 1-26.
398. Dabral, P.P.; Murry, M.Z. Modelling and Forecasting of Rainfall Time Series Using SARIMA. *Environmental Processes* **2017**, *4*, 399-419, doi:10.1007/s40710-017-0226-y.
399. Nury, A.H.; Hasan, K.; Alam, M.J. Bin Comparative study of wavelet-ARIMA and wavelet-ANN models for temperature time series data in northeastern Bangladesh. *Journal of King Saud University - Science* **2017**, *29*, 47-61, doi:10.1016/j.jksus.2015.12.002.
400. Chatfield, C. *Time-Series Forecasting*; 1st Ed.; Chapman and Hall/CRC: Florida, USA, 2000; ISBN 978-1-4200-3620-6.
401. Cleveland, R.B.; Cleveland, W.S.; McRae, J.E.; Terpenning, I. STL: A seasonal-trend decomposition. *Journal of official statistics* **1990**, *6*, 3-73.
402. Ahaneku, I.E.; Otache, Y.M. Stochastic characteristics and modelling of monthly rainfall time series of Ilorin, Nigeria. *Open Journal of Modern Hydrology* **2014**, *2014*.
403. Chatfield, C. *Time-Series Forecasting*; 2000; ISBN 9781420036206.
404. Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.; Reinsel, G.C. *Time Series Analysis Forecasting and Control* 1994.
405. Salas, J.D.; Obeysekera, J.T.B. ARMA model identification of hydrologic time series. *Water Resources Research* **1982**, *18*, 1011-1021.
406. Burlando, P.; Rosso, R.; Cadavid, L.G.; Salas, J.D. Forecasting of short-term rainfall using ARMA models. *Journal of Hydrology* **1993**, *144*, 193-211.
407. Ljung, G.M.; Box, G.E.P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika* **1978**, *65*, 297-303, doi:10.1093/biomet/65.2.297.

408. Said, S.E.; Dickey, D.A. Testing for Unit Roots in Autoregressive-Moving Average Models of Unknown Order. *Biometrika* **1984**, *71*, 599-607, doi:10.2307/2336570.
409. Mendenhall, W.; Beaver, R.J.; Beaver, B.M. *Introduction to probability and statistics*; 14th ed.; Cengage Learning, 2012; ISBN 9781133103752.
410. Quevedo-Tiznado, J.A.; Mobayed-Khodr, N.; Fuentes-Ruiz, C.; González-Sosa, E.; Chávez-García, C.A. Simulación Del Escurrimiento Directo De Eventos En Cuencas Pequeñas Con El Modelo Hidras. *Agrociencia* **2016**, *50*, 787-798.
411. Hosseini, S.M.; Mahjouri, N.; Riahi, S. Development of a direct geomorphologic IUH model for daily runoff estimation in ungauged watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* **2016**, *21*, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001333.
412. Radwan, F.; Alazba, A.A.; Mossad, A. Estimating potential direct runoff for ungauged urban watersheds based on RST and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* **2018**, *11*, doi:10.1007/s12517-018-4067-4.
413. Walega, A., A.; Rutkowska, A.; Grzebinoga, M. Direct runoff assessment using modified SME method in catchments in the Upper Vistula River Basin. *Acta Geophysica* **2017**, *65*, 363-375, doi:10.1007/s11600-017-0033-x.
414. Fassman-Beck, E.; Hunt, W.; Berghage, R.; Carpenter, D.; Kurtz, T.; Stovin, V.; Wadzuk, B. Curve number and runoff coefficients for extensive living roofs. *Journal of Hydrologic Engineering* **2015**, *21*, 1-10, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001318.
415. Babiker, I.S.; Mohamed, M.A.A. Use of NRCS-curve number method for peak discharge estimation in Sharqu ElNeil locality, Khartoum, Sudan. *Arabian Journal of Geosciences* **2019**, *12*, doi:10.1007/s12517-019-4685-5.
416. Tailor, D.; Shrimali, N.J. Surface runoff estimation by SCS curve number method using gis for Rupen-Khan watershed , Mehsana district , Gujarat soil. *J. Indian Water Resour. Soc.*, **2016**, *36*, 2-6.
417. Li, C.; Liu, M.; Hu, Y.; Zong, M.; Zhao, M.; Walter, M.T. Characteristics of impervious surface and its effect on direct runoff: A case study in a rapidly urbanized area. *Water Science and Technology: Water Supply* **2019**, *19*, 1885-1891, doi:10.2166/ws.2019.064.
418. Li, C.; Liu, M.; Hu, Y.; Shi, T.; Zong, M.; Walter, M.T. Assessing the impact of urbanization on direct runoff using improved composite CN method in a large urban area. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2018**, *15*, doi:10.3390/ijerph15040775.
419. Suryatmojo, H.; Putra, G.M.; Satriagasa, M.C. Investigation of direct runoff in the intensive farming system of upstream Merawu watershed, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2019**, *407*, doi:10.1088/1755-1315/407/1/012013.
420. Jabri, B.; Hessane, M.A. Production of a Curve Number map using GIS Techniques in the watershed of the high Sebou (Morocco). In *Proceedings of the E3S Web of Conferences*; 2020; Vol. 150, pp. 1-9.
421. Parisay, Z.; Sheikh, V.; Bahremand, A.; Bairam ColombiaKomaki, C.; Abdollahi, K. An Approach for Estimating Monthly Curve Number Based on Remotely-Sensed MODIS Leaf Area Index Products. *Water Resources Management* **2019**, *33*, 2955-2972, doi:10.1007/s11269-019-02279-8.
422. Taddele Dile, Y.; Karlberg, L.; Srinivasan, R.; Rockström, J. Investigation of the Curve Number Method For Surface Runoff Estimation In Tropical Regions. *Journal of the American Water Resources Association* **2016**, *52*, 1155-1169, doi:10.1111/1752-1688.12446.
423. Moon, G.W.; Ajmal, M.; Ahn, J.H.; Kim, T.W. Investigating practical alternatives to the NRCS-CN method for direct runoff estimation using slope-adjusted curve numbers. *KSCE Journal of Civil Engineering* **2016**, *20*, 3022-3030, doi:10.1007/s12205-016-0148-7.
424. Akbari, M.; Haghighi, A.T.; Aghayi, M.M.; Javadian, M.; Tajrishy, M.; Kløve, B. Assimilation of satellite-based data for hydrological mapping

- of precipitation and direct runoff coefficient for the Lake Urmia basin in Iran. *Water (Switzerland)* **2019**, *11*, doi:10.3390/w11081624.
425. Gajbhiye, S.; Mishra, S.K.; Pandey, A. Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. *Applied Water Science* **2014**, *4*, 51-61, doi:10.1007/s13201-013-0129-7.
 426. Mistry, A.; Lodha, P.P.; Prakash, I.; Mehmood, K. Estimation of Direct Runoff for Purna River Sub-Basin, Using Scs-Cn Method, Dangas District, Gujarat. *International Journal of Advance Engineering and Research Development* **2017**, *4*, 581-593, doi:10.21090/ijaerd.53055.
 427. Rubyhanusha, P.; Rajapakse, R.L.H.L. Significance of Spatial Variability in Precipitation for Stream Flow Modeling in Maha Oya River Basin, Sri Lanka. *MERCon 2019 - Proceedings, 5th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference 2019*, 656-661, doi:10.1109/MERCon.2019.8818774.
 428. Guswa, A.J.; Hamel, P.; Meyer, K. Curve number approach to estimate monthly and annual direct runoff. *Journal of Hydrologic Engineering* **2018**, *23*, 1-10, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001606.
 429. Kozlov, D.V.; Ghebrehiwot, A.A. Efficacy of digital elevation and Nash models in runoff forecast. *Magazine of Civil Engineering* **2019**, *87*, 103-122, doi:DOI: 10.18720/MCE.87.9.
 430. USGS (U.S. Geological Survey) HydroSHEDS 15 arc-second DEMs for South America Available online: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov> (accessed on May 29, 2018).
 431. Bruhn, M.; Miralles-Wilhelm, F. *Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe*; Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2014;
 432. Giordano, M.; Shah, T. International Journal of Water From IWRM back to integrated water resources management. *International Journal of Water Resources Development* **2014**, *30*, 264-376, doi:10.1080/07900627.2013.851521.
 433. Baños-González, I.; Martínez-Fernández, J.; Esteve, M.A. Simulación dinámica de sistemas socio-ecológicos: sostenibilidad en Reservas de la Biosfera. *Ecosistemas* **2013**, *22*, 74-83.
 434. Beven, K.J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*; John Wiley & Sons, 2011;
 435. Martínez-Fernández, J.; Esteve-Selma, M.A.; Baños-González, I.; Carreño, F.; Moreno, A. Sustainability of Mediterranean irrigated agro-landscapes. *Ecological Modelling* **2013**, *248*, 11-19.
 436. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.*; FAO, Ed.; FAO: Roma, 2006; ISBN 92-5-304219-2.
 437. Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* **2007**, *50*, 885-900, doi:10.13031/2013.23153.
 438. Khoi, D.N.; Thom, V.T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. *Global Ecology and Conservation* **2015**, *4*, 538-548, doi:10.1016/j.gecco.2015.10.007.
 439. SEI, E.I. of S. WEAP- TUTORIAL Water Evaluation And Planning System. *Weap* **2016**, 1-286.
 440. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios *Evaluación Integral De Prestadores Uniaguas SA*; Superservicios, 2015; pp. 1-32;.
 441. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios *Evaluación Integral De Prestadores Empresas Públicas De San pelayo*; Superservicios, 2018; pp. 1-63;.
 442. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios *Evaluación integral de prestadores de servicios públicos domiciliarios de San Bernardo del Viento*; Superservicios: Bogotá, 2018; pp. 1-57;.

443. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios *Evaluación Integral De Prestadores Veolia*; Superservicios: Bogotá, 2017; ISBN 2010130004876.
444. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios *Evaluación integral de prestadores empresas públicas municipales de Tierralta*; Superservicios: Bogotá, 2018; pp. 1-142;.
445. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios *Evaluación integral de prestadores Empresas varias muncipales de Valencia*; Superservicios: Bogotá, 2017; pp. 1-27;.
446. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios *Evaluación Integral de Prestadores Aguas del Sinú*; Superservicios: Bogotá, 2017;
447. IDEAM *Estudio Nacional del Agua 2014*; Franco Torres, O., García Herrán, M., Vargas Martínez, O., Bernal Quiroga, F., Campillo, A.K., Eds.; IDEAM: Bogotá, 2015; ISBN 978-958-8067-70-4.
448. IDEAM *Estudio Nacional del Agua 2018*; García Herrán, M., Vargas Martínez, N.O., Jaramillo Rodríguez, O., Marín Salazar, J.P., Eds.; IDEAM: Bogotá, 2019; ISBN 978-958-54-8912-7.
449. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales *Estudio Nacional del Agua 2010*; Franco Torres, O., García Herrán, M., Vargas Martínez, O., Eds.; IDEAM: Bogotá, 2010; ISBN 1-02-044847-4.
450. Dungumaro, E.W.; Madulu, N.F. Public participation in integrated water resources management: The case of Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth* **2003**, *28*, 1009-1014, doi:10.1016/j.pce.2003.08.042.
451. Kramer, A.; Pahl-wostl, C. The global policy network behind integrated water resources management: is it an effective norm diffusor? *Ecology and Society* **2014**, *19*, 1-24.
452. Ferreyra, C.; de Loë, R.C.; Kreutzwiser, R.D. Imagined communities , contested watersheds: Challenges to integrated water resources management in agricultural areas. *Journal of Rural Studies* **2008**, *24*, 304-321, doi:10.1016/j.jrurstud.2007.11.001.
453. Carvajal-Escobar, Y. Environmental flow regime in the framework of integrated water resources management strategy. *Ecohydrology and Hydrobiology* **2008**, *8*, 307-315, doi:10.2478/v10104-009-0024-x.
454. Lempert, R.J.; Groves, D.G. Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west. *Technological Forecasting and Social Change* **2010**, *77*, 960-974, doi:10.1016/j.techfore.2010.04.007.
455. Huntjens, P.; Pahl-Wostl, C.; Rihoux, B.; Schlüter, M.; Flachner, Z.; Neto, S.; Koskova, R.; Dickens, C.; Kiti, I.N. Adaptive water management and policy learning in a changing climate: A formal comparative analysis of eight water management regimes in Europe, Africa and Asia. *Environmental Policy and Governance* **2011**, *21*, 145-163, doi:10.1002/eet.571.
456. Costa Barbosa, M.; Mushtaq, S.; Alam, K. Integrated water resources management: Are river basin committees in Brazil enabling effective stakeholder interaction? *Environmental Science and Policy* **2017**, *76*, 1-11, doi:10.1016/j.envsci.2017.06.002.
457. Crase, L.; Cooper, B.; Dollery, B.; Marques, R. One Person's Drain Is another's Water Supply: Why Property Rights, Scope, Measurement and Hydrology Matter when it Comes to Integrated Water Resources Management. *Ecological Economics* **2018**, *147*, 436-441, doi:10.1016/j.ecolecon.2018.01.036.
458. Fischhendler, I.; Heikkila, T. Change? The Case of Water Policy Reform in Israel. *Ecology and Society* **2010**, *15*, 1-16.
459. Grigg, N.S. Integrated water resources management: balancing views and improving practice. *Water International* **2008**, *33*, 279-292, doi:10.1080/02508060802272820.

460. Gallego-Ayala, J.; Juízo, D. Strategic implementation of integrated water resources management in Mozambique: An A'WOT analysis. *Physics and Chemistry of the Earth* **2011**, *36*, 1103-1111, doi:10.1016/j.pce.2011.07.040.
461. Petit, O. Paradise lost? The difficulties in defining and monitoring Integrated Water Resources Management indicators. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2016**, *21*, 58-64, doi:10.1016/j.cosust.2016.11.006.
462. Ross, A. Speeding the transition towards integrated groundwater and surface water management in Australia. *Journal of Hydrology* **2016**, *567*, e1-e10, doi:10.1016/j.jhydrol.2017.01.037.
463. Asamblea Nacional Constituyente *Constitución política de Colombia 1991*; 1991;
464. de Ambiente, M. *Decretos | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*;
465. GWP, G.W.P.- *What is IWRM? - GWP*;
466. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible *Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial*; 2018; ISBN 978-958-8901-99-2.
467. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible *Plan de formación para la gestión integral del recurso hídrico*; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ed.; Bogotá, 2018; ISBN 978-958-8901-82-4.