



Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque
y Bebedero mediante el modelo Water Evaluation and Planning
System (WEAP). Guanacaste, Costa Rica, 1993-2016

Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias Sociales
Escuela de Geografía

Postulante: Melisa Mena Benavides

Carné: B24063
2019

Tribunal Examinador



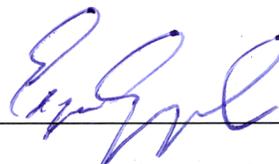
Dr. Christian Birkel
Director del Comité Asesor



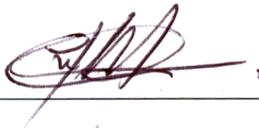
M.Sc. Francisco Solano Mata
Tribunal Examinador



Dr. Isabel Avendaño Flores
Lectora del Comité Asesor



Dr. Edgar Espinoza Cisneros
Tribunal Examinador



Dr. Rafael Arce Mesén
Lector del Comité Asesor



Melisa Mena Benavides
Sustentante

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director de tesis Dr. Christian Birkel, por su confianza en mí, su acompañamiento incondicional y sus innumerables palabras de aliento sin las que esta tesis no habría sido posible. Así mismo a la Dra. Isabel Avendaño Flores y el Dr. Rafael Arce Mesén por su apoyo y consejo.

A todas las personas que participan del proyecto TropiSeca les agradezco su apoyo y consejos. En particular a la Dr. Alexandra Nauditt, M.Sc Juan Ramírez, M.Sc Justyna Sycz, Dr. Patricio Crespo y Dr. Alex Manuel Áviles. A la *Deutscher Akademischer Austausch Dienst* (DAAD) por el financiamiento del proyecto TropiSeca el cual hizo posible el intercambio entre estudiantes y profesores del Observatorio de Agua y Cambio Global de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica y el *Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics* de la *TH Koeln University of Applied Sciences* y las demás instituciones que participan de este proyecto.

También quiero agradecer al M.Sc. Javier Artiñano del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), a Herbert Villavicencio de la Dirección de Aguas, a Dr. Ana María Durán Quesada del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, por los datos facilitados. Así mismo agradezco los consejos brindados por M.Sc. Karina Palacios, Dra. Alicia Correa Barahona y el DEA. Pascal Girot.

Por último, quiero agradecer de todo corazón a mi familia por su apoyo incondicional y a mis amigos cercanos, quienes en conjunto forman una red de apoyo fundamental a mí.

Resumen

Las cuencas Tempisque y Bebedero, al norte de Costa Rica, se caracterizan por una clara estacionalidad lluviosa marcada por una definida estación seca que se extiende de diciembre a mayo. La variabilidad climática natural se ve agravada por fenómenos regionales de océano y atmósfera como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que provoca sequías hidrometeorológicas de gravedad variable en la región costera del Pacífico oriental tropical; así como la ocurrencia de inundaciones que dependen de otros factores a escala climática regional y global. En esta investigación se propone el modelo WEAP (por sus siglas en inglés *Water Evaluation and Planning System*) como una herramienta para evaluar la disponibilidad de agua, así como el efecto que las demandas sectoriales tienen en disponibilidad. También se discute que tan sustentable es el manejo del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero.

El caudal seminatural en las cuencas Tempisque y Bebedero se simuló para el periodo entre 1993 a 2016. Las cabeceras de cada cuenca fueron calibradas conforme a la disponibilidad de caudales observados, se calibró la parte alta de las cuencas Tempisque y Bebedero para el periodo entre 1993 a 2003, con énfasis en la calibración de los caudales mínimos, logrando una notoria eficiencia de simulación en la cabecera del río Tempisque (logNSE 0,79). Los resultados de la simulación muestran una adecuada variabilidad intra anual al compararse con los observados y una clara disminución del caudal entre 1997 y 1998 a causa de la sequía provocada por el fenómeno El Niño. En la sección media y baja de ambas cuencas faltan mediciones de caudal, esto impidió realizar la calibración y en su lugar se definieron los valores paramétricos utilizados en las cabeceras.

Del agua superficial concesionada, un 0,48% se utiliza para uso doméstico, un 0,56% para uso turístico y un 89,96% para uso agrícola. Debido a que el agua destinada al sector doméstico y turístico es muy poca en comparación al agrícola, estos dos sectores no representan una amenaza para la disponibilidad presente y futura del agua superficial. Caso contrario, la demanda del sector agrícola puede superar la disponibilidad en particular durante la época seca al asumir un escenario de consumo máximo, situación que comprometería los ecosistemas fluviales. En el caso del río Bebedero se estimó que existe un excedente proveniente del trasvase de agua a

través de los proyectos ARCOSA y DRAT. El aumento máximo porcentual estimado es de 375% cuando se compara el caudal simulado y el caudal después del aporte del trasvase.

Por último, la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero está en peligro por los siguientes aspectos: 1) El manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, dificulta obtener una estimación correcta sobre la disponibilidad la disponibilidad y consumo de agua 2) Al no contar con un caudal ambiental establecido no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua y en época seca cuando la demanda agrícola aumenta, esta situación pone en peligro la salud de los ecosistemas riparios 3) La variabilidad climática propia del área de estudio y las variaciones extremas en el clima producto del cambio climático, exigen tomar medidas de adaptación hacia un escenario de menor disponibilidad hídrica y sin embargo existe un vacío en la política hídrica costarricense que permita el manejo integrado del agua.

Índice

I.	Marco Introdutorio	8
1.1.	Presentación.....	8
1.2.	Caracterización del área de estudio	8
1.3.	Planteamiento del problema.....	13
1.4.	Justificación.....	14
1.5.	Objetivo general.....	16
1.6.	Objetivos específicos	16
1.7.	Antecedentes.....	16
1.7.1.	Marco legal sobre el agua y algunas observaciones sobre su manejo en Costa Rica	16
1.7.2.	Manejo del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero	18
1.7.3.	Estudios sobre la cuenca del río Tempisque	20
II.	Marco conceptual	24
2.1.	Interpolación espacial: Ponderado por el Inverso a la Distancia	24
2.2.	Procesos hidrológicos de precipitación-escorrentía.....	24
2.3.	Sensibilidad de parámetros y eficiencia.....	29
2.4.	Sustentabilidad del recurso hídrico	31
III.	Marco metodológico	33
3.1.	Procedimientos para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, mediante el uso del programa WEAP.....	33
3.1.1.	Datos de entrada para el modelo WEAP.....	33
3.1.2.	Calibración del modelo, periodo 1993-2003.....	39
3.3.	Procedimientos para evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP.	43

IV.	Cuantificación de la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP	49
4.1.	Datos de entrada para el modelo WEAP	49
4.2.	Calibración visual del modelo, periodo 1993-2003.	54
4.3.	Calibración a partir de la prueba de sensibilidad y medición de la eficiencia periodo 1993-2003.....	57
4.4.	Caudal simulado para el periodo 1993-2016	62
V.	Describir los registros de concesiones en las cuencas Tempisque y Bebedero y comparar la demanda frente a la disponibilidad de agua superficial.....	65
5.1.	Caudales concesionados por uso y subcuenca.	65
5.2.	Descripción de la distribución, fuente y caudales concesionados para consumo humano, agrícola y turístico.....	66
5.3.	Caudal remanente después de la extracción motivo de las concesiones.....	74
VI.	Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios hipotéticos incorporados en el programa WEAP.	81
6.1.	Demandas de agua para el sector doméstico y turístico y su efecto en la disponibilidad.....	81
6.2.	Demanda agrícola y su efecto en la disponibilidad	84
6.3.	El estado de la sostenibilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero.....	93
VII.	Conclusiones y Recomendaciones.....	99
VIII.	Bibliografía citada	104

Índice de cuadros

Cuadro 1: Indicadores poblacionales para los cantones en las cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica, 2011	12
Cuadro 2: Dotaciones de uso doméstico poblacional.	45
Cuadro 3: Consumo de agua según cultivo (m ³ /ha/año)	47
Cuadro 4: Calibración visual, valores asignados a los parámetros dependientes e independientes de las coberturas de la tierra.	55
Cuadro 5: Valores asignados a los parámetros independientes a los cambios de cobertura determinados mediante la calibración por eficiencia, Subcuencas 1 y 2.	60
Cuadro 6: Comparación de la eficiencia global entre la calibración visual y la de sensibilidad.	62
Cuadro 7: Caudales máximo, mínimos y acumulados por subcuenca para el periodo 1993-2016.	64
Cuadro 8: Caudal concesionado en litros por segundo (l/s) para todos los usos por subcuenca, agua superficial, actualizado al 2017.	65
Cuadro 9: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y por subcuenca, para las concesiones con expediente tipo “Acueducto rural”, 1993-2017.	69
Cuadro 10: Caudales para consumo humano según fuente y por subcuenca, para los expedientes tipo “Agua superficial”, 1993-2017.	70
Cuadro 11: Caudales concesionados para consumo turístico según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017.	73
Cuadro 12: Caudales concesionados para riego según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017.	74
Cuadro 13: agua superficial concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca.	75
Cuadro 14: Personas abastecidas en un año, por subcuenca, 1993-2017.	82
Cuadro 15: Caudal de requerimiento promedio mensual para los sectores doméstico, turístico y agrícola.	84
Cuadro 16: Área agrícola en hectáreas, según cultivo, en las cuencas Tempisque y Bebedero.	88
Cuadro 17: Recomendaciones para asegurar la sustentabilidad del recurso hídrico en Costa Rica.	94

Índice de figuras

Figura 1: Localización del área de estudio, cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica.	10
Figura 2: Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo.....	26
Figura 3: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey) y secciones de los ríos principales.	34
Figura 4: Flujo de procesos automatizados con la herramienta <i>Model Builder</i> de ArcMap	37
Figura 5: Variación mensual en los valores Kc según cultivo	39
Figura 6: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey), secciones de ríos principales, las demandas (doméstica, turística y agrícola) y las líneas de transmisión. Fuente: elaboración propia, 2019.	44
Figura 7: Promedio Anual de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento resultado de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016, área de estudio.	50
Figura 8: Promedios mensuales de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento extraídos de las interpolaciones mensuales para cada subcuenca entre 1993-2016.	52
Figura 9: Cobertura de la tierra, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, año 2010	53
Figura 10: Tipos de cobertura por fracción del área de cada subcuenca.	54
Figura 11: Resultados de la calibración visual entre caudal observado y la escorrentía simulada.	57
Figura 12: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z ₁ y Z ₂ para la Subcuenca 1 cabecera del Tempisque.	58
Figura 13: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z ₁ y Z ₂ para la Subcuenca 2 cabecera del Bebedero.	59
Figura 14: Resultados de la calibración con sensibilidad y eficiencia de parámetros.....	61
Figura 15: Caudales simulados por subcuenca, cuencas del río Tempisque y Bebedero, 1993-2016.	63
Figura 16: Agua para consumo doméstico en el área de estudio, 1993- 2017, A) Concesiones tipo Acueducto Rural B) Concesiones tipo Agua Superficial C) Caudales concesionados bajo la	

categoría de Acueducto Rural D) Caudales concesionados bajo la categoría de Agua Superficial.	68
Figura 17: Agua para consumo agrícola y turístico en el área de estudio, 1993- 2017, A) Concesiones para uso agrícola B) Concesiones para uso turístico C) Caudales de agua superficial concesionados para uso agrícola D) Caudales de agua superficial concesionados para uso turístico.	71
Figura 18: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Tempisque.	77
Figura 19: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Bebedero.....	78
Figura 20: Volumen de la demanda para el sectores doméstico, turístico y agrícola.	83
Figura 21: Tipo de cobertura para las cuencas del Tempisque y Bebedero.	86
Figura 22: Cobertura de la tierra por tipo de cultivo, DRAT, II semestre, 2013-2016.....	87
Figura 23: Caudal simulado y después de las demandas, río Tempisque.....	91
Figura 24: Caudales promedio mensuales entregados al SENARA para abastecer al DRAT entre 2013 y octubre del 2016.	92
Figura 25: Caudal del Bebedero después de aporte del trasvase.....	93

I. Marco Introductorio

1.1. Presentación

Las cuencas Tempisque y Bebedero, al norte de Costa Rica, se caracterizan por una clara estacionalidad lluviosa marcada por una estación seca que se extiende de diciembre a mayo en el promedio a largo plazo. La variabilidad climática natural se ve agravada por fenómenos regionales de océano y atmósfera como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que provoca sequías hidrometeorológicas de gravedad variable en la región costera del Pacífico oriental tropical; así como por la ocurrencia de inundaciones que dependen de otros factores a gran escala. En el país, la última actualización de la Ley de Aguas fue en 1942 y no existen planes integrales.

Cuando ocurren eventos meteorológicos extremos, en las noticias se plasman las incertidumbres que tienen las personas en general sobre la idoneidad de la gestión que realizan las instituciones correspondientes. La duda que existe se refiere a si las cuencas están sobre concesionadas y si el uso del agua es sustentable. La respuesta a estas preguntas no es simple y depende de varios factores, pero urgen herramientas técnicas que informen de las decisiones a tomar sobre un recurso natural tan delicado como el agua.

Con el fin de contribuir en esa tarea, se propone el uso del modelo WEAP (por sus siglas en inglés *Water Evaluation and Planning System*) como una herramienta para evaluar la disponibilidad de agua, así como el efecto que las demandas sectoriales tienen en disponibilidad. También se discute a partir de los resultados y comparando con otros estudios, que tan sustentable es el manejo del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero en Guanacaste.

1.2. Caracterización del área de estudio

Las cuencas de los ríos Tempisque y Bebedero se ubican en la región Pacífico Norte de Costa Rica y desembocan en Puerto Moreno en el golfo de Nicoya. Esta característica geográfica se utiliza como fundamento para que ambas cuencas se conciban como una sola unidad. De esta forma el área de estudio se extiende por 5.460 km². Para evitar confusiones evitar conflictos con la división tradicional de las cuencas en el país, se reitera que el área de estudio se compone

de las cuencas Tempisque y Bebedero. El área de estudio limita al norte con el Parque Nacional Guanacaste y bordea la cordillera Volcánica de Guanacaste. Se extiende hacia el Sur por la margen Este bordeando la cordillera Volcánica de Tilarán y por el Oeste rodea la fila montañosa costeña y las serranías de Nicoya (Figura 1).

La región Pacífico Norte tiene un régimen climático tropical seco. El promedio anual de temperatura es de 27,4°C, mientras que marzo es el mes más caliente con un promedio de 30°C. La precipitación promedio anual ronda los 1.800 mm, típicamente la época lluviosa se extiende entre mayo a noviembre y la época seca entre diciembre y abril. La primera máxima se registra

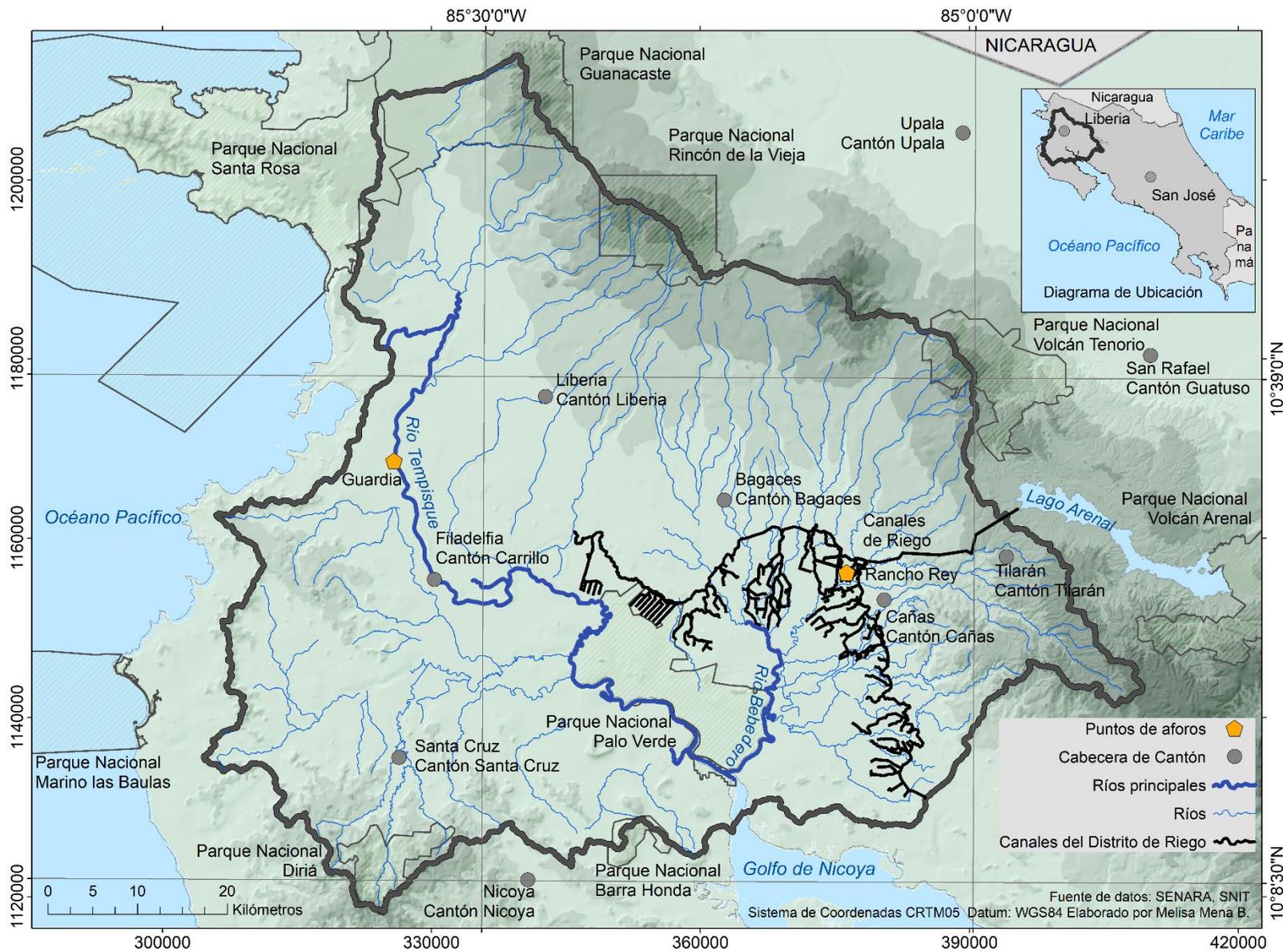


Figura 1: Localización del área de estudio, cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica.

en mayo o junio seguido de unas semanas con poca lluvia en julio, conocido como el veranillo de San Juan, mientras que la máxima precipitación se registra en el mes de octubre. Las variaciones intra- anuales de las precipitaciones se asocian al movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), dinámica que explica en buena medida la distribución mensual de las lluvias en la Región Pacífico norte. Aquellos sectores que poseen la mayor precipitación se ubican en los sectores de mayor altitud debido al efecto orográfico (Instituto Meteorológico Nacional, 2008).

El área de estudio se extiende por los cantones de Liberia, Nicoya, Santa Cruz, Bagaces, Carrillo, Cañas, Abangares, La Cruz y Tilarán. En estos cantones, para el año 2011, la población total estuvo compuesta por 290.596,00, que representa el 88% de la población que vive en la provincia de Guanacaste, 326.953 personas. Por ende, las cuencas Tempisque y Bebedero abastecen las demandas de agua del 88% de las personas que habitan la provincia, así como 82.249,00 viviendas con un promedio de 3,55 ocupantes. La población económicamente activa labora principalmente en el sector terciario (64.97%) seguido del sector primario (20,69%) y por último el sector secundario (14,32%). De modo que, después del consumo doméstico, en promedio un 64.97% de las personas en el área de estudio utilizan el agua para actividades comerciales o turísticas, seguido de las actividades agropecuarias y por último las industriales.

En los cantones de Liberia, Santa Cruz y Carrillo lidera el sector terciario, indicador de que la oferta de servicios de la provincia se concentra aquí. En los cantones de Nicoya, Cañas y Tilarán, también prevalece la actividad terciaria, ya que el menos el 60% de las personas se dedican a los servicios, seguido de la actividad primaria y secundaria. Mientras que, en Bagaces, Abangares y La Cruz al menos 50% de las personas se dedican al sector primario o secundario. De ese porcentaje que se reparte entre dos sectores, en La Cruz el 37,2% de la población se dedican al sector primario, lo que representa el valor más alto en esta categoría, y también es donde existe el valor más bajo de personas dedicadas al sector secundario con un 9,5% de la población. En el cantón de Bagaces el 29,2% de las personas se dedican a actividades del sector primario, le siguen el cantón de Abangares y Cañas, con un porcentaje de 27,2% y 27,9% personas respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1: Indicadores poblacionales para los cantones en las cuencas Tempisque y Bebedero,
Guanacaste, Costa Rica, 2011

Cantones	Superficie (km ²)	Población total	Viviendas individuales ocupadas	Densidad de población (habitantes/km ²)	Promedio de ocupantes por vivienda	Población ocupada por sector		
						Primario	Secundario	Terciario
Liberia	1.436,50	62.987	16.577	44	3,75	8,4	13	78,6
Nicoya	1.333,70	50.825	15.038	38	3,38	16,9	14,5	68,6
Santa Cruz	1.312,30	55.104	16.645	42	3,31	12,2	10,9	76,9
Bagaces	1.273,50	19.536	5.615	15	3,48	29,2	12,6	58,2
Carrillo	577,50	37.122	10.141	64	3,65	13,3	16	70,6
Cañas	682,20	26.201	7.172	38	3,65	24,9	13,8	61,3
Abangares	675,80	18.039	5.311	27	3,39	24,2	23,8	51,9
La Cruz	1.383,90	19.181	4.732	14	4,05	37,2	9,5	53,3
Tilarán	638,4	19.640	6.018	31	3,26	20	14,8	65
Total	9.313,80	290.596,00	87.249,00	34,78	3,55	20,69	14,32	64,97

Fuente: Indicadores cantonales - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2000 y 2011 (2013)

A principios del siglo XX, el río Tempisque se utilizaba para el cabotaje con fines comerciales ya que se daba una importante explotación y comercialización de madera. El caudal del río era tal, que en 1939, a solicitud de los pobladores del cantón Filadelfia, iniciaron los trámites para la construcción de defensas de concreto contra las inundaciones del río Tempisque (Pizarro-Méndez, 2009). Las últimas inundaciones de importancia ocurrieron en el año 1999 debido a los efectos del huracán Mitch, en el 2016 por el huracán Otto y en el 2017 por el huracán Nate.

La cuenca del río Tempisque se caracteriza por una vegetación de bosque tropical seco que fue modificada primeramente por los pobladores precolombinos a través de la agricultura itinerante. Más tarde, durante el periodo colonial, predominaban las haciendas ganaderas, y para inicios del siglo XX era importante la extracción maderera (Pizarro-Méndez, 2009). A partir de 1978, con el Proyecto de Riego Arenal-Tempisque surgió la agricultura intensiva, sobre todo de arroz, caña de azúcar y melón (Coto, 2001). En la actualidad al menos un 27% del área de estudio se utiliza para la producción agrícola. Dentro de los cultivos está el azúcar, el arroz y el melón (Birkel

et al., 2017). Otra de las actividades importantes es el turismo, actividad que se beneficia del valor paisajístico de los ecosistemas ribereños y de manglar.

Una particularidad de esta área de estudio es que se trasvasa agua de la vertiente Caribe, como parte del proyecto hidroeléctrico Arenal que luego se convierte en el proyecto de riego Arenal-Tempisque. El agua del Lago Arenal se desvía por pendiente, aguas abajo, hacia la cuenca del Bebedero, pasando por tres casas de máquinas, con lo que se produce energía eléctrica que alimenta el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del país. La primera turbina se ubica en Arenal, la segunda en la plata conocida como Corobicí y en la tercera plata Sandillal, lo que conforma el complejo ARCOSA, construido y administrado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) desde 1974 (Rodríguez, 2004). El agua residual de las turbinas se canaliza a través del Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT), administrado por el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) o se vierten aguas abajo del río Corobicí. El agua de riego es de especial utilidad en la producción agropecuaria sobre todo en los meses secos.

1.3. Planteamiento del problema

La variabilidad climática de las cuencas Tempisque y Bebedero causa sequías e inundaciones periódicas. La estrategia de mitigación adoptada el siglo pasado para enfrentar las inundaciones fue la construcción de diques, por ejemplo, en Filadelfia; mientras que la falta de agua para la producción agrícola se mitigó con el trasvase de agua desde la vertiente Caribe a través del Distrito de Riego Arenal-Tempisque. Ahora hay nuevos retos que enfrentar como la variabilidad climática, que exacerbada por el cambio climático podría contribuir a periodos de sequía más extensos. Adicionalmente, no hay certeza de sí bajo el actual régimen de concesiones de agua, es posible abastecer a todos los sectores ante diferentes escenarios climáticos y de producción. Ambas situaciones confrontadas, actúan en materia ambiental, económica y social promoviendo el deterioro ambiental de las cuencas Tempisque y Bebedero, y generando preocupación entre las personas y sectores.

Para el adecuado manejo de los recursos se necesita en primera instancia cuantificar la disponibilidad para luego definir cómo distribuirlo. De manera que es necesaria una herramienta

que permita cuantificar la oferta de agua y contrastar ese dato con la demanda con miras a evaluar si el consumo de agua es sustentable en las cuencas Tempisque y Bebedero. En específico, las preguntas a responder son: ¿Cuál es el balance hídrico? ¿Cuánta y para qué usos se extrae el agua? ¿Existe sobre extracción? ¿Qué pasaría si no existiese el trasvase de agua proveniente del Lago Arenal o aumentara la población?

1.4. Justificación

En esta investigación, la sequía, es de especial interés al ser una condición hidrometeorológica que implica grandes retos para la gestión del agua. Bajo condiciones de escasez de agua la competencia entre los sectores productivos y los ecosistemas aumenta. Situación que suele resaltar los vacíos en la gestión del agua. Precisamente los periódicos nacionales El Tico Times (Reploge y García, 2017) y el Semanario Universidad (Mora, 2016) alzaron la voz de alerta ante la extracción desmesurada del agua del río Tempisque, consecuencia de tomas ilegales y la sobre extracción de dueños de concesiones.

En el 2014 el gobierno creó el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG) como respuesta a la sequía del 2014-2015, que tiene como ejes “la seguridad hídrica para las comunidades, la seguridad alimentaria, las necesidades de agua para los ecosistemas y la gestión del aprovechamiento sostenible” (Ministerio de Comunicación, 2015). El programa tiene objetivos ambiciosos ya que promueven la integralidad del uso y manejo, pero fue la respuesta un evento extremo, en lugar de un proceso prospectivo de la gestión del agua.

Los estudios que contabilizan la disponibilidad de agua, así como la demanda en las cuencas Tempisque y Bebedero, se reduce a dos. El primero es un balance hídrico que contempla la oferta versus demanda para las principales cuencas del país publicado en el 2008 por el IMTA. El segundo es un balance hídrico de la misma índole para la cabecera de la cuenca del río Tempisque realizado por Guzmán-Arias, 2013. Sin embargo, en la elaboración de planes o programas para el manejo del agua falta integrar estudios como estos a pesar de ser una reiterada recomendación (Jiménez y González., 2003; Contraloría General de la República, 2014).

En esta investigación se realizará un estudio de la oferta versus la demanda de agua mediante el uso del programa WEAP. El motivo para utilizar esta herramienta es que está especializada en la modelación del balance hídrico considerando la relación entre precipitación-escorrentía, así como la incorporación de información sobre el uso y manejo del agua. La capacidad que tiene este programa de integrar el cálculo de la escorrentía, incorporar las demandas, incluir los sistemas de transmisión, reservorios, así como los requerimientos ecosistémicos, entre otros, es único. Además, una vez simulado el escenario real de la cuenca se pueden evaluar diferentes escenarios hipotéticos basados en la pregunta ¿Qué pasaría si ...?

En este caso, para las cuencas Tempisque y Bebedero se modela la escorrentía de ambos ríos, y se agregan los caudales de agua superficial concesiones y registrados ante la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía, con el propósito de evaluar si las cuencas están sobre concesión. Así mismo se evaluará el efecto del trasvase de agua proveniente de la vertiente Caribe y distribuido por el Distrito de Riego Arenal-Tempisque, en el caudal natural del río Bebedero.

El programa WEAP es de uso internacional y está respaldado por la Organización de las Naciones Unidas. En América Latina y el Caribe se ha utilizado ampliamente, por ejemplo, en: Chile (Bonelli et al., 2014; Henríquez et al., 2015; entre otros); México (Ingol-Blanco y McKinney, 2013; Sandoval-Solís et al., 2011); Brasil (Linsen, 2009; Linsen y Rodríguez, 2010); Perú (Condezo-Montes et al., 2016; T. Condom et al., 2011; entre otros); Colombia (Ospina et al., 2009); Guatemala (Harris, 2007) y República Dominicana (FitzHugh, 2006). En Costa Rica se utilizó por una universidad canadiense para el modelado un área pequeña de Guanacaste (Hund, 2018), pero no ha sido empleado en una investigación académica costarricense. Por lo que poner en práctica el uso de este modelo por la Universidad de Costa Rica, es una oportunidad para aportar desde la Geografía con información cuantitativa para el manejo del agua. Además, la investigación sirve como estudio de caso para desarrollar un marco metodológico robusto, así como demostrar las ventajas y limitaciones del programa WEAP como herramienta para la planificación integrada del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero.

1.5. Objetivo general

Evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero con el fin de generar insumos para el manejo del agua mediante la aplicación del modelo *Water Evaluation and Planning System*, WEAP. Guanacaste, Costa Rica, 1993-2016.

1.6. Objetivos específicos

- Estimar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, mediante el uso del programa WEAP.
- Describir los registros de concesiones en las cuencas Tempisque y Bebedero y comparar la demanda frente a la disponibilidad de agua superficial.
- Evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP.

1.7. Antecedentes

En la sección anterior se plantea la incertidumbre de la disponibilidad de agua ante una sobre explotación de los ríos Tempisque y Bebedero, empero bajo condiciones de sequía. En esta sección se hace una breve reseña sobre la gobernanza del agua en Costa Rica ilustrado en el capítulo cuatro “Armonía con la Naturaleza” del XXII Programa Estado de la Nación (2016). También de los proyectos de Estado en las cuencas del Tempisque y Bebedero en el siglo XX y XXI. Finalmente se hace un repaso sobre los modelos hidrológicos aplicados, algunos estudios en Geografía y publicaciones internacionales sobre el recurso hídrico en el área de estudio.

1.7.1. Marco legal sobre el agua y algunas observaciones sobre su manejo en Costa Rica

El capítulo cuatro “Armonía con la Naturaleza” del XXII Programa Estado de la Nación resalta que la legislación sobre recurso hídrico existe desde el año 1884 y el tema hídrico acapara más de la mitad de las leyes ambientales en el país, producidas entre 1951 y 1982. Posterior a 1982 y hasta el 2015 se aprobaron 102 instrumentos legales respecto al recurso hídrico. Algunos de los elementos para la gestión del agua están regulados en las leyes más antiguas y más de la mitad de los artículos en legislación hídrica priorizan el uso público sobre el

privado. La mayoría de la normativa está dirigida a la regulación o a la promoción de proyectos en materia hídrica, tradicionalmente dirigida a temas de infraestructura. En cuanto a la contaminación del agua y las sanciones respectivas, la legislación es abundante, pero la aplicación es deficiente y existe una desactualización de las tarifas e impuestos asociados a las concesiones (Programa Estado de la Nación, 2016).

Algunos de los vacíos identificados en el XXII informe del Programa Estado de la Nación (2016) con respecto a la normativa vigente se resume a continuación:

- Ausencia de una instancia de coordinación institucional que trate de manera integrada el agua;
- Inexistencia de incentivos para el desarrollo sustentable;
- Carencia de instrumentos para la planificación, uso racional, sustentable y la conservación del agua;
- Débiles canales de comunicación para la participación ciudadana en temas de gobernanza;
- Reiteración y desorden en las prohibiciones y sanciones;
- Falta de evaluación sobre la implementación de compromisos internacionales y la necesidad de fortalecer el marco jurídico de las ASADAS;
- Finalmente, en la normativa vigente no queda explícito si el derecho al acceso al agua para uso humano y doméstico es un tema constitucional o no.

En cuanto al estado del recurso hídrico, en términos generales, el XXII Programa Estado de la Nación, señala que el 99,4% de la población tuvo acceso a servicios de suministro de agua por tubería, pero existen preocupaciones en cuanto a la disponibilidad y la calidad del agua ya que el país no cuenta con sistemas efectivos para controlar la contaminación superficial y subterránea de los cuerpos de agua. Ante el debate público sobre la ley de aguas en Costa Rica, es importante asegurar el derecho humano al agua y procurar enmendar los vacíos legales vigentes, para que a futuro la gestión sobre agua sea más efectiva.

1.7.2. Manejo del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero

Desde el 2005 hay antecedentes de que la cuenca del río Tempisque muestra signos de conflictividad social y deterioro ambiental a raíz de un uso no planificado del agua (Jiménez et al., 2005). Las notas de prensa del Semanario Universidad (Mora, 2016) y el Tico Times (Replonge y García, 2017) la conflictividad en torno al uso del agua en el área de estudio resucita ante eventos de sequía, además el informe XXII Programa del Estado de la Nación, evidencia que la planificación del uso de agua presenta varias debilidades y el desarrollo sustentable no se incentiva.

La cuenca del río Tempisque tiene para el país un valor ecosistémico como un valor productivo. Los ecosistemas de pantanos, marismas, manglares y bosques secos tropicales, ubicados en esta cuenca son únicos por lo que desde 1998 la Estación Biológica Palo Verde realiza esfuerzos para mantener la integridad ecológica de ese Parque Nacional Palo Verde (Jiménez y González, 2003). Sin embargo, los problemas en cuanto a la gestión del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero no son novedad, ya desde el 2003 se señaló la necesidad de “definir los límites de desarrollo de la cuenca, establecer un plan de uso del agua que contemple la oferta versus demanda para cada sector, un inventario y control de flujos de concesiones, así como monitoreo de cantidad y calidad de agua” (Jiménez y González, 2003). Por otra parte, de acuerdo con las estrategias de desarrollo en la provincia de Guanacaste, desde el año 1970, se promueve la industrialización de la agricultura y a partir del año 2000 el turismo masivo.

A mediados de la década de 1970, se propusieron dos grandes obras que se construyeron de 1970 a 1980. La primera es el complejo de generación hidroeléctrica Arenal-Corobicí-Sandillal (ARCOSA) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para el abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional y la segunda es el Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT). Esta última obra se abastece de las aguas que descarta el complejo ARCOSA. La Central Hidroeléctrica Arenal constituye el primer aprovechamiento del complejo ARCOSA, se ubica en la división entre las vertientes del Caribe y Pacífico. A través del DRAT, se trasvasa agua de la vertiente Caribe hacia las cuencas del Tempisque y Bebedero. Esto permite regar los cultivos intensivos durante la época seca en el Pacífico. El Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT) cubre una extensión aproximada de 45.000 hectáreas de los cuales 30.000 son regables. El objetivo de este proyecto

es mejorar el nivel de vida de los habitantes de la zona incrementando la producción de alimentos básicos y de exportación (Programa en Investigación en Desarrollo Economía y Ambiente, División de Investigación y Desarrollo, 2014)

En 2014, como consecuencia de la grave sequía entre 2014-2015 y de conflictos anteriores, el gobierno de Costa Rica puso en marcha el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG). Este proyecto tiene como ejes “la seguridad hídrica para las comunidades, la seguridad alimentaria, las necesidades de agua para los ecosistemas y la gestión del aprovechamiento sostenible” (Ministerio de Comunicación, 2015). El plan consta de cuatro acciones específicas de gestión del recurso hídrico que son: el abastecimiento de agua para la margen derecha del río Tempisque y comunidades costeras a través del embalse en río Piedras; un Sistema Nacional de Monitoreo para Aguas Subterráneas en Tiempo Real; una planta desalinizadora privada y la regionalización de la gestión de Dirección de Aguas. Adicionalmente, el plan contempla ayudar a los productores agropecuarios y pesqueros de la Región Chorotega a través de entregas de materiales para la producción y la construcción de centros de distribución de productos (Ministerio de Comunicación, 2015).

Entre mayo del 2014 y julio del 2015, según el Ministerio de Comunicación, se habilitaron pozos y tanques de abastecimiento en Liberia; se inauguraron acueductos; se puso a funcionar las plantas de tratamiento de arsénico en Bebedero de Cañas, Falconia y Montenegro de Bagaces; y se trabaja en el tratamiento de las aguas del embalse Sardillal. El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas y Avenamiento (SENARA) construye una ampliación en el canal sur del Distrito de Riego para irrigar 8.800 hectáreas entre el río Cañas y la quebrada Piñuela en Colorado de Abangares. Paralelamente, como respuesta a las demandas del sector agropecuario y la fuerte crítica por la sobre concesión de agua en la cuenca del río Tempisque, se hacen estudios para hacer un embalse en el río Enmedio, afluente del río Piedras para el riego total de 1.425 hectáreas (Presidencia de la República de Costa Rica, 2016).

Es evidente que el Estado ha realizado inversión en infraestructura hídrica en las cuencas del Tempisque y Bebedero. En el siglo XXI la inversión se enfocó en el sector agropecuario, con el proyecto PIAAG la inversión se diversificó para atender de manera integral las diferentes

necesidades de los sectores. Sin embargo, no hay certeza de si estos esfuerzos son sustentables a largo plazo. Esta investigación aportará a la contabilidad de la disponibilidad y demanda de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero. Este elemento es fundamental ya que como en todo proceso de planificación es indispensable saber con cuánto se dispone para definir cómo distribuirlo.

1.7.3. Estudios sobre la cuenca del río Tempisque

Los estudios más antiguos en la Universidad de Costa Rica (UCR), empiezan en la década de 1970 motivados por los proyectos del Estado con relación al Distrito Arenal-Tempisque, donde sobresalen algunas investigaciones referentes al suelo. En este capítulo se citan algunos estudios de modelación hidrológica para la cuenca del Tempisque o Bebedero realizada por la escuela de Ingeniería Civil de la UCR. También se mencionan estudios afines a esta investigación elaborados por el Instituto Tecnológico Nacional de Costa Rica, La Universidad Nacional junto con la Universidad Estatal a Distancia y la Universidad de Georgia, entre otros.

Con respecto a la modelación hidrológica la tesis “Evaluación de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Tempisque” (Somarriba, 2003) desarrolló un modelo ajustado al original de Thornthwaite y Mather de 1957. El que fue utilizado posteriormente en dos tesis, una sobre modelado del balance hídrico basado en cambios de uso del suelo en la cuenca del río Abangares (Umaña, 2007) y la otra sobre escorrentía superficial de la cuenca alta del río Tempisque ante diferentes escenarios de cambio climático (Leitón, 2011) que adicionalmente utiliza los modelos climáticos globales (MCG) para evaluar los distintos escenarios de cambio climático. Todos estos trabajos presentaron dificultades con la disponibilidad de datos meteorológicos, ya que las estaciones suelen presentar vacíos de información.

En el 2015, el Instituto Tecnológico Nacional de Costa Rica generó un estudio sobre los escenarios climáticos y los caudales medios de la cuenca del río Tempisque, en relación con el uso del suelo, utilizando el modelo *Hydrological Land Use Change* (Calvo-Alvarado & Calvo-Obando, 2015). En el 2016 la Universidad de Georgia junto con aportes de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo el programa *Develop* de la NASA, calcularon el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés) y el Índice de Condiciones

de Sequía Escalonada (SDCI, por sus siglas en inglés) a partir de imágenes satelitales de tipo re-análisis y datos de estaciones meteorológicas para monitorear la sequía y el balance hídrico. El proyecto pretendía dotar de herramientas técnicas al SENARA para el monitoreo climático y la gestión del agua (Durham et al., 2016) pero presentó dificultades en la etapa de calibración.

En la Escuela Geografía, de la Universidad de Costa Rica, se han realizado tres tesis de licenciatura que tienen como área de estudio la cuenca del río Tempisque. La primera tesis es sobre el uso del suelo en la I etapa del Distrito de Riego (Corella-Rivers, 1979). Años después, se presentó una tesis de Licenciatura sobre el impacto socioeconómico de la primera etapa del proyecto de riego Arenal-Tempisque (Wong, 1993) que a través de métodos cualitativos tenía como objetivo determinar el impacto socioeconómico para los beneficiarios del proyecto. Como parte de las conclusiones se señala que, con el proyecto de riego el tipo de producción agrícola pasa de ser extensiva a intensiva y que ocurría una desigual distribución del agua para riego debido a una mala administración de las instituciones gubernamentales, sin embargo, los beneficiarios consideraban que el proyecto tenía un impacto positivo en su condición socioeconómica. La última tesis de Licenciatura identifica los impactos socioeconómicos y ambientales de la construcción del puente sobre el río Tempisque en Nicoya (Bermúdez et al., 2002) trabajo en el que se resalta el valor de los ecosistemas de manglar y la estrecha relación de las personas con el río Tempisque, no solo por razones económicas y comerciales, sino porque el río es un elemento fundamental de la identidad territorial del guanacasteco.

En el 2008 el Banco Interamericano de Desarrollo financió la elaboración de un balance hídrico que considera las demandas para 15 cuencas utilizando la metodología de UNESCO (2006). Para calcular la oferta, esta metodología combina una serie de variables que dio como resultado una oferta potencial anual media de 8.052 hm³/año para las cuencas Tempisque y Bebedero en conjunto. En este valor se incluye la importación de agua de otras cuencas y los retornos de los diferentes usos, estos dos valores suman 5.836,22 hm³/año, según los datos en el informe (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008). El inconveniente que tiene esta investigación es que no especifica el periodo de los datos utilizados para realizar los cálculos y esto dificulta realizar comparaciones.

La tesis doctoral de Guzmán-Arias (2013) “Base para la planificación del recurso hídrico superficial en la cuenca alta y media del Río Tempisque, Costa Rica”, es la única que aborda tanto la disponibilidad de agua como la demanda. En esta tesis se hace un repaso sobre la planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe. Se realiza una recolección de datos de caudales registrados, usos y concesiones para la cuenca alta del río Tempisque. Se estima el balance hídrico anual, a partir de fuentes secundarias y se restan los caudales de uso con lo que se concluye que “la oferta del recurso hídrico es insuficiente para satisfacer la demanda según diferentes usuarios y concesionarios” (p.106). Finalmente se realiza una propuesta de planificación del recurso hídrico superficial para la cuenca baja del río Tempisque (Guzmán-Arias, 2013).

Una de las más recientes publicaciones se enfoca en la conexión que existe entre el agua, la producción de energía y la producción de alimento en las cuencas Tempisque y Bebedero (Birkel et al., 2017). Tiene un valor importante porque explica en detalle la variabilidad climática natural de las cuencas Tempisque y Bebedero, resaltando las variaciones de precipitación interanuales, así como los repetidos eventos de estrés hídrico e inundación. Precisamente, la publicación resalta que considerando la relevancia de la producción agropecuaria y energética que se lleva a cabo en las cuencas Tempisque y Bebedero, las variaciones en las precipitaciones representan un riesgo para Guanacaste por el impacto socioeconómico que conllevan.

La publicación más reciente elabora un indicador de recarga de agua subterránea como herramienta para los tomadores de decisiones con el fin de aumentar la resiliencia socio-hidrológica a la sequía estacional (Hund et al., 2018). La investigación tiene como sitio de estudio el acuífero de Potrero y Caimital ubicados en Nicoya Guanacaste, donde los investigadores realizaron un monitoreo de ríos y acuíferos por dos años. En combinación con datos adicionales, modelaron la recarga de acuíferos para el periodo entre 2005 a 2016, utilizando el programa WEAP. Esta metodología facilitó caracterizar la relación entre la precipitación y la recarga de acuíferos, permitiendo estimar la recarga durante la época lluviosa a partir de datos actuales (Hund et al., 2018). Lo anterior es evidencia de que WEAP es una herramienta efectiva para la contabilidad actual y futura de la recarga acuífera en Nicoya Guanacaste. Mientras que en la presente investigación WEAP se utiliza para estimar la disponibilidad de agua superficial y los

efectos que tienen las demandas en el caudal, además de aplicarse en un área significativamente más grande, específicamente 5.460 km² frente a dos acuíferos ubicados en el cantón de Nicoya.

Además, la investigación de Hund et al. (2018) desarrolla un indicador a partir de los datos generados en WEAP, con lo que los gestores del agua pueden evaluar el comportamiento de la recarga, y saber si esta disminuirá antes de que termine la época lluviosa. Esta información permitiría desencadenar medidas de adaptación a corto plazo para proteger el agua de recarga acuífera durante la época lluviosa cuando todavía se dispone de agua superficial. Las medidas de adaptación propuestas por los autores son un plan de contingencia que considere medidas de control de la demanda para procurar la conservación del agua, así como, considerar alternativas de suministro como el agua superficial o agua llovida (Hund et al., 2018). Esta investigación demuestra que es posible contar con herramientas para la gestión previsiva del agua, lo que hace falta es una normativa que exija la gestión integrada del agua. Con esto se podrían buscar recursos para que investigaciones como esta pasen de ser un proyecto puntual a un proyecto con amplia incidencia territorial.

Considerando lo anterior, Costa Rica debe mejorar la claridad y efectividad de la legislación referente al agua, así como la comunicación entre las instituciones del Estado. Una ley integrada del recurso hídrico sería una herramienta vinculante para promover la planificación territorial con enfoque de cuenca que permita contar con planes de manejo a este nivel. Esto permitiría promover la planificación y uso sustentable del agua. En cuanto a las herramientas técnicas para realizar esa preparación, WEAP ha demostrado ser un programa útil tanto en otros países de Latinoamérica y el Caribe, como en los acuíferos de Potrero y Caimital en Nicoya Guanacaste. En esta investigación el modelo WEAP se utilizará para simular la escorrentía superficial y por primera vez en el país para un área de 5.460 km².

II. Marco conceptual

En la sección anterior se hizo un recuento sobre el manejo del agua en Costa Rica, así como de las cuencas Tempisque y Bebedero. Se plantea que la aplicación del modelo WEAP a escala de cuenca es una novedad y una necesidad en el área de estudio. Ahora se revisarán algunos conceptos como la interpolación espacial, modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía, el cálculo del balance hídrico a través del método denominado Humedad del Suelo en WEAP, así como la calibración y eficiencia que aseguran el óptimo funcionamiento del modelo. Por último, se plantea lo que se entiende por sustentabilidad del recurso hídrico.

2.1. Interpolación espacial: Ponderado por el Inverso a la Distancia

El método de interpolación Ponderado por el Inverso a la Distancia, más conocido como IDW por sus siglas en inglés, es un método determinista local. Estima valores puntuales en localidades no incluidas en la muestra, a partir de los datos del entorno local (llamado el “vecindario”). Al igual que los demás métodos de interpolación geográfica, IDW presupone la existencia de autocorrelación espacial y asume que la misma decrece con la distancia, por lo que usa el criterio del inverso de la distancia para asignar los pesos a cada una de las observaciones del entorno que serán usadas en la predicción espacial (Johnston et al., 2003).

Para predecir un valor en una celda sin datos, el algoritmo usará los datos medidos alrededor de la celda a predecir, de este modo, los valores más cercanos a la celda a predecir tendrán más influencia o peso en el valor a predecir que aquellos más lejanos. Entre más cerca al punto de medición, dentro del radio, mayor es el peso relativo en la ecuación:

Ecuación 1: Interpolación inverso de la distancia

$$T(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i T(s_i)$$

Donde $T(s_0)$ es el valor estimado por celda s_0 , N es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación, λ_i es el peso dado al valor observado $T(s_i)$ en las cercanías del valor s_0 .

2.2. Procesos hidrológicos de precipitación-escorrentía

Los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía se clasifican de forma básica en dos tipos: los distribuidos y los agregados. Los modelos distribuidos discretizan la cuenca en una grilla

cuadrangular y establece variables representadas en promedios. Estas variables están representadas en la grilla y las ecuaciones se resuelven cuadro a cuadro. Los modelos agregados tratan la cuenca como una sola unidad con variables establecidas que representan porcentajes a lo largo del área (Beven, 2012). Por otro lado, los modelos semi-distribuidos calculan el balance hídrico y la contribución de flujos, por áreas, conocidas como unidades hidrológicas o sub-cuencas separadas, que son consideradas homogéneas entre ellas. El modelo WEAP se considera un modelo semi-distribuido porque las variables en cada subcuenca se representan en promedios. También es un modelo conceptual, esto quiere decir que el modelo considera leyes físicas pero de forma sumamente simplificada, estas actúan sobre las variables de entrada y generan los resultados (Xu, 2002).

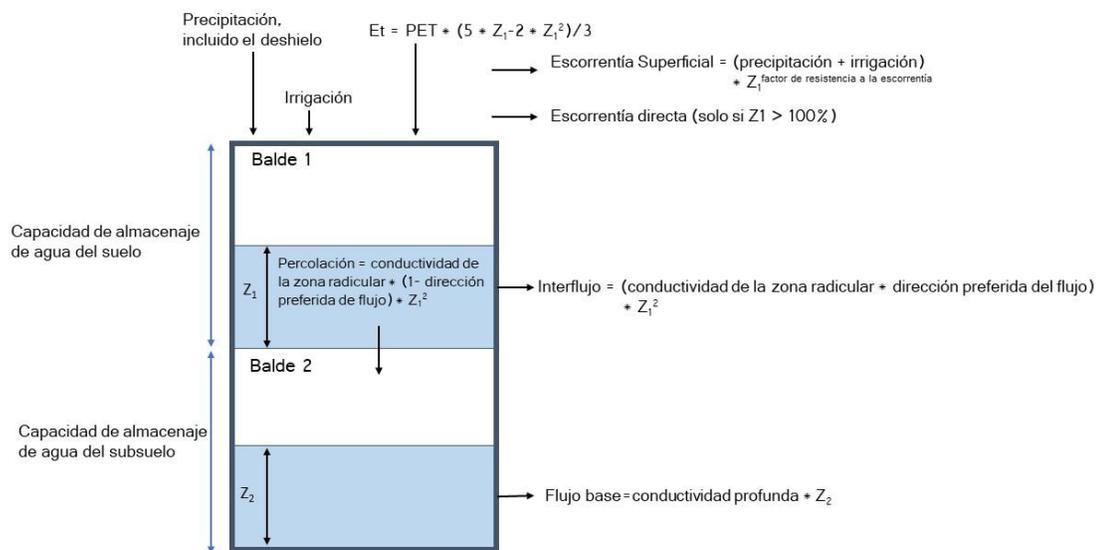
Los procesos hidrológicos que suceden en una cuenca, como lo son la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración y el riego, se pueden simular en WEAP a través de cinco métodos distintos. El método más simple se denomina “Únicamente Demandas de Riego” es un método de coeficiente simple, así como el “Precipitación Escorrentía”. También basado en el principio de que la escorrentía es el producto de la precipitación menos la evapotranspiración, existe el método llamado “Humedad del Suelo”. Existe un tercer método que se denomina “MABIA” que es útil para simulaciones diarias, así como el “Crecimiento de Plantas” (PGM, por sus siglas en inglés) que están enfocados a la producción agrícola (Stockholm Environment Institute SIE, 2015). El método que se utilizará en esta investigación es el denominado Humedad del Suelo porque es el más robusto en la modelación de escorrentía y a diferencia de los demás, no requiere mayores detalles sobre los cultivos.

El método de Humedad del Suelo es unidimensional pero el más complejo dentro de las opciones de WEAP, ya que representa la cuenca en dos capas de suelo. También tiene la capacidad de simular el aporte de flujo por descongelamiento de la nieve, aunque en este caso no se consideró ya que en el área de estudio no nieva. En este método, las dos capas de suelo están representadas por dos compartimentos o baldes. Se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea y la percolación profunda para una cuenca. Este método se caracteriza porque pide especificar la cobertura de la tierra para así

simular el efecto que tiene en los procesos hidrológicos (Stockholm Environment Institute SIE, 2015).

En seguida se explicará el modelo conceptual que divide el suelo en dos compartimentos o baldes. El primer balde, representa la parte superior del suelo, a los que está asociado los procesos de evapotranspiración, escorrentía, interflujo superficial y cambios en la humedad del suelo. El balde 2, representa el subsuelo, se asocia con los procesos de circulación del flujo base hacia el río y también los cambios en la humedad de esta capa (Stockholm Environment Institute SIE, 2015). Para entender el método de Humedad del Suelo, se detalla con un diagrama el esquema de dos baldes y las ecuaciones asociadas.

Figura 2: Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo



Elaboración propia con base en (Stockholm Environment Institute SIE, 2015)

Las variables meteorológicas que WEAP utiliza son: la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y el factor de nubosidad. Con excepción de la precipitación, las demás variables se utilizan para calcular la evapotranspiración potencial. Además, se debe indicar los tipos de cobertura de la tierra que tiene el área de estudio.

Sobre las coberturas es necesario conocer el coeficiente de cultivo (K_c) para cada tipo de cobertura, este es un factor que se utiliza para estimar la evapotranspiración de los cultivos, que junto con las variables climáticas (precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y la radiación) se estima la evapotranspiración de toda el área de estudio. El K_c varía según las etapas de crecimiento de la cobertura, lo que hace que la planta consuma una cantidad distinta de agua. Los valores de K_c se calculan a través de un método complejo, por ello, la mayoría de los cultivos tiene un valor K_c de referencia internacional que es posible conseguir en la bibliografía (FAO, 2006).

Adicionalmente, el método de Humedad del Suelo cuenta con 8 parámetros, cuyo valor se ajustan en el proceso de calibración. El primer parámetro se denominan la Capacidad de Agua del Suelo (SW_c , por sus siglas en inglés) que el programa define como la capacidad efectiva de retención del agua de la capa superior del suelo. El segundo parámetro se denomina Capacidad de Agua Profunda (DW_c , por sus siglas en inglés) y el programa lo define como la profundidad de la capa inferior del suelo. Estos parámetros no corresponden estrictamente a propiedades físicas del suelo, son más bien en la práctica a altura en milímetros del primer y segundo balde (figura 2). Para que el valor no sea completamente arbitrario en el caso del balde superior, se ingresa un valor que se aproxime a la altura de la parte superficial del suelo más o menos al mantillo, mientras que la altura del balde inferior refiere al subsuelo.

El tercer parámetro se denomina el Factor de Resistencia a la Escorrentía (RR_f , por sus siglas en inglés), se refiere como lo indica el nombre al factor que controla el movimiento horizontal del agua por el suelo, controlando cuánta agua se convierte en escorrentía superficial. Se le asigna un valor arbitrario en un rango de 1 a 1000, según la respuesta del modelo. El cuarto parámetro se denomina la Conductividad de la Zona Radicular (RZ_c , por sus siglas en inglés) y hace referencia al agua, a la conductividad hidráulica, del balde superior a saturación plena con una unidad de mm/mes, que en otras palabras controla la percolación del agua entre el suelo y el subsuelo. Estos dos parámetros se definen separadamente para cada tipo de cobertura, los valores introducidos no se derivan de observaciones o propiedades físicas del suelo, sino que son valores que simulan el efecto que cada cobertura tendría en el movimiento del agua.

Por ejemplo, para el Factor de Resistencia a la Escorrentía se asume que el bosque es la cobertura que causa más resistencia seguido del pasto y la agricultura. En el caso de la Conductividad de la Zona Radicular se considera la influencia de las raíces para transportar agua hacia el subsuelo, en otras palabras, la profundidad de las raíces. En este caso se asume que el bosque es la cobertura que transporta más agua al subsuelo, seguido del pasto y la agricultura. Debido a que el Factor de Resistencia a la Escorrentía y la Conductividad de la Zona Radicular no son valores para los que se realiza una medición, estos se definen de modo arbitrario, y se ajustan dependiendo de la respuesta del parámetro durante el proceso de calibración.

El quinto parámetro se llama Conductividad Profunda (D_c , por sus siglas en inglés) y se refiere a la tasa de conductividad de agua (mm/mes) en dirección horizontal, en la capa inferior del suelo cuando el balde 2 está saturado, por tanto, simula el flujo base. El sexto parámetro se llama la Dirección Preferida del Flujo (PFd, por sus siglas en inglés), definido en un rango de 0 a 1, hace referencia a la inclinación media del balde superior, y se define por separado para cada tipo de cobertura. La inclinación media tiene que ver con cuánta agua en el balde superior se convierte en escorrentía superficial o cuánta percola hacia el balde inferior. El séptimo y octavo parámetro es Z_1 y Z_2 (%) representan la cantidad de agua con la que inicia del balde superior e inferior al iniciar la serie de cálculo. El en caso del Z_1 este se subdivide por cobertura mientras que el Z_2 es independiente de la cobertura.

El método de Humedad del Suelo en WEAP, desagrega algunos parámetros por tipo de cobertura. Los parámetros que se desagregan por cobertura son la Capacidad de almacenamiento del Suelo (SWc) o capacidad del balde 1, la Resistencia a la Escorrentía (RRf), la Conductividad en la Zona Radicular (RZc), la Dirección Preferida de Flujo (PFd) y el Z_1 . Mientras que la Capacidad de almacenamiento del Subsuelo (DWc), la Conductividad Profunda (D_c) y Z_2 no se desagregan por tipo de cobertura.

Adicionalmente, en WEAP, el análisis de demandas se desglosa según los requerimientos por unidad de actividad para un año. Se agregan como nodos de consumo con una línea de transmisión del río al punto de demanda y de ser el caso con una línea de transmisión de regreso para simular el agua que retorna al sistema natural. El formato que requiere WEAP para simular

las demandas es una unidad de actividad (ej. número de viviendas, número de personas abastecidas o área irrigada) y una tasa de consumo de agua asociada a la unidad de actividad (ej. volumen de consumo anual por persona). Los datos se ingresan para un año, que es la referencia y se puede proyectar mediante el uso de tasas de crecimiento o funciones de interpolación. En esencia, el consumo de agua se calcula multiplicando la unidad de actividad por la tasa de consumo. Es así como WEAP incorpora los usos del agua a un modelo para la planificación del recurso hídrico.

2.3. Sensibilidad de parámetros y eficiencia

La calibración de un modelo se compone de una estimación general de mejor ajuste, seguido de un análisis de sensibilidad de parámetros para afinar la calibración. Simultáneamente estos procesos se validan con una prueba cuantitativa que indique el rendimiento general del modelo, por ejemplo, en esta investigación se utilizó el coeficiente Nash-Sutcliffe y su versión logarítmica.

La calibración es el proceso de ajuste de parámetros de un modelo para lograr que el caudal simulado se asemeje al observado por el fluviógrafo. La calibración requiere un análisis de sensibilidad de parámetros esto quiere decir que se prueba el efecto que tiene en la serie del caudal simulado los cambios en los valores que se asignan al parámetro. uno a uno los parámetros. Esto se puede realizarse de forma manual o computarizada utilizando un algoritmo de optimización. Sin embargo, toda calibración y subsiguientes predicciones está sujeta a incertidumbre, que a la vez resulta en que ningún modelo de precipitación-escorrentía es cien por ciento fidedigno en reflejar los procesos naturales que generan escorrentía (Beven, 2012).

El análisis de sensibilidad se puede hacer con una valoración visual o con diferentes métodos cuantitativos que miden estadísticamente el mejor ajuste. En el análisis de sensibilidad cuantitativo se explora la totalidad del rango de valores del parámetro para encontrar un pico de mejor ajuste. Los resultados se visualizan en un gráfico que contenga en el eje vertical el rango explorado y en el eje horizontal los resultados del indicador estadístico de mejor ajuste. El punto más alto de la serie graficada indica el valor óptimo del parámetro. Puede suceder que un parámetro sea insensible, lo que resultaría en una serie plana al graficarla, esto ocurre cuando la alteración de valores al parámetro no representa un cambio significativo en los resultados del

modelo. Debido a que las simulaciones son el resultado de la interacción entre los diferentes parámetros del modelo, es usual que la sensibilidad varíe en un rango de respuesta para cada parámetro. Por esta razón, las sensibilidades se suelen evaluar dentro un rango estimado de mejor ajuste resultado de un proceso de calibración a lo que se denomina el óptimo local (Beven, 2012).

Existe una variedad de métodos para cuantificar la eficiencia del mejor ajuste, sin embargo, los de mayor uso se basan en la suma del error cuadrado a la varianza del error. El coeficiente más utilizado es el Nash y Sutcliffe, (1970), es un estadístico normalizado que determina la magnitud de la varianza del error contra la varianza de los datos observados. La ecuación del NSE (por sus siglas en inglés) es

Ecuación 2: Nash y Sutcliffe

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{prom})^2} \right]$$

Donde Y_t^{obs} el valor de variable observada a un tiempo de cambio t , Y_t^{sim} es el valor simulado de la variable y Y^{prom} es el promedio de la variable observado y n es el número total de observaciones. Este indicador de eficiencia funciona como un coeficiente de determinación, donde cero indica que el modelo hidrológico no es mejor que el promedio de las observaciones para todos los intervalos de tiempo. Los valores negativos indican que el modelo funciona peor que el promedio de las observaciones, o sea inaceptable, y uno es el valor óptimo. El NSE hace énfasis en los picos de caudal, para revertir esto y hacer énfasis en lo mínimos, que son de mayor interés cuando el enfoque está en el caudal mínimo, se usa la versión logarítmica del NSE

Ecuación 3: Versión logarítmica de Nash y Sutcliffe

$$\text{NSE} = 1 - \log \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{prom})^2} \right]$$

2.4. Sustentabilidad del recurso hídrico

Se consideran recursos naturales los bienes y servicios que proporciona la naturaleza sin implicar el uso de mano de obra humana. Se clasifican en renovables o no renovables de acuerdo con la disponibilidad en el espacio y tiempo, la tasa de regeneración y el ritmo de uso. Los recursos renovables son aquellos que tienen un ciclo de regeneración por encima de su extracción, mientras que los no renovables tienen ciclos de regeneración muy por debajo de los ritmos de extracción (Mastrangelo, 2009). El agua se clasifica como un recurso no renovable ya que su distribución espacial y temporal no es fija, tampoco el ritmo de consumo pues es mucho más acelerado que el ritmo de regeneración en la misma cantidad y calidad. Al ser el agua dulce un recurso no renovable, en términos globales, es necesario contar con mecanismos técnicos y políticos para el uso sustentable.

El concepto de sustentabilidad está precedido al cuestionamiento sobre los límites del crecimiento y a la dificultad de encontrar un término de referencia homogéneo. Antes de 1982 no existía un término preciso para referirse a la conciliación entre la producción de bienes y la capacidad de los ecosistemas para sostener patrones de consumo. Esto cambió con el Informe Brundtland "Nuestro Futuro Común", elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas. En este informe se define el desarrollo sustentable como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones (ONU, 1987). En particular, se refiere a un desarrollo armonioso entre el crecimiento económico, la equidad social y a sustentabilidad ambiental, donde el equilibrio entre estos aspectos es el óptimo deseado (Zarta, 2018).

Si bien la sustentabilidad está sujeta a factores de riesgo e incertidumbre sobre un futuro incierto, el aprovechamiento de los recursos naturales debe mantenerse en los límites de la regeneración, así como considerar los efectos que su aprovechamiento tenga en el conjunto del ecosistema. En general se asume que a través de prácticas adecuadas se puede influir de forma positiva, a pesar de la incertidumbre, para producir la menor degradación del recurso hídrico. Loukus (2002) identifica varios aspectos como guía para la planificación y manejo sustentable del recurso hídrico, entre estos: desarrollar una visión compartida de manejo; fomentar la coordinación entre actores e instituciones; recordar que la sustentabilidad es un tema ecológico, social y económico por lo

tanto las relaciones entre estas esferas son complejas, dinámicas, cambiantes y típicamente distintas en tiempo y espacio de modo que hay que desarrollar enfoques de gestión adaptables.

A modo de estudiar el aprovechamiento del agua, en esta investigación se trabajará con los registros de concesiones de aprovechamiento del agua. Una concesión es un acto administrativo mediante el que el ente competente, administrador el agua, “otorga de forma temporal a una persona física o jurídica el derecho al uso privativo de un determinado volumen y caudal del agua, o la ocupación y utilización de un bien perteneciente al dominio público hidráulico con una determinada finalidad y un condicionado presente.” (Diccionario del español jurídico, 2019). Dado que las concesiones otorgan un volumen de aprovechamiento, este dato se utilizará para cuantificar la demanda de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero.

En este capítulo se repasan los conceptos claves para el desarrollo de esta investigación como la interpolación espacial, los procesos hidrológicos de precipitación-escorrentía simplificados para el modelo llamado Humedad del Suelo en WEAP. También se discuten aspectos básicos para comprender el proceso de calibración de un modelo, así como qué se entiende por desarrollo sustentable. En el próximo capítulo se detalla la metodología utilizada para realizar esta investigación.

III. Marco metodológico

En el capítulo anterior se plantearon los conceptos más importantes para comprender lo que se desarrolla en esta investigación. En este capítulo se describe cómo se desarrollarán los tres objetivos planteados. Primero, cómo se cuantificó la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero mediante el uso del programa WEAP. Segundo, cómo se realizó la descripción de las concesiones y el efecto que los usos tienen en la disponibilidad del agua superficial. Tercero, cómo se incorporaron las demandas en WEAP, explorando diferentes escenarios e incluyendo el agua del trasvase; así como una breve evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero a la luz de la información recolectada en los primeros objetivos.

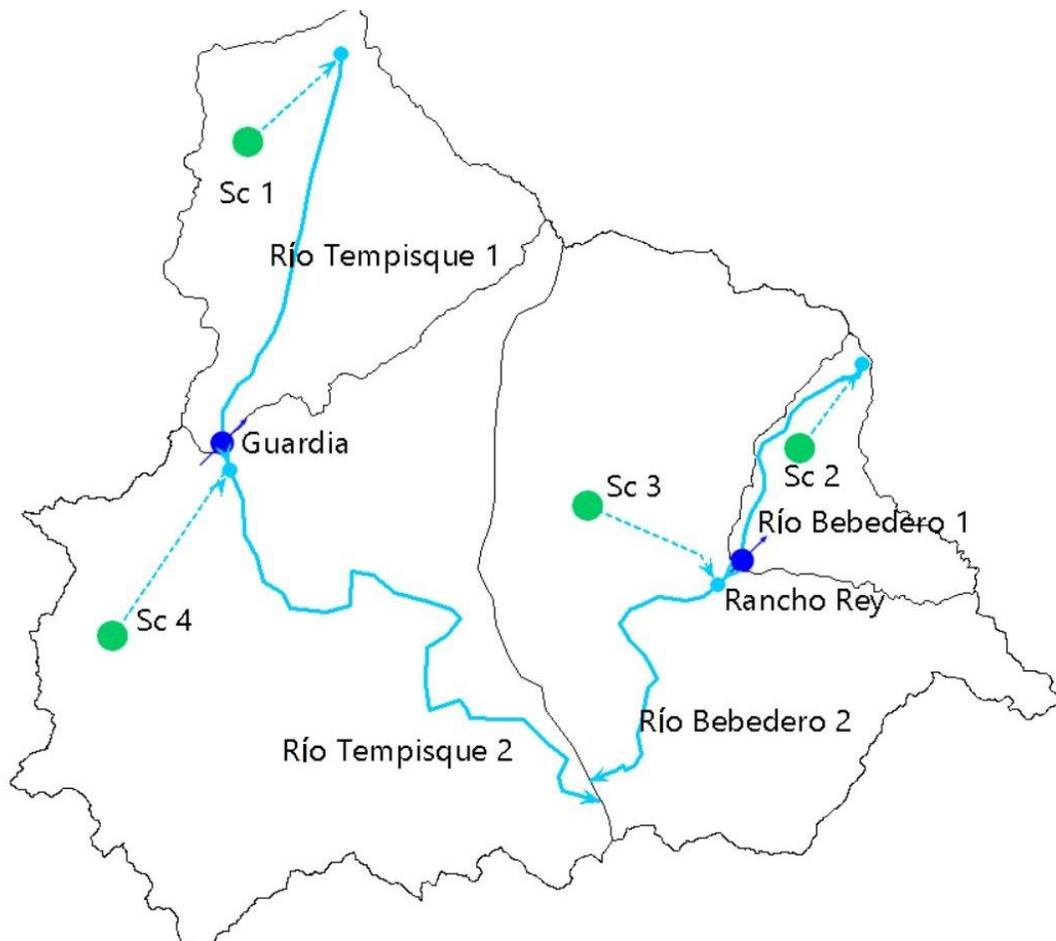
3.1. Procedimientos para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas

Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, mediante el uso del programa WEAP

3.1.1. Datos de entrada para el modelo WEAP

Para simular el balance hídrico, mediante el método de Humedad del Suelo en WEAP, son fundamentales varios datos climáticos y de cobertura de la tierra. El primer paso fue dividir el área de estudio en subunidades a llamarse subcuencas. El criterio para realizar la división territorial fue la ubicación de las estaciones de caudal, Guardia y Rancho Rey (figura 4). Los datos observados registran el agua que se produce en el área aguas arriba de ese punto de medición y por ello se utiliza como criterio para la división del área de estudio en subcuencas. La subcuenca 1 representa la cuenca alta del río Tempisque, aguas arriba de la estación Guardia. La subcuenca 2 es el área aguas arriba de la estación Rancho Rey, la subcuenca 3 es el área aguas abajo de esta estación hasta la boca del río Bebedero. La subcuenca 4 es el área aguas debajo de la estación Guardia hasta la desembocadura del río Tempisque, como se observa en la siguiente figura 3.

Figura 3: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey) y secciones de los ríos principales.



Elaboración propia, 2019.

WEAP calcula el balance hídrico para cada subcuenca, bajo el supuesto de que el clima es uniforme para cada área. El método de Humedad del Suelo se basa en la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Método de Humedad del Suelo en WEAP para calcular el balance hídrico.

$$Rd_j \frac{d_{z_{1,j}}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Donde $d_{z_{1,j}} = [1,0]$ es el almacenamiento relativo dado como una fracción del total del almacenamiento efectivo de la Zona Radicular (mm) para cada categoría de cobertura de la tierra, j . La precipitación efectiva P_e , incluye el deshielo de cada subcuenca pero que en este

caso no aplica. La evaporación potencial, PET, se basa en la ecuación de Penman-Monteith (FAO, 2006) y el $k_{c,j}$ es el coeficiente de cultivo para cada tipo de cobertura de la tierra. El tercer término se refiere a la Escorrentía Superficial donde RRf es el Factor de Resistencia a la Escorrentía (figura 2). El cuarto término se refiere al interflujo, donde $k_{s,j}$ es una estimación de la conductividad cuando el balde 1 (Z_1) está saturada. El quinto término se refiere a la percolación profunda donde f_j es un coeficiente para dividir el suelo y fraccionar el movimiento del agua en dirección horizontal como verticalmente.

El manual de WEAP especifica con respecto a la ecuación de Penman-Monteith (FAO, 2006), que el programa utiliza la versión modificada para un cultivo estandarizado de pasto con 0,12m de altura y una resistencia de superficie de 69 s/m. También señala que en su implementación se hicieron dos modificaciones a la ecuación: el valor de albedo varía en un rango entre 0,15 y 0,25 como función de la capa de nieve, y el de calor del suelo con el término G, fue ignorado. La ecuación de Penman-Monteith, al igual que WEAP, requiere datos de temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar (WEAP la calcula a partir de la fracción de nubosidad).

En esta investigación los datos de precipitación fueron tomados de un set de datos mensuales para el periodo 1950-2014 (Bocanegra, 2017; Muñoz-Jiménez et al., 2018). El set de datos cuenta con 54 puntos de medición ubicadas en el área de estudio, perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Los registros contenían vacíos de información que fueron completados con datos satelitales, formato grilla, tipo re-análisis, con una resolución temporal mensual y una espacial de ~ 25 km; para el periodo entre 1900-2014. Los datos satelitales se obtuvieron de los servidores públicos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre, División de Ciencias Físicas, (NOAA/OAR/ESRL PSD, 2017) por sus siglas en inglés. En el proceso de completar las series del IMN con los datos satelitales, se determinó que la información satelital era adecuada para rellenar los vacíos pues el indicador estadístico de correlación fue de 0,8. Debido a que la serie completada llega hasta el año 2014, para los años 2015 y 2016, se utilizó el promedio del periodo entre 1993 a 2014.

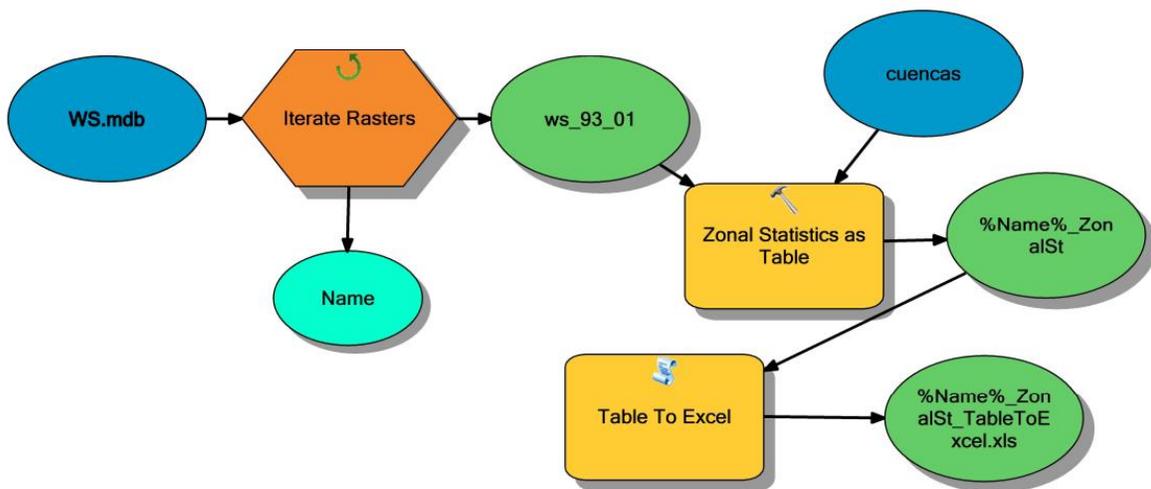
Los datos de temperatura mensual se obtuvieron de siete estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional, que cubrían el periodo de estudio de 1993 al 2016. Las estaciones Aeropuerto Liberia, Santa Cruz, Montezuma tenían un registro de datos promedio mensuales, mientras que Hacienda Mojica, Ingenio Taboga, Santa Rosa y Tilarán, solo con datos mensuales de temperatura mínima y máxima; para estas últimas se calculó el promedio a partir de los que datos disponibles. Como no se obtuvo observaciones en sitio de velocidad del viento y humedad relativa, los datos se obtuvieron de la página POWER - Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA, 2017). También son datos satelitales tipo re-análisis pero a diferencia de los mencionados anteriormente, estos se descargan como archivos tipo texto para coordenadas específicas. De modo que la muestra de puntos para la velocidad del viento y humedad relativa corresponde a las coordenadas de las estaciones con registro de temperatura, esto con el fin de procurar la consistencia.

Una vez recopilados los datos de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, para el periodo de estudio 1993-2016 se realizó la interpolación espacial de cada una de las variables, con el fin de sacar un valor promedio mensual por subcuenca. En el caso de la precipitación, debido a que red de puntos era densa se habría podido calcular el promedio con los valores por estación. Sin embargo, esto no habría sido idóneo para las variables temperatura, velocidad del viento y humedad relativa porque la muestra era menos densa. Por este motivo y procurando mantener la consistencia se empleó la interpolación IDW para todas las variables climáticas.

Para ello se empleó la herramienta *Spatial Analyst* en ArcGis 10.4.1 y el algoritmo Ponderado por el Inverso de la Distancia, más conocido como IDW por sus siglas en inglés. Los parámetros utilizados para la interpolación fueron los asignados por defecto: potencia de dos y radio de 12 puntos, para todas las variables climáticas. La interpolación se realizó con el propósito de obtener un valor promedio por cuenca para cada variable climática con representatividad espacial. Como WEAP solo acepta un valor promedio por variable climática para cada subcuenca, no se realizó un análisis riguroso para determinar los mejores parámetros para la interpolación.

Las interpolaciones se realizaron una a una con la herramienta de análisis espacial mientras que, para extraer el valor promedio mensual de cada variable climática para cada subcuena, se utilizó la herramienta *Model Builder* en ArcMap 10.4.1. Lo que permitió utilizar la herramienta *Zonal Statistics as Table* para extraer un valor promedio del *raster* y automatizar el proceso al emplear un iterador como se observa en la siguiente figura.

Figura 4: Flujo de procesos automatizados con la herramienta *Model Builder* de ArcMap



Fuente: Elaboración propia, 2019.

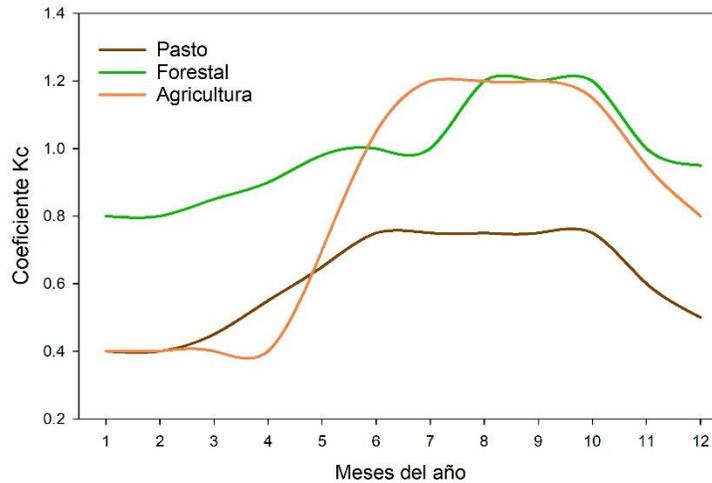
En el primer término se iteran las interpolaciones mensuales en formato raster, en el segundo término se emplea la herramienta *Zonal Statistics as Table* usando las subcuenas como máscara. Esto resulta en una tabla con diferentes estadísticos en las columnas, entre los que son de relevancia el promedio y en el campo de las columnas se desagregan por subcuena. En el tercer término la tabla se convierte a formato Excel, para poder consultar el archivo fuera de ArcMap.

A partir de las tablas generadas conteniendo lo promedios climáticos mensuales por subcuena, se crean nuevas tablas para poblar el modelo WEAP. En WEAP las tablas se crean para cada variable climática por subcuena conteniendo una columna de años, otra para los meses y otra para el valor promedio.

Por otra parte, el dato de fracción de nubosidad se obtuvo mediante consulta al Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) de la Universidad de Costa Rica quienes indicaron que la fracción de nubosidad promedio para Guanacaste es de 0,6. Para estimar la variación interanual se hizo una aproximación informada con respecto a los meses de lluvia del área de estudio, asumiendo 0,4 en los meses más lluviosos y 0,8 en los más despejados. Antes de incorporar los datos meteorológicos al modelo WEAP, se contabilizó el área por tipo de cobertura según datos de (FONAFIFO, 2012), por subcuenca y se aproximó el valor K_c para cada tipo de cobertura según los valores de referencia de FAO (2006), información que luego se introdujo en WEAP.

El K_c es un coeficiente que contabiliza la evapotranspiración de los cultivos. Considerando que la época lluviosa empieza entre mayo y abril y se extiende hasta noviembre, los valores K_c de inicio, medio y fin de los cultivos de la FAO (2006) se adaptaron para que los valores mínimos se ubicaran en la época seca y los máximos en la lluviosa. Para la cobertura agrícola, se tomó como referencia el ciclo de cultivo de la caña, en el caso de humedales y cuerpos de agua se usó el valor 1 ya que los valores de referencia estaban muy cerca del 1 y estas áreas no son extensas. Las curvas con el valor K_c , para cada tipo de cobertura, quedaron de la siguiente manera:

Figura 5: Variación mensual en los valores Kc según cultivo



Fuente: Elaboración propia, 2019

Una vez que se incorpora la información climática, de cobertura de la tierra y los valores Kc para estas coberturas, WEAP genera simulaciones de caudal que deben ser calibradas; este proceso se describe a continuación.

3.1.2. Calibración del modelo, periodo 1993-2003

Una vez corrido en el modelo se procede a la calibración, consiste en el ajuste de parámetros para procurar que la serie de caudal simulado se asemeje al observado. La calibración se realizó para el período 1993-2003 con datos mensual de caudal y consistió en tres pasos. Primero un ajuste visual manipulando uno a uno los valores de los parámetros del modelo para que el caudal simulado se asemeje en el eje *y* al caudal observado. Segundo, una prueba de eficiencia para los parámetros que no son afectados por los tipos de cobertura presentes utilizando el coeficiente NSE y su versión logarítmica. Por último, la prueba de eficiencia general, comparando la calibración visual y la calibración basada en el paso anterior.

Para guiar la asignación de algunos valores se utilizó como referencia criterios físicos. En el caso de la Capacidad de Almacenamiento del Suelo (SWc) o en su defecto la capacidad de almacenamiento del balde 1, se tomó como base el tamaño de las raíces de los pastos y la caña de azúcar mientras que para la Capacidad del Subsuelo (DWc) se consideró la profundidad de pozos. Los parámetros Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRf) y Conductividad en la Zona

Radicular (RZc), se desagregan por tipo de cobertura y se refieren, respectivamente, al movimiento vertical y lateral del agua en el suelo. Como la cobertura de la tierra afecta el movimiento lateral del agua, el supuesto es que la mayor resistencia la crea la cobertura agrícola, seguida de los pastos, luego la cobertura forestal y por último el agua y manglares casi no producen resistencia. En cuanto al movimiento vertical del agua por el suelo a saturación plena, se asumió que la conductividad hidráulica es mayor en el terreno con cobertura agrícola y el pasto, seguido de la cobertura forestal, y que en el agua y manglar no hay mucho cambio ya que los dos baldes permanecen saturados. Estos criterios se asumieron como una base para guiar la calibración visual, pero los valores finales responden a la mejor respuesta del modelo.

Para los parámetros restantes no existe una referencia previa que facilite determinar el valor indicado. Estos son la Dirección Preferida del Flujo (PFd), la Conductividad Profunda (Dc), el Z_1 y el Z_2 . De estos, los parámetros Dirección Preferida del Flujo (PFd) y Z_1 se desagregan por cobertura, pero se encontró que el modelo respondía mejor cuando se utilizaba el mismo valor en todas las coberturas. Entonces, del rango posible y ante una ausencia de respuesta clara del modelo a los cambios en estos parámetros cabe preguntarse, ¿cuál valor es el más adecuado? Para responder esta pregunta se empleó la prueba de eficiencia NSE y logNSE.

Para estos parámetros se realizó la prueba se realiza evaluando el resultado del caudal observado versus el simulado para cada cambio de valor que se realice por parámetro. Para ello se emplea la fórmula NSE y logNSE y se gráfica, en el eje X se indica el rango de valores explorados y en el eje Y el resultado del coeficiente de eficiencia. Si se dibuja una curva positiva el modelo es sensible a ese parámetro y el pico de esta curva sería el valor con mayor eficiencia, de modo contrario el modelo no es al parámetro.

Ante la limitante de que esta prueba se hizo manualmente, para cubrir todo el rango de posibles valores por parámetro, se realizó una prueba sistemática con intervalo de 5. En el caso de Z_1 y Z_2 el rango propio de los parámetros va de 0-100. La Dirección Preferida del Flujo (PFd) tiene un rango de 0-1, por lo que se hicieron saltos de 0,05. En el caso de la Conductividad Profunda (Dc) el parámetro no tiene un rango definido por lo que en la presente se definió de 0-1000 y se cubrió con intervalos de 5.

Los resultados de caudal generados se procesaron en una hoja Excel para hacer el cálculo de los coeficientes NSE y logNSE, que luego se graficaron en SigmaPlot. El criterio final para la calibración se basó en el resultado del logNSE, ya que el interés primordial era simular lo mejor posible los mínimos de caudal, ya que estos son críticos para el manejo del recurso hídrico. Finalmente se comparó la eficiencia del resultado final entre la calibración visual y la que incorpora la eficiencia de parámetros, utilizando de nuevo el coeficiente NSE y logNSE. De este modo se procuró disminuir la subjetividad de la calibración visual utilizando un método cuantitativo, sistemático y replicable.

3.2. Descripción de los registros de concesiones en las cuencas Tempisque y Bebedero y cómo comparar la demanda frente a la disponibilidad de agua superficial.

En la modelación de las cuencas Tempisque y Bebedero, se asumió que los registros de caudal representan un caudal seminatural, omitiendo que los registros podrían estar alterados por extracciones y vertidos de las concesiones agua arriba. Precisamente en el desarrollo del segundo objetivo se contabilizan las extracciones por concepto de concesiones, se describe la fuente y ubicación. Finalmente se realiza una resta simple al caudal simulado a modo de ilustrar el efecto de las concesiones en la disponibilidad.

Los datos de concesiones para el aprovechamiento del agua fueron suministrados por la Dirección de Aguas, dependencia del Ministerio de Ambiente y Energía, MINAE. Se facilitó en formato Excel conteniendo los siguientes campos: número de expediente, nombre, tipo de expediente (superficial, subterránea), estado del expediente, tipo de fuente (por ejemplo, detalles de la fuente como río o nacimiento), coordenadas geográficas de la toma y el caudal asignado según uso en litros por segundo.

Lo primero fue extraer los expedientes tipo A, aguas superficiales, ya que el modelo desarrollado es para agua superficial. Fue necesario excluir tres concesiones a nombre del SENARA, ya que el elevado caudal registrado, dos por 1500 l/s y por 7000 l/s indica que no pertenecen a un sistema natural sino al DRAT que a la vez es agua trasvasada proveniente de la vertiente Caribe. Luego se analizaron los expedientes tipo R, correspondientes a la categoría “acueducto rural”, información que indica que el agua es utilizada para abastecer la demanda de consumo humano.

Dentro de este tipo de expediente existen fuentes superficiales como subterráneas y debido a la importancia de su uso se estudiaron ambos tipos. Si bien en el análisis del efecto de las extracciones en el caudal disponible solo se incluyen las fuentes subterráneas, estas se estudiaron según ubicación y caudales otorgados ya que tienen un valor importante al abastecer el sistema de agua potable.

Lo segundo fue clasificar los expedientes por estado, separando los otorgados y morosos de los demás. Se asumió que los expedientes con estado de “otorgados” cumplen con todos los requisitos para el aprovechamiento del agua, mientras que los “morosos” también cumplen con los requisitos más deben el pago del canon. En esta investigación no se contempla un análisis detallado del manejo que realiza la Dirección de Aguas de los expedientes, por lo que se desconocen los detalles del significado de cada uno de los tipos de expedientes. Los expedientes excluidos fueron los siguientes: archivar sin trámite, cancelado, cancelado por vencimiento, denegado, en trámite, inscripción nueva, inscrito, inscrito-artesanal, pendiente, resuelto, solicitud nueva. Por último, se eliminaron las concesiones con fecha de otorgamiento anterior a 1993.

A modo de demostrar el efecto de las concesiones en el caudal disponible, se realizó una resta simple entre el caudal concesionado y al caudal simulado. Esto es posible ya que las concesiones se consideran volúmenes que escapan del sistema a pesar de que esto sea una simplificación. En realidad, parte del agua extraída regresa de forma indirecta a la cuenca a causa de un uso parcial del agua concesionada, por fugas en los sistemas de abastecimiento o como agua efluente del punto de consumo que regresa al sistema en su mayoría contaminada. En este ejercicio los caudales a extraer fueron los concesionados en los expedientes tipo A y el tipo R, que toman el agua de fuentes superficiales.

Dado que en las tomas de las concesiones no hay medidores, se debe asumir que el caudal otorgado en el expediente es el consumo real, así como constante en el tiempo. Por consiguiente, al caudal simulado se le resta el 100% del caudal concesionado, sin embargo, a modo de representar un consumo parcial se desarrollaron escenarios de consumo del 80%, 60%, 40% o el 20% del total concesionado. Inicialmente los caudales se analizaron en la unidad que venían l/s, sin embargo, posteriormente para poder comparar con los datos generados en WEAP y los

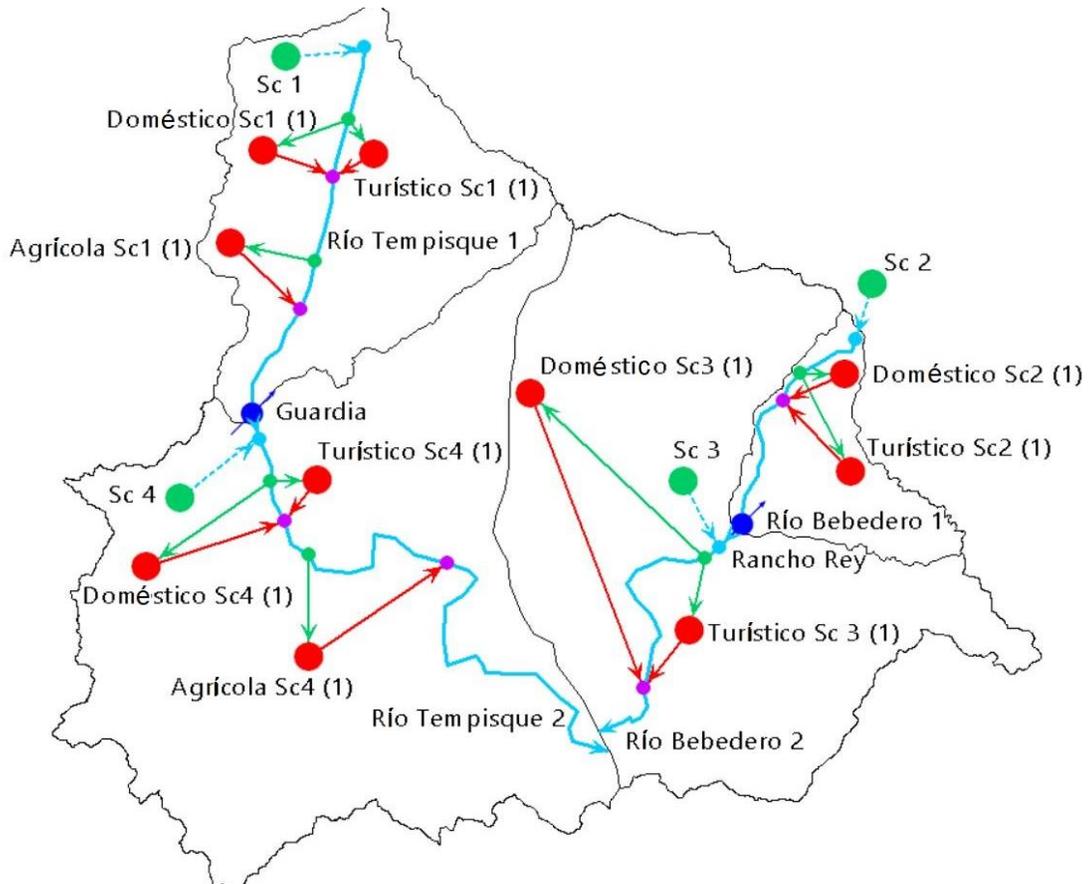
de los fluviógrafos, se transformaron a m^3/s . Los datos de concesiones fueron procesados en Excel, ArcMap y las figuras se realizaron en Sigmaplot. Por último, el análisis se apega a los expedientes de la Dirección de Aguas, por lo que cualquier otro tipo de extracción se excluye de esta investigación.

3.3. Procedimientos para evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP.

Las especificaciones de WEAP para incorporar las demandas, exige reinterpretar los datos de la Dirección de Aguas. El programa requiere un valor anual por nivel de actividad, como número de personas abastecidas en un año, número de casas, o un área agrícola. Asociado a cada unidad de actividad se debe ingresar una tasa de consumo de agua anual, o sea el consumo anual de agua por persona o cultivo. De tal manera la demanda es el resultado de multiplicar el nivel de actividad por la tasa de consumo.

Lo primero para introducir las demandas en WEAP es crear los puntos de consumo en el esquema de trabajo. Los puntos de consumo se clasifican según uso, por ejemplo, doméstico, turístico o agrícola. El punto de demanda se conecta al suministro, en este caso el río, con una línea de conexión, así como una línea de conexión de retorno, por la que fluye el agua que no se consumió en el sitio de demanda (figura 6). Las tuberías suministro siempre tienen un porcentaje de pérdida, en este caso se definió un valor arbitrario de 10% . También se realizaron corridas del modelo asumiendo un consumo del 100%, 80%, 60%, 40% o el 20%. En los casos en que el consumo no es del 100%, el agua efluente del punto de demanda regresa al río por la línea de conexión de retorno.

Figura 6: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey), secciones de ríos principales, las demandas (doméstica, turística y agrícola) y las líneas de transmisión. Fuente: elaboración propia, 2019.



Elaboración propia, 2019.

Como se observa en la figura 6 las demandas se clasificaron en tres categorías: doméstica, turística y agrícola. Como las demandas son una aproximación en base a los registros de concesiones y el programa requiere especificar una unidad y tasa de consumo, las categorías utilizadas responden a lo que es posible aproximar con los datos disponibles. El consumo promedio por persona para el sector doméstico y turístico se tomó del Reglamento de Dotación de Agua para Costa Rica, publicado en La Gaceta del 20 de mayo de 2004, elaborado por el Departamento de Aguas, donde se estipulan las dotaciones de uso doméstico poblacional según zonas.

Cuadro 2: Dotaciones de uso doméstico poblacional.

Zonas	Litros/día/persona	Factor de proyección de crecimiento poblacional: 3% anual.
Urbana	300	
Rural	200	
Turística o costera	350	

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2004.

Para ello primero se transformaron los datos del cuadro 2 a m³/diarios/persona y luego se multiplicó por 365, para saber el valor anual. Así mismo se transformó el caudal concesionado para el sector doméstico y turístico a m³/s y luego se multiplicó por los segundos en un año. El caudal concesionado se dividió entre el valor de referencia para aproximar la cantidad de personas abastecidas. Los valores se ingresan a WEAP y el programa multiplica la cantidad de personas por el consumo anual para calcular la demanda.

Por otro lado, al estimar la demanda agrícola es necesario conocer el área cultivada y el consumo de agua por cultivo. El área agrícola considerada en esta investigación proviene de dos fuentes de datos. La primera fuente es el SENARA, donde el archivo *shape* facilitado cuenta con un registro de las parcelas y su uso histórico para las áreas que son parte del proyecto DRAT. Mientras que el área agrícola que no es parte del DRAT es una que se obtuvo utilizando métodos de teledetección y fointerpretación.

La información espacial de cobertura de la tierra de SENARA está clasificada según cultivo por semestre y se extiende desde el 2007 al primer semestre del 2017. Solo se consideró la cobertura del periodo 2013-2016 porque en estos años se cuenta con datos de caudal trasvasado y esta área agrícola se abastece de esa agua a través de los canales de riego del proyecto DRAT. Por otro lado, el área agrícola de la cuenca del Tempisque se abastece del agua que produce la cuenca. En este caso se partió de una clasificación de cobertura de la tierra para Guanacaste elaborada por la Escuela de Geografía. De los productos facilitados, se utilizó la cobertura del 2010, ya que es la más reciente sometida a un proceso de calidad.

Adicionalmente, se contrastó el mosaico de imágenes Landsat del año 2010 que se utilizó para crear la clasificación de coberturas, con el producto final. Se determinó que para el propósito de

esta investigación lo más conveniente era combinar las clases tituladas “Cultivos remanentes” y “Terreno descubierto”. Es posible que debido a diferencias en los ciclos de cultivo la reflectancia, fuera diferente y por ello durante el proceso de clasificación se determinarían dos categorías distintas, pero al revisar el producto contra la imagen satelital era evidente que ambas clases pertenecían a áreas parceladas. Por tanto, el área agrícola digitalizada en la cuenca del Tempisque es el resultado de una reclasificación del producto facilitados por la Escuela de Geografía, así como la clasificación visual o fotointerpretación del mosaico de imágenes satelitales Landsat para el año 2010. La desventaja es que en esta nueva digitalización no se distinguió entre áreas agrícolas y pastos. Esto representa una incertidumbre en los datos ya que algunas parcelas se podrían dedicar a actividades pecuarias en lugar de agrícolas.

En el caso de área agrícola en el Bebedero, como esta está asociada al proyecto del DRAT y la información de uso de la tierra fue brindada SENARA, se conoce con detalle las áreas por cultivo. Por lo contrario, en la cuenca del Tempisque solo se pudo inferir tres tipos de uso agrícola: caña, arroz y melón. Esta información se infirió al combinar conocimiento previo de la zona de estudio, así como una revisión de los propietarios de concesiones con caudal para riego según ubicación. Por otro lado, el consumo de agua por cultivo se aproximó según referencias bibliográficas, donde el consumo diario de referencia se multiplicó por los días en los meses en que los cultivos requieren riego.

Cuadro 3: Consumo de agua según cultivo (m³/ha/año)

Tipo de cultivo	m ³ /ha/año	Fuente
Arroz	26.000,0	Organización para Estudios Tropicales (2006).
Caña	3.910,0	Santana Segura, R. (2018).
Pasto	16.443,7	Murillo Solano, J. et al (2014).
Melón	5.230,0	Marín Thiele, F (2014).
Varios cultivos	8.527,9	Promedio de melón, caña y pasto según este cuadro.

Elaboración propia, 2019.

Ya que WEAP requiere la tasa de consumo anual por cultivo los valores utilizados se detallan en el cuadro 3. El consumo anual del pasto es mayor que el consumo del melón, el motivo es que el ciclo de cultivo que se asumió para cada cultivo varía. Para el melón se asumió un consumo diario de 48 m³/ha entre enero y marzo, en abril 20 m³/ha/día y en diciembre de 10 m³/ha/día. En el caso del pasto se asumió como un cultivo que se da a lo largo del año con el fin de alimentar el ganado. Se asumió una variación de consumo según los meses basada en (Murillo Solano, J. et al, 2014) con un consumo entre 47 y 49 m³/ha/día para los meses de diciembre a abril, mientras que entre junio y noviembre el consumo diario varió en un rango entre 42 y 45 m³/ha/día. Al sumar el consumo mensual, en un año el pasto consume más agua que el melón, ya que este último no necesita agua de riego entre mayo y noviembre.

En la figura 6 se puede observar que no existe ningún punto de consumo agrícola en la cuenca del río Bebedero. El motivo para esto es que esta demanda se abastece del agua distribuida por el DRAT que proviene del trasvase de la vertiente Caribe, por lo que esto se modeló distinto. En este caso se utilizó un elemento en WEAP llamado “Otros suministros”, que funciona como un reservorio al que se le especifica el caudal de entrada. Libera el agua según demandas aguas abajo, pero no almacena agua, por lo que el agua que no se consume se contabiliza como una pérdida. Este elemento se incluyó solo para el periodo entre 2013-2016 ya que los datos de

caudal manejados por el SENARA corresponden a este periodo. Los caudales que administra SENARA se clasifican en tres categorías: el de generación, que es el que ARCOSA le entrega al DRAT; derivado, que es el agua que se distribuye entre los caudales sur y oeste; y el no aprovechado, que es el agua que no entra a los canales y se desvía al río Corobicí. Los tres tipos de caudal fueron analizados con respecto a su efecto en el caudal simulado.

Lo anterior permite estimar el efecto que la demanda doméstica y turística tienen en la disponibilidad de agua superficial, así como el efecto de la demanda agrícola. También simular el efecto que el trasvase tiene en el río Bebedero. Por último, el tema de la sustentabilidad hídrica en las cuencas Tempisque y Bebedero, se analiza contestando las recomendaciones emitidas por la Contraloría General de la República (2014) sobre medidas para asegurar la sustentabilidad del recurso hídrico en Costa Rica, a la luz de los hallazgos obtenidos anteriormente.

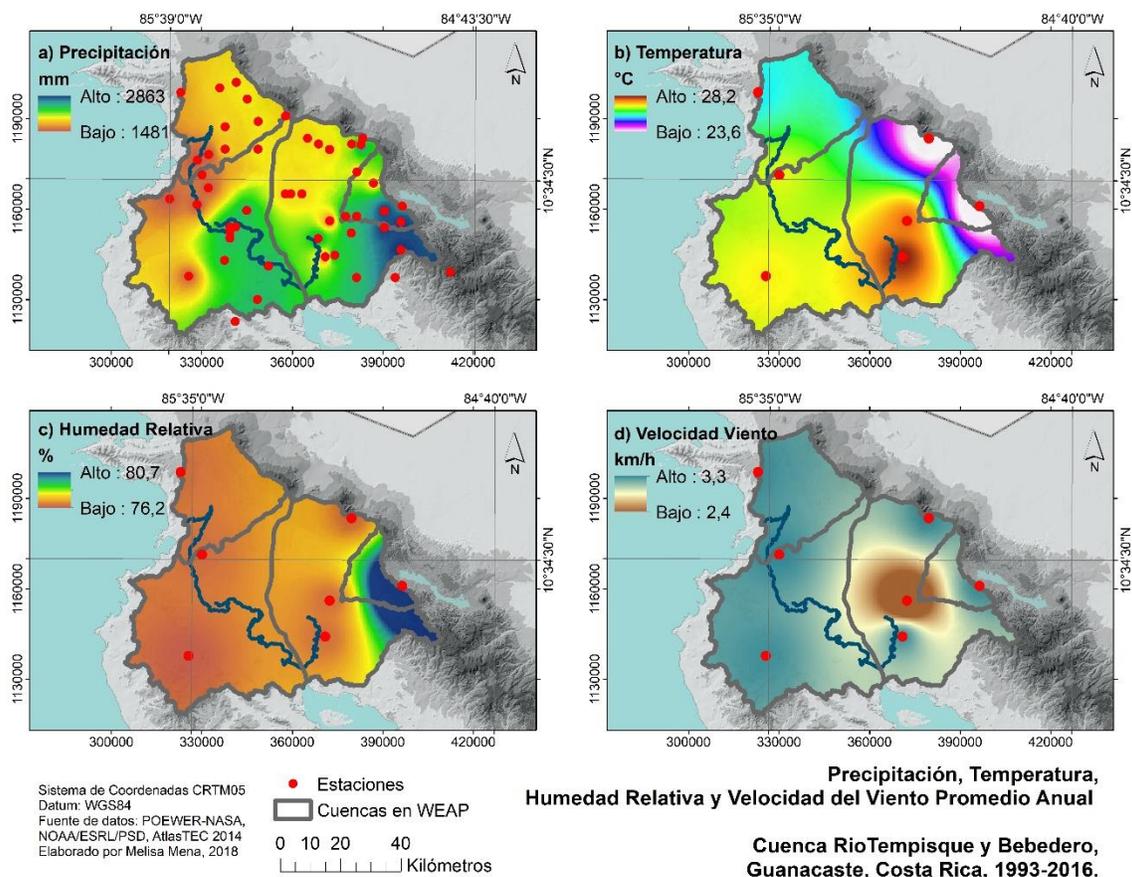
IV. Cuantificación de la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP

En este capítulo se detalla toda la información que se utilizó para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero entre 1993 y 2016, así como los resultados y conclusiones para este objetivo. Primero se especifica la información de entrada que se utilizó en WEAP incluyendo datos climáticos y de cobertura de la tierra. Segundo, se puntualiza sobre el proceso de calibración que incluye la calibración visual y la prueba de sensibilidad y eficiencia para el periodo 1993 a 2003. Por último, se describen los resultados obtenidos para 1993 al 2016 y una sección de reseñas finales para este capítulo.

4.1. Datos de entrada para el modelo WEAP

En la figura 7 se visualiza la distribución espacial del promedio anual de a) la precipitación, b) la temperatura, c) la humedad relativa y d) la velocidad del viento producto de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016 en el área de estudio. En cada área interpolada se delimitan las subcuencas utilizadas para procesar los datos en WEAP, así como los puntos de muestreo.

Figura 7: Promedio Anual de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento resultado de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016, área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2019

La distribución de la precipitación (figura 7.a) se divide en dos tendencias, hacia el noroeste menores precipitaciones (~1500-2500 mm) que al sureste (~2000-3000 mm). Esto se debe a la agrupación de valores similares, porque a pesar de que la red de muestreo es muy densa los valores se repiten en estaciones adyacentes. Lo anterior sucede porque la fuente de datos utilizada para rellenar las series de datos de las estaciones tiene una resolución de $\sim 30\text{km}^2$ lo que genera que varios puntos se concentren dentro de un mismo píxel cuyo valor es el mismo. No obstante, hacia el sureste, en el área más lejana, se ubican las mayores precipitaciones y en este caso sí responde la topografía y cambios altitudinales.

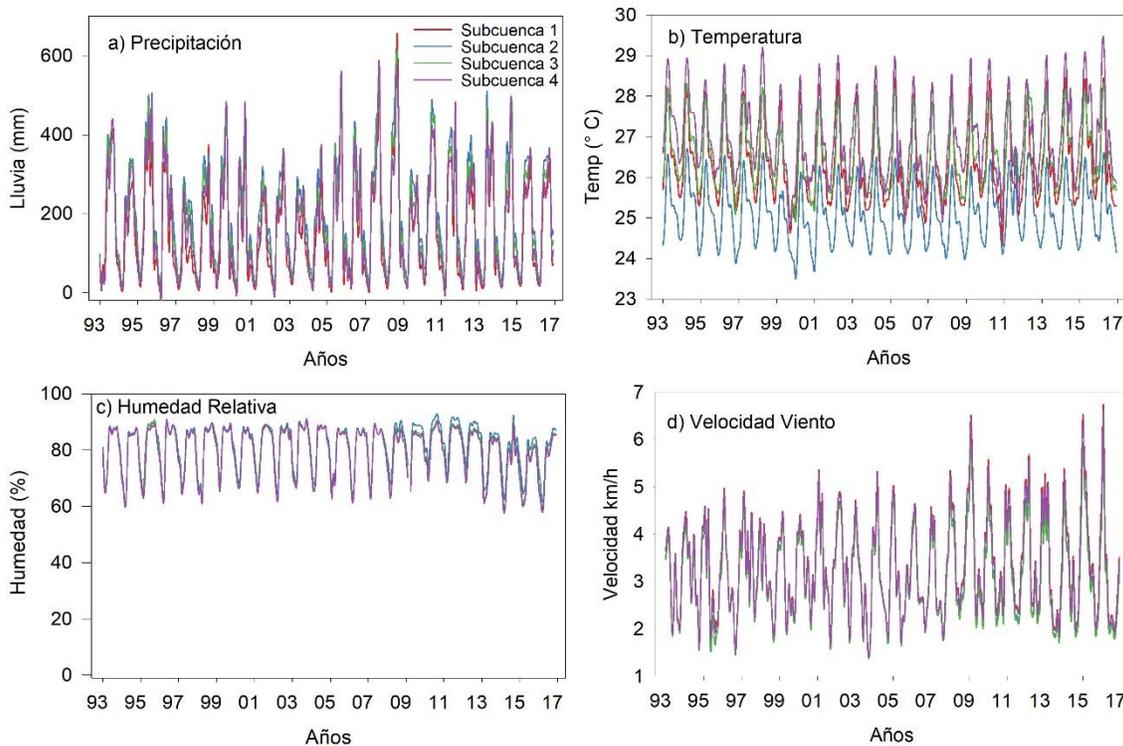
La interpolación de la temperatura fue la que mejor refleja las variaciones altitudinales y en el caso de la humedad relativa solo en la parte sureste. La temperatura promedio anual (figura 7.b) varía de entre 23,6 a 28,2°C y la interpolación refleja que las temperaturas más altas se ubican en las partes más planas y cercanas a las costas, mientras que con el aumento altitudinal la disminución en la temperatura es proporcional. En el caso de la humedad relativa, esta se distribuye casi homogéneamente en 76-75 % alrededor del área de estudio, con excepción de la punta que se extiende al sureste, donde la humedad llega a 80,7%, precisamente en el territorio más montañoso y lluvioso. La velocidad del viento también es relativamente homogénea de ~ 3 km/h por excepción de un punto cerca de Cañas, donde la velocidad baja aproximadamente 1km/h a 2,4 km/h, este efecto es conocido como “ojo de buey”. Como las interpolaciones de temperatura, viene de estaciones meteorológicas en sitio, este producto es el que mejor refleja la gradiente ambiental asociada al aumento en altitud que es de esperar.

Los puntos donde las interpolaciones presentan los conocidos “ojos de buey”, puntos de concentración o islas, es producto de un diseño metodológico mejorable, al ajustar el peso de los puntos y el radio de búsqueda de valores vecinos, y de la debilidad propia del método al no realizarse una evaluación del error de predicción. Este efecto está presente en todas las interpolaciones, y en menor medida en la de humedad relativa. Es posible que la cercanía de los dos puntos al sureste cause este efecto. A pesar de algunas posibilidades de mejora en las interpolaciones, que podrían incluir cambiar la fuente de datos para el rellenado de datos o mejorar la distribución de la red de muestreo, para esta investigación es suficiente porque lo que se utiliza en el modelo es el valor promedio por subcuenca.

Precisamente en la figura 8 se observan las series de tiempo con los promedios mensuales para cada subcuenca obtenidos de las interpolaciones entre 1993-2016 para las variables meteorológicas a) precipitación, b) temperatura, c) humedad relativa y d) velocidad del viento. El promedio mensual de humedad relativa varía entre 60-90% y velocidad del viento entre 1,5 y 6,7 km/h. Se puede observar que la variabilidad entre los promedios es casi imperceptible cuando se comparan los valores entre subcuencas, esto responde precisamente a la homogeneidad de las interpolaciones que es de donde se extrae el promedio.

La precipitación mensual varía de 0 a 660 mm y de igual forma, sutilmente entre cuencas, donde la número dos es la más lluviosa en general. En el área de estudio los valores de temperatura varían entre 23 y 29°C pero las diferencias entre subcuencas son significativas. A grandes rasgos, la subcuenca 2 maneja un rango entre 23 y 26°C, o sea el rango bajo entre las tres subcuencas, las subcuencas 1 y 3 representan el rango medio entre los 24 y 28°C, mientras que la subcuenca 4 varía entre los 25- 29°C, que representa el rango más alto.

Figura 8: Promedios mensuales de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento extraídos de las interpolaciones mensuales para cada subcuenca entre 1993-2016.

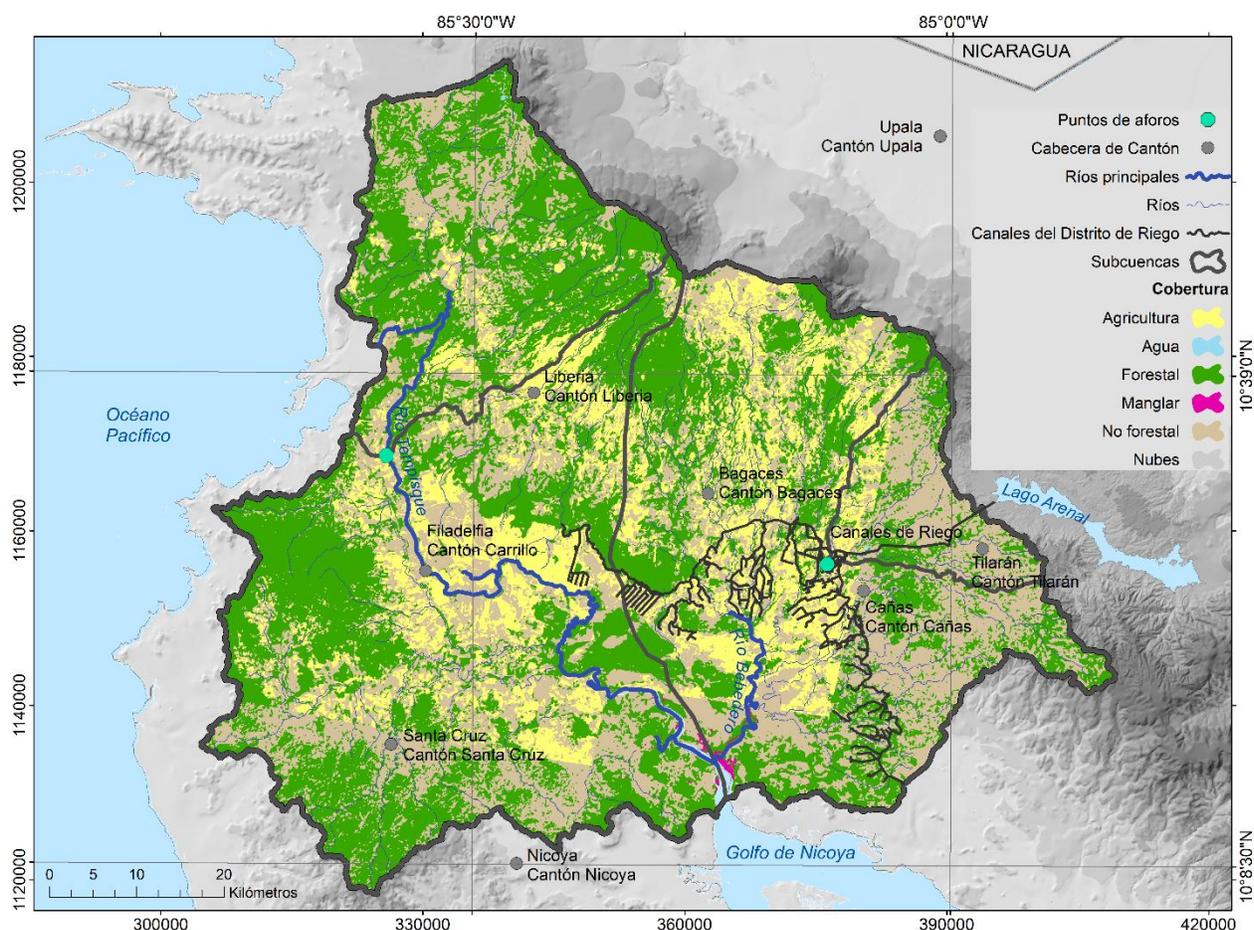


Fuente: Elaboración propia, 2019.

Además de las variables climáticas, para realizar el método de humedad del suelo es necesario ingresar información sobre la cobertura de la tierra. La distribución espacial de los diferentes tipos de cobertura se puede apreciar en la figura 10 donde se distingue entre las categorías: forestal, no forestal, agrícola, manglares, cuerpos de agua y nubes. La distinción que hace FONAFIFO, la fuente de datos es muy gruesa pero suficiente para un área tan grande. En la figura se observa

que las extensiones más grandes de cultivos se ubican en las márgenes de los cursos de agua, ya sea en forma de ríos o canales de irrigación; así como estar contenidos fuera de las áreas de protección nacionales. Los manglares se ubican únicamente en la desembocadura de los ríos Bebedero y Tempisque, en la línea de costa. La cobertura forestal se concentra en la subcuenca 1 y en las áreas de mayor altitud, así como en el sector oeste de la cuenca 3. La categoría de no forestal, en esta investigación se clasificó como pasto, y se concentra en la subcuenca 2 y al sur de la subcuenca 3.

Figura 9: Cobertura de la tierra, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, año 2010

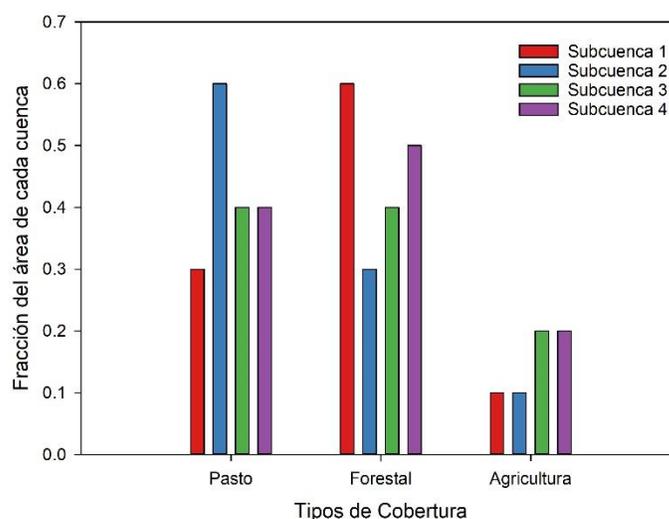


Fuente de datos: FONAFIFO (2010) y SENARA, SNIT, Proyección CRTM05, Datum WGS84.

La Figura 10 permite comparar las fracciones de área por tipo de cobertura con respecto al área total por subcuenca. La subcuenca 2 tiene la porción más grande de pasto con respecto al área

total de la cuenca, la cobertura forestal predomina en la subcuenca 1 y la porción de área dedicada a la agricultura es muy similar entre las subcuencas 1,2 y 3,4. La subcuenca 2 es la más pequeña de las cuatro, con un área de 314 km², donde prevalecen los pastos con 195,7 km², un área de 87,4 km² de tipo forestal, 30,7 km² de agricultura. La subcuenca 1, es la siguiente en tamaño (área de 959,19 km²) en la que prevalece el uso forestal con un área de 588,2 km², seguido 299,4 km² de pastos y por último 71,5 km² de agricultura. Debido a que ambas subcuencas son las cabeceras de los ríos Bebedero y Tempisque, respectivamente, es un buen indicador para la salud de los ríos aguas abajo que las áreas de cultivo no predominen.

Figura 10: Tipos de cobertura por fracción del área de cada subcuenca.



Elaboración propia, 2019.

En el caso de la subcuenca 3 con un área de 1857,37 km², 755,3 km² están cubiertos por pastos, 682,1 km² tiene cobertura forestal y 415,4 km² se dedican a la agricultura. En la subcuenca 4, la más grande con un área de 2299,78 km², predomina la cobertura forestal con 1050.2 km², seguido de pastos con 826.1 km² y la agrícola con 421,1 km²; estas últimas dos categorías levemente por encima de la subcuenca 3. La porción de manglar en la subcuenca 3 es de 4,1 km² y en la subcuenca 4 de 2,1 km².

4.2. Calibración visual del modelo, periodo 1993-2003.

Para ajustar el caudal simulado con el observado, se debe calibrar el modelo y esto implica ajustar los valores de los diferentes parámetros que conforman el modelo conceptual de dos

baldes. Los primeros parámetros por definir son la profundidad de la capa superior e inferior del suelo, Capacidad del suelo (SWc) y Capacidad del subsuelo (DWc), estos valores se desagregan según cobertura de la tierra (ver cuadro 4). Como las categorías de cobertura de la tierra son iguales para toda el área de estudio, se utilizaron los mismos valores en las dos cuencas de calibración, la 1 y la 2. Como regla general se asumió que el tamaño de las raíces del terreno agrícola es menor al de pastos y a su vez este es mucho menor que el forestal. La capacidad de la capa inferior del suelo se definió en 20 000 mm tomando como referencia la profundidad de los pozos en Bagaces (García y Arellano, 2012).

En el cuadro 4 se especifican los valores utilizados para los parámetros sensibles o dependientes a la cobertura de la tierra. Estos son, factor de resistencia a la escorrentía (RRf), conductividad de la zona de las raíces (RZc), capacidad del suelo (SWc) y capacidad del subsuelo (DWc). También se incluyen los parámetros independientes o insensibles al cambio de cobertura de la tierra, que son: conductividad profunda (Dc), dirección Preferida de Flujo (PFd) Z₂ y Z₁.

Cuadro 4: Calibración visual, valores asignados a los parámetros dependientes e independientes de las coberturas de la tierra.

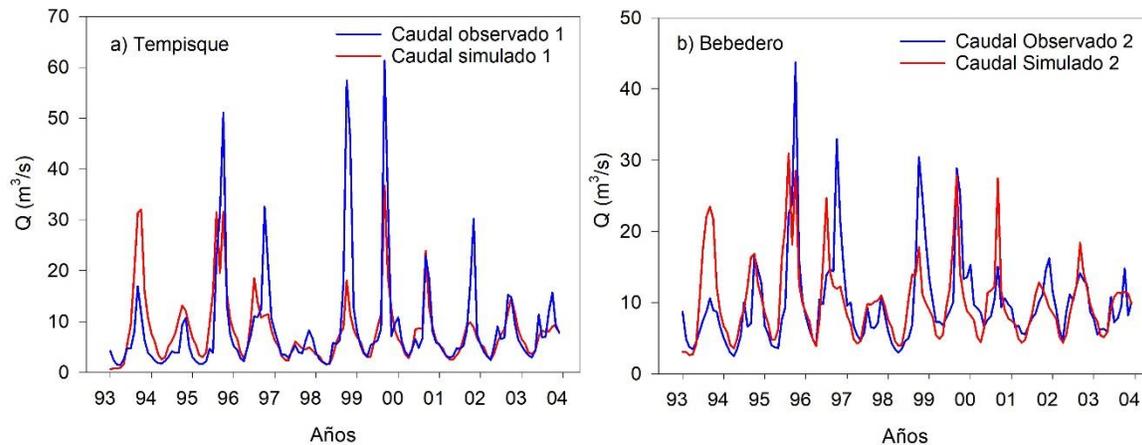
	Parámetros dependientes del cambio de cobertura					Parámetros independientes del cambio de cobertura				
	Cobertura	RRf	RZc	SWc (mm)	DWc (mm)	Cobertura	Dc (mm)	PFd	Z ₁	Z ₂
Subcuenca 1	Pasto	40	200	400	20000	Pasto	20	0,26	10	5
	Bosque	60	500	2000		Bosque		0,26	10	
	Agua	2	80	20		Agua		0	100	
	Manglar	2	80	20		Manglar		0	100	
	Agricultura	40	200	250		Agricultura		0,26	10	
Subcuenca 2	Pasto	400	200	400	20000	Pasto	60	0,58	5	60
	Bosque	600	500	2000		Bosque		0,58	5	
	Agua	2	80	20		Agua		0	100	
	Manglar	2	80	20		Manglar		0	100	
	Agricultura	400	200	250		Agricultura		0,58	5	

Fuente: elaboración propia, 2019.

El Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRf), varían entre cuencas por 100 números absolutos, esto posiblemente se deba a que en la subcuenca 2 hay más área con pasto y por tanto se deba compensar el Factor de Resistencia. En WEAP, los parámetros Dirección Preferida de Flujo (PFd) y Z1 también están desagregados por cobertura, pero se determinó que en este caso no son sensibles a las diferencias de cobertura para una misma subcuenca. Las coberturas Agua y Manglar no tendrían una dirección de flujo ya que el balde superior estaría saturado desde el inicio, por lo que se les asignó el valor cero. También en el agua y manglar, al Z₁ se le asignó el valor de 100, ya que representa que el balde superior estaría completamente saturado al iniciar la simulación.

El figura 11 muestra el caudal simulado (línea roja) obtenido por la calibración visual versus el observado (línea azul) entre 1994 y 2003. Se observa que el caudal simulado refleja la estacionalidad del área de estudio, directamente relacionado a las precipitaciones, aunque no logra simular picos de caudal observado. Lo más satisfactorio es que el caudal mínimo se asemeja al observado, esto es de vital interés porque el modelo no sobre estima la disponibilidad mínima de agua. En situaciones particulares como en el año 1993, tanto en la subcuenca 1 como en la subcuenca 2 y en el 2000 en la subcuenca 2, el caudal simulado es menor que el observado. La falla al inicio de la simulación para ambas cuencas demuestra que el modelo se acopla mejor después de los primeros meses de la serie.

Figura 11: Resultados de la calibración visual entre caudal observado y la escorrentía simulada.



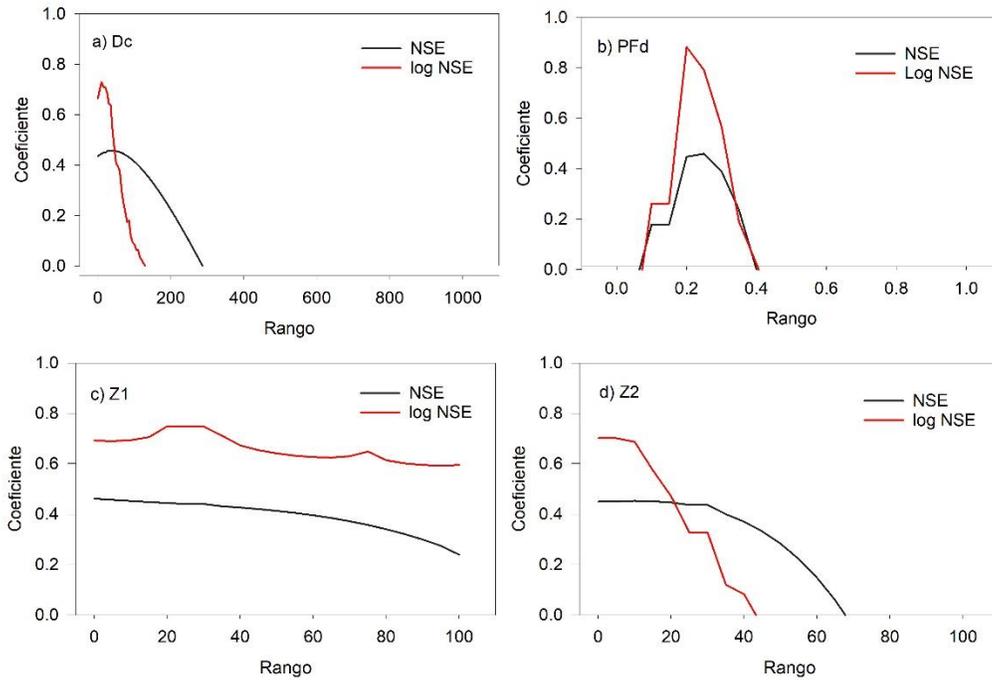
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Si bien el ajuste visual es satisfactorio porque demuestra una adecuada variabilidad intra e interanual es necesario probar la eficiencia de aquellos parámetros que resultaron ser insensibles a los tipos de cobertura durante la calibración visual (cuadro 4), con el propósito de usar el valor más eficiente y lograr la mejor calibración y resultados.

4.3. Calibración a partir de la prueba de sensibilidad y medición de la eficiencia periodo 1993-2003.

La prueba de sensibilidad y eficiencia, no se puede hacer de forma automatizada y aleatoria, debido a las limitaciones del programa WEAP. Así como se detalla en la metodología, se realizó una prueba por intervalos del indicador de eficiencia NSE (línea negra) y logNSE (línea roja), para los parámetros Dirección preferida de flujo (PFd), Conductividad profunda (Dc), valor de inicio del balde superior (Z1), y valor de inicio del balde inferior (Z2). Los resultados de las corridas para cada parámetro se observan en las figuras 12 y 13.

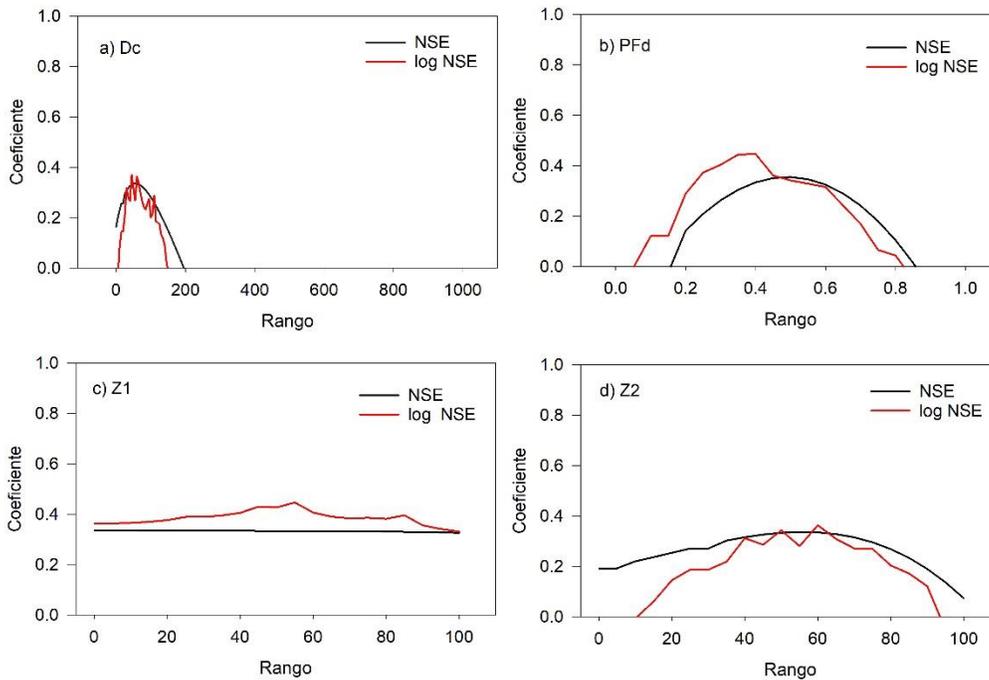
Figura 12: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z₁ y Z₂ para la Subcuenca 1 cabecera del Tempisque.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la subcuenca 1, cabecera del Tempisque los parámetros Conductividad profunda (Dc), Dirección preferida de flujo (PFd) y el Balde inferior (Z₂) demostraron una clara sensibilidad de eficiencia y un mejor desempeño que la versión logarítmica del NSE (logNSE). El desempeño superior del logNSE quiere decir que hay mayor eficiencia en la calibración de flujos mínimos, que en los picos de caudal. El parámetro Conductividad profunda (Dc) es sensible en un rango entre 0-35 y una eficiencia logNSE de 0,75. El parámetro Dirección preferida de flujo (PFd) es sensible al logNSE en un rango entre 0,06-0,4 con una diferencia del logNSE de 0,88. En el caso del valor de inicio del balde superior (Z₁) el parámetro es más sensible en la versión logarítmica sin embargo no se distingue una eficiencia significativa. Por otro lado, para el balde inferior (Z₂), el logNSE es más eficiente en un rango entre 0,30-0,70, mientras que el NSE en un rango de 0,03-15., con una diferencia de 0,24 en el coeficiente.

Figura 13: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z₁ y Z₂ para la Subcuenca 2 cabecera del Bebedero.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la subcuenca 2, cabecera del Bebedero los parámetros Conductividad profunda (Dc), Dirección preferida de flujo (PFd) y el balde inferior (Z₂) demostraron una clara sensibilidad en eficiencia, pero poca diferencia en el desempeño entre el NSE y su versión logarítmica. El desempeño similar de ambos indicadores de eficiencia significa que la diferencia de calibrar entre el NSE o el logNSE no variaría mucho, no obstante, en este caso se utiliza la mejor eficiencia en el logNSE por haber interés en modelar adecuadamente los flujos mínimos. El parámetro Conductividad profunda (Dc) es sensible en un rango de 0-134 en logNSE particularmente entre 45-50. El parámetro Dirección preferida de flujo (PFd) es sensible en un rango entre 0,05-0,85 donde el logNSE es superior solo por 0,05 puntos con respecto al NSE. Para el parámetro Inicio del balde superior (Z₁) el NSE es insensible y el logNSE es ligeramente más sensible solo por 0,11 puntos en el coeficiente. El balde inferior (Z₂) en logNSE tiene un ligero pico de eficiencia con respecto al NSE en el valor 60.

Los valores finales utilizados para cada parámetro se encuentran en el cuadro 5. En la subcuenca 2 los valores por parámetro son más altos que en la subcuenca 1. En el caso de la subcuenca 3 se utilizaron estos mismos parámetros que en la subcuenca 2 a diferencia del Dc, caso en que se utilizó un valor de 0,1 con el fin de reducir la tendencia positiva que se generaba a partir del año 2003 si se utiliza en el mismo valor que en la cuenca alta. De igual forma, los parámetros que se utilizaron en la subcuenca 4, fueron los de la subcuenca 1 a excepción del valor Dc que también se utilizó el valor 0,1.

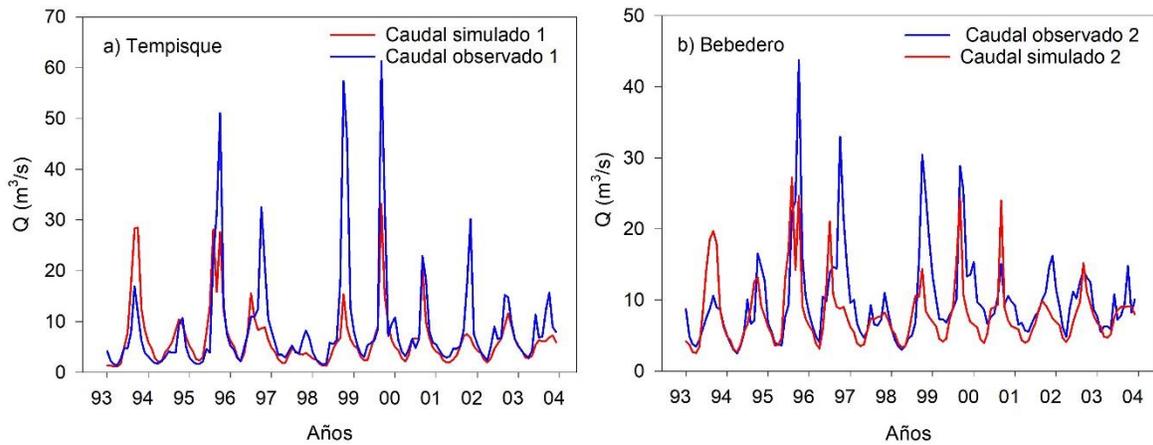
Cuadro 5: Valores asignados a los parámetros independientes a los cambios de cobertura determinados mediante la calibración por eficiencia, Subcuencas 1 y 2.

	Cobertura	Dc (mm)	PFd	Z1	Z2
Subcuenca 1	Pasto	10	0,2	20	10
	Forestal		0,2	20	
	Agricultura		0,2	20	
	Agua		0	100	
	Manglar		0	100	
Subcuenca 2	Pasto	45	0,4	55	60
	Forestal		0,5	55	
	Agricultura		0,8	55	
	Agua		0	100	
	Manglar		0	100	

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 14 se observa la serie de tiempo de caudal observado y simulado después de hacer la calibración sistemática con los valores de mejor desempeño para el logNSE. Para ambos métodos de calibración, en la subcuenca 2, se observa una mejor simulación de los caudales mínimos hasta 1998, después de esta fecha en ambos métodos el caudal simulado disminuye con respecto al observado. Realizando una comparación visual entre las ver figuras 10.a/b y 13.a/b no se observa mayor diferencia situación que se comprueban con los resultados de eficiencia total en el cuadro 6.

Figura 14: Resultados de la calibración con sensibilidad y eficiencia de parámetros.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Al realizarse la comprobación de la eficiencia de los resultados finales, en la subcuenca 1, se observa una mejoría de 0,10 entre el logNSE de la calibración visual y la realizada a través de la eficiencia de parámetros. Mientras que en la subcuenca 2 no hubo diferencia entre los dos tipos de calibración para el caso de logNSE. La eficiencia de la simulación es dos veces mejor en la subcuenca 1 que en la subcuenca 2.

Cuadro 6: Comparación de la eficiencia global entre la calibración visual y la de sensibilidad.

Calibración	Subcuenca 1		Subcuenca 2	
	NSE	logNSE	NSE	logNSE
Visual	0,45	0,69	0,33	0,36
Eficiencia por parámetros	0,43	0,79	0,28	0,36

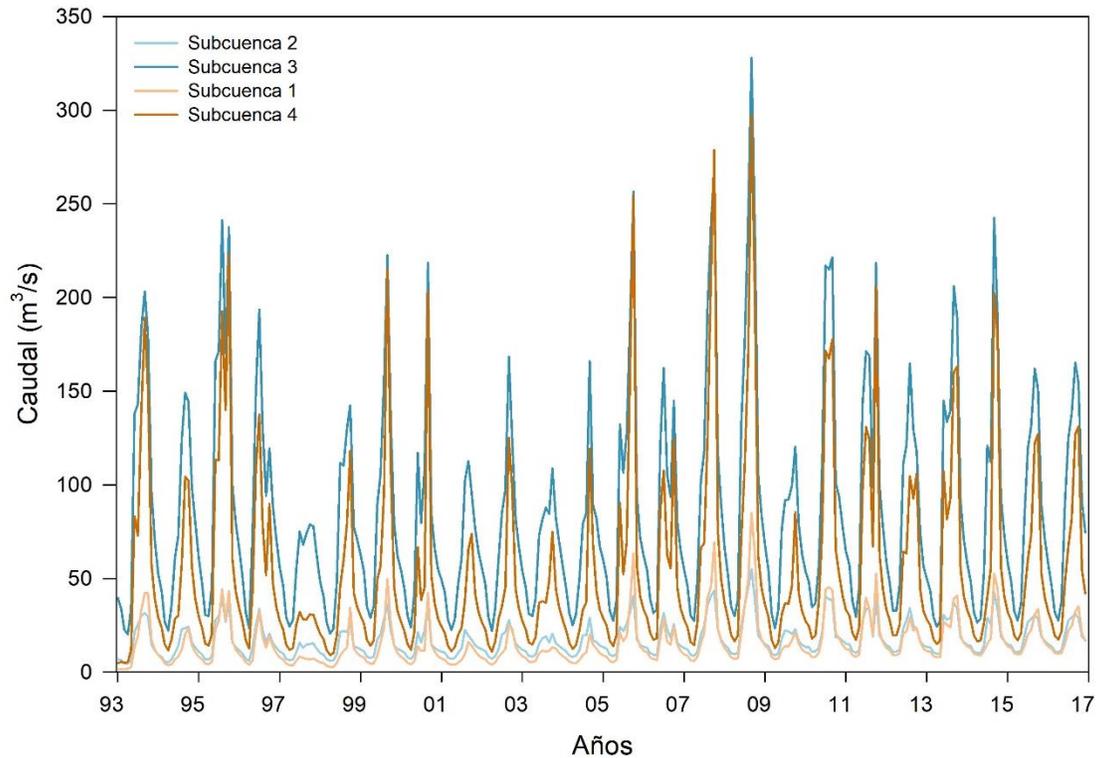
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Para las subcuencas 3 y 4 no se pudo replicar el proceso de calibración realizado en las subcuencas 1 y 2 ya que no se contaba con caudales observados que permitieran comparar las simulaciones con datos en el sitio. Por lo que, los valores utilizados en los parámetros fueron los mismos de las partes altas de cada cuenca (ver cuadro 5); los de la subcuenca 1 se utilizaron en la subcuenca 4 y de la subcuenca 2 en la subcuenca 3. A excepción del parámetro Conductividad profunda (Dc) que se le asignó un valor mínimo de 0,1 para evitar crear una tendencia positiva en el caudal simulado.

4.4. Caudal simulado para el periodo 1993-2016

En la sección anterior se detallan los parámetros de calibración de las subcuencas 1 y 2 así como los resultados de caudal obtenidos para el periodo entre 1993 y 2003. En esta sección veremos los resultados de caudal simulado para cada subcuenca de trabajo en WEAP durante el periodo de estudio que comprende el periodo entre 1993-2016. Para el periodo entre 1993 y 2003, al comparar los resultados de la simulación con los observados se observa una adecuada variabilidad intra e interanual que se mantiene del 2004 en adelante. En la figura X se observa toda la serie de caudal simulado para las subcuencas del río Bebedero (2 y 3) y para las subcuencas del río Tempisque (1 y 4). Las cuencas 1 y 2 fluctúan en un rango similar con caudales menores que las subcuencas 3 y 4. Mientras que las subcuencas 3 y 4 generan más caudal ya que cubren un área mayor, en general la subcuenca 3 es la que más agua genera.

Figura 15: Caudales simulados por subcuenca, cuencas del río Tempisque y Bebedero, 1993-2016.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según el caudal simulado, para el periodo 1993-2016 la subcuenca 1 tiene un caudal mínimo de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo de $68,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que la subcuenca 2 tiene un caudal mínimo de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximo de $40,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, la subcuenca 3 tiene un caudal máximo de $328 \text{ m}^3/\text{s}$ y mínimo de $20,1 \text{ m}^3/\text{s}$. En la subcuenca 4 se simuló un caudal máximo de $297,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y uno mínimo de $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal medio anual de la subcuenca 1 es de $15,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y el de la subcuenca 2 es mayor solo por $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para un promedio de $17,4 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica que las cabeceras del Tempisque y el Bebedero producen una cantidad del agua similar.

Cuadro 7: Caudales máximo, mínimos y acumulados por subcuenca para el periodo 1993-2016.

	Subcuencas			
Número de subcuenca	1	2	3	4
Caudal máximo (m ³ /s)	84,9	54,9	328,0	297,2
Caudal mínimo (m ³ /s)	1,5	4,5	20,1	4,7
Caudal promedio anual (m ³ /s)	15,4	17,4	86,4	55,1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según la información del cuadro 7 se determina que la parte media baja de la cuenca del Bebedero es la que más agua produce. En la cuenca del Tempisque en general la temperatura es mayor que en la cuenca del Bebedero, generando mayor evapotranspiración y con ello menos agua en los ríos. La evapotranspiración actual tanto en la subcuenca 1 y 4 (Tempisque) es en promedio de 23 mm, mientras que en la subcuenca 2 la evapotranspiración actual es en promedio 18 mm y en la subcuenca 3 de 22 mm. Aunque la diferencia entre la evapotranspiración de la cuenca del Tempisque y la del Bebedero no es mucha, esta leve diferencia se traduce en menos disponibilidad de agua superficial.

En conclusión, se estimó la escorrentía superficial para la parte alta de las cuencas Tempisque y Bebedero, así como para las secciones medias y bajas, aun cuando para la calibración de estas últimas no se contó con datos observados. En el siguiente capítulo se estudiará la base de datos de concesiones de la Dirección de Aguas con el fin de cuantificar la demanda de agua en el área de estudio.

V. Describir los registros de concesiones en las cuencas Tempisque y Bebedero y comparar la demanda frente a la disponibilidad de agua superficial.

En el capítulo anterior se calculó la oferta o disponibilidad superficial de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, en este se analizan las concesiones de agua superficial y su posible efecto en los ríos. Se describen las concesiones por uso y subcuenca, así como su ubicación, fuente y caudales concesionados. Después de realiza una resta simple del agua concesionada al caudal simulado para ver el efecto de las concesiones en la disponibilidad, por último, se realizan unas conclusiones para este apartado.

5.1. Caudales concesionados por uso y subcuenca.

El cuadro 8 resume el acumulado del caudal concesionado por uso y subcuenca de fuentes superficiales según datos de la Dirección de Aguas. La cuenca del Tempisque (subcuenca 1 y 4) es la que en conjunto tiene más caudal concesionado con 16.703,22 l/s, mientras que la del Bebedero (subcuenca 2 y 3) el caudal concesionado suma a 7.177,61 l/s, esto es 2,3 veces menos que en el Tempisque.

Cuadro 8: Caudal concesionado en litros por segundo (l/s) para todos los usos por subcuenca, agua superficial, actualizado al 2017.

	Tempisque		Bebedero		
	Caudal Concesionado (l/s) por subcuencas				
Número de subcuenca	1	4	2	3	Total
Fuerza hidráulica	0	0	0	0	0
Industrial	6	0	0	2	8
Comercial	0	0,03	0,92	8,09	9,04
Consumo humano	107,31	0,46	0,97	5,03	113,77
Turismo	29,66	3,3	0,57	99,77	133,3
Agropecuario	2,16	137,21	222,47	2.054,32	2.416,16
Agroindustrial	0	3568	0	0	3.568
Riego	1.999,25	10.849,84	2.220,07	2.563,4	17.632,56
Total	2.144,38	14.558,84	2.445	4.732,61	23.880,83

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En cuanto a los usos, en el área de estudio no se destina agua para producir fuerza hidráulica. Los otros dos usos con poco caudal concesionado son el industrial y comercial. El uso industrial

existe en la subcuenca 3 y 1 con un total de 8 l/s concesionados. El uso comercial se concentra en la subcuenca 3 con 8 l/s y un total de 9 l/s. En orden de cantidad, siguen los usos para consumo humano y turístico. En el caso del uso para consumo humano, el caudal concesionado se concentra en la subcuenca 1 con 107 l/s y en el caso del uso turístico se acumula en la subcuenca 3, seguido de la subcuenca 1. Seguidamente, los usos con valores acumulados de más de 2000 l/s son el agropecuario, agroindustrial y por último el riego con la mayor cantidad (17.632,6 l/s). En el caso del uso agropecuario el caudal concesionado es mayor en la cuenca del Bebedero (2276,79 l/s) que en la del Tempisque (139,37 l/s) y se concentra el área de la subcuenca 3. El uso agroindustrial solo existe en la subcuenca 4, con 3.568 l/s concesionados, repartidos en dos concesiones, una por 3000 l/s y la otra por 568 l/s, pertenecientes a dos ingenios que procesan la caña. Por último, el uso con mayor caudal concesionado es el riego con un total de 17.632,56 l/s que se reparte entre las subcuencas 3 y 4, siendo la subcuenca 4 en la que más caudal se destina al riego 14.558,84 l/s.

5.2. Descripción de la distribución, fuente y caudales concesionados para consumo humano, agrícola y turístico.

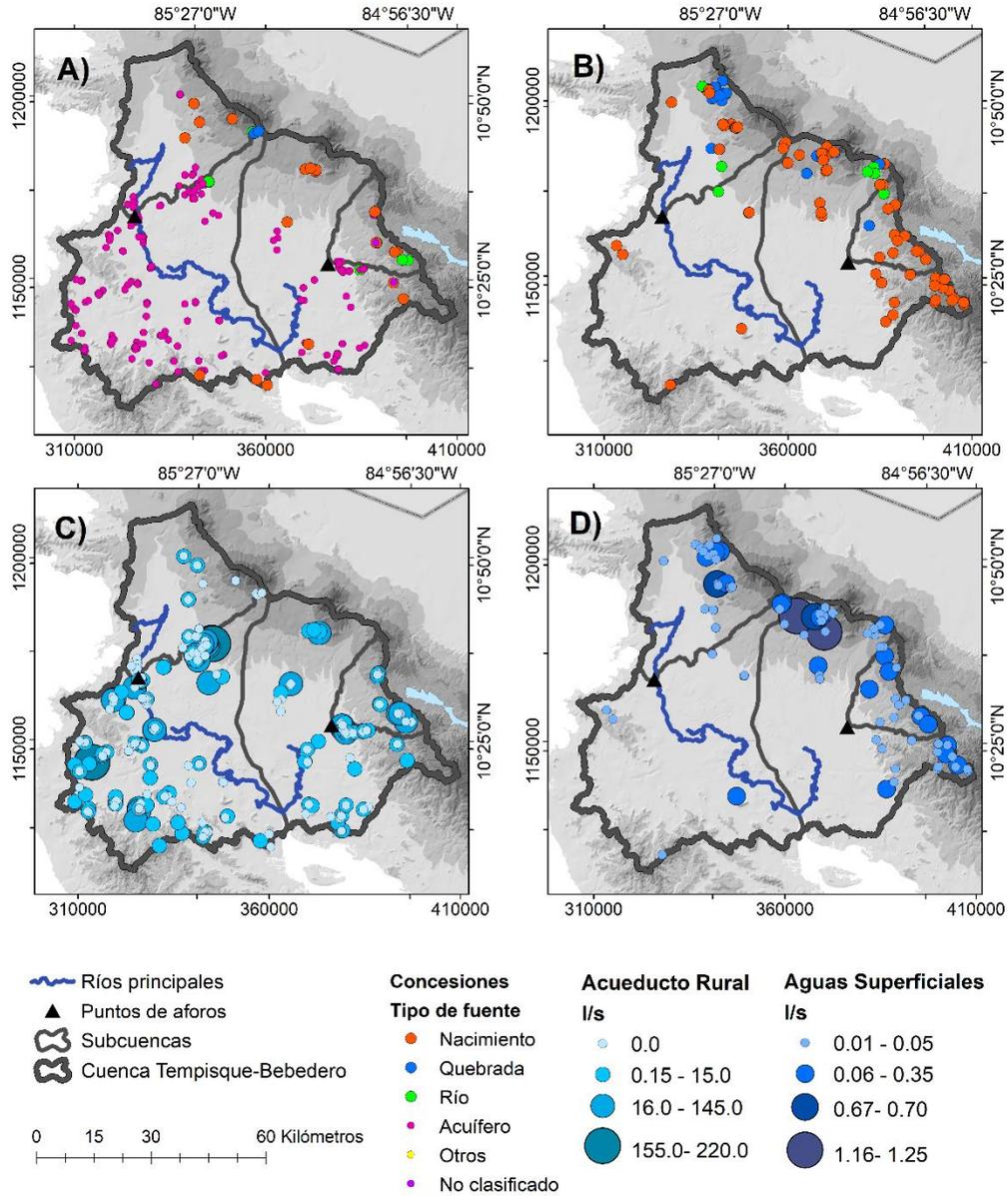
Según la base de datos, las concesiones dedicadas a abastecer la demanda doméstica se dividen en dos tipos de expedientes, los de tipos A que corresponden a aguas superficiales y los de tipo R que corresponden a acueductos rurales. El factor diferenciador, a pesar de que en los dos casos el agua se usa para abastecer el consumo doméstico, es el ente administrador, ya que, en el caso de los expedientes tipo R todos pertenecen al AyA. Al analizar la información se concluye que 2243,84 l/s concesionados para abastecer la demanda doméstica en el área de estudio, de esos 63% provienen de acuíferos y 37% de agua superficial. Se realiza una descripción de cómo se abastece la demanda doméstica, incluyendo los acuíferos, aunque posteriormente estos volúmenes no se incluyen en el análisis sobre el efecto de las demandas en el caudal, ya que representa un alto porcentaje del agua utilizada para abastecer la demanda doméstica.

La distribución de las concesiones que toman el agua de acuíferos (puntos rosados) se ubica en las planicies del área de estudio, mientras que las otras fuentes se ubican en las partes altas. En la figura 1.a se observa la distribución de las concesiones con el tipo de expediente “acueducto

rural” y su fuente de suministro. Varios de los pozos se agrupan cerca de las cabeceras de cantón u otros poblados donde se concentran los poblados, por ejemplo, Liberia, Cañas, Tilarán, Santa Cruz, Sardinal y Palmira. En términos generales, los acuíferos más importantes en la zona de estudio son: Liberia-Bagaces, Tempisque y parte de El Coco, Basilito y Juntas. No es casualidad que las concesiones que pertenecen al AyA se agrupen cerca de poblados, justamente porque su propósito es abastecer la demanda doméstica.

En la figura 16.c se especifica el volumen concesionado de los expedientes tipo acueducto rural (R). Los volúmenes concesionados se distinguen por símbolos graduados, así como colores distintos para facilitar su interpretación. Del total de concesiones, 131 (41,2%) tienen un caudal entre los 0,15- 47 l/s, cuatro (1,23%) un caudal entre 155 - 188,8 l/s y dos con un caudal de 220 l/s; la otra mitad (57,5%) registra un caudal de cero. Las concesiones que tienen un caudal registro de cero se abastecen tanto de acuífero como aguas superficiales, pero se incluyen en la figura 16.a y c, justamente porque son la mitad de los expedientes R. Llama la atención que todas esas concesiones con un caudal registrado de cero estén vigentes, lo cual hace pensar que existe la posibilidad de extraer agua sin medida alguna, sobre todo porque no se especifica una fecha de caducidad para la concesión.

Figura 16: Agua para consumo doméstico en el área de estudio, 1993- 2017, A) Concesiones tipo Acueducto Rural B) Concesiones tipo Agua Superficial C) Caudales concesionados bajo la categoría de Acueducto Rural D) Caudales concesionados bajo la categoría de Agua Superficial.



Fuente de datos: Dirección de Aguas, MINAE y SNIT, Proyección CRTM05, Datum WGS84.

Las concesiones pertenecientes al tipo de expediente acueducto rural, se abastecen en su mayoría de acuíferos, seguido de los ríos. Un total de 1412,2 l/s provienen de acuíferos, 631 l/s de ríos y 192,1 l/s de nacimientos; estas últimas dos fuentes suman a 823 l/s de fuentes

superficiales administradas por el AyA. Excluyendo los acuíferos, los 823 l/s se distribuyen por subcuenca y fuente como se observa en la Cuadro 9. En la subcuenca 1, la cabecera del Tempisque, hay un total de 24 l/s concesionados todos provenientes de nacimientos. En la subcuenca 2, cabecera del Bebedero, hay un total de 106 l/s concesionados, 76 l/s provienen de nacimientos y 30 l/s de ríos. En la subcuenca 3, parte media y baja del Bebedero, 87,8 l/s provienen de nacimientos y 6 l/s de ríos. En la subcuenca 4, parte media y baja del Tempisque, se concentra la mayor cantidad de agua concesionada al AyA, con un total de 599,3 l/s, repartidos en 440 l/s provenientes de ríos y 159,3 l/s de nacimientos.

Cuadro 9: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y por subcuenca, para las concesiones con expediente tipo “Acueducto rural”, 1993-2017.

Número de subcuenca	Caudal (l/s)			
	1	2	3	4
Nacimiento	24	76	87,83	159,3
Quebrada	0	0	0	0
Río	0	30	6	440
TOTAL	24	106	93,83	599,3

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Las concesiones tipo A (aguas superficiales) utilizadas para abastecer el consumo humano, se distribuyen en la parte alta del área de estudio se ubican las nacientes, seguido de las quebradas y ríos (figura 15.b). Todas las concesiones de fuentes superficiales tienen expedientes asignados a personas o empresas y en todos los casos una concesión se destina a más de un uso (entre de los que destaca el agropecuario, riego y turismo) siendo el consumo humano la porción más pequeña del total del volumen concesionado por punto. En los expedientes tipo A, predominan las nacientes como suministro para consumo humano, posiblemente porque presentan la ventaja de que se pueden entubar desde la fuente y se podría prescindir de sistemas para la potabilización.

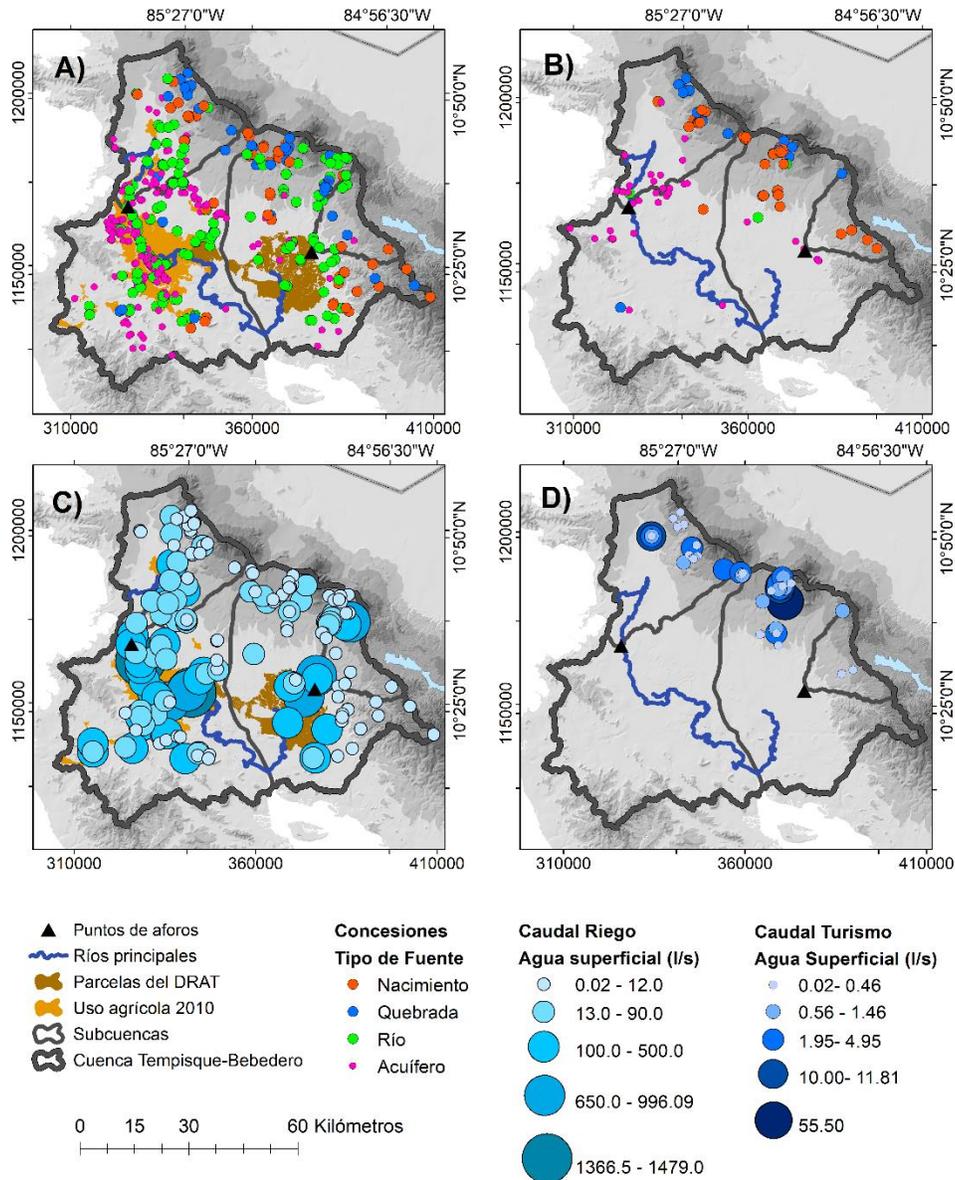
El agua superficial para consumo humano (expedientes tipo A) suma un total de 8,64 l/s y 106 concesiones. Del total, noventa (84,9%) tienen un caudal concesionado menor a 0,1 l/s, cinco (4,7%) son de 0,1 l/s, siete (6,6%) están en el rango entre 0,14 y 0,35 l/s, dos (1,8%) entre 0,67 y 0,70 l/s y otras dos (1,8%) con 1,16 y 1,25 l/s siendo las más altas. Esto quiere decir que predominan las concesiones de poco caudal repartidas entre varios usuarios. En la siguiente Cuadro 10 se detallan los volúmenes agregados de las concesiones para uso doméstico, según el tipo de fuente y subcuenca, de los expedientes tipo A. En este caso, las nacientes son las fuentes más importantes para abastecer el consumo doméstico, en particular en las subcuencas 1 (cabecera del Tempisque) y subcuenca 3 (área media y baja de la cuenca del Bebedero). El agua concesionada para consumo doméstico en la cuenca del Tempisque es de 2,62 l/s y en la cuenca del Bebedero es tres veces más con 6,02 l/s.

Cuadro 10: Caudales para consumo humano según fuente y por subcuenca, para los expedientes tipo “Agua superficial”, 1993-2017.

Número de subcuenca	Caudal (l/s)			
	1	2	3	4
Nacimiento	1,21	0,55	4,13	0,44
Quebrada	0,87	0,07	0,88	0
Río	0,08	0,35	0,04	0,2
TOTAL	2,16	0,97	5,05	0,46

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Figura 17: Agua para consumo agrícola y turístico en el área de estudio, 1993- 2017, A) Concesiones para uso agrícola B) Concesiones para uso turístico C) Caudales de agua superficial concesionados para uso agrícola D) Caudales de agua superficial concesionados para uso turístico.



Fuente de datos: Dirección de Aguas, MINAE y SNIT, Proyección CRTM05, Datum WGS84.

Sobre el uso del agua para el sector turismo, como se observa en la figura 16.b. las concesiones turísticas utilizan agua que proviene tanto de fuentes subterráneas como superficiales. Las fuentes superficiales se ubican sobre todo en las partes altas del área de estudio y las

subterráneas en las partes planas cerca de los poblados de Liberia, Sardinal y Palmira. En la figura 16.d se muestran los volúmenes por concesión, pero únicamente para aquellas que tienen fuentes superficiales, ya que como se mencionó anteriormente esta investigación se enfoca en la disponibilidad de agua superficial.

Las concesiones para uso turístico que se abastecen de fuentes superficiales son en total 58, suman un caudal de 133,3 l/s y se ubican en la parte alta del área de estudio (figura 17.b). La concesión con mayor caudal otorgado es de 55,5 l/s, se ubica en La Fortuna y proviene del río Peje; esta misma concesión también destina 24,5 l/s para actividades agropecuarias. Tres concesiones (5,1%) tienen un caudal de entre 10 – 11,81 l/s y todas toman el agua de nacimientos; una de las concesiones indica que es termal y se ubica también en La Fortuna. En el rango de 1,95 a 4,95 l/s hay once concesiones (19%) y en el rango entre 0,56 a 1,46 l/s hay doce concesiones que representan el 20,7%. Mientras que 31 concesiones, el 53,4%, tienen aprobados entre 0,02 y 0,46 l/s. De modo que solo cuatro concesiones tienen más de 11,81 l/s concesionados, de estas una está muy por encima con 55,5 l/s concesionados, el resto de las concesiones llega a un máximo de 5 l/s.

La fuente más importante para abastecer el uso turístico son los ríos (cuadro 11), pero este valor corresponde a una sola concesión. Esta concesión de 55,5 l/s, es la única de las turísticas, que toma el agua de un río y se ubica en la subcuenca 3. La segunda fuente en importancia son las nacientes, sobre todo en la subcuenca 1 (cabecera del Tempisque) y en la subcuenca 3 (área media y baja de la cuenca del Bebedero). En la subcuenca 3 el agua se utiliza para abastecer la zona de La Fortuna, que es un conocido pueblo turístico ubicado en la parte alta de la cuenca del Bebedero y zona de influencia del Parque Nacional Arenal. En la subcuenca 1 el agua se utiliza para desarrollos turísticos pequeños en las cercanías de Cañas Dulces y hacia el NNE de Mayorga, zona de influencia del Parque Nacional Rincón de la Vieja. En total, en la cuenca del Tempisque 32,96 l/s de agua superficial se destinan a satisfacer la demanda turística y en la cuenca del Bebedero son 100,34 l/s.

Cuadro 11: Caudales concesionados para consumo turístico según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017.

Número de subcuenca	Caudal (l/s)			
	1	2	3	4
Nacimiento	24,27	0,57	36,01	3,3
Quebrada	5,39	0	8,26	0
Río	0	0	55,5	0
TOTAL	29,66	0,57	99,77	3,3

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Por otra parte, las concesiones cuyo caudal se dedica al riego proviene de fuentes superficiales como subterráneas. De las 343 concesiones en el área de estudio destinadas a este uso, 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales y otras 157 (45,7%) se abastecen de aguas subterráneas. En la cuenca del Tempisque existen los dos tipos de fuentes mientras que en la del Bebedero predominan las fuentes superficiales, en esta cuenca en particular, la mayoría del agua para riego proviene de los canales del DRAT. Las concesiones que se observan en la figura 2.a abastecen áreas agrícolas pequeñas que no son parte del DRAT. En la figura 2.a se observa la distribución de las concesiones para riego según la Dirección de Aguas, los colores diferencian los tipos de fuente. Se contabiliza un total de 18422,36 l/s y 343 concesiones, de esas 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales y 157 (45,7%) de aguas subterráneas, estas últimas concentradas en la parte baja de la cuenca del Tempisque. Los propietarios de concesiones de agua subterránea para riego, tiene la posibilidad de tener acceso a agua durante la época seca o en periodos de sequía, cuando el agua superficial escasea.

En las figuras 2.c se distingue, gracias a símbolos graduados y con distintos colores, los volúmenes de agua superficial concesionados para riego. Las concesiones con mayor caudal se encuentran en un rango entre 1365,5 l/s y 1479 l/s, representan el 1,1% del total, se ubican en la cuenca del río Tempisque y extraen el agua directamente de este río. Seguidamente, con un rango de caudal concesionado entre 650 – 996 l/s hay 6 concesiones (3,2%). Estas 6 suman a un total de 7580,5 l/s y toman el agua de tres ríos: tres del río Tempisque (2400 l/s); dos

del río Corobicí (1686 l/s); y una del Tenorio por 650 l/s. En el rango entre 100 y 500 l/s hay 31 concesiones (16,8 %) de estas 24 se ubican en la cuenca del Tempisque, 6 en la cuenca del Bebedero. Cincuenta concesiones (27 %) tienen permiso de extraer entre 13 y 90 l/s y, 94 concesiones (50,8%) extraen entre 0,02 y 12 l/s. Del total de concesiones para riego 78% tienen permiso de extraer entre 0,02 y 90 l/s, 21% entre 100-996 l/s y un 1% entre 1365,5 l/s- 1479 l/s.

Cuadro 12: Caudales concesionados para riego según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017.

Número de subcuenca	Caudal (l/s)			
	1	2	3	4
Nacimiento	8,98	3,29	15,53	12,93
Quebrada	199,74	4,38	211,96	101
Río	1890,53	2.202,93	3.035,38	10.735,91
TOTAL	2.099,25	2.210,6	3.262,87	10.849,84

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La parte media y baja de la cuenca del Tempisque (subcuenca 4), es el área con más agua concesionada para riego (Cuadro 12). Con respecto a la subcuenca 3, que es la segunda con más agua concesionada para riego, en la subcuenca 4 se destinan 3,3 veces más agua. En la toda la cuenca del río Tempisque hay concesionados 12.949,09 l/s para riego y en la cuenca del Bebedero 5. 473,47 l/s, 2,4 veces menos que en el Tempisque. Tal como queda claro en la Cuadro 5 la mayoría del caudal concesionado para riego proviene directamente de los ríos, seguido de las quebradas y nacimientos.

5.3. Caudal remanente después de la extracción motivo de las concesiones.

Seguidamente se estima el efecto de las concesiones abastecidas por fuentes superficiales, podrían tener en la disponibilidad de agua. En el cuadro 13 se resume el total del agua superficial concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca. En caso de los expedientes tipo A se incluyen todos los tipos usos y en el caso de los expedientes tipo R, los caudales indicados corresponden únicamente al uso doméstico. La subcuenca con más extracciones es la 4 ya que

en ambos tipos de expedientes es la cuenca con más caudal concedido. Como se observa en la Cuadro XX, las cuencas altas, tanto la subcuenca 1 como la 2 tienen un caudal concesionado total entre 2 mil y 2500 l/s. La subcuenca 3, la parte media y baja del río Bebedero, tiene concesionado el doble de caudal, unos 4826,44 l/s. Mientras que la subcuenca 4 está siete veces más concesionada que las cuencas altas, con un total de 15.158,14 l/s.

Cuadro 13: agua superficial concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca.

Agua superficial	Tempisque		Bebedero		Total
	Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 1	Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 4	Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 2	Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 3	Caudal concesionado (l/s)
Expedientes tipo A	2.144,38	14.558,84	2.445,00	4.732,61	2.880,83
Expedientes tipo R	24,00	599,30	106,00	93,83	823,13
Total	2.168,38	15.158,14	2.551,00	4.826,44	24.703,96

Fuente: Elaboración propia, 2019.

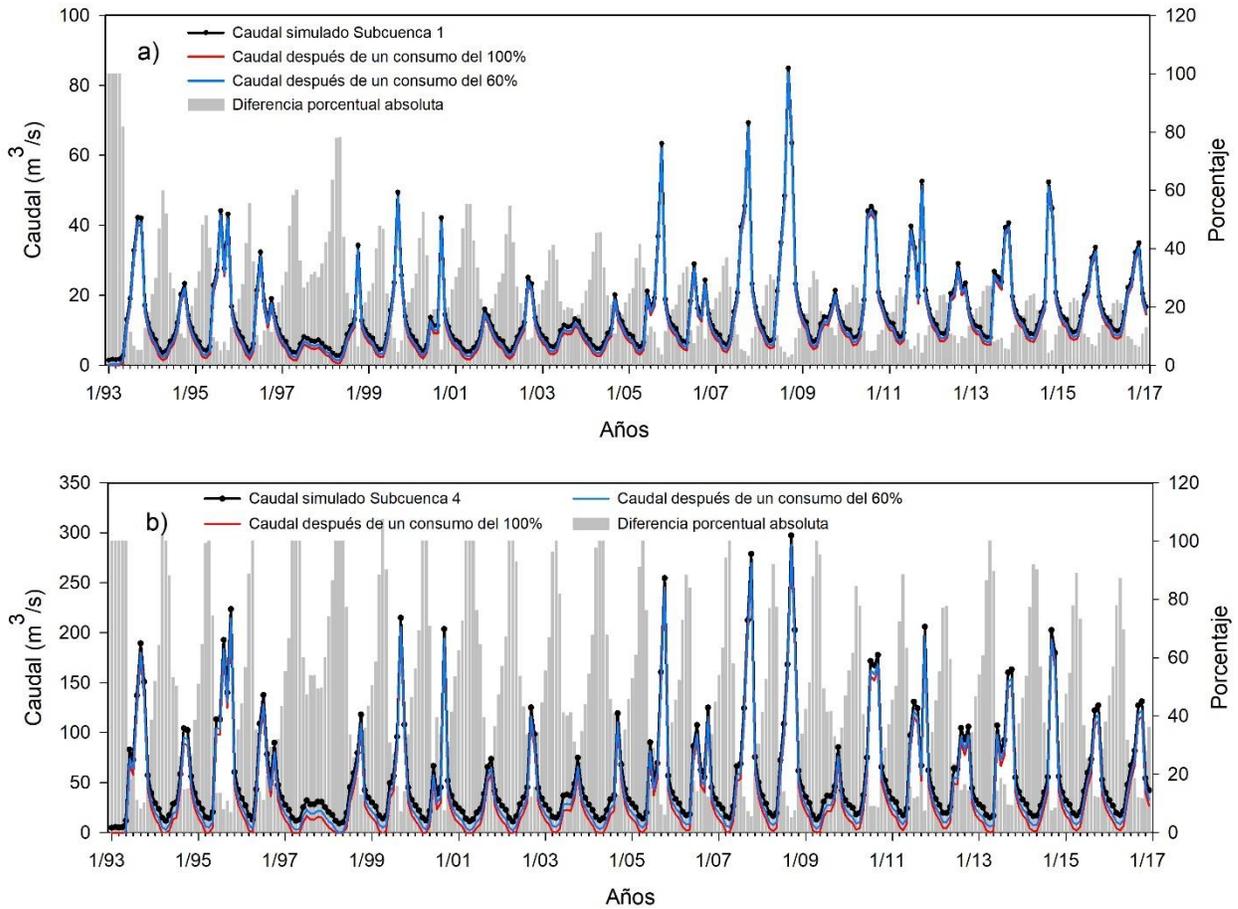
Se toma como base el caudal simulado y se le resta el volumen concesionado asumiendo varios escenarios. Los escenarios consisten en asumir diferentes porcentajes de consumo del caudal concesionado, como un 100%, 80%, 60%, 40% o 20%. En las siguientes figuras, para cada subcuenca, se graficó el caudal simulado, el caudal después de un consumo del 100%, el caudal después de un consumo del 60% y la diferencia porcentual entre el caudal simulado y el caudal después de un consumo del 100%. El motivo por el cual se decide enfocar el análisis en un escenario de consumo del 100%, aunque sea poco realista, es porque de esta forma nos apegamos al registro de caudales concesiones. Por otro lado, el escenario de consumo del 60% representa un punto intermedio, alejado de los extremos, representando un escenario de consumo moderado.

En el Tempisque la posibilidad de que el río se seca consecuencia de las concesiones es más alta en la subcuenca 4 que en la subcuenca 1. Asumiendo un consumo del 100%, en la subcuenca 1, en los primeros 4 meses del año 1993 el río se habría secado (ver figura 18.a), la diferencia porcentual es del 100%, lo que indica que el río se seca. El río se seca solo en ese

momento y no en otros ya que al inicio de la serie los caudales son muy bajos consecuencia de la inexactitud propia de todo modelo hidrológico. En esta misma cuenca los meses más críticos habrían sido entre marzo y mayo del año 1997 y 1998 donde el río se habría secado por 3 meses. Esto es producto de una disponibilidad de agua reducida resultado de la sequía de 1997-1998, periodo en que las lluvias disminuyeron. En el periodo entre 1993 y 2004, cada año, en los meses entre marzo, abril y mayo se registran disminuciones de entre -40% y -60%, lo que ejemplifica que durante esos meses hay más posibilidad de que las concesiones tengan un efecto negativo en la disponibilidad de agua en el río. Del 2005 hasta el 2016, la disminución entre el caudal simulado y el caudal después de las extracciones disminuyen, resultado de una leve tendencia positiva en el caudal simulado a partir del 2005 que compensa por las extracciones, sin embargo, marzo, abril y mayo se mantienen como los meses con registros de caudal más bajo.

La disponibilidad del agua en la subcuenca 4 es mucho más que en la 1, con un máximo de 297 m³/s frente a 85 m³/s en la 1, no obstante, debido a que el caudal concesionado es significativamente mayor en la subcuenca 4 el caudal puede verse seriamente reducido por las concesiones. Por ejemplo, durante el primer semestre del año 1993 entre enero y junio (ver figura 18.b) el caudal concesionado supera la disponibilidad, resultando en valores de déficit del 100% lo que indica que el río se seca. Al igual que en la parte alta de la cuenca, a lo largo del periodo entre 1993 y el 2016 en los meses de marzo, abril y mayo las extracciones tienen el potencial de disminuir considerablemente el caudal natural, ya sea que se asuma un consumo del 100% como de un 60%. El peor escenario es asumir un consumo del 100%, donde en los meses mencionados, según una resta simple, el río se seca o el caudal es menor a 2 m³/s. Bajo ese escenario, entre 1993-2000, en el mes de abril el río se seca, del año 2000 en adelante la disminución en el caudal se mantiene, aunque no se llega a secar.

Figura 18: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Tempisque.

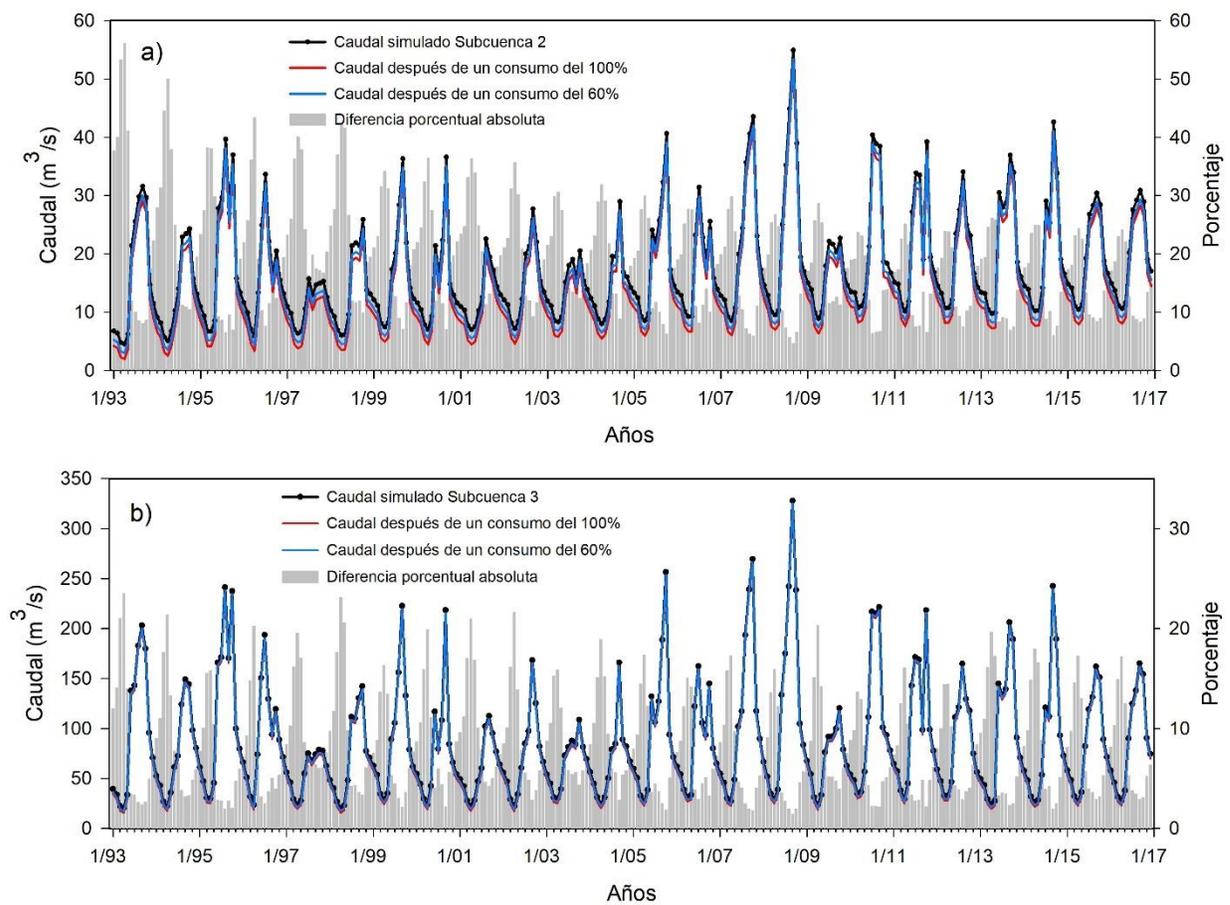


Fuente: Elaboración propia, 2019.

En el caso de la cuenca del río Bebedero el caudal concesionado no tiene un efecto significativo en la disponibilidad de agua. Como se observa en la figura 18.a, en la subcuenca 2, la diferencia porcentual entre el caudal simulado y el que quedaría después de un consumo del 100% llega a un máximo de -53% en el mes de abril de 1993. Así como en la cuenca del Tempisque, en los primeros meses de 1993 WEAP genera simulaciones bajas producto de las inexactitudes propias de cualquier modelo. A pesar de esto, en ningún momento, en toda la cuenca del río Bebedero (ver figura 19.a y b), existe la posibilidad de que el río se seque cuando al sumir que el caudal concesionado se consume en un 100%. En la subcuenca 3 la diferencia entre el caudal simulado y el caudal remanente después de una extracción del 100% es mínima, con una disminución

porcentual máxima de -23%. Esta parte de la cuenca del Bebedero tiene el doble de agua concesionada con respecto a la parte alta y a pesar de eso el caudal no varía significativamente a cauda de las concesiones en la subcuenca 4. Lo anterior se debe a que la subcuenca 3 genera más agua que la subcuenca 4, con mínimos más altos, y además el agua concesionada en la subcuenca 3 es tres veces menos que en la 4.

Figura 19: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Bebedero.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la investigación de Guzmán-Arias (2013) se determina que la cuenca alta del río Tempisque la posibilidad de que la disponibilidad de agua sea insuficiente para satisfacer las demandas es alta. En esa investigación se contabilizó un total concesionado de $12 m^3/s$ al 2008, caudal que, según sus datos, supera la disponibilidad en los meses de marzo ($10,5 m^3/s$) o abril ($8,9 m^3/s$)

al asumir que se extrae el total de los valores concesionados. Además, señala que en caso de implementarse un caudal ambiental existe la posibilidad de generar conflictos con los concesionarios ya que tendrían que disminuir la cuota que se les permite extraer.

En nuestro caso, para la subcuenca 1 se contabilizó un caudal concesionado total de $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en base a información de la Dirección de Aguas actualizada al 2017. Puede que la diferencia de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ entre lo contabilizado en esta investigación y lo contabilizado por Guzmán-Arias (2013) se deba al acceso y disposición de los datos, ya que en su caso la información no se limita a la base de datos de la Dirección de Aguas, sino que se complementa con visitas a otras instituciones clave. Por otro lado, en el tema de agua disponible ella estima una disponibilidad de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo y de $8,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en abril, lo que también difiere con nuestros resultados ya que en promedio para esos meses nuestro caudal simulado en la subcuenca 1 es de $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en marzo y de $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en abril. Aquí el factor que marca la diferencia es que en el trabajo de Guzmán-Arias el caudal modelado es para el periodo entre 1951-1969 con datos de precipitación esa fecha, así como caudales de ese entonces para la calibración. Ella argumenta que el motivo por el que eligió utilizar esos datos es que es el periodo que mejor representa lo que sería el caudal natural. En promedio, la diferencia entre sus resultados de caudal y los de esta investigación es de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, habría que ahondar con mayor profundidad para saber si los resultados son comparables.

A pesar de las diferencias de resultados encontramos puntos de conciencia. A diferencia de los resultados de Guzmán-Arias (2013) en esta investigación no se encontró que para la cuenca alta del Tempisque hubiera una sobre concesión, aunque sí lo determinamos para la subcuenca 2, la parte media y baja del Tempisque. Donde encontramos similitudes, es que en ambos casos se tuvo que asumir que el caudal concesionado en los expedientes equivale a la extracción real, cuando en realidad la extracción real no es la que se registra en los permisos. Cuando los datos son deficientes, poco confiables o peor aún no reflejan la realidad, los resultados de los ejercicios de análisis siempre dependerán del manejo que se les dé a los datos, lo que imposibilita que la información de una investigación pueda compararse con otra. Para revertir esto es necesario mejorar los sistemas de monitoreo, en este caso en particular y monitoreo de cuánta agua se

extrae de las fuentes de agua superficial, para lo que se requeriría instalar medidores en las tomas de las concesiones.

En este capítulo se describió la ubicación, fuente y caudales otorgados en los registros de concesiones. Se realizaron observaciones sobre estos aspectos más no se realizó un detallado escrutinio del manejo o asignación de las concesiones. Así mismo se realizó un ejercicio de resta simple entre el caudal simulado y el concesionado a modo de explorar el efecto que las concesiones tienen en la disponibilidad de agua superficial. En este sentido en la parte media y baja de la cuenca del Tempisque, si el consumo de agua fuera el concesionado, las demandas podrían reducir significativamente el caudal del río.

En el siguiente capítulo se aproximan las demandas según el formato de datos de WEAP con base a la información de concesiones, así como del consumo de agua por cultivo. También se comenta sobre la sustentabilidad hídrica en las cuencas Tempisque y Bebedero a la luz de los resultados de los dos capítulos anteriores y los resultados de otros informes.

VI. Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios hipotéticos incorporados en el programa WEAP.

En el capítulo anterior se concluye que realizando una resta simple y asumiendo un consumo del 100% del caudal concesionado la parte media y baja del Tempisque está sobre concesionada. En este capítulo seis, se realiza una aproximación de la demanda para el sector doméstico, turístico y agrícola basado en el consumo promedio de las personas y los cultivos. Esa información se agrega a WEAP y se calcula si la disponibilidad de agua es suficiente para abastecer todas las demandas. Se concluye que en la cuenca media y baja del Tempisque la demanda del sector agrícola puede superar la disponibilidad. Mientras que en la parte media y baja del Bebedero existe un excedente de agua motivo del trasvase proveniente del proyecto ARCOSA. Luego se discute la sustentabilidad hídrica general de las cuencas Tempisque y Bebedero al contrastar nuestros resultados e información con las disposiciones sobre la sustentabilidad hídrica en el país emitidas por la Contraloría General de la República en el 2014.

6.1. Demandas de agua para el sector doméstico y turístico y su efecto en la disponibilidad.

En este capítulo se revisa el efecto de la demanda desde el punto de vista de las necesidades de abastecimiento por sector. En el caso de la demanda doméstica y turística, a pesar de que el agua proviene en su mayoría de fuentes subterráneas como se discutió en el capítulo anterior, nos enfocamos solo en las tomas superficiales. La demanda por sector se calcula aproximando la necesidad de agua por unidad de consumo, por ejemplo, en el caso de la demanda doméstica se refiere a las personas. También se es necesario conocer el consumo promedio por persona o en el caso de sector agrícola el consumo promedio por cultivo. En este capítulo primero discutiremos los resultados de incluir la demanda doméstica y turística en WEAP y por último los resultados de incluir la demanda agrícola y sus efectos en el caudal.

No obtuvimos información de cuántas personas se abastecen de cada tipo de fuente, información que es necesaria para incluir las demandas en WEAP, de modo que el dato de personas abastecidas se aproximó. Según los valores publicados por la gaceta, se asumió que el consumo por persona es de 200 litros de agua al día y que en caso de los turistas el consumo es de 350 litros al día (Instituto Meteorológico Nacional, 2004). Luego se tomó el caudal concesionado por

subcuenca derivado por el consumo por persona, con lo que se obtuvo el aproximado de personas abastecidas como se observa en el cuadro 14.

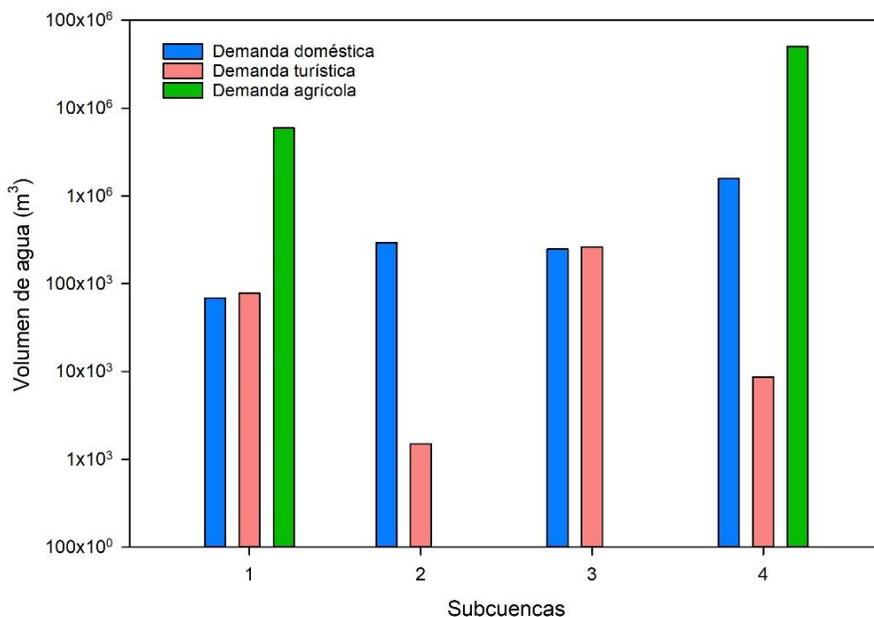
Cuadro 14: Personas abastecidas en un año, por subcuenca, 1993-2017.

Número de subcuenca	Personas en un año				
	1	2	3	4	Total
Consumo humano	11.301	47.974	40.733	259.317	359.547
Turismo	7.322	141	24.629	815	32.983
Total	18.623	48.114	65.362	260.131	392.531

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En toda el área de estudio, se abastece aproximadamente a 292 mil personas con agua de fuentes superficiales, de esas, 359.547 mil personas usan el agua para fines domésticos y 32.983 son turistas. Del total de personas abastecidas para consumo doméstico la mayoría se ubica en la subcuenca 4 un 72%. En el caso de la demanda turística la mayoría se ubica en la subcuenca 3 con un 75% que corresponde a las concesiones ubicadas en La Fortuna San Carlos.

Figura 20: Volumen de la demanda para el sectores doméstico, turístico y agrícola.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 20 se detalla el volumen (m^3) promedio de demanda para cada sector, la demanda se refiere al volumen necesario para satisfacer las necesidades. La demanda está directamente relacionada a la unidad de consumo, en el caso de la demanda doméstica y turística a las personas, y en el caso de la agricultura al área cultivada por cultivo. En la subcuenca 4 se donde se ubica la mayor demanda agrícola y doméstica, en promedio por mes se requieren aproximadamente 1,5 millones de m^3 para abastecer la demanda doméstica y 50,2 millones de m^3 para abastecer la demanda agrícola; la demanda turística es de 8 mil de m^3 . En la subcuenca 1, la demanda promedio por mes es de 68, mil m^3 para el sector doméstico, 77,9 mil m^3 para el sector turismo y 5,9 millones de m^3 para el sector agrícola.

Cuadro 15: Caudal de requerimiento promedio mensual para los sectores doméstico, turístico y agrícola.

Número de subcuenca	1	2	3	4	Total
Caudal de requerimiento doméstico (m ³ /s)	0,03	0,12	0,10	0,67	0,92
Caudal de requerimiento turístico (m ³ /s)	0,03	0,001	0,11	0,004	0,15
Caudal de requerimiento agrícola (m ³ /s)	2,51			21,22	23,74

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Se concluye que la demanda doméstica y turística no representan una amenaza a la disponibilidad de agua. En el cuadro 15 se especifican los caudales de requerimiento por sector para cada subcuenca, esto quiere decir que los valores incluyen un 10% de pérdida en los sistemas de abastecimiento y aun contabilizando este valor de pérdida adicional, el requerimiento es muy bajo en comparación a la disponibilidad. Tampoco habría problema si la población aumenta, el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC 2012) estima que la tasa anual de crecimiento por cada 100 habitantes se mantendrá hasta el 2025 en 1,5%. Si asumiéramos que más personas se abastecen de fuentes superficiales, el crecimiento es tan poco que no representa una amenaza para la disponibilidad. Mientras que la demanda agrícola sí tiene el potencial de disminuir considerablemente la disponibilidad en la subcuenca 4, inclusive secar el río según el análisis realizado.

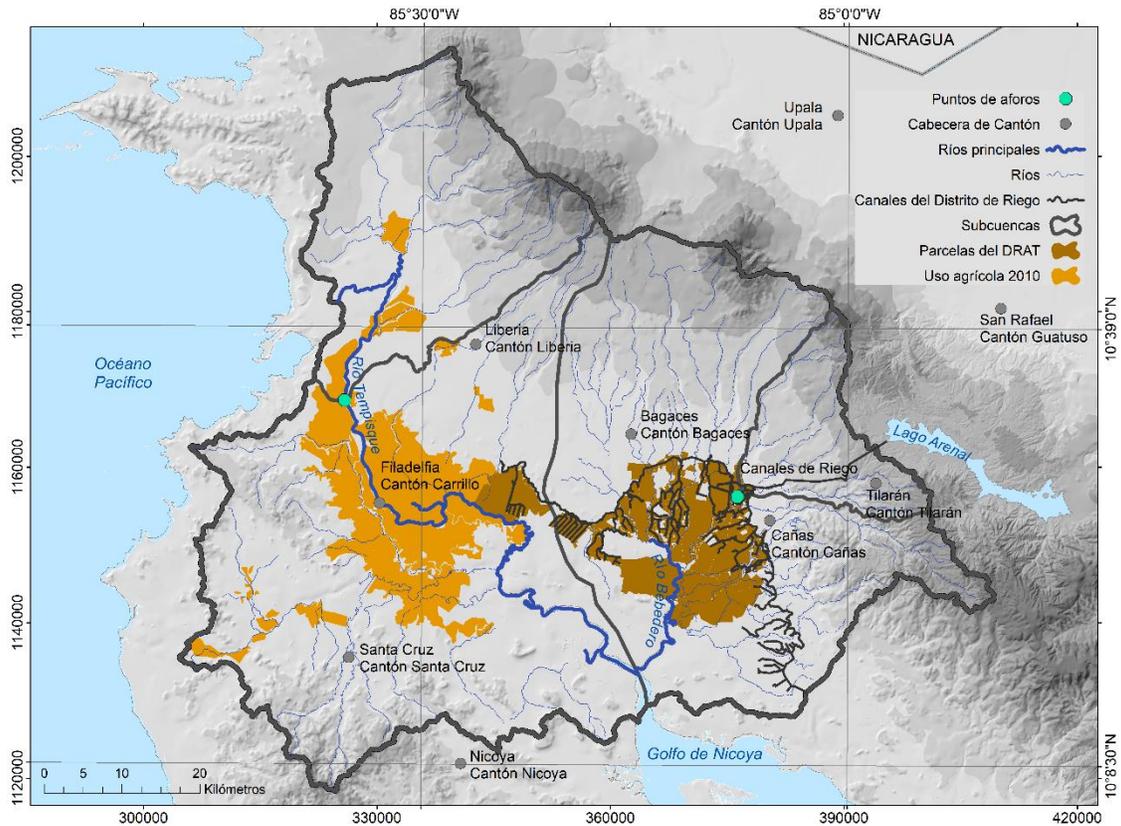
6.2. Demanda agrícola y su efecto en la disponibilidad

El sector doméstico y turístico no tienen el potencial de afectar significativamente la disponibilidad de agua superficial el sector agrícola sí lo tiene. Como se observa en la última columna del cuadro 15, en la cuenca del Tempisque el caudal de requerimiento para el sector agrícola es del 23,74 m³/s y la demanda es de 19 m³/s. El otro aspecto que resalta en el cuadro 15 es que no hay información para las subcuencas 3 y 4 que en conjunto representan la cuenca del río Bebedero. El motivo es que la gran mayoría del área agrícola en esa cuenca se abastece de los canales de riego, parte del Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT), proyecto que a su vez se abastece

del agua sobrante del complejo ARCOSA y que es el medio para trasvasar agua de la vertiente Caribe. Por lo tanto, si bien existen similitudes en los cultivos que se producen, el tipo y periodo de los datos varía, motivo por el que cada cuenca se trabajó por separado.

En la figura 21 se observan las áreas agrícolas de la cuenca del Tempisque y la del Bebedero con colores distintos, la diferenciación de color tiene el propósito de resaltar la diferencia en la fuente de datos. La mancha café es el área agrícola del Bebedero con 33.405 hectáreas y conforma el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT), proyecto administrado por el SENARA. El área agrícola de la cuenca del Tempisque (polígono naranja) es de 62.733 hectáreas, el doble que la del Bebedero, y se obtuvo a partir de una reclasificación de información suministrada por la Escuela de Geografía. Considerando que la cuenca del Bebedero cuenta con el DRAT, aportando agua adicional a la naturalmente disponible. Llama la atención que el área agrícola en la cuenca del Tempisque sea el doble que en la del Bebedero, considerando que las condiciones que facilita el DRAT posibilitan más posibilidades de mitigar y adaptarse a la época seca y en particular a los efectos del Niño (ENOS).

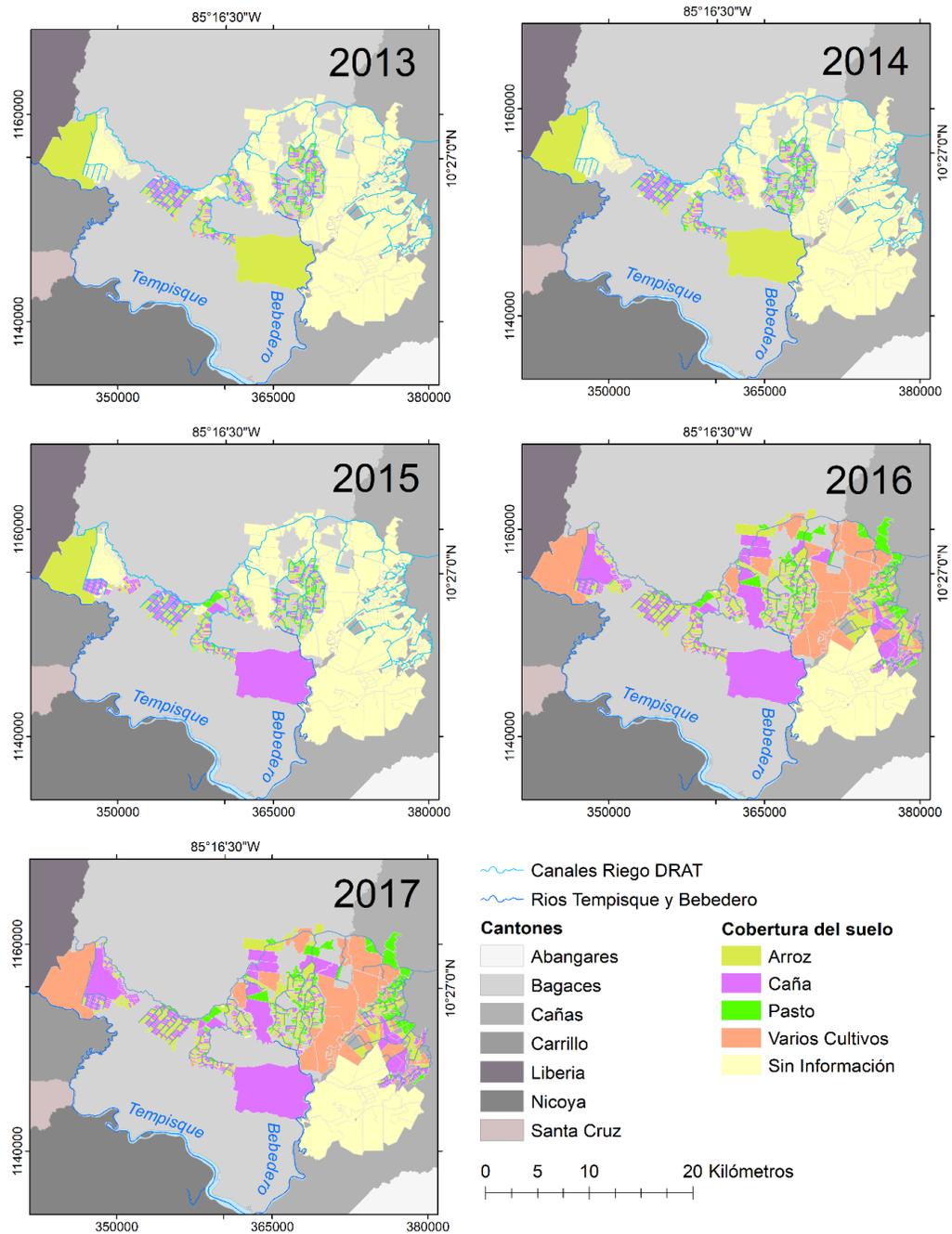
Figura 21: Tipo de cobertura para las cuencas del Tempisque y Bebedero.



Fuente de datos: SENARA, Escuela de Geografía, SNIT, Proyección CRTM05, Datum WGS84.

Conocer el área agrícola total no es suficiente, se requiere conocer las áreas cultivadas según cultivo para estimar la demanda. En el caso del área agrícola en la cuenca del Tempisque, las diferencias según cultivo son un aproximado inferido a partir de los nombres de las concesiones dentro del área agrícola. Mientras que en la cuenca del Bebedero se cuenta con detalles por cultivo ya que la información fue suministrada por SENARA. En este caso, el área de cultivo se ubica en la subcuenca 3 entre los cantones de Bagaces y Cañas, con un total de 33.405,4 hectáreas correspondiente a 954 parcelas de cuales 37 carecen información de cobertura. En la figura 22 se detalla el tipo de cobertura para el segundo semestre de cada año entre el 2013 y el 2016 y en el caso del 2017, la información corresponde al primer semestre.

Figura 22: Cobertura de la tierra por tipo de cultivo, DRAT, II semestre, 2013-2016.



Fuente de datos: SENARA, SNIT, Proyección CRTM05, Datum WGS84.

A lo largo del tiempo, aparte de haber una mejoría en la cobertura espacial de la información, no se detectan cambios significativos en el tipo de cultivo. Entre el II semestre del 2013 y 2014 no se detectan cambios. La parcela ubicada en el centro del área agrícola, que colinda al este con el río Bebedero (área de 3.285 ha) cambia de cultivar arroz a caña entre el I semestre del 2014 y II semestre del 2015. Entre el 2015 y el 2016, SENARA completó información donde antes no la había, demostrando un cambio de cobertura de la finca ubicada al extremo oeste (área de 2.317 ha), que pasó de cultivar arroz a la categoría “varios cultivos”. En este caso la parcela se dedicó al cultivo del arroz desde el 2007 hasta el II semestre del 2015, en el I semestre del 2016 pasó a cultivar arroz y caña, en el II semestre de ese año se registra arroz y pasto al igual que en el I semestre del 2017. El último cambio ocurre en el segundo semestre del 2016 donde la información de cobertura es más completa que en años anteriores, y entre el 2016 y el 2017 no hay cambios significativos de cultivo.

Cuadro 16: Área agrícola en hectáreas, según cultivo, en las cuencas Tempisque y Bebedero.

Número de subcuenca	1	3	4	Total
Arroz	0	4.984,99	13.342,47	18327,46
Caña	0	8.765,1	29.032,49	37797,59
Melón	1.933,01	0	0	1933,01
Pasto	0	2.454,08	0	2454,08
Varios cultivos	0	9.402,58	0	9402,58
Sin determinar	7.183,11	0	16.693,52	18425,12
Sin información	0	7.798,72	0	7798,72
Total	9.116,12	33.405,47	59.068,48	

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En el cuadro 16 se detalla el área agrícola según cultivo que se utilizó en WEAP, la información del Tempisque es del año 2010 y la del Bebedero del 2016. Según las fuentes de información disponibles, en la cuenca del Tempisque hay 62.733 ha, de las cuales poco más de 9 mil se

ubican en la subcuenca 1 y las otras 59 mil en la subcuenca 4. En la subcuenca 1 solo se pudo identificar el cultivo de melón, mientras que en la subcuenca 4 se identificó el cultivo de arroz y la caña, como el cultivo dominante. Para las 18.425,12 ha a las que no se les identificó un cultivo, el consumo de agua se estimó como el promedio entre melón, caña y pasto, excluyendo el arroz para no incluir un valor extremo. En cambio, en la cuenca del Bebedero el tipo de cobertura que predomina es la categoría “varios cultivos” (9.403 ha), seguido de la caña (8.765 ha), el arroz (4.985 ha), el pasto (2.454 ha) y 7798 ha que carecen de información. Cabe resaltar que a pesar de que el área con la cobertura “varios cultivos” es la más extensa, se distribuye en 70. Por otro lado, las 8.765 ha de caña se reparten en 259 parcelas y las 4.985 ha de arroz en 429, esto último indicando que el arroz se cultiva en áreas de menor extensión en comparación a los demás cultivos.

La demanda agrícola se estimó multiplicando el área cultivada por el consumo de agua por cultivo y luego se estimó su efecto en el caudal. En ambas cuencas se asumió que el consumo por cultivo fue el mismo para todo el periodo de estudio y que el área cultivada por cultivo no varía en el tiempo. El análisis sobre el efecto de la demanda agrícola en los ríos cubrió el periodo entre 1993 y el 2016 para el Tempisque y entre el 2013 y 2016 para el Bebedero. Esto último porque la demanda agrícola en el Bebedero se abastece del agua de los canales de riego y lamentablemente solo se obtuvo mediciones de caudal en los canales para ese lapso.

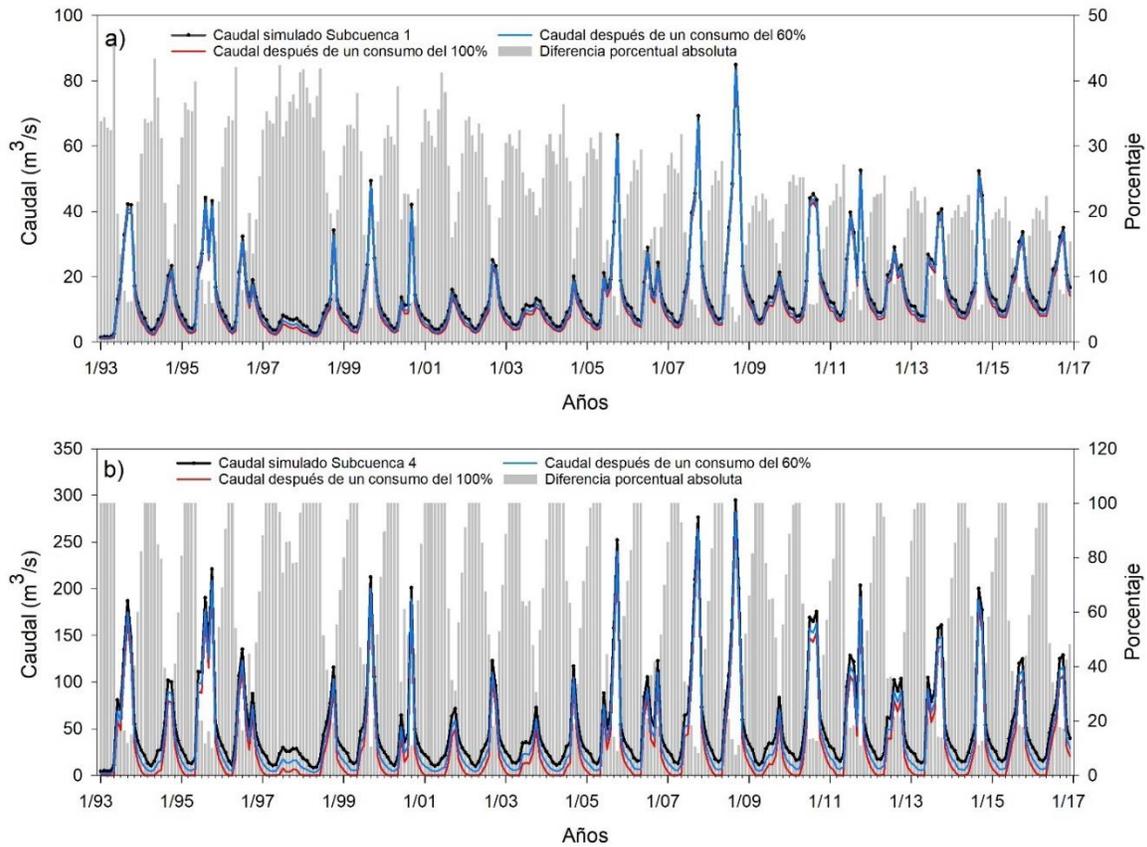
La demanda en la subcuenca 4 es ocho veces superior que en la subcuenca 1. Considerando un 10% de aumento en la cantidad de agua superficial desviada, que representa las pérdidas en el sistema de distribución, en la subcuenca 1 en promedio se necesita $2.26 \text{ m}^3/\text{s}$ para abastecer la demanda agrícola, mientras que en la subcuenca 4 se necesitan en promedio $19.1 \text{ m}^3/\text{s}$. En la figura 23 se demuestra el efecto de la demanda doméstica, turística y agrícola en el caudal. La demanda doméstica, turística no afectan la disponibilidad, o sea hay suficiente agua para abastecer la demanda, no es el caso de la demanda agrícola, que sí tiene el potencial de sobrepasar la disponibilidad.

Como se observa en la figura 23.a, asumiendo un consumo del 100%, en la subcuenca 1 la diferencia porcentual entre el caudal simulado y el caudal después de abastecer todas las

demandas llega a un máximo de -50,3% en el mes de mayo de 1993. Como se observó en 1993 se presentan los valores más críticos ya que el modelo simula los caudales más bajos de toda la serie. Al igual que en el capítulo anterior, la disminución de caudal más notoria es en la época seca y durante la sequía de 1997-1998. Entre febrero de 1997 y julio del 1998 la disminución en el caudal estuvo en un rango entre -44% (max. en enero 1998) y -27% (min. julio 1998).

Según los datos utilizados en esta investigación y asumiendo un consumo del 100, se concluye que, la demanda agrícola tiene el potencial de secar el río durante la época seca, en particular en los meses de mayo y junio (figura 23.b). De acuerdo con la información obtenida en este estudio el río se seca entre: enero a junio de 1993; febrero a julio de 1998, marzo a julio del 2001; abril a junio de los años 1994, 1995, 1997, 1999, 2000, 2002 al 2006, 2008, 2009, 2013 al 2015; mayo a junio de 1996, 2007, 2010 al 2012, 2016. En estos mismos meses, bajo el escenario de un consumo agrícola del 60%, la demanda no supera la disponibilidad. Bajo este escenario la reducción porcentual es de -60% en lugar de -100%. En el caso de la cuenca del Bebedero, la realidad es completamente diferente ya que en la subcuenca 3 hay un ingreso de agua trasvasada, proveniente de la vertiente Caribe debido al proyecto ARCOSA.

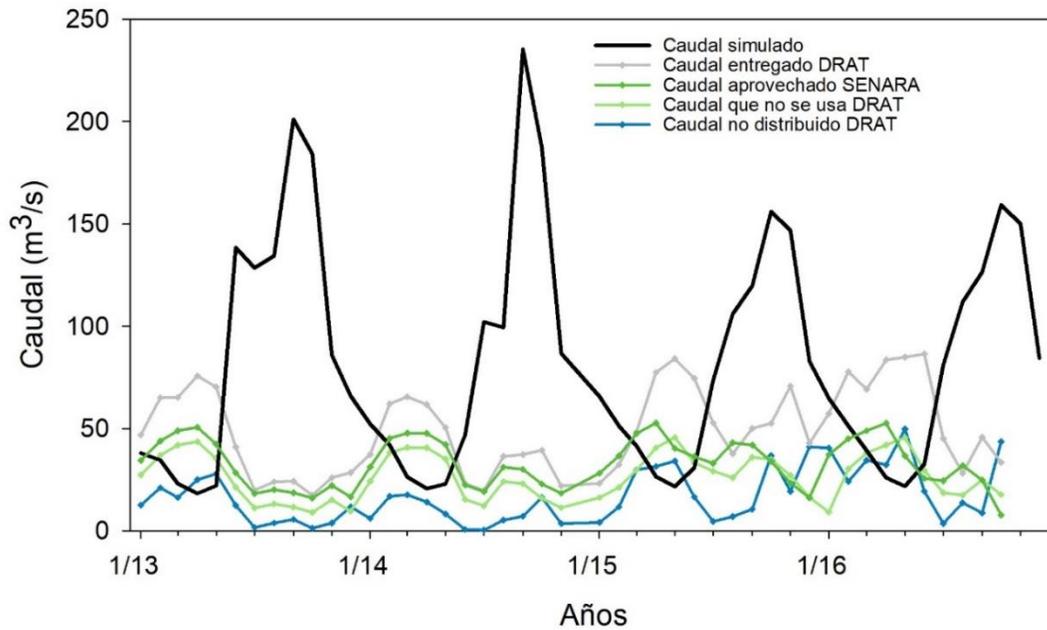
Figura 23: Caudal simulado y después de las demandas, río Tempisque



Fuente: Elaboración propia, 2019

En la figura 24 se visualiza el caudal simulado y se distingue entre los caudales promedio mensuales entregados al SENARA entre 2013 y octubre del 2016. Los caudales se desagregan de la siguiente forma: los aprovechados, son los que se distribuyeron en los canales de riego; los no distribuidos, que son los caudales que SENARA no desvió a los canales, o sea que se incorporaron directamente al río Corobicí; y el caudal que no se usa en el DRAT, que corresponde al caudal excedente después de abastecer la demanda agrícola (figura 24). Este último es una aproximación obtenida en WEAP que responde a los cálculos de demanda de agua por cultivo. El caudal excedente más el caudal no distribuido en el DRAT, se suma al caudal simulado de la subcuenca 3, y se considera un nuevo caudal (figura 25).

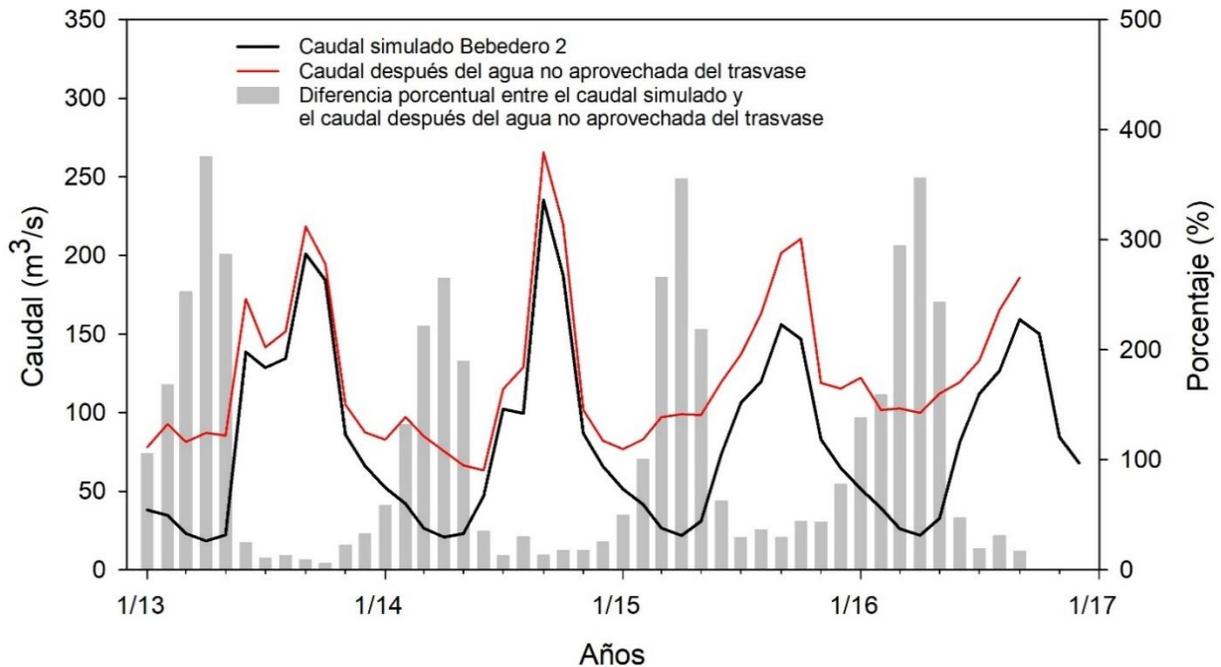
Figura 24: Caudales promedio mensuales entregados al SENARA para abastecer al DRAT entre 2013 y octubre del 2016.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Sobre el caudal entregado al SENARA se observa claramente que durante los meses secos el complejo ARCOSA entrega más agua al SENARA. Esto quiere decir que cuando en la vertiente Pacífica es época seca (diciembre a mayo) la demanda de electricidad aumenta, aportando más agua a los canales y aumentando el flujo natural de la subcuenca 3. Consecuentemente en ese periodo, y a pesar de la demanda agrícola, la media y baja de la cuenca del Bebedero, tiene un excedente de agua (figura 25).

Figura 25: Caudal del Bebedero después de aporte del trasvase.



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 25, la línea negra es el caudal simulado, la roja el nuevo caudal después del aporte del agua trasvasada que no fue consumida en fines agrícolas y también se muestra el porcentaje de diferencia entre estos dos caudales. El aumento máximo porcentual es de 375% en abril del 2013, luego en el 2014 el mayor aumento fue de 265% también en abril. En ese mismo mes sucedió el mayor aumento de caudal en el año 2015, que fue de un 355% y el 2016 fue de un 365%. Considerando que entre el 2014 y 2015 hubo una sequía, el aumento del caudal se mantuvo al menos al doble de lo considerado como caudal natural (caudal simulado). Lo anterior indica que, en el tanto en la vertiente Caribe se mantengan los regímenes de precipitación conocidos, el DRAT tiene la capacidad de mitigar el efecto de la reducción en la precipitación durante la época seca o durante los eventos de El Niño. Eso beneficia tanto a los productores que tienen acceso DRAT como a los ecosistemas, localizados río abajo como el Parque Nacional Palo Verde, ya que reciben un aporte mayor de agua.

6.3. El estado de la sostenibilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero.

A pesar de los datos que alertan sobre la vulnerabilidad ante la escasez en las cuencas Tempisque y Bebedero, las acciones del Estado para procurar la sustentabilidad hídrica

parecieran desarticuladas. En el 2014 la Contraloría General de la República realizó una auditoría para evaluar la idoneidad de los mecanismos implementados por el Estado para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica. Las recomendaciones de este informe se resumen en el cuadro 17.

Cuadro 17: Recomendaciones para asegurar la sustentabilidad del recurso hídrico en Costa Rica.

<p>Recomendaciones para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica</p>	<ul style="list-style-type: none"> A. Establecer mecanismos de seguimiento a la implementación de los instrumentos de política hídrica. B. Establecer un mecanismo para guiar la participación ciudadana. C. Desarrollar el sistema nacional de información para la gestión integrada de los recursos hídricos. D. Medir los avances en la sustentabilidad del recurso hídrico. E. Elaborar e implementar planes de acción para contar con un balance hídrico preciso. F. Programar el monitoreo en campo del uso racional del agua. G. Inventariar y priorizar los acuíferos del país. H. Establecer las metas de reducción de la carga contaminante. I. Emitir las directrices para la ejecución del Canon Ambiental por Vertidos. J. Establecer el mecanismo de control en el SINAC para conocer el aporte de la inversión de fondos a la sostenibilidad del recurso hídrico. K. Definir las zonas que protejan captaciones de agua para consumo humano para el pago por servicios ambientales.
--	---

Fuente: Elaboración propia, con base en Contraloría General de la República, 2014.

Las recomendaciones se emitieron como disposiciones de acatamiento obligatorio a cumplir dentro de plazos distintos establecidos para cada ministerio. La evaluación del cumplimiento de todas estas disposiciones, así como el aporte que hayan tenido hacia la mejora de la gobernanza del agua es una oportunidad de investigación que no se aborda en este caso. Sin embargo, a partir de la experiencia en la realización de esta investigación y los resultados obtenidos se pueden realizar algunos comentarios.

En este sentido, ciertas recomendaciones se pueden agrupar como puntos que tienen que ver con la política. El punto A recomienda establecer mecanismos de seguimiento de política hídrica, más la política hídrica de Costa Rica está desarticulada. Como lo indica XXII informe del Estado de la Nación lo anterior se refleja en que no existe una instancia de coordinación institucional que integre todos los aspectos para el manejo del agua. El punto B sugiere que la visión a promover es la participación de la sociedad en los distintos aspectos de la gobernanza del agua, tema que en esta investigación no se trabaja. También hay otras recomendaciones que tienen que ver con el ámbito político como la H, I y J. En particular la H tiene que ver con empezar un riguroso proceso para reducir la contaminación del agua, mientras que las otras dos tienen que ver con mecanismos para fortalecer las finanzas de la Dirección de Aguas.

Otras de las recomendaciones se refieren a fortalecer los mecanismos de sistemas de información existentes, dentro de los que cabe la recomendación C, E, G y K. Así como recomendaciones dirigidas a mejorar los sistemas de control y vigilancia, entre los que se puede mencionar el punto D y F. Pero sucede que si no se fortalecen los sistemas de información tampoco se puede realizar un adecuado control y vigilancia. Con el proyecto PIAAG mejoró la inversión en estos dos aspectos en Guanacaste, con lo que se logró comenzar nuevos proyectos y fortalecer otros.

Durante la administración Solís Rivera (2014-2018), en efecto, se iniciaron proyectos para desarrollar un Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (SNIGIRH), un Sistema Nacional de Monitoreo del Agua Subterráneas en tiempo Real (SIMASTIR), un Sistema de Permiso y Concesiones (SIPECO) en línea y una Propuesta de Metodología de Caudal Ambiental de Costa Rica (MINAE, 2017). El SIPECO facilita los trámites en línea y expedientes digitales que facilita el manejo de solicitudes de concesiones ante la Dirección de Aguas. En Guanacaste los medidores de aguas subterráneas en tiempo real ya generan datos, aunque solo con el tiempo se podrá ver si estos son efectivos y cómo se manejarán los datos generados.

Con respecto al SNIGIRH, el visor cartográfico web está en funcionamiento y la consulta de datos directamente a los servidores es de protocolos WFS y WMS; pero el sistema tiene mucho que mejorar. Entre las fallas detectadas del SNIGIRH están: uno, es común que el visor cartográfico

no permita visualizar las capas, solo se puede hacer desde un SIG; dos, para bajar las capas y poder utilizarlas como información primaria se debe realizar una consulta a un servidor utilizando los protocolos WFS y WMS, situación que limita para ciertos usuarios la utilidad de los datos. Por lo que en cuando al SNIGIRH si bien está en pie y funcionando aún hay espacio para la mejora.

En el tema de abastecimiento de agua para sus diferentes usos en el presente y futuro, el Gobierno de Costa Rica ha puesto en marcha la ejecución del proyecto PAACUME que figura como un mecanismo de adaptación al cambio climático y la creciente demanda a futuro del agua. El proyecto contempla la construcción de una presa en el río Piedras, un canal de riego a llamarse “Canal Oeste” y una red de distribución. Con este proyecto se abastecerá “un millón de personas en los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya; 18,800 hectáreas de riego; 700 productores agropecuarios; 10 mil viviendas con electricidad y resalta al impulsar la sustitución de usos de agua subterránea por agua superficial” (Presidencia de la República de Costa Rica, 2018). La contribución de este proyecto a la sustentabilidad hídrica en el Tempisque es una evaluación que se presta para una investigación por sí misma. El hecho es que el DRAT tiene agua de sobra y se podría almacenarse, más en este proyecto no queda claro si es un aspecto que se consideró.

Según los resultados de esta investigación, en la parte media y baja de la cuenca del río Tempisque existe la posibilidad de que las demandas excedan la disponibilidad. La investigación de Guzmán-Arias determinó que esto sucede, pero en la cuenca alta del Tempisque, de ser así la situación sería aún peor aguas abajo, sobre todo en los meses de marzo y abril. En la investigación realizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008, también se concluye que ante reducciones de precipitación y un aumento de la demanda, la disponibilidad hídrica se vería en riesgo durante la época seca tanto en la cuenca del Tempisque como la del Bebedero. A pesar de los preocupantes resultados de estudios previos (Guzmán-Arias, 2013; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) o de la presente, en el área de estudio las situaciones de escasez se extienden a lo largo del territorio, en particular durante las épocas de El Niño, pero sigue sin existir una política que aborde el tema de modo preventivo.

Es cierto que en la época seca algunas fuentes de agua superficial se secan o se reducen asociado a la variabilidad natural. Las disminuciones estacionales suelen mitigarse con la toma

de aguas subterráneas, y los acuíferos se recargan con las lluvias de la siguiente temporada, pero cuando las disminuciones de precipitación se prolongan, por ejemplo, en eventos El Niño, todo el sistema hidrológico se estresa. De hecho, la propuesta de la Hundt et al., (2018) fue desarrollar para un pequeño acuífero de Guanacaste un indicador de recarga. El indicador permitiría evaluar si en un año la recarga disminuiría antes de que termine la época lluviosa. Los autores proponen que con esa información se podrían desencadenar medidas de adaptación a corto plazo como: el control de la demanda procurando la conservación del agua, así como considerar alternativas de suministro durante la época seca como el agua superficial o agua llovida para permitir que el acuífero se recargue.

Al comparar las investigaciones anteriores con la presente el problema recurrente es la dificultad para conseguir datos. Debido a que el acceso a datos es limitado y en cada investigación los datos se manejan de forma distinta, comparar los resultados entre investigaciones es difícil. Para modelar son fundamentales los datos climáticos, pero también los de caudal, ya que son necesarios para calibrar los modelos. Considerando que la estación Guardia dejó de funcionar desde el 2010, es preocupante que en la actualidad no ha un monitoreo continuo de caudales, ya que esto limitará las investigaciones futuras. Precisamente porque el ICE fue históricamente el mayor generador de información básica, resulta incierto el futuro del monitoreo de datos básicos ante el desmantelamiento de la mayoría de la red de observaciones que tiene el ICE en el país.

En ese sentido, el monitoreo de variables climáticas, así como de aguas superficiales (por ejemplo, caudales y niveles) es fundamental para cumplir con tres de las obligaciones emitidas por la Contraloría, que son: medir los avances en la sostenibilidad del recurso hídrico; elaborar e implementar planes de acción para contar con un balance hídrico preciso; programar el monitoreo en campo del uso racional del agua. Con los datos actuales realizar un balance hídrico preciso que considere las demandas es imposible ya que desde que se realizó la investigación del IMTA en el 2008 resalta la necesidad de monitorear con medidores las concesiones otorgadas.

La sustentabilidad hídrica en las cuencas Tempisque y Bebedero efectivamente está en riesgo por una serie de factores. Lo primero es que el área de estudio está expuesta a una variabilidad climática que causa periodos de sequía producto del fenómeno El Niño, así como a eventos

extremos que se esperan aumenten con el cambio climático, por lo que es imperante tomar medidas de adaptación. Lo segundo, es que existe un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua. En el caso particular del Tempisque, según los registros de concesiones, la cuenca está sobre concesionada, sin embargo, esto no es verificable ya que no existen datos para corroborar el consumo real. Lo tercero, es que a falta de implementar un caudal ambiental no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua.

Analizando el efecto de las concesiones en el caudal, se concluyó de nuevo que la parte media y baja del Tempisque se enfrenta a la posibilidad de que las demandas excedan la disponibilidad, motivado por la demanda agrícola. Así mismo se confirmó que en la parte media y baja de la cuenca del Bebedero el agua trasvasada es suficiente para abastecer la demanda agrícola y generar excedentes, lo que a su vez aumenta la disponibilidad de agua para los ecosistemas aguas abajo.

VII. Conclusiones y Recomendaciones

En esta investigación se estimó la disponibilidad del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero y se contabilizó el agua concesionada. Para realizar un manejo integrado del recurso hídrico se requieren balances hídricos que permitan conocer con cuánto recurso se cuenta, para luego analizar la mejor forma de repartirla entre los sectores. En este sentido WEAP es una herramienta que permite realizar una contabilidad hídrica, ya que considera tanto la oferta como la demanda de agua.

Los datos de entrada y el procesamiento al que se sometieron resultaron adecuados para la simulación de la escorrentía en el área de estudio. Por un lado, los datos satelitales permitieron completar la información faltante y se demostró que pueden ser utilizados efectivamente cuando se carece de observaciones en el sitio como fue en este caso de las variables humedad relativa y velocidad del viento. A partir de los datos se realizaron interpolaciones que permitieron pasar de datos puntuales en el territorio a valores distribuidos espacialmente que reflejaron diferencias altitudinales. El proceso de generar interpolaciones mensuales es poco eficiente debido al tiempo de procesamiento, por lo que si se desea mejorar este aspecto se recomienda realizar las interpolaciones en programas diseñados para manejar altos volúmenes de datos como R o Python. Así mismo, para otros casos y cuando existe una alta cobertura de estaciones meteorológicas, se podría prescindir de las interpolaciones e ingresar únicamente, los valores ponderados de las estaciones dentro de las subcuencas.

El programa WEAP se utilizó para simular el caudal seminatural en las cuencas Tempisque y Bebedero entre 1993 y 2016. Las cabeceras de cada cuenca fueron calibradas para el periodo entre 1993-2003, con énfasis en la calibración de los caudales mínimos, logrando una notoria eficiencia de simulación en la cabecera del río Tempisque (logNSE 0,79). Los resultados se asemejan a los observados, en particular en los caudales mínimos y la simulación refleja una clara disminución del caudal entre 1997 y 1998 a causa de la sequía provocada por el fenómeno El Niño. Debido a falta de datos las partes medias y bajas de ambas cuencas no se calibraron. Así mismo, se recomienda explorar la calibración utilizando el complemento de WEAP, con las siglas PEST, o buscar cómo realizar un enlace para programar una calibración aleatoria utilizando R o Python.

Por otro lado, las subcuencas 3 y 4 no se lograron calibrar ya que se carecían los datos de caudal. Se recomienda instalar medidores de caudal tanto en la parte alta como baja de las cuencas del Tempisque y Bebedero. Con lo que se podrían realizar más ejercicios de modelación, certeros y en el futuro. También se recomienda explorar las posibilidades de calibrar el modelo utilizando el complemento que trae WEAP, llamado PEST para la calibración o buscar cómo programar una calibración aleatoria utilizando por ejemplo R o Python.

Al revisar la base de datos de concesiones se identificaron aspectos de mejora para el control de las concesiones. En el caso particular de las concesiones del AyA de tipo “acueducto rural”, resalta que según los registros estas tiene un caudal otorgado de cero. No cabe duda de que el agua administrada por el AyA es prioritaria ya que abastece el consumo doméstico, pero para velar por la sustentabilidad hídrica, estas concesiones deben ser vigiladas a fin de asegurar que no se perjudique el sistema a largo plazo. En general, para realizar una contabilidad real de la demanda con es suficiente un dato de caudal concesionado, hace falta colocar medidores en las tomas, para contabilizar las variaciones de extracción en el tiempo. Si Costa Rica y Guanacaste en desean contar con un balance hídrico completo y comparable, son necesarias las mediciones sistemáticas en campo, incluidos los caudales de los ríos como de las tomas.

El caudal concesionado para cubrir la demanda doméstica suma 2.243,84 l/s, de ese 1.412,21 l/s provienen de acuíferos y 831,64 l/s de nacientes, ríos y quebradas. Los 831,64 l/s se dividen en: 823 l/s asociados a expedientes del tipo R, acueducto rural, administrados por AyA; 8,64 l/s asociados a expedientes tipo A, expedientes de agua superficial, que pertenecen a personas particulares. En este caso, las concesiones de agua superficial también se destinan a otros usos, estos suelen contabilizar un mayor caudal que el destinado a consumo humano.

En el caso de los expedientes tipo A, las cuencas están concesionadas de menor a mayor en el siguiente orden: subcuenca 4, 2, 1 y 3. Esto quiere decir que la subcuenca 3, la parte media y baja del Bebedero, con 5 l/s es la que más agua concesionada tiene para abastecer el consumo humano. En los expedientes tipo R, el orden de cuencas concesionadas cambia, en este caso, en la subcuenca 4, se destinan 599,3 l/s provenientes de ríos, nacientes y quedaras, para abastecer la demanda doméstica. Seguido de la subcuenca 2 con 106 l/s, la subcuenca 3 con l/s y la subcuenca 1 con 24 l/s. En conjunto entre los expedientes tipo A y R, en el Tempisque se destinan 625,92 l/s para abastecer la demanda doméstica y en el Bebedero 205,85 l/s.

Para el sector turismo en la cuenca del Tempisque hay un caudal total concesionado de 32,96 l/s y en la cuenca del Bebedero 100,34 l/s. En la cuenca del Tempisque, el caudal concesionado para turismo se concentra en la subcuenca 1 y se utiliza para abastecer pequeños desarrollos turísticos en las cercanías de Cañas Dulces y hacia el NNE de Mayorga, zona de influencia del Parque Nacional Rincón de la Vieja. En la cuenca del Bebedero, el caudal concesionado se concentra en la subcuenca 3, con las mayores concesiones ubicadas cerca de La Fortuna, que es un conocido poblado turístico ubicado en la parte alta de la cuenca del Bebedero y zona de influencia del Parque Nacional Arenal.

Para riego se contabilizan 343 concesiones en el área de estudio, de esas 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales, con un aporte primario de ríos, sobre todo en la parte media y baja del río Tempisque. En el caso del agua para riego que proviene de nacientes y quebradas, estas se ubican en su mayoría en las zonas altas de la cuenca. Del total de concesiones para riego de fuentes superficiales 78% tienen permiso de extraer entre 0,02 - 90 l/s, 21% entre 100 - 996 l/s y un 1% entre 1365,5 l/s- 1479 l/s, lo que indica que 1% de los concesionarios tienen derecho a 16,4 veces más de agua que el otro 78%.

Asumiendo un 100% de consumo del total de agua superficial concesionada en los expedientes tipo A y R el caudal otorgado se le restó al simulado. A partir de este ejercicio se identificó que la subcuenca 4 tiene el potencial de secarse producto de las concesiones. La cuenca del Tempisque se conforma de la subcuenca 1 y 4. La disponibilidad de agua en la subcuenca 4 es mucho más que en la 1, con un máximo de 297 m³/s frente a 85 m³/s en la 1, no obstante, debido a que el caudal concesionado es significativamente mayor en la subcuenca 4 el caudal puede verse seriamente reducido por las concesiones. En particular durante los meses de marzo abril y mayo, siendo el mes de abril el más crítico ya que los datos reflejan que siempre tiene el potencial de secarse. Si bien este ejercicio de resta no representa la realidad, permite identificar que, si se da una extracción indistinta entre la época lluviosa y la seca, aumenta la posibilidad de que el caudal disminuya considerablemente. Esto aplica en particular para la parte media y baja del río Tempisque a causa de las concesiones del sector agrícola.

Guzmán-Arias (2013) determina que la cuenca alta del Tempisque está sobre concesionada, mientras que en este trabajo se concluye que esa situación ocurre en la cuenca media y baja del Tempisque. La diferencia de resultados refleja que los registros de caudal concesionado varían

según las instituciones que se consulten. Lo que figura como un problema de registro, y agrava la inminente realidad de que el consumo real de las concesiones es desconocido. Como consecuencia, las investigaciones que consideren demandas de agua no sean comparables y en general pone en riesgo la sustentabilidad del recurso hídrico. Adicionalmente, como las concesiones no tienen un medidor en la toma, el consumo real de agua por concepto de concesiones en este momento es desconocido.

Según los caudales concesionados para consumo humano, la subcuenca 4 es a la que más personas abastece (260.131 por año) seguido de la subcuenca 3 con unas 65.362 personas, para un total de 392.531 personas en el área de estudio. La demanda doméstica en conjunto con la turística no tiene el potencial de reducir la disponibilidad de agua superficial. No obstante, como la demanda agrícola es la más importante, esta sí puede reducir los niveles de agua superficial en particular en la parte media y baja de la cuenca del Tempisque. La demanda promedio mensual de todos los sectores en la cuenca del Tempisque es de 5,9 millones de m³ que se traduce a un caudal de 23,74 m³/s.

En la cuenca del Tempisque el área agrícola total es de 62.733,09 ha, de esas 29.032,49 ha son para el cultivo de caña, 13.342,47 ha para el cultivo de arroz, 1933,01 ha para el cultivo de melón y 18.425,12 ha no se lograron determinar. Mientras que en la cuenca del Bebedero se cultivan 8.765,1 ha de caña, 4.984,99 ha de arroz, 2.454,08 de pastos, 9.402,58 ha de varios cultivos y para 7.798,72 ha no hay información; todo suma a 33.405,47 ha que es la mitad que en el Tempisque.

Dado que en el Bebedero llega agua adicional para uso agrícola y no toda se usa, se estimó que puede haber un máximo aumento porcentual de 375% entre el caudal simulado y el caudal considerando el trasvase. Resulta sorprendente que en la cuenca del Tempisque el área agrícola duplique la del Bebedero, en particular porque el DRAT es un mecanismo de mitigación ante la variabilidad climática.

Se identificaron tres aspectos críticos que ponen en peligro la sustentabilidad hídrica en el área de estudio. Lo primero, es que existe un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua. Lo segundo, es que ante la ausencia de un caudal ambiental establecido no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua. Lo tercero es que ante la

variabilidad climática propia del área de estudio y los efectos en el clima producto del cambio climático, si no se toman medidas de adaptación hacia un escenario de menor disponibilidad hídrica, no habrá agua suficiente durante todo un año para abastecer a todas las demandas.

Para contrarrestar lo anterior, se deben tomar acciones de mejora en todos los aspectos, incluidos la política, los sistemas de información y el control y vigilancia. Para realizar ejercicios de modelación, más certeros y actuales, se recomienda instalar medidores de caudal en la parte alta y baja de las cuencas del Tempisque y Bebedero; así como retomar el registro de datos en las estaciones Guardia y Rancho Rey. Los datos deben ser de acceso fácil, idealmente de descarga en la web, para promover la investigación y consulta ciudadana. También se deben instalar medidores en las tomas de las concesiones, lo que permitiría conocer la demanda real y aplicar una mejor vigilancia del uso del agua.

Con respecto a la implementación de un caudal ambiental, es necesario promover una ley que lo obligue, complementado de una red de monitoreo que lo asegure. Por último, se debe promover la recolección y reserva de agua durante la época lluviosa, para luego ser utilizada en época seca, en particular para los sectores agrícolas y pecuarias, quienes consumen la mayor cantidad de agua y requieren menor calidad. Así mismo procurar la maximización de la eficiencia en los métodos de riego y cultivar productos mejor adaptados a las condiciones naturales de la cuenca Tempisque y Bebedero.

VIII. Bibliografía citada

- Bermúdez, P., Rodríguez, R., & Vargas, C. (2002). Identificación y Caracterización de los Impactos Socioeconómicos y Ambientales de la Construcción del Puente sobre el río Tempisque, Nicoya-Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Sociales. Escuela de Geografía, San José, Costa Rica.
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: the premier* (2nd ed). John Wiley & Sons, Ltd.
- Birkel, C., Brenes, A., & Sánchez-Murillo, R. (2017, mayo). The Tempisque-Bebedero catchment system: energy water-food consensus in the seasonally dry tropics of northwestern Costa Rica. (M. Al-Saidi & L. Ribbe, Eds.). Nexus Research Focus, TH-Köln, University of Applied Sciences. Recuperado de https://www.water-energy-food.org/fileadmin/user_upload/files/documents/others/Outlook-Nexus_Assessing-Resource-Use-Challenges_ReducedSize.pdf el 30/2/2018
- Bocanegra, J. (2017). Hydrological drought assesment in the Tempisque-Bebedero catchment system in Costa Rica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí y TH-Koeln University of applied science, Colonia, Alemania.
- Bonelli, S., Vicuña, S., Meza, F. J., Gironás, J., & Barton, J. (2014). Incorporating climate change adaptation strategies in urban water supply planning: the case of central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5(3), 357–376. <https://doi.org/10.2166/wcc.2014.037> el 23/3/2018
- Calvo-Alvarado J. y Calvo-Obando AJ. (2015) Estimación del impacto del cambio del uso de la tierra y el clima en los caudales medios de la cuenca alta del Río Tempisque, Costa Rica. Conference: Communicating the Value of the Guanacaste Conservation Area., At Área de Conservación Guanacaste. Guanacaste, Costa Rica, Volume: 1
- Condezo-Montes, B., Mejía-Marcacuzco, A., & Ingol-Blanco, E. (2016). Análisis de los sistemas de recursos hídricos en los proyectos especiales Chavimochic y Chincas. Presentado en XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/articulo_completo_ladhi2016_Boris_28_04_2016_Final.pdf el 13/7/2018
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2011, 869–916. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-869-2011> el 12/2/2018
- Contraloría General de la República. (2014). Informe de la auditoría de carácter especial acerca de los mecanismos implementados por el Estado para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico (No. DFOE-AE-IF-03-2014). San Jose, Costa Rica.

- Corella Rivers, H. (1979). Algunas consideraciones geográficas en torno al uso del suelo en la I etapa del proyecto de riego, río Tempisque, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Sociales, Escuela de Geografía, San José, C.R.
- Coto, M. (2001). El proyecto de Riego Arenal Tempisque. En J. A. Jiménez-Ramón & E. González-Jiménez (Eds.), *La cuenca del río Tempisque: Perspectivas para un Manejo Integrado* (1a ed., pp. 106–119). San José, C.R.: Organización para Estudios Tropicales.
- Diccionario del español jurídico (2019) Concesión de aguas. Real Academia Española. Consejo General del Poder Judicial. Recuperado de <https://dej.rae.es/lema/concesi%C3%B3n-de-aguas> el 12/5/2018
- Durham, R., Rivera-Araya, M. J., Davis, M., Quesada, L., Venegas, N., & Cui, D. (2016). Costa Rica Water Resources Monitoring Drought and Water Balance in the Guanacaste Province to Enhance Decision Making and Response Planning in Costa Rica. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Diyang_Cui/publication/310141860_Monitoring_Drought_and_Water_Balance_in_the_Guanacaste_Province_to_Enhance_Decision_Making_and_Response_Planning_in_Costa_Rica/links/5829a0a908ae509544734536.pdf el 18/7/2018
- Programa Estado de la Nación (2016) XXII Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 4: Armonía con la naturaleza. Recuperado de <http://repositorio.conare.ac.cr> el 1/12/2017
- FAO. (2006). Serie Riego y drenaje: Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf> el 1/1/2018
- FitzHugh, T. (2006). Water Budget Analyses for the Yuna River Watershed and Samana Bay. The Nature Conservancy. Recuperado de http://www.crc.uri.edu/download/27_Yuna_Water_Budget_Writeup_FitzHugh_en.pdf el 2/12/2017
- FONAFIFO. (2012). Estudio de cobertura forestal de Costa Rica 2009-2010. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones MINAE. Recuperado de <http://www.minae.go.cr/recursos/documentos/cobertura-forestal/estudio-cobertura-forestal-fonafifo-marzo2012.pdf> el 5/3/2018
- Garia, M.A. & Arellano, F., 2012: Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Nimboyores, Guanacaste, Costa Rica.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 47: 143-161.
- Guzmán-Arias, I. (2013). Base para la Planificación del Recurso hídrico Superficial en la Cuenca Alta y Media del Río Tempisque, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia.

- Harris, S. (2007). Beyond Building Models: Using WEAP to inform climate change adaptation policy in Guatemala. University of California, Berkeley. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/Beyond_Building_Models_Using_WEAP_to_inform_climate_change_adaptation.pdf el 15/12/2017
- Henriquez Dole, L., Gironas, J., & Vicuna, S. (2015). Analysis of Future Streamflow Regimes under Global Change Scenarios in Central Chile for Ecosystem Sustainability. Presentado en American Geophysical Union, Fall Meeting 2015. Recuperado de <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFMGC51E1134H> el 15/12/2017
- Hund, S., Allen D., Morillas L., Johnson M. (2018) "Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase sociohydrological resilience to seasonal drought". Journal of Hydrology, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.06> el 15/12/2017
- Indicadores cantonales - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2000 y 2011. (2013). Estado de la Nación e Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de http://www.estadonacion.or.cr/images/stories/biblioteca_virtual/otras_publicaciones/Indicadores-Cantones-FINAL-GUANACASTE.pdf el 2/12/2017
- Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2013). Development of a Hydrological Model for the Rio Conchos Basin. Journal of Hydrologic Engineering, 18(3), 340–351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000607) el 12/12/2017
- Instituto Meteorológico Nacional (2004) Manual técnico del departamento de aguas, Pub. L. No. La Gaceta No 98 el 12/5/2018
- Instituto Meteorológico Nacional. (2008). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Recuperado de http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/modulo1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf el 25/5/2018
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2008). Elaboración de Balances hídricos por cuencas hidrográficas y propuesta de modernización de las redes de medición en Costa Rica: Balances hídricos mensuales, oferta y demanda. Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Banco Interamericano de Desarrollo. San José
- Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC (2012) Panorama Demográfico. Vol.1, Año.7
- Jiménez, J. A., & González, E. (2003). Hacia el Manejo Integral de la cuenca baja del río Tempisque. Organización para Estudios Tropicales.
- Jiménez-Ramón, J. A., Calvo-Alvarado, J. C., González-Jiménez, E., Pizarro, F., & Jiménez, A. (2005). Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el río Tempisque. UICN.

- Johnston K, Ver Hoef J, Krivoruchko K, Lunçcas N (2003) Using ArcGIS® Geostatistical Analyst. ESRI.
 Recuperado de: http://dusk.geo.orst.edu/gis/geostat_analyst.pdf el 12/8/2018 el 9/5/2018
- Linsen, M. (2009). Barriers for water: About the decision-making process regarding locations for new small dams in the Preto River Basin in the Federal District, Brazil. Delf University of Technology.
 Recuperado de <http://www.weap21.org/downloads/Barriers-for-water-Preto.pdf>
- Linsen, M., & Rodríguez, L. (2010). The role of water balance accounting in the decision-making process leading to new small dams in the Preto River Basin in the Federal District, Brazil. Geophysical Research Abstracts, 12. Recuperado de <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-2691-1.pdf>
- Leitón, J. J. (2011). Cambio en el patrón de escorrentía superficial de la cuenca alta del río Tempisque ante diferentes escenarios de cambio climático. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.
- Loukus, D (2000) Sustainable Water Resource Management. Journal Water International, vol. 25, issue 1
- Mastrangelo V (2009) Análisis del concepto de recursos naturales en dos estudios de caso en Argentina. Ambiente & Sociedade. Campinas v. XII, n. 2
- Marín Thiele, F. (2014) Almacenamiento de Agua ante el Cambio Climático. Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos (ProNAP) Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. APB-073
- MINAE. (2017). Informe General de Labores Dirección de Agua 2016 (Labores No. DA-0142-2017). San Jose, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Aguas.
- Ministerio de Comunicación. (2015, septiembre 5). Acciones del gobierno junto a la comunidad de Guanacaste de mayo del 2014 a julio del 2015. Recuperado de http://presidencia.go.cr/wp-content/uploads/2015/07/Acciones-por-Guanacaste_WEB1.pdf el 11/5/2018
- Mora Rojas, J. (2016, marzo 8). Más allá de la sequía: El Tempisque, un gigante que muere en silencio. Semanario Universidad. Recuperado de <http://semanariouniversidad.ucr.cr/pais/tempisque-gigante-muere-silencio/> el 12/5/2018
- Muñoz-Jiménez, R., Giraldo-Osorio, J.D., Brenes-Torres. A, Avendaño-Flores. I, & Nauditt. A, & Hidalgo. H, & Birkel. C, (2018). Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. International Journal of Climatology. 10.1002/joc.5925.
- Murillo-Solano, J. Barros Henríquez, J. Roncallo Fandiño, B. Arrieta Pico, G. (2014) Requerimientos hídricos de cuatro gramíneas de corte para uso eficiente del agua en el Caribe seco colombiano. Corpoica Cienc. Technol. Agropecu. 15(1) 83-99

- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- NASA. (2017). Langley Research Center (LaRC) POWER Project. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov/> el 10/5/2018
- NOAA/OAR/ESRL PSD. (2017). PSD Climate Data Repository. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/psd/repository/entry/show?entryid=synth%3Ae570c8f9-ec09-4e89-93b4-babd5651e7a9%3AL3VkJWwuYWlydC5wcmVjaXAvchJIY2lwLm1vbi50b3RhbC52NDAXLm5j> el 20/5/2018
- Organización para Estudios Tropicales (2006) El manejo del riego en el cultivo de arroz. San Pedro, Costa Rica.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU (1987). Nuestro futuro común. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Recuperado de http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf el 22/5/2018
- Ospina Noreña, J. , Gay Garcia, C., Conde, A. ., Magaña, V., & Sánchez Torres Esqueda, G. (2009). Vulnerability of water resources in the face of potential climate change: Generation of hydroelectric power in Colombia. *Atmósfera*, 22(3), 229–252.
- Pizarro-Méndez, Y. (2009). Retomando el río, retomando el tiempo: Documentos para una Historia Medioambiental de la cuenca del Tempisque en la primera mitad del Siglo XX. *Revista de Historia*, (59–90).
- Presidencia de la República de Costa Rica. (2018, julio 24). SENARA presenta diseños de obras de proyecto Paacume. Recuperado de <https://presidencia.go.cr/comunicados/2018/07/senara-presenta-disenos-de-obras-de-proyecto-paacume/> el 12/6/2018
- Programa en Investigación en Desarrollo Economía y Ambiente, División de Investigación y Desarrollo. (2014). Evaluación del impacto del Distrito de Riego Arenal-Tempisque, Región Chorotega, Costa Rica 1981-2011. (J. Robalino, Ed.). CATIE.
- Replage, J., & García, E. (2017, febrero 8). Tempisque River: History of neglect threatens Guanacaste people and environment. *The Tico Times*. Recuperado de <http://www.ticotimes.net/2016/08/02/tempisque-river-history-of-neglect-threatens-guanacaste-people-and-environment> el 12/6/2018
- Rodríguez Vega, E. (Ed.). (2004). *Costa Rica en el siglo XX (Vol. 3)*. San José, Costa Rica: EUNED.

- Santana Segura, R. (2018) Modernización de los sistemas de riego mediante introducción de tecnologías de conducción de aguas por tubería en lugar de canales abiertos en la finca Experimental Taboga UTN-Sede Guanacaste (tesis de licenciatura). Universidad Técnica Nacional, Guanacaste, Costa Rica.
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., Teasley, R. L., & Patino-Gomez, C. (2011). Groundwater Banking in the Rio Grande Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 62–71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000091](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000091)
- Somarriba, E. (2003). Evaluación de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Tempisque. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.
- Stockholm Environment Institute SIE. (2015). WEAP User Guide.
- Umaña, A. (2007). Programación de un modelo de balance hídrico basado en cambios de uso del suelo, en la cuenca del río Abangares. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, San José, C.R.
- UNESCO. (2006). Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, No4.
- Wong, L. A. (1993). Impacto socioeconómico de la primera etapa del proyecto de riego Arenal-Tempisque, Guanacaste. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Sociales. Escuela de Historia y Geografía. Departamento de Geografía, San José, C.R.
- Xu, C. (2002) Textbook of Hydrologic Models. Uppsala University, Sweden
- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, (28), 409-423. Doi: <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>