

**ALTERNATIVAS PARA SATISFACER EL REQUERIMIENTO DE AGUA EN LOS CULTIVOS DE
CAÑA DE AZÚCAR DEL VALLE DEL CAUCA**

Yobana Arias Arias

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Directora:

Ph.D., Jeannette del Carmen Zambrano Nájera

Codirector:

Ph.D., Héctor Fabio Aristizábal Rodríguez

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia
2019**

Dedicada a **Ti** hija mía, mi compañera de vida, para decirte que siempre se puede hacer lo que se ama, que nada te limite, que con Dios, con esfuerzo y con ayuda de los que te aman, puedes alcanzar tus logros.

Y a **Ti** Carmen Arias, Madre mía por inyectarme esa fuerza infinita, por enseñarme a creer que puedo, aunque las condiciones digan lo contrario, aunque todo diga que no, tú siempre dices “si puedes”. Eres la voz en mi mente que me grita ¡SI!

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que sabía lo que necesitaba aprender, lecciones personales incluso más valiosas que las académicas, este proceso fue una carrera de resistencia y no de velocidad, de paciencia y de humildad, gracias al maestro de maestros.

A mis amores, los compañeros de mi vida, el tiempo se los robé a ustedes, Lina María y Carlos A., no tengo palabras para agradecerles su comprensión, sacrificio, y cariño. Gracias.

Agradecimiento muy especial a mi profe, Jeannette Zambrano por su paciencia infinita, su apoyo y su eterno optimismo. Por compartir conmigo su conocimiento generosamente.

A Juan Pablo Rebolledo, por la gran idea, por todos los permisos, por ampliar los límites mentales y enseñarme a pensar en grande.

Por su apoyo técnico, aportes constantes y suministro de información: Ricardo Cruz (tecnicaña), Fanny Hoyos (Cenicaña) Claudia Yiselly Soto (CVC), Sandra Teresa Escobar (CVC), Harold Gonzalez (CVC)

A mi compañera en esta locura, Adriana Caicedo, quién logró que este proceso fuera más fácil y feliz. Gracias por tu increíble amistad.

A Asobolo por siempre estar disponibles. Lorena Ponce gracias por compartir y debatir ideas y conocimiento

Andres Arroyo y Andres Rojas, gracias por su guía, por su infinita paciencia y por compartirme algo de sus altísimos conocimientos que permitieron desarrollar la parte cartográfica del trabajo.

A mis hermanos, sobrinos y cuñada que siempre están a mi lado, me guían me ayudan y me inspiran.

RESUMEN

Actualmente se ejerce gran presión sobre los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de agua para las actividades humanas. Específicamente la agricultura presenta requerimientos muy altos a nivel internacional y en el Valle del Cauca, Colombia la Caña de Azúcar es uno de los principales demandantes. Esto genera conflictos por los usos del agua con otros usuarios o entre agricultores. Lo anterior exige tomar medidas de adaptación que permitan un uso eficiente del recurso garantizando sus sostenibilidad y la productividad agrícola. Por tanto, este trabajo propone evaluar alternativas que permitan gestionar la oferta y la demanda en la cuenca del río Bolo del Valle del Cauca. El trabajo se realizó mediante la identificación de zonas de alta presión hídrica, la actualización de las demandas agrícolas, la modelación del sistema hídrico de la zona de estudio y la evaluación de alternativas de gestión. El modelo se realizó con la herramienta WEAP y se lograron identificar las zonas y épocas dónde se presentan las demandas no cubiertas. Se propusieron 3 escenarios para reducir las demandas de agua y 3 para ampliar la oferta. La evaluación de las primeras alternativas no permitió ampliar la cobertura al 100% para la zona de estudio, aunque se logran reducciones significativas de los requerimientos de agua y por tanto de las demandas no cubiertas. Por tanto, hubo necesidad de ampliar la oferta para lograr cobertura total, y al respecto se proponen técnicas estratégicas que permitan ampliar los recursos por medios no convencionales.

PALABRAS CLAVE: Planificación de recursos hídricos, gestión de la demanda de agua, demanda de agua caña de azúcar, eficiencia de riego..

ALTERNATIVES TO MEET THE WATER REQUIREMENT THE SUGARCANE CROPS IN VALLE DEL CAUCA

ABSTRACT

Great pressure is currently being exerted on water resources to meet the needs of water for human activities. Specifically, agriculture has very high requirements at the international level and in Valle del Cauca, Colombia, Sugar Cane is one of the main applicants. This generates conflicts over water uses with other users or between farmers. This requires adaptation measures that allow efficient use of the resource, guaranteeing its sustainability and agricultural productivity. Therefore, this work proposes evaluating alternatives that allow managing supply and demand in the Bolo's river basin in the Valle del Cauca region. This research was carried out by identifying areas of high water pressure, updating agricultural demands, modeling the water system in the study area, and evaluating management alternatives. The model was developed with tools WEAP, it was possible to identify the areas and times where unmet demands are presented. This research offers 3 proposals to reduce water demands and 3 proposals to expand the supply. The evaluation of the first alternatives did not allow the coverage to be expanded to 100% for the study area, although significant reductions in water requirements and therefore in uncovered demands are achieved. Therefore, there was a need to expand the offer to achieve full coverage, and in this regard, strategic techniques are proposed to expand resources by unconventional means.

KEYWORDS: water resources planning, water demand management, sugar cane water demand, irrigation efficiency.

TABLA DE CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	1
	1.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1	DEMANDA	3
1.2	NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS	6
1.3	VARIABILIDAD CLIMÁTICA INTERANUAL.....	8
1.4	DEFICIENCIAS EN LA PLANIFICACIÓN.....	10
	2.ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	13
	3.OBJETIVOS.....	15
3.1	OBJETIVO GENERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
	4.ALCANCE	15
	5.MARCO TEÓRICO	16
5.1	OFERTA	16
	5.1.1 Oferta hídrica superficial disponible	16
	5.1.2 Oferta hídrica subterránea.....	19
5.2	DEMANDA HÍDRICA	23
	5.2.1 DEMANDA DE AGUA PARA USO AGRÍCOLA	24
	5.2.1.1 Necesidad de agua para evapotranspiración de la caña de azúcar.....	25
	5.2.1.2 Coeficientes de desarrollo del cultivo, K_c.....	28
	5.2.1.3 Eficiencia de riego, K_r.....	29
	5.2.1.4 Precipitación efectiva.....	29
5.3	BALANCES HÍDRICOS Y ANÁLISIS DE PRESIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO	30
5.4	ANÁLISIS DEL DIAGNÓSTICO Y DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS	34
5.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SERIES HIDROLÓGICAS.....	37
	5.5.1 Método por análisis de regresión	37
	5.5.2 Método de la razón	38
	5.5.3 Método de interpolación con otras estaciones	39
	5.5.4 Método de cociente-normal.....	40
	5.5.5 Estimación de datos faltantes de una variable en función de otras variables ..	41

5.5.6	Cadenas de <i>Markov</i>	41
5.5.7	Programa Suemulador	42
6.	METODOLOGÍA	43
6.1	DIAGNÓSTICO DE OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL Y DEMANDA EN LAS CUENCAS DEL VALLE DEL CAUCA PARA PRIORIZAR LA ZONA DE INTERVENCIÓN.....	43
6.2	CÁLCULO DE LA DEMANDA AGRÍCOLA EN LA CUENCA PRIORIZADA.....	43
6.2.1	Pre-procesamiento de la información	43
6.2.2	Procesamiento de la información	45
6.3	DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA PRIORIZADA 46	
6.3.1	Agua superficial	46
6.3.2	Aguas subterráneas	46
6.4	DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA SATISFACER LA DEMANDA EN LA CUENCA PRIORIZADA	46
7.	RESULTADOS	48
7.1	DIAGNÓSTICO DE CUENCAS EN EL VALLE DEL CAUCA	48
7.1.1	Balances hídricos oferta y demanda de aguas superficiales para las cuencas del Valle del Cauca	48
7.1.2	Índices de escasez	50
7.2	BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA PRIORIZADA O CUENCA DEL RÍO BOLO	51
7.2.1	Ubicación e hidrología del área de estudio	51
7.2.2	Condiciones de distribución de agua cuenca río Bolo	53
7.2.3	Balance hídrico en la cuenca del río Bolo	58
7.3	CÁLCULO DE LA DEMANDA DE AGUA AGRÍCOLA PARA LA CAÑA DE AZÚCAR EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO	59
7.3.1	Determinación de las variables de entrada	59
7.3.1.2	Información meteorológica y cartográfica de la cuenca río Bolo	61
7.3.1.3	Determinación del Coeficiente de cultivo, K_c	67
7.3.1.4	Determinación de la eficiencia de riego (e_i) - factor K_r	72
7.3.1.5	Determinación de la Precipitación efectiva P_e – factor K_e	73
7.3.2	Resultados de la modelación en Matlab	74

7.3.3	Cálculo de la demanda agrícola para otros cultivos	85
7.4	DEMANDA DOMÉSTICA, INDUSTRIAL, PECUARIA, INDUSTRIAL Y AMBIENTAL	86
7.5	OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO	87
7.5.1	Análisis de caudales medios.....	87
7.5.2	Curva de duración de caudal	90
7.5.3	Índice de regulación de caudal	90
7.5.4	Caudal ambiental.....	92
7.5.5	Oferta hídrica superficial de la cuenca	92
7.6	OFERTA DE AGUA SUBTERRÁNEA	92
7.7	ANÁLISIS OFERTA DEMANDA.....	93
7.7.1	Esquema y desarrollo del modelo	93
7.8	DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA SATISFACER LA DEMANDA EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO	101
7.8.1	Recursos convencionales – Gestión en la demanda	102
7.8.2	Recursos no convencionales.....	116
	8.CONCLUSIONES	122
	9.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	10.ANEXOS	136
10.1	CODIGO FUENTE EN MATLAB PARA CALCULO DE LA DEMANDA AGRICOLA	137
10.2	ANEXO 1. CALCULO NO DISTRIBUIDO DE DEMANDA APLICANDO FORMULA 18.....	140
10.3	ANEXO 2. PUBLICACIONES Y PREMIOS	142
10.3.1	Artículos de congresos publicados	142
10.3.2	Premio.....	142
	Reconocimiento TECNICAÑA mejor trabajo académico en la categoría de campo	170

INTRODUCCIÓN

En el Departamento del Valle del Cauca Colombia, se vienen presentando conflictos por el uso del agua desde hace algunos años. Estos se atribuyen al incremento de la demanda de todos los usos, a la disminución de la oferta hídrica superficial y a la falta de gobernabilidad. A su vez los incrementos en la demanda se presentan porque los cultivos existentes en el Valle tienen requerimientos de riego y porque otros usos como el doméstico superan las proyecciones de planificación. Con respecto a la demanda, el área sembrada en caña de azúcar pasó de 140 mil ha en 1990 a 225 mil ha en 2019 (Asocaña, 2017), y se ha detectado que las precipitaciones no son suficientes para cubrir las necesidades de agua de la planta, por lo que el riego se ha tomado como práctica habitual en el 95% del área cultivada en el Valle del Cauca (Torres, Cruz, & Villegas, 2004).

Adicionalmente, la oferta se ha visto reducida principalmente en los períodos secos del fenómeno del Niño que cada vez han sido más prolongados y con precipitaciones con tendencia a disminuir en el Valle del Cauca. Las fuentes de abastecimiento para esta zona están constituidas principalmente por el río Cauca, sus tributarios y por pozos de aguas subterráneas, sobre las cuales en los últimos años se han producido conflictos por el uso de agua debido a las grandes presiones hídricas.

También se ha constatado que los sistemas de planificación son muy débiles ya que, aunque se han realizado balances de agua por cuenca y reglamentaciones de corrientes, por parte de la Autoridad Ambiental, CVC Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, no se han planteado soluciones definitivas con lo que la situación se ha visto agravada.

La situación en que se encuentran las cuencas del Valle del Cauca no es una problemática nueva, ya que se ha presentado en otras cuencas en el mundo, como explican (Falkenmark & Molden, 2008): *“Conforme se desarrollan las sociedades, los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas se usan cada vez más, para fines agrícolas, domésticos e industriales trayendo como consecuencia, la reducción de la capacidad para cumplir con las crecientes demandas de diversos sectores e intereses”*. Las sociedades pueden adaptarse a esto de diversas maneras: con reasignación de

agua, gestión de la demanda o transferencias entre cuencas como el principal medio de tratar con el problema. Sin embargo, existen las medidas de "solución rápida", como la explotación de aguas subterráneas o superficiales mal planificada, o reasignación injusta de agua a los usuarios, trayendo como consecuencia sobre-explotación de las aguas subterráneas, dejando un limitado o nulo caudal ambiental. Ejemplo de estos casos son los ríos Colorado (U.S.A), Amarillo (China), cuencas del río Jordán (Israel), el río Murray-Darling en Australia y el río Indo en la India y Pakistán.

Efectivamente estas soluciones rápidas que también se presentan en la región, son las que se deben evitar y la propuesta de este trabajo es realizar un análisis de posibles alternativas para una zona crítica (cuenca del río Bolo), para lo que se desarrolló una herramienta que permite realizar análisis distribuido de las necesidades hídricas para el cultivo de la caña de azúcar y plantear posibles soluciones para el abastecimiento de agua para esta región.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el departamento del Valle del Cauca las fuentes de agua están constituidas principalmente por el río Cauca, sus tributarios y por pozos de aguas subterráneas, sobre las cuales en los últimos años se han producido conflictos por el uso de agua debido a las presiones tan fuertes que se ejercen sobre las mismas. Estos conflictos pueden ser atribuidos al incremento de área sembrada en caña y de otros usos que superan las proyecciones de planificación, al hecho de que la caña de azúcar es un cultivo que requiere altas cantidades de agua para garantizar su producción, a la disminución de la oferta hídrica superficial y a la falta de gobernabilidad. A continuación, se analizarán cada una de esas causas con mayor detalle.

1.1 DEMANDA

Con respecto a la demanda ésta se ha incrementado considerablemente. El área sembrada en caña de azúcar pasó de 140 mil ha en 1990 a 225 mil ha en 2018 (Asocaña, 2019). Estas áreas son aprovechadas por un complejo azucarero compuesto por: cerca de 1.200 proveedores de caña de azúcar, 13 ingenios (Cabaña, Carmelita, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Risaralda, Sancarlos, Tumaco, Ríopaila-Castilla, Incauca y Providencia) (Asocaña, 2011). Adicionalmente, en la zona existen más de 40 empresas procesadoras de alimentos, bebidas y licores, dos co-generadores de energía eléctrica, un productor de papel, tres industrias sucroquímicas, más de 50 grandes proveedores especializados, 88 empresas asociativas de trabajo y una cooperativa de trabajadores. A este grupo también pertenecen los organismos de apoyo propios del sector azucarero, así como una amplia red de instituciones públicas y privadas que le brindan soporte (Asocaña, 2017).

En las cuencas utilizadas para abastecer las demandas anteriores también existe una demanda alta del sector doméstico representada por varios municipios que presentan un incremento considerable de su población (Tabla 1).

Tabla 1. Proyecciones de población municipales 2005-2014

Fuente: (DANE, 2017)

Municipio	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Pradera	51.855	52.493	53.137	53.792	54.460	55.137	55.831	56.538	57.255
Candelaria	75.772	76.933	78.096	79.279	80.476	81.697	82.898	84.120	85.354
Palmira	294.580	296.620	298.667	300.712	302.741	304.763	306.727	308.671	310.608
El Cerrito	56.032	56.315	56.605	56.890	57.177	57.463	57.749	58.025	58.295
Bugalagrande	21.398	21.355	21.316	21.264	21.217	21.167	21.127	21.070	21.017
Florida	57.064	57.264	57.480	57.697	57.910	58.122	58.342	58.556	58.771
Ginebra	20.101	20.285	20.473	20.661	20.852	21.055	21.241	21.430	21.617
Guacarí	33.112	33.388	33.665	33.953	34.230	34.522	34.796	35.084	35.374
Guadalajara de Buga	116.105	115.949	115.779	115.613	115.433	115.249	115.028	114.807	114.569
Tuluá	199.244	201.670	204.125	206.588	209.077	211.581	214.081	216.604	219.138
Zarzal	43.035	43.471	43.900	44.338	44.778	45.227	45.681	46.133	46.593

Como se deriva de lo anterior en el sector el uso es intensivo sobre el recurso hídrico, situación que ha sido diagnosticada por diferentes sectores e instituciones. En el Estudio Nacional del Agua - ENA 2014, se muestra la presión por demanda anual en las 316 zonas hidrográficas del país y se identificaron zonas que tienen altos grados de uso, donde los mayores corresponden a las zonas hidrográficas Magdalena y Cauca con un 67% de la demanda del país. Adicionalmente, la más alta demanda corresponde al sector agrícola (Figura 1) observándose una alta presión por uso agrícola en el sector del Valle del Cauca.

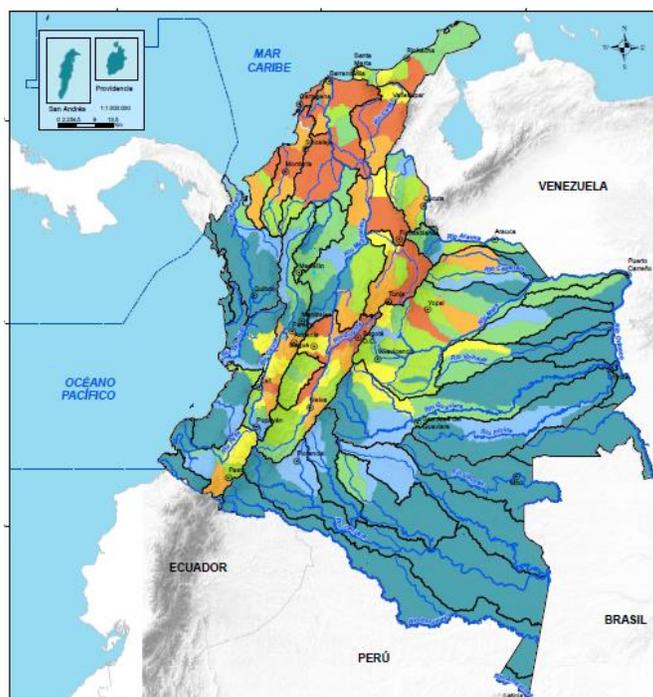


Figura 1. Demanda hídrica anual en el Valle del Cauca

Fuente: (Minambiente & IDEAM, 2018)

A pesar de la gran presión ejercida por el sector agrícola, este sector es altamente representativo en la productividad colombiana. Por ejemplo, solamente el sector azucarero genera 188 mil empleos en la cadena productiva. Según la composición familiar de la región, más de 720 mil personas se benefician de esta actividad. Por cada empleo que generan los ingenios azucareros en la fábrica se generan 28,4 empleos adicionales. Según informa Fedesarrollo, para el 2010 gracias a la actividad manufacturera de los ingenios se generaron 265 mil empleos a través de toda la cadena de valor (Asocaña, 2011).

En los municipios cañicultores, frente al resto de municipios en Colombia donde se desarrollan otras actividades agrícolas o agroindustriales, la calidad de vida es mejor y las necesidades básicas insatisfechas de la población son menores, pese a que la inversión pública es baja. Una mejor calidad de vida se ve reflejada en una mayor tasa de escolaridad, una mayor tasa de alfabetismo y una menor tasa de mortalidad. Así mismo, los municipios donde se cultiva caña, destinada a los ingenios azucareros, tienen menos pobreza que otros municipios con presencia de otros cultivos distintos. Las necesidades básicas insatisfechas de la población en los municipios cañicultores están por debajo de la media nacional. Respecto al Producto Interno Bruto (PIB), por cada peso que los ingenios aportan se genera en la economía un efecto 4 veces mayor, lo que significa que los ingenios son grandes dinamizadores de la economía colombiana (Asocaña, 2011). Históricamente, la producción de caña de azúcar ha representado, en promedio un 4% de la producción agrícola nacional y la producción de los ingenios cerca de un 1,5% del PIB total nacional. En el caso del Valle del Cauca y el Cauca, la participación del PIB de caña de azúcar en el PIB agrícola departamental representa cerca de un 37% y 31%, respectivamente (Cámara de Comercio de Cali, 2012).

Estos datos muestran la magnitud y la importancia del sector en el departamento, ya que los rendimientos financieros del cultivo y las garantías de la compra de la caña unidos a las facilidades de cosecha por parte de los ingenios hacen que sea la mejor alternativa de uso del suelo para los propietarios de los terrenos, teniendo en cuenta que la tenencia de las tierras es 75% de propietarios independientes y el 25% son

propiedad de los ingenios. Por las razones anteriores, es de gran importancia para el país garantizar la productividad de este sector.

1.2 NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS

Adicionalmente, al uso intensivo del recurso hídrico, la Caña de Azúcar por ser un cultivo de larga duración que produce enormes cantidades de biomasa, es una de las plantas con mayores requerimientos de agua por ciclo de cultivo, como se observa en la Tabla 2. Sin embargo, cuando se calcula el requerimiento de agua a los otros cultivos a un periodo equivalente de 13 meses como la caña, los valores son parecidos.

Tabla 2. Requerimiento de agua de los cultivos
Fuente: adaptado de (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012)

Cultivo	Ciclo del cultivo	Requerimiento de agua		Req. De agua en 13 meses	
		Días*	Meses		mm*
Maíz	<i>Zea mays</i> L.	190	6.3	350-800	700-1600
Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i>		13	1.200-1.500 **	1.200-1.500
Sorgo	<i>Sorghum vulgare</i>	150	4.9	450-750	1194-1990
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	135	4.5	400-500	1156-1450
Arroz	<i>Oryza sativa</i> L.	135	4.5	800-1.100	2311-3178
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill	90	3.0	400-800	1720-3440
Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>	150	4.9	700-1.200	1857-3184

* Datos que varían según la variedad y los regímenes climatológicos de cada región

** Datos Valle del Cauca (Cruz, 2015)

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) la caña de azúcar se cultiva en 100 países en regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo con un rendimiento promedio mundial de 69,8 toneladas de caña/ha por año, lo que varía de región a región, dependiendo del potencial climático, el nivel de manejo, el ciclo de cultivo y de si la producción de caña es con riego o secano (Steduto et al., 2012).

A nivel mundial, un rendimiento de 120 ton/ha (14 ton sacarosa/ha) se considera un buen rendimiento en condiciones de riego completo, con los rendimientos de la caña en condiciones de secano (sin riego) varían entre 30 y 90 ton/ha de caña fresca por año, dependiendo de las condiciones climáticas y del suelo (Steduto et al., 2012).

Colombia y Australia son líderes en producción en términos de toneladas de azúcar por ha (TAH), Colombia debe su alta productividad relativa a una marcada ventaja en las toneladas de caña por ha (TCH) en relación con los demás países productores debido, posiblemente, a la alta fertilidad de los suelos del Valle del Cauca, a la factibilidad de riego y al desarrollo de una cultura productora de caña (Luna González, Cock, Palma, Díaz, & Moreno, 1995). Colombia alcanza un promedio histórico de 120 de TCH y de 15,7 TAH, como se puede ver en la **Figura 2**.

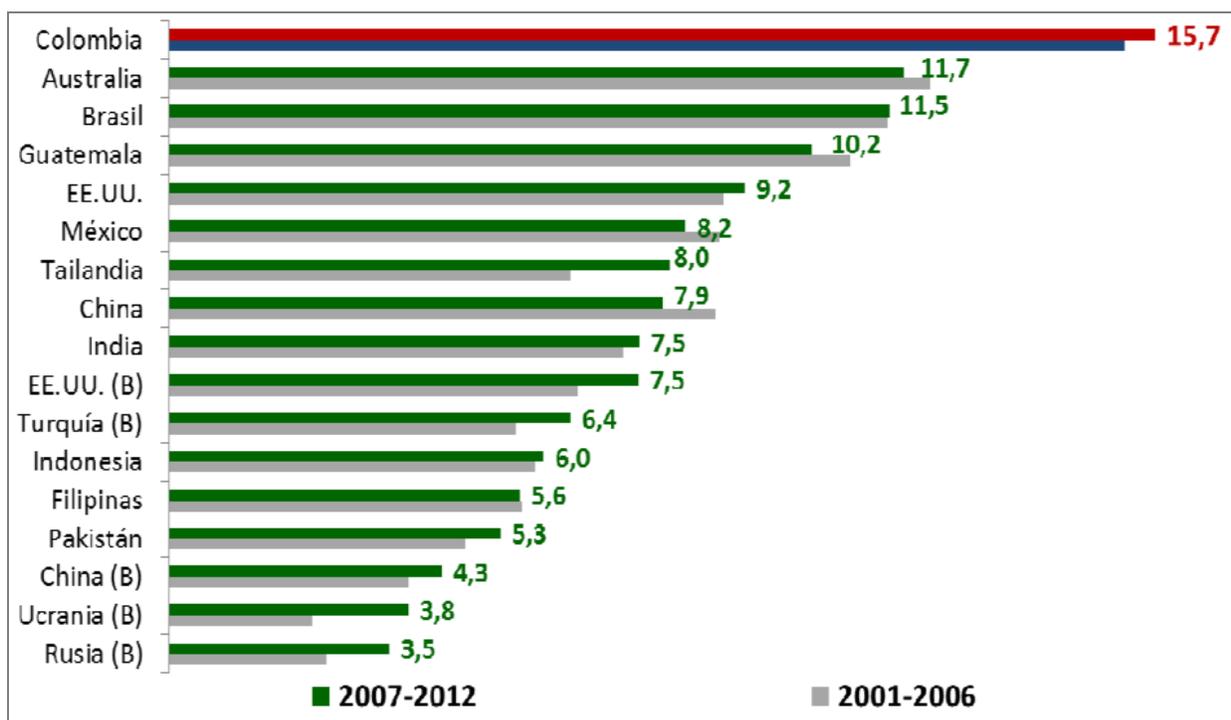


Figura 2. Países con mayor productividad medida en Toneladas de azúcar por ha
Fuente: (Procaña, 2014)

La caña de azúcar toma el agua de la precipitación o de la humedad del suelo. Las precipitaciones en el Valle del Cauca en años normales oscilan entre 800 y 2.600 mm con dos periodos lluviosos que abarcan los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre (Torres et al., 2004). Por otra parte, un suelo normal en el Valle del río Cauca puede almacenar alrededor de 4.000 m³/ha de agua (400 mm) en los primeros 100 cm de profundidad; aproximadamente un 50% de esta cantidad puede ser extraída como agua aprovechable por las plantas. De esta manera, el suelo actúa como un

reservorio de agua para las plantas ya que permite almacenar la lluvia. Sin embargo, esto no es suficiente para cubrir las necesidades de agua de la planta.

Por esta razón, el riego en la caña de azúcar se ha tomado como práctica habitual y en el 95% del área cultivada en el Valle del Cauca se aplican riegos suplementarios. El agua para el riego de la caña de azúcar proviene de aguas superficiales y subterráneas. Las aguas superficiales se captan de ríos y quebradas cuyo caudal disminuye considerablemente durante los periodos secos, motivo por el cual es necesario recurrir a fuentes menos variables como el agua subterránea (Torres et al., 2004).

Sin embargo, el riego es uno de los costos más altos en el levantamiento del cultivo de la caña de azúcar, por ese motivo, el sector se ha preocupado por el uso eficiente y ahorro del agua. Para lo cual ha realizado investigación e implementado métodos como el balance hídrico para la programación de riegos, variedades de caña menos exigentes en necesidades hídricas y tecnologías de riegos más eficientes (Torres et al., 2004). Aunque se han tomado medidas, estas no han sido suficientes y los conflictos por los usos del agua no se disminuyen, sino que por el contrario se han incrementado.

En conclusión, el agua es fundamental para la sostenibilidad de la economía de la caña en el tiempo, por eso desde hace 20 años varios ingenios del sector iniciaron la creación de asociaciones de usuarios de ríos, con el objetivo de que pudieran trabajar en la parte alta de la cuenca principalmente en reforestación. Hoy las asociaciones han realizado un gran trabajo con varios participantes fuera del sector y se visualizan como las manejadoras del recurso en comunión con las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR). Unido a esto se creó desde hace varios años “El fondo de agua para la vida y la sostenibilidad” que involucra a todo el sector y pretende conseguir recursos a gran escala para hacer inversiones en las cuencas a gran escala.

1.3 VARIABILIDAD CLIMÁTICA INTERANUAL

Adicionalmente a los incrementos de la demanda en los diferentes usos que se tienen en el sector, la oferta se ha visto reducida por el cambio climático como se

puede observar en la Tabla 3 donde se resalta en rojo los trimestres con el Índice Oceánico Niño (ONI) >0.5.

Tabla 3. Comportamiento histórico del ONI por trimestre
Fuente: adaptado de (Steduto et al., 2012)

Año	Trimestre											
	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,8	-0,7	-0,5	-0,3	0	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9
2007	0,7	0,3	0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,7	-0,5	-0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,7	1	1,3	1,6
2010	1,5	1,3	0,9	0,4	-0,1	-0,6	-1	-1,4	-1,6	-1,7	-1,7	-1,6
2011	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,1	-1
2012	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0	-0,2
2013	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,7
2015	0,6	0,6	0,6	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,5	2,6
2016	2,5	2,2	1,7	1,0	0,5	0	-0,3	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	-0,1	-0,4	-0,7	-0,9	-1
2018	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	0,8

El fenómeno del Niño se ha presentado cada vez en periodos más prolongados y con precipitaciones con tendencia a disminuir en el tiempo como se ve reflejado en la Figura 3, realizada con datos de pluviometría de una parte de la zona de estudio.

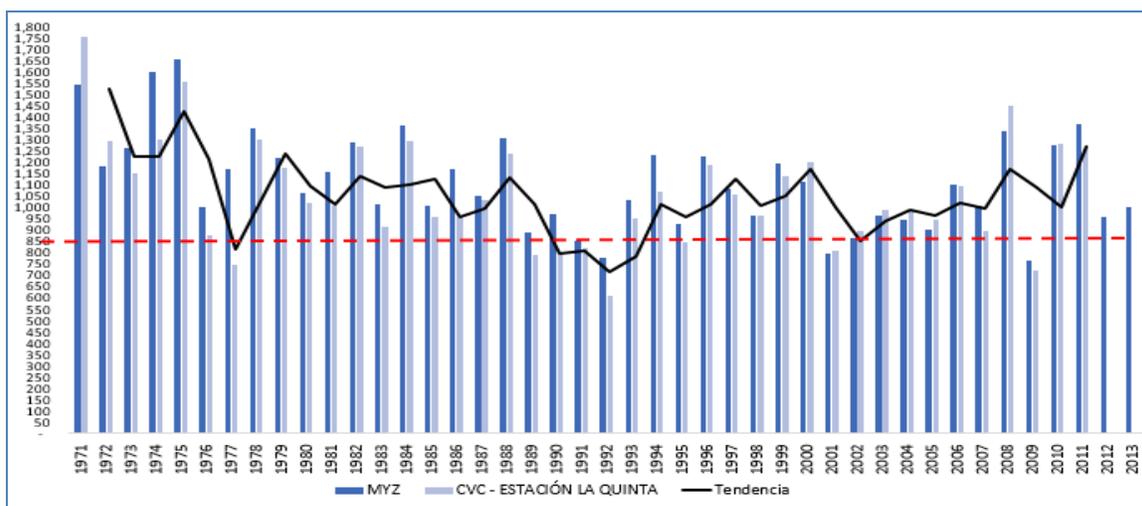


Figura 3. Precipitación anual por años – tendencia a periodos secos más agudos.
Fuente: Elaboración propia con datos de CVC y Mayagüez

En los periodos El Niño, los ríos presentan caudales menores a los promedio presentados, como es el caso de los registros del año 2015 (ver en la **Figura 4**).

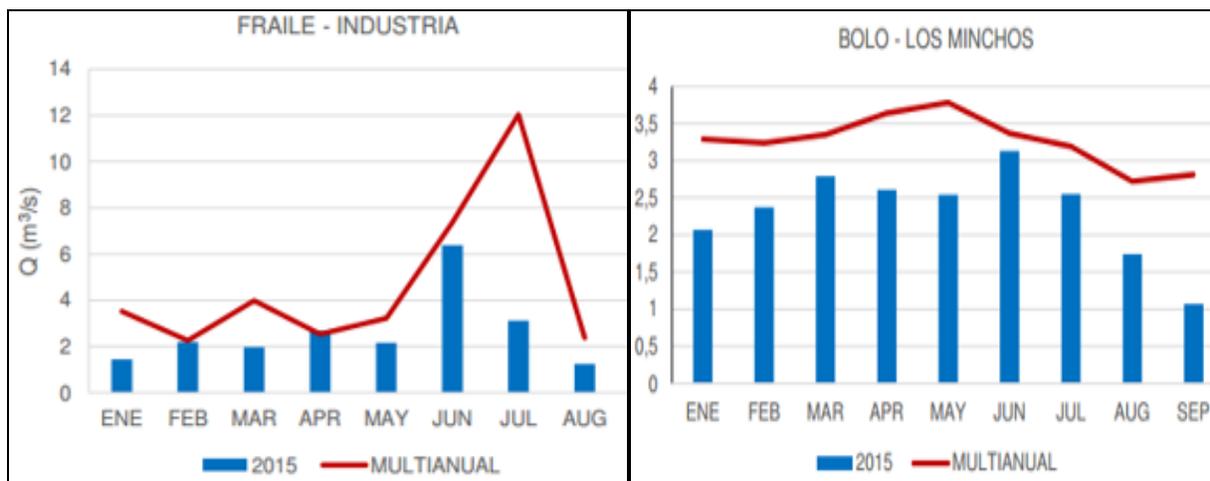


Figura 4. Comportamiento de Caudales de los ríos en periodo seco respecto al promedio

Fuente: Elaboración propia con datos de CVC

Por otra parte, la disponibilidad de aguas subterráneas en esta zona también se puede ver afectada en un periodo del Fenómeno de El Niño. Por ejemplo, entre los años 1989 y 1992 (que corresponde a un periodo muy seco), se observó un descenso progresivo en los niveles piezómetros de los acuíferos en los municipios de Candelaria y Palmira, que alcanzaron niveles críticos cuando muchos pozos quedaron trabajando en forma intermitente. La situación más preocupante se presentó en el municipio de Palmira, donde la precipitación en el año 1991 fue apenas de 700 mm. Lo que obligó a los agricultores a realizar un bombeo excesivo de los acuíferos, lo que produjo un descenso en los niveles y una disminución en los caudales de los pozos hasta de un 30% con respecto a su caudal normal. Después de 1992, cuando se normalizaron las condiciones climáticas, los niveles y caudales en los pozos se recuperaron nuevamente, con una rápida recarga del acuífero superior (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012a).

1.4 DEFICIENCIAS EN LA PLANIFICACIÓN

Por último, los sistemas de planificación son muy débiles ya que, aunque se han realizado estudios como de balances de agua por cuenca, como el realizado en el año 2008 por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC (Figura 5), estos

no han sido suficientes. El estudio mencionado concluye que las cuencas Bolo, Fraile, Desbaratado, Cerrito, Amaime, Guabas y Zabaletas, presentan periodos de déficit más agudos, pero no plantean soluciones.

De igual forma sucede con las reglamentaciones de corrientes, realizadas por la CVC donde se distribuye el agua según el caudal calculado de las curvas de duración de caudales y a partir de las cuales se hace la asignación para las concesiones de agua según la demanda de cada usuario. En los casos en que la demanda supera la oferta se disminuyen los módulos de riego establecidos para el cultivo de caña de azúcar pasándolos de 1 l/s/ha a módulos críticos de 0.37 l/s/ha, lo que resulta insuficiente para el cultivo. Estos conflictos y la falta de investigación han generado falta de gobernanza ya que los lineamientos definidos por las CAR no son seguidos por parte de los usuarios. Además, la falta de seguimiento, lentitud e inconstancia en los procesos por parte de las autoridades no permiten ejercer la adecuada gestión y control ambiental.

Finalmente, las consecuencias de los decrementos de caudales más pronunciados en los periodos secos, han generado grandes conflictos de uso del agua entre usuarios que toman más del caudal concesionado. Los usuarios que tienen acceso a pozos en ocasiones explotan sin respetar su régimen de operación conllevando al deterioro de pozos reduciendo de esta manera su vida útil y aumentando reposiciones. Las autoridades han tomado la decisión de hacer turnos de riego que van en contra del rendimiento económico de los cultivos y priorizan las necesidades de los acueductos, lo que conlleva a que en muchos eventos los caudales ambientales no son respetados. Toda la problemática descrita anteriormente es descrita en la figura 5 de manera sintética en el árbol de problemas que se presenta a continuación.

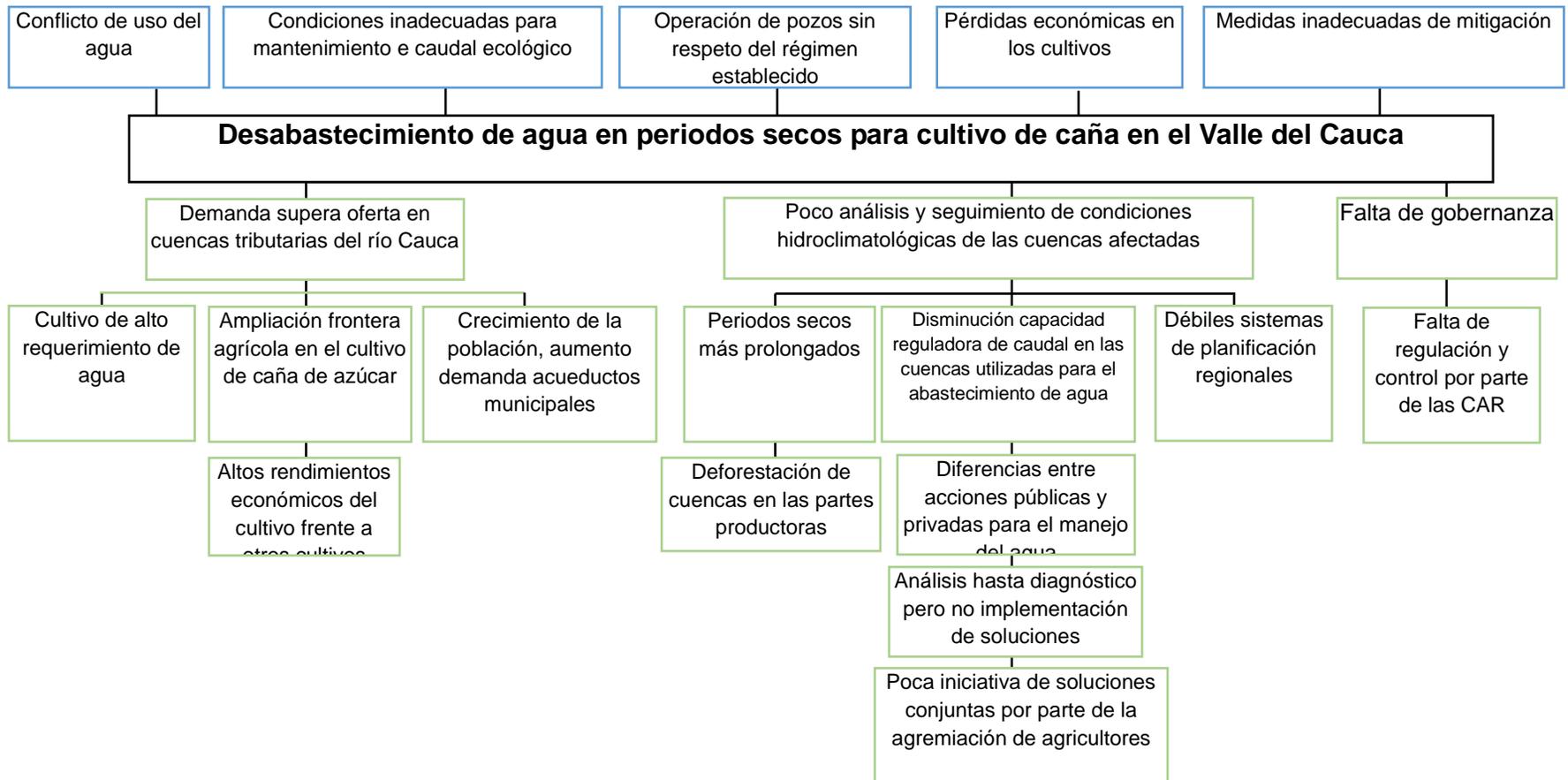


Figura 5. Árbol de problemas

Fuente: Elaboración propia

2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

La situación en que se encuentran estas cuencas no es una problemática nueva, ya que se ha presentado en otras cuencas en el mundo, como explican (Falkenmark & Molden, 2008). Conforme se desarrollan las sociedades, los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas se usan cada vez más para fines agrícolas, domésticos e industriales trayendo como consecuencia, la reducción de la capacidad para cumplir con las crecientes demandas de diversos sectores e intereses. Las sociedades pueden adaptarse a esto de diversas maneras: con reasignación de agua, gestión de la demanda o transferencias entre cuencas como el principal medio de tratar con el problema. Sin embargo, existen las medidas de "solución rápida", como la explotación de aguas subterráneas o superficiales mal planificada o la reasignación injusta de agua a los usuarios, trayendo como consecuencia la sobre-explotación de las aguas subterráneas, dejando un limitado o nulo caudal ambiental. Ejemplo de estos casos son los ríos Colorado (U.S.A), Amarillo (China), cuencas del río Jordán (Israel), el río Murray-Darling en Australia y el río Indo en la India y Pakistán.

En cuanto a las proyecciones de abastecimiento urbano, se realizó un análisis de la vulnerabilidad de las cuencas a nivel mundial, entendiéndose por vulnerabilidad el fracaso de satisfacer simultáneamente las demandas de los usuarios humanos, ambientales y agrícolas. El estudio se hizo teniendo en cuenta condiciones climáticas normales, y se demostró que en el año 2010 el 36% de las grandes ciudades analizadas son vulnerables ya que compiten con los usuarios agrícolas. En la proyección para el año 2040 el 44% de las ciudades estudiadas serán vulnerables debido al aumento de las demandas agrícolas y urbanas (Padowski & Gorelick, 2014).

El tema del cambio climático incrementa el conflicto de uso de agua y es una alarma que varios países han estado evaluando a través de modelos estudiados por (Rosenzweig et al., 2004) en regiones agrícolas de Argentina, Brasil, China, Hungría, Rumania y los EE.UU., utilizando las proyecciones del cambio climático, la agricultura, la producción, la población, la tecnología y el crecimiento del PIB. Los cambios en la demanda de agua debido a los efectos del cambio climático en la agricultura y el

aumento de la demanda de crecimiento urbano requerirán mejoras oportunas en cultivos, riego y tecnología de drenaje y administración del agua.

En la cuenca del río Krishna en la India se han presentado variaciones en las precipitaciones y más demanda de agua por cultivos de alto uso consuntivo como el arroz y la caña de azúcar, a pesar de contar con un gran distrito de riego “Nagarjuna Saga”, se presenta escasez e inequitativa distribución de agua. Para verificar el impacto en los cultivos se han usado técnicas modernas de teledetección y estadísticas (Venot et al., 2010), y modelos de imágenes MODIS que permiten hacer análisis espaciales y temporales. Los hallazgos sugieren que las asignaciones equitativas podrían lograrse mediante la mejora de la eficiencia de distribución de agua de la red de canales en los años normales, diversificación de cultivos e introducción de fuentes alternativas de agua durante los años de escasez de agua para ciertas partes del distrito de riego, también estos modelos pueden identificar cómo y dónde mejorar el rendimiento de un sistema de riego (Gaur, Biggs, Gumma, Parthasaradhi, & Turrall, 2008).

En Perú para abastecer las necesidades de riego, se realizó el proyecto CHAVIMOCHIC que consiste en derivar aguas del río Santa mediante una bocatoma de 105 m³/s de capacidad de captación, un desarenador para evacuar hasta 2 millones t/año de sedimentos, una conducción de 267 km con conductos cubiertos, túneles y sifones; que atraviesa los valles de Chao, Virú, Moche y Chicama, para irrigar 66.000 ha de los intervalles y mejorar el riego de otras 78.000 ha; generar energía eléctrica en la central hidroeléctrica (C.H.) de Virú 7.5 MW, y abastecer de agua potable a la ciudad de Trujillo mediante una planta de tratamiento de agua potable de 1.0 m³/s, este proyecto contempla: la operación y mantenimiento de las obras hidráulicas, generación de empleo, apoyo a la producción agraria, prevención de daños al medio ambiente, gestión sobre uso y manejo de aguas: organización de usuarios de agua, organizaciones agrarias, comisiones de regantes, usuarios de agua con fines no agrícolas, propuesta de creación de la autoridad autónoma regional de gestión de agua del santa (Rojas & Pagador, 2000).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar alternativas de abastecimiento de agua para cubrir las necesidades de agua en cultivos de caña de azúcar en el suroriente del Valle del Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar la oferta de agua superficial y demanda en las cuencas del Valle del Cauca para priorizar la zona de intervención o estudio con información secundaria y estudios existentes.
- Calcular la demanda de agua en los diversos usos en la cuenca priorizada.
- Definir la oferta hídrica superficial y subterránea de la cuenca priorizada.
- Definir posibles alternativas de solución para satisfacer la demanda en la cuenca priorizada.

4. ALCANCE

El desabastecimiento para los cultivos en el Valle del Cauca tiene varias causas y consecuencias que no se pueden abarcar todas en un estudio. Este trabajo se propone realizar actualización del cálculo de la demanda de la Caña de Azúcar para una cuenca crítica y analizar las posibles alternativas de soluciones particulares para dicha cuenca. La oferta hídrica no será recalculada ya que se cuenta con modelos actuales realizados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC.

5. MARCO TEÓRICO

Los procesos de planificación de recursos hídricos, requieren un diagnóstico de la oferta y la demanda utilizando siempre como unidad territorial de análisis la cuenca. Por tanto, cada una de dichas variables debe ser determinada de manera clara.

5.1 OFERTA

La oferta hídrica se reconoce como la suma de las variables que permiten determinar la disponibilidad de agua para una región, se identifica el caudal, la precipitación, tipo de suelo, uso de suelo/cobertura vegetal y evapotranspiración, las cuales pueden tomarse para el análisis todas o algunas de ellas (De Bievre, Coello, & Keizer, 2008); *“Representa la cantidad de agua potencialmente disponible en el sistema, que resulta luego de aplicar factores de reducción ambientales”* (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). La oferta total de una cuenca incluye oferta hídrica superficial, aguas subterráneas y la precipitación.

5.1.1 Oferta hídrica superficial disponible

De acuerdo al Instituto de Hidrología y Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM), por oferta hídrica superficial total se comprende la *“porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo, cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta, lagos, lagunas, reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar”* (Figueroa Castrillón, 2017). La escorrentía superficial es una expresión material de la oferta hídrica total, pero, para fines de uso del recurso hídrico es importante definir que solo una parte de esa escorrentía o caudal puede ser usada y por ello se define la oferta hídrica disponible. Esta oferta disponible es el resultado de considerar una parte de la oferta hídrica total para mantener y conservar los ecosistemas fluviales y las necesidades de los usuarios aguas abajo (Gonzalo, Domínguez, Marín, & Vanegas, 2004).

Oferta hídrica total superficial, OHTS: se define como el “*volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie del suelo que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lenticos*” (Ministerio del medio ambiente, 2014).

Oferta hídrica disponible, OHTD: Se define como “*volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial (OHTS) el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento de los ecosistemas y de los sistemas fluviales, y en alguna medida un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas*” (Ministerio del medio ambiente, 2014).

El caudal ambiental se calcula en cuencas con autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en las que se considera representativo el valor característico Q_{85} de la curva de duración (caudal igualado o superado un 85% del tiempo), este valor característico se aplica a estaciones con un Índice de Regulación Hídrica (IRH) igual o superior a 0.7 (alta retención y regulación). El segundo grupo corresponde a estaciones con valores del IRH inferiores a 0.7, para las cuales se asigna el valor característico Q_{75} de la curva de duración de caudales medios diarios en la determinación del caudal ambiental (Minambiente & IDEAM, 2014). El esquema se muestra en la **Figura 6**.

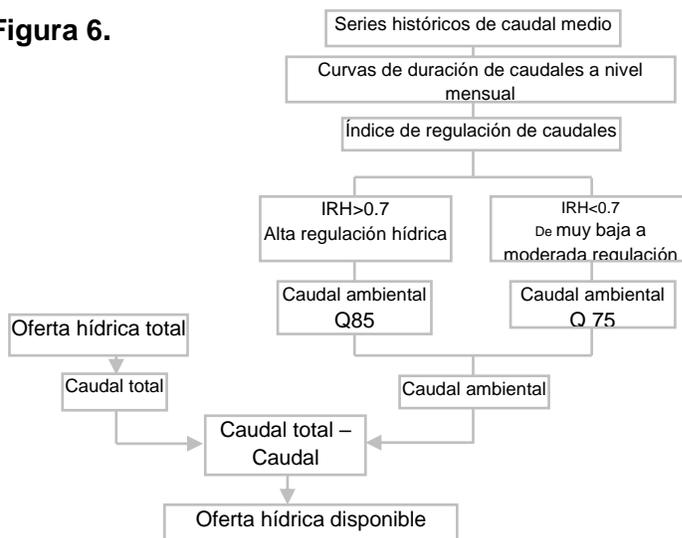


Figura 6. Diagrama de flujo para la determinación de la oferta hídrica superficial
Fuente: (Minambiente & IDEAM, 2014)

Curva de duración de caudal (CDC): el método tradicional de construcción de la CDC según el Servicio Geológico de los Estados Unidos o *U.S. Geological Survey* (USGS) propone construir una sola curva de duración de caudales empleando todo el registro de datos disponible en el sitio de interés. Sugiere que únicamente se deben utilizar los años con registros completos (al menos 90% de los datos de un año) y descartar los años incompletos.

Todos los años completos de registro se pueden utilizar para preparar una CDC; se deben excluir los registros de años parciales. Los años para los cuales los registros están completos no necesitan ser consecutivos, pero los registros utilizados deben ser por años en los que las condiciones físicas en la cuenca, como el almacenamiento artificial, desviaciones u otras influencias hechas por el hombre, fueran esencialmente las mismas (Searcy, 1959).

A los caudales observados, $i = 1, 2, \dots, N$, se les asigna un número de orden para establecer una serie ordenada (i), $i = 1, 2, \dots, N$, en donde N es el número de datos y $q(1)$ y $q(N)$ son el caudal mayor y el caudal menor de la serie, respectivamente. Posteriormente se calcula la probabilidad de excedencia de los caudales ordenados. Si se emplea la distribución de probabilidad de *Weibull* (comúnmente empleada) se obtiene la probabilidad de excedencia o probabilidad de ser igualado o excedido, mediante la siguiente expresión:

$$p_i = (Q \geq (i)) = \frac{i}{N + 1} \quad (1)$$

Finalmente, cada uno de los datos ordenados (i) es graficado en pareja con su correspondiente valor de probabilidad de excedencia p , obteniendo la curva de duración de caudales CDC.

En caso de que existan valores iguales de caudal dentro de la serie, se deben graficar todos los valores iguales de caudal en pareja con la mayor probabilidad calculada para dicho valor (Salazar Oliveros, 2016). Los datos diarios provienen del promedio de caudal a diferentes horas.

Caudal ambiental: de acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, se define como el “volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo

de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” (Presidencia de la República de Colombia, 2010).

La oferta es variable en el tiempo y en el espacio, ya que es el resultado de diferentes procesos hidrológicos que se producen en la cuenca. Por tal motivo, es importante analizar cómo varía la oferta hídrica superficial en diferentes condiciones: años húmedos, años secos, etc.

Año hidrológico: el **medio** se encuentra definido por los caudales medios mensuales multianuales de la serie histórica de caudales medios, el **húmedo** es definido por los caudales máximos de los medios mensuales multianuales de la serie de caudales medios mensuales (incluye períodos de los eventos El Niño y La Niña) y el **seco** son los caudales mínimos mensuales de las series de caudales medios, los cuales se identifican con el año típico seco mensuales e incluye períodos de los eventos El Niño y La Niña (Ministerio del medio ambiente, 2014)(Ministerio del medio ambiente, 2014) .Todos estos términos de caudales son aplicados a la cuenca aferente del sitio de captación de la fuente de agua.

5.1.2 Oferta hídrica subterránea

Otra fuente de la cual se puede obtener el agua para satisfacer las necesidades de agua es la oferta hídrica subterránea, sobre la cual se explican a continuación los conceptos más importantes.

Unidad hidrológica de análisis: *“área natural de concentración y recolección de aguas superficiales y/o subterráneas que tiene connotación principalmente hidrológica en la cuantificación, distribución y utilización de los recursos hídricos disponibles. Para aguas superficiales su delimitación se realiza siguiendo la divisoria topográfica de aguas, y para aguas subterráneas siguiendo criterios hidrogeológicos”* (Presidencia de la República de Colombia, 2004).

Caudal de un acuífero: disponible, corresponde al caudal que se podría extraer continuamente de un acuífero, sin que se reduzcan sus reservas y **explotable** corresponde al caudal que se puede extraer de los recursos disponibles de un acuífero, sin alterar el régimen de explotación establecido por la autoridad ambiental competente (Presidencia de la República de Colombia, 2004).

Índice de escasez para aguas subterráneas: es la relación entre la sumatoria de los caudales captados en el acuífero y los caudales explotables del mismo, de conformidad con la siguiente expresión:

$$I_{EG} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_c}{Q_c} \quad (2)$$

donde,

I_{EG} : Corresponde al índice de escasez para aguas subterráneas

$\sum_{i=1}^n Q_c$: es la sumatoria de los caudales captados en el acuífero

Q_c : es el caudal del recurso hídrico que es explotable del acuífero.

Caudal explotable del acuífero: *“los recursos explotables representan el volumen de agua, expresado en forma de caudal, que se puede captar de un acuífero a largo plazo (oferta hídrica subterránea), sin causar alteraciones indeseables en el régimen de aguas subterráneas, teniendo en cuenta condiciones técnicas y económicas. En general, los recursos explotables no deben exceder la recarga asegurada del acuífero, o recursos disponibles”* (Ortiz, Vélez, & Villegas, 2006).

La **recarga de agua subterránea** se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada, donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas de agua. Esta entrada se da de dos maneras, la primera por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y la segunda comprende la entrada de agua al acuífero luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo. También se define como el flujo descendente de agua que alcanza el nivel freático y que comienza a formar parte de las reservas subterráneas de agua. La recarga puede definirse también como el volumen de agua que penetra en un cierto período de tiempo en las reservas subterráneas o como el flujo unitario que alcanza el nivel freático (Ortiz et al., 2006).

La recarga de un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación o a las aguas superficiales (ríos y lagos); o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por

infiltraciones de embalses y depósitos. En general, la recarga por lluvia es la más importante, mientras que la recarga producida por ríos y lagos es importante en climas poco lluviosos, y la debida a fugas en redes de abastecimiento es de gran importancia en zonas urbanas (Ortiz et al., 2006).

Para la estimación de la recarga por precipitación el método más utilizado es el de balance hídrico: aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de frontera durante un determinado período de tiempo. La diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua (Ortiz et al., 2006).

La ecuación hidrológica del balance es una representación cuantitativa de la evolución del ciclo hidrológico, la cual se expresa como:

$$F_{entra} = F_{sale} \pm \Delta S \quad (3)$$

donde:

F_{entra} : Flujos que entran al sistema.

F_{sale} : Flujos que salen del sistema

ΔS : Cambio temporal en la humedad del suelo

Las entradas incluyen la precipitación, el flujo superficial que entra hacia el sistema, incluyendo el flujo de los arroyos y la escorrentía superficial, el flujo subterráneo que viene de los acuíferos ubicados fuera del área de estudio y la importación artificial de agua a través de tuberías y canales (Ortiz et al., 2006).

Las salidas o el flujo que sale del sistema incluye la evapotranspiración del agua presente en el suelo, la evaporación de agua superficial, la escorrentía superficial, el flujo subterráneo que sale del sistema y la exportación artificial de agua a través de tuberías y canales. En general las técnicas de balance aplicadas a la evaluación de recursos de agua subterránea tratan la recarga como el residual de otros flujos en la ecuación de balance (Recarga = Precipitación-Escorrentía-Evapotranspiración-cambios en el almacenamiento) (Ortiz et al., 2006).

Caudal Captado Demanda: directamente relacionado con la demanda de uso del agua subterránea. Para la aplicación de esta metodología se tienen dos escenarios:

- **El punto de captación cuenta con medidor volumétrico de extracción:** en este caso se diligenciarán formatos mensuales en los cuales se reporten los volúmenes captados en el periodo de tiempo.
- **El punto de captación no cuenta con medidor volumétrico:** Para este caso será necesario hacer cálculos aproximados de la extracción. Para este fin se tendrán datos de la bomba, del sistema de extracción, tiempo de funcionamiento diario, caudal de extracción. A partir de tal información se obtendrá el volumen captado en cada punto (Ortiz et al., 2006).

La información que se encuentra con mayor facilidad y los análisis que se han realizado, es sobre todo para la oferta de agua superficial, sin embargo, existen áreas en la zona de estudio que dependen directamente de los pozos de fuentes subterráneas para el suministro de agua, por tanto, es fundamental tener en cuenta la oferta en el momento de buscar alternativas de agua en periodos secos. La información que se tiene en el Valle del Cauca es que la recarga natural media anual es de 3.500 millones de m³ que se podría considerar como el límite máximo de disponibilidad, pues en teoría mientras las extracciones anuales no superen este volumen el sistema se mantendrá en equilibrio, sin descensos progresivos de los niveles piezométricos. Sin embargo, este volumen de recarga es el que tiene todo el sistema y alimenta tanto el nivel superior como inferior del acuífero, se desconoce cómo se distribuye la recarga en estos dos niveles; por otra parte, la recarga y las extracciones no están distribuidas uniformemente, ni espacial ni temporalmente y la disponibilidad del recurso varía de un sitio a otro. La Autoridad Ambiental estima con los estudios que se tienen hasta el momento que la disponibilidad de agua subterránea en el departamento puede ser de 1.000 m³ al año (30% de la recarga anual) que no afectará la sostenibilidad del acuífero (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012).

Con datos registrados del consumo de pozos en los últimos 15 años se estiman las extracciones de aguas subterráneas entre 400 y 600 millones de m³ al año, lo que corresponde a un 20% de la recarga natural anual que recibe todo el sistema (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012).

5.2 DEMANDA HÍDRICA

El Decreto 3930 de 2010 define la demanda hídrica como la suma del volumen de agua utilizada para los diferentes usos: doméstico, servicios, preservación de fauna y flora, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, energía, minería e hidrocarburos, pesca, maricultura y acuicultura, navegación, transporte y caudal de retorno (Presidencia de la República de Colombia, 2010).

Por su parte el IDEAM lo comprende como la extracción (sustracción, alteración, desviación o retención temporal de agua) del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no (IDEAM, 2015).

Se describe a continuación la metodología para el cálculo de la demanda utilizado por el Estudio Nacional del Agua 2014:

Demanda para uso doméstico. Se basa en la asignación de la dotación de agua para consumo humano de la Reglamentación Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS 2000-(Resolución 2320 de 2009 MAVDT) que clasifica los municipios de acuerdo a la altitud (IDEAM, 2015).

Demanda hídrica en la industria. Se utiliza el Registro Único Ambiental –RUA- como fuente base de información para el cálculo de la demanda en el sector industrial, teniendo en cuenta que esta registra el uso de agua en las industrias grandes, medianas y pequeñas (IDEAM, 2015).

Demanda hídrica para energía. En el ENA 2014 se considera la demanda de agua para energía la utilizada en las grandes centrales hidroeléctricas, en las pequeñas centrales – PCH y en las termoeléctricas. El uso del agua en la generación se considera un uso industrial (Decreto 3930 de 2010, Cap. IV; Art.16) (IDEAM, 2015).

Demanda Agrícola. La demanda hídrica del sector agrícola se enfoca en estudiar los requerimientos de agua en los cultivos, para ello se analiza su interrelación con las variables climáticas y de suelos para toda Colombia. El requerimiento hídrico de los cultivos se determina a partir del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y del balance de agua en el suelo, definiendo mes a mes, el agua que el suelo retiene

proveniente de la lluvia o del riego y que el cultivo puede extraer en su zona radicular (IDEAM, 2015).

El requerimiento del cultivo de la caña de azúcar está suficientemente estudiado por Cenicaña (Centro de investigación de la caña de azúcar) para las variedades más representativas del área sembrada, se puede contar con esta información directamente con el centro y para los datos de evaporación se puede contar con las redes meteorológicas que tienen longitud de datos de más de 10 años.

Demanda hídrica del sector pecuario. Bovinos. La demanda hídrica necesaria para la cría, levante y mantenimiento de bovinos se calcula con el inventario de los mismos del año 2012. **Aves.** Para la estimación de la demanda de agua en el sector se utiliza el inventario suministrado por Fenavi 2012, (pollos de engorde y ponedoras), obtenidos del registro del Fondo Nacional Avícola - Fonav. De acuerdo al CIEM la demanda promedio de un pollo de engorde es de 350 cm³/día y de una ponedora es de 250 cm³/día. **Porcinos.** Se realizó a partir de la investigación previa de los anuarios estadísticos departamentales del año 2009, la distribución municipal del uso de agua en el sacrificio de porcinos se realiza a partir de los archivos de Fedegan (IDEAM, 2015).

De las anteriores demandas, se trabaja especialmente en la de la Caña de Azúcar, por lo que se explica con mayor detalle la forma de cálculo.

5.2.1 DEMANDA DE AGUA PARA USO AGRÍCOLA

En lo referente a la demanda agrícola el Decreto 3930 de 2010 la define como:

Demanda Agrícola. La demanda hídrica del sector agrícola se enfoca en estudiar los requerimientos de agua en los cultivos, para ello se analiza su interrelación con las variables climáticas y de suelos para toda Colombia. El requerimiento hídrico de los cultivos se determina a partir del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y del balance de agua en el suelo, definiendo mes a mes, el agua que el suelo retiene proveniente de la lluvia o del riego y que el cultivo puede extraer en su zona radicular.

El requerimiento del cultivo de la caña de azúcar está suficientemente estudiado por Cenicaña (Centro de investigación de la caña de azúcar) para las variedades más representativas del área sembrada, y se puede contar con esta información

directamente con el centro y para los datos de evaporación se puede contar con las redes meteorológicas que tienen longitud de datos de más de 10 años.

Para determinar el requerimiento se debe realizar un balance hídrico en la planta que permita determinar si las necesidades son satisfechas por la oferta actual. Teniendo en cuenta lo anterior es importante determinar cómo se calcula la demanda para dicho sector. La estimación de la demanda de agua, depende de que se conozca el requerimiento de la misma, que está determinado por la cantidad de agua que las plantas transpiran y aquella que se evapora directamente. Ambos procesos son difíciles de separar por lo que normalmente son analizados conjuntamente como la Evapotranspiración (ET).

Una vez determinado el requerimiento o necesidad de agua, se realiza un balance demanda – oferta en la planta para determinar la necesidad de riego. Este balance se realiza mediante la siguiente ecuación (IDEAM, 2010), cuyos parámetros se explican con mayor detalle a continuación.

$$Da = 10 \sum_{d=1}^{l_p} \frac{[(Kc \times ET_p) - \frac{(P \times K_e)}{100}]}{Kr} \times A \quad (4)$$

Donde,

- Da : requerimiento de agua del cultivo (m^3/ha)
- 10 : es el factor que aplica para convertir a m^3/ha
- l_p : duración del periodo de crecimiento
- Kc : coeficiente cultivo (adimensional)
- ET_p : evapotranspiración de referencia potencial (mm)
- P : precipitación (mm)
- K_e : coeficiente de escorrentía (adimensional)
- Kr : coeficiente de eficiencia de riego (adimensional)
- A : área sembrada (ha)

5.2.1.1 Necesidad de agua para evapotranspiración de la caña de azúcar

Es la cantidad de agua que se requiere para satisfacer la tasa de evapotranspiración (ET), de modo que los cultivos puedan prosperar. La tasa de evapotranspiración es la cantidad de agua que se pierde en la atmósfera a través de las hojas de la planta, así como la superficie del suelo. Por lo tanto, con el fin de estimar las necesidades de agua de un cultivo, primero se debe medir la tasa de evapotranspiración. Sin embargo, la ET no se mide directamente para todas las

plantas, sino que se mide lo que se conoce como evapotranspiración de referencia (ET_o) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La ET_o , es la ET medida en una superficie de referencia. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s.m^{-1} y un albedo de 0.23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

La ET_o se puede calcular utilizando datos meteorológicos. La FAO recomienda el método Penman-Monteith como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración con datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (5)$$

Donde,

- ET_o = evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹]
- R_n = radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m⁻² día⁻¹]
- G = densidad de flujo de calor [MJ m⁻² día⁻¹]
- T = temperatura del aire a 2 m de altura [°C]
- u_2 = la velocidad del viento a 2 m de altura [m s⁻¹]
- e_s = la presión de vapor de saturación de vapor [kPa]
- e_a = presión real de vapor [kPa]
- $e_s - e_a$ = déficit de presión de saturación de vapor [kPa]
- D = pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C⁻¹]
- g = constante psicométrica [kPa °C⁻¹]

Existen procedimientos de cálculos necesarios para derivar estos parámetros climáticos de los datos meteorológicos, así como, para estimar las variables faltantes requeridas para calcular ET_o . La ET_o también se puede estimar de la evaporación del tanque evaporímetro Clase A. Los tanques han probado su valor práctico y han sido utilizados con éxito para estimar ET_o observando la evaporación del tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la ET_o . Sin embargo, para la aplicación de este método se deben tomar ciertas precauciones y

debe estar garantizado un buen manejo del tanque (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

A partir de diciembre 23 de 2004 se publica en el Boletín diario de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) los datos de evaporación requeridos para el cálculo del balance hídrico. Dichos valores de evaporación son calculados mediante una ecuación desarrollada para el efecto, en la cual se utilizan datos diarios de otras variables atmosféricas registrados por las estaciones de la red. Los valores de evaporación tienen una correspondencia alta con los obtenidos por mediciones efectuadas directamente en el tanque Clase A.

Hasta ahora, la evaporación había sido calculada con base en el método de Penman-Monteith (integrado al software de las estaciones de la RMA) pero los valores resultaban notoriamente sobrestimados en comparación con los valores reales de evaporación medidos en el tanque Clase A.

Con el propósito de mejorar la calidad del dato de evaporación suministrado por las estaciones, Cenicaña adelantó investigaciones y mediante la aplicación de diferentes técnicas estadísticas (componentes principales, conglomerados, lógica difusa, regresión múltiple) y, especialmente, mediante la generación y el perfeccionamiento de una aproximación empírico-estadística, se obtuvo la ecuación que ahora es utilizada para el cálculo de los datos diarios de evaporación. La ecuación incorpora los datos diarios de radiación solar, oscilación de la temperatura del aire, velocidad media del viento y humedad relativa del aire.

En el valle del río Cauca se encontró una relación lineal muy estrecha entre la Evapotranspiración (ET) y la Evaporación (EV) (**Figura 7**), hecho que permite calcular la ET a partir de la evaporación media en un tanque clase A. Una vez estimado el valor de ET se puede fácilmente implementar la programación de los riegos por el método del balance hídrico.

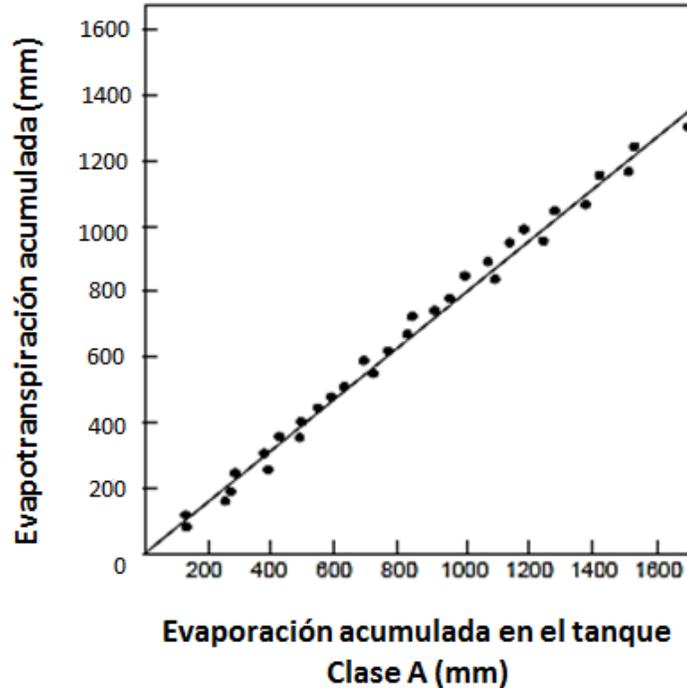


Figura 7. Relación Evapotranspiración (ET) y Evaporación (EV)
Fuente: Cenicaña (Torres et al., 2004)

Evapotranspiración real del cultivo ET_c

La Evapotranspiración Real del Cultivo (ET_c) se conoce como la Evapotranspiración de referencia multiplicada por un factor o coeficiente de cultivo K_c . De manera que la ET_c del cultivo se puede hallar por medios directos o indirectos, determinando el coeficiente de cultivo a través del ciclo vegetativo.

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (6)$$

5.2.1.2 Coeficientes de desarrollo del cultivo, K_c

K_c es el coeficiente que relaciona la evapotranspiración de referencia ET_0 con la que realmente evapotranspira, ET_c en el cultivo para cada etapa de duración del cultivo (L_p), básicamente es el cociente entre ET_c y ET_0 . Representa el efecto integrado de cuatro características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo de referencia (pasto) Ver **Figura 8**.

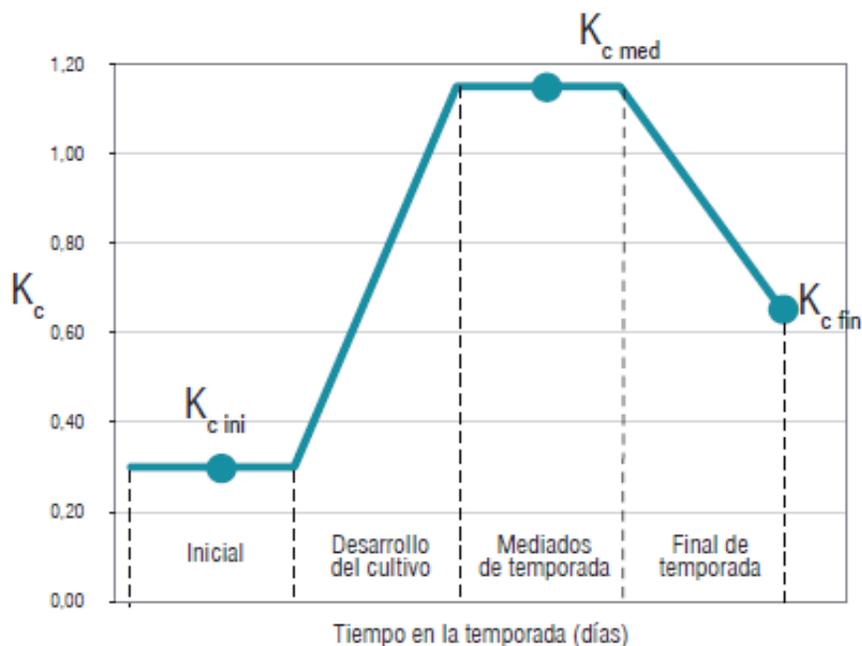


Figura 8. Curva del coeficiente del cultivo
Fuente: (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

El uso agrícola predominante en la zona de estudio es el cultivo de caña de azúcar para determinar el requerimiento de agua es necesario analizar ciertas variables que se describen a continuación.

5.2.1.3 Eficiencia de riego, Kr

La eficiencia de riego es un concepto usado en proyectos y en el manejo de sistemas de riego. La calidad del riego se evalúa con base en indicadores de desempeño como eficiencia y uniformidad y mediante índices de productividad de agua que relacionan el rendimiento de los cultivos y el valor económico de la producción por unidad de lámina de agua aplicada o consumida. De esta forma, durante la operación del sistema de riego los valores de uniformidad de aplicación y de distribución deben ser altos y las pérdidas bajas para obtener altos valores de eficiencia (Flórez-Tuta et al., 2013).

5.2.1.4 Precipitación efectiva

En conjunto con la evapotranspiración de Cultivo (ET_c) la precipitación efectiva PE es uno de los elementos esenciales para estimar los requerimientos de agua. Para

su medición se aplica el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el cual emplea las siguientes fórmulas: (Rangel, MamadouBa, Kelso, & Magaña, 2013).

$$Pe = P \left(125 - \frac{2P}{125} \right) \text{ para } P \leq 250 \text{ mm/periodo} \quad (7)$$

$$Pe = 125 + 0,1P \text{ para } P \geq 250 \text{ mm/periodo} \quad (8)$$

Por precipitación efectiva se comprende “*la cantidad de agua que se infiltra en el terreno*” (Alonso, Corominas, & Hürlimann, 2013), aunque otros autores la han definido como “*el agua que alcanza la superficie del suelo*” (Nosetto & Jobbagy, 2014). Otro método empleado para determinar la precipitación efectiva, conocido también como PPE es el de la *Bureau of Reclamation* (oficina de reclamación) en Estados Unidos (Texeira, Pannunzio, & Borello, 2013).

5.3 BALANCES HÍDRICOS Y ANÁLISIS DE PRESIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO

Una vez se tiene determinada la oferta y las necesidades de agua para la población y para las actividades productivas, se realiza un balance hídrico para determinar si la oferta disponible es suficiente o si la demanda es muy alta para los recursos disponibles. Los balances hídricos se definen como:

Balance hídrico: se basa en la ley física universal de conservación de masas y representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica; expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado (IDEAM, 2010).

Para realizar esto normalmente se utilizan indicadores que permiten definir si existe una oferta alta y si la presión sobre los recursos es muy alta. Los indicadores definidos por IDEAM para Colombia se explican a continuación:

Indicadores hídricos: para la búsqueda de modelos de desarrollo sostenible se requieren herramientas que permitan el análisis de la evolución de los procesos, y a su vez, construir indicadores de estado y tendencia de las condiciones actuales y futuras

del recurso, teniendo como base la oferta y las presiones por su utilización. El conjunto de indicadores puede ser útil para diagnosticar en qué situación se encuentra el recurso agua con relación a ciertos umbrales, para diseñar políticas basadas en objetivos que reorienten las acciones y decisiones hacia el desarrollo sostenible (IDEAM, 2010).

Índice de escasez: según el Decreto 155 del 2004, el índice de escasez es la relación porcentual de la demanda de agua ejercida por las actividades sociales y económicas en su conjunto para su uso y aprovechamiento, con la oferta hídrica disponible (neta) (Presidencia de la República de Colombia, 2004).

$$I_{ES} = \frac{\text{Demanda hídrica superficial}}{\text{Oferta hídrica superficial disponible}} \quad (9)$$

También se expresa como:

$$I_e = \frac{D}{O_n} \times Fr \times 100 \quad (10)$$

donde,

I_e : índice de Escasez (%)

D : Demanda de agua (m³)

O_n : Oferta Hídrica Superficial Neta (m³)

Fr : Factor de reducción por calidad y caudal ecológico

El Índice de escasez se clasificó en cinco categorías como se puede ver en la **Tabla 4** en el ENA 2010, las que se mantuvieron en el ENA 2014.

Tabla 4. Clasificación índice de escasez

Fuente: (IDEAM, 2010)

Categoría	Índice de escasez	Características
No significativo	<1%	Demanda no significativa con relación a la oferta
Mínimo	1-10%	Demanda muy baja con respecto a la oferta
Medio	11-20%	Demanda baja con respecto a la oferta
Medio alto	21-50%	Demanda apreciable
Alto	>50%	Demanda alta con respecto a la oferta

A partir del año 2014, este índice fue redefinido como **Índice de uso del agua (IUA)** el que corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes usuarios, en un periodo de tiempo t (anual, mensual) y en una unidad espacial de referencia j (área,

zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para la misma unidad temporal t y espacial j (Minambiente & IDEAM, 2014) así:

$$IAU = \frac{Dh_{jt}}{Oh_{jt}} \times 100$$

Donde, Dh_{jt} : es la demanda hídrica sectorial en la unidad espacial de referencia j , en el periodo de tiempo t , Oh_{jt} : es la oferta hídrica superficial disponible en la unidad espacial de referencia j , en el periodo de tiempo t .

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propone una clasificación en 5 categorías que van desde muy alto hasta muy bajo con un ámbito numérico que inicia en >50 y termina en <1 (**Tabla 5**)

Tabla 5. Clasificación del Índice de Uso de Agua Superficial (IUA).

Fuente: (IDEAM, 2010)

Calificador	Significado	Ámbito numérico
Muy alto	La presentación de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible	>50
Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible	20,01-50
Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible	10,01 -20
Bajo	La presión de la demandas es baja con respecto a la oferta disponible	1-10
Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	<= 1

Índice de Aridez (IA): estima la suficiencia o insuficiencia de precipitación para el sostenimiento de ecosistemas. Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial (IDEAM, 2010) (**Tabla 6**).

$$IA = \frac{Etp - Etr}{Etp} \quad (11)$$

donde,

la: índice de aridez (adimensional)

Etp: evapotranspiración potencial (mm)

Etr: evapotranspiración real (m)

Tabla 6. Clasificación índice de aridez

Fuente: (IDEAM, 2010)

Calificador	Ámbito numérico
-------------	-----------------

Altos excedentes de agua	< 0.15
Excedentes de agua	0.15-0.19
Moderado y excedente de agua	0.20-0.29
Moderado	0.30-0.39
Moderado a deficitario de agua	0.40-0.49
Deficitario de agua	0.50-0.59
Altamente deficitario de agua	>0.60

Índice de regulación hídrica IRH: asociado con el potencial de disponibilidad hídrica y regulación hidrológica, mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas. Se calcula con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación (**Tabla 7**) (IDEAM, 2010).

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad (12)$$

donde:

IRH: índice de Retención y Regulación Hídrica.

V_p : volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la CDC.

V_t : volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios CDC.

Tabla 7. Clasificación Índice de Regulación Hídrica
Fuente: (IDEAM, 2010)

Calificador	Ámbito numérico
Muy baja retención y regulación de humedad	<0.50
Baja retención y regulación de humedad	0.50-0.65
Media retención y regulación de humedad media	0.65-0.75
Alta retención y regulación de humedad	0.75-0.85
Muy alta retención y regulación de humedad	>0.85

Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento Hídrico (IVH): determina la fragilidad de mantener la oferta para abastecimiento. Es el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener la oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño) podría generar riesgos de desabastecimiento. El IVH se determina a través de una matriz (*Tabla 8*) de relación de rangos de Índice de Regulación Hídrica

(IRH) y el Índice de Uso de Agua (IUA) (Ministerio del medio ambiente, 2014). ver **Tabla 8**.

Tabla 8. Matriz de relación para determinación de IVH
Fuente: (IDEAM, 2010)

Rango IUA	Categoría
<1	Muy bajo
1-10	Bajo
10-20	Moderado
20-50	Alto
50-100	Muy alto
>100	Crítico

5.4 ANÁLISIS DEL DIAGNÓSTICO Y DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS

Una vez se ha definido el balance hídrico para las cuencas del Valle del Cauca, así como las zonas críticas, se deben establecer las alternativas de solución. Para la determinación de alternativas se utilizan diferentes herramientas de análisis denominadas modelos de planificación. A continuación, se describen algunos más detalladamente.

Modelo de planificación: entre las herramientas más utilizadas para la gestión de sistemas de recursos hídricos complejos están los modelos de simulación, empleados para predecir la respuesta del sistema de recursos hídricos bajo un grupo dado de condiciones. Estos modelos requieren entre otros, información de las entradas al sistema, y de las reglas de operación. Los típicos modelos de simulación incluyen el balance de masas de las entradas, salidas y cambios en el almacenamiento de los embalses, bajo condiciones de operación estándar, entre otros, la simulación nos da información acerca de la garantía de que una demanda sea suministrada; este tipo de modelos son de mucha utilidad en la fase de planeación de un sistema. Los modelos de planificación sirven de apoyo a la toma de decisiones en la asignación de los recursos hídricos a diversos sectores considerando: la oferta y la demanda de agua, los modos de gestión del recurso y las necesidades locales en los planes (Centro de Cambio Global, 2009).

Modelo WEAP: herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. Tiene una amplia base de usuarios en todo el mundo y está

disponible en diferentes idiomas, incluido el español. Explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. Incluye un modelo hidrológico, así como varios módulos que permiten integrar WEAP con el modelo de agua subterránea MODFLOW y de calidad del agua QUAL2K, también ha sido utilizado en conjunción con modelos socio-económicos. Apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). Emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible. A diferencia de otros modelos de recursos hídricos típicos basados en modelación hidrológica externa, es un modelo forzado por variables climáticas. Por otra parte, y de manera similar a estos modelos de recursos hídricos, incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo ideal para realizar estudios de cambio climático, en los que es importante estimar cambios en la oferta de agua (ej. cambios en la precipitación proyectados) y en la demanda de agua (ej. cambios en la demanda por evaporación en cultivos), los cuales producirán un balance de agua diferente a nivel de cuenca (Centro de Cambio Global, 2009). La figura 9 permite observar las etapas centrales para el desarrollo de un modelo WEAP.

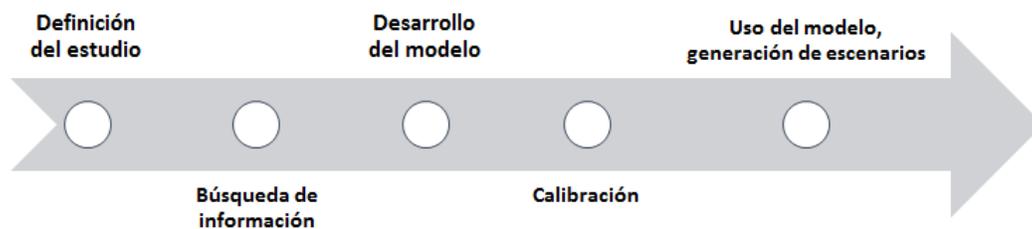


Figura 9. Diagrama de flujo para la determinación de la oferta hídrica superficial

Definición del estudio: se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.

Búsqueda de información: se realiza la recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

Desarrollo del modelo: se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.

Calibración: se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.

Uso del modelo, generación de escenarios: una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación (Centro de Cambio Global, 2009).

Modelo AQUATOOL: el Sistema Soporte a la Decisión *SAD AQUATOOL*, fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (España), presenta una alternativa en la gestión de los recursos hídricos para evaluar escenarios de planificación de uso conjunto de agua superficial y subterránea. Es un Software para la ayuda en la toma de decisiones en materia de Planificación de la gestión de Cuencas hidrográficas. *AQUATOOL* es un entorno de desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (SSD) para planificación y gestión de cuencas o de sistemas de recursos hídricos. Como SSD proporciona recursos para ayudar al análisis de diversos problemas relacionados con la gestión del agua. Fue desarrollado para ser utilizado en las fases de planeación y operación de los recursos hídricos, lo conforman básicamente cuatro módulos: *SIMWIN*, *OPTIWIN*, *MASHWIN*, *AQUIVAL*. El módulo de *SIMWIN* permite desarrollar modelos de simulación de la gestión de cuencas con múltiples embalses, acuíferos, demandas e infraestructuras de transporte. Si la modelación de la cuenca es para ser utilizada en la fase de planeación, es suficiente hacer uso del modelo *SIMGES*. Si la modelación tiene como objetivo gestionar las

sequías durante la operación del sistema de recursos hídricos se requiere el uso del modelo SIMRISK (Molina & Pablo, 2002). *AQUATOOL*, permite al usuario abordar diversas tareas del día a día en la gestión de cuencas (**Figura 10**).

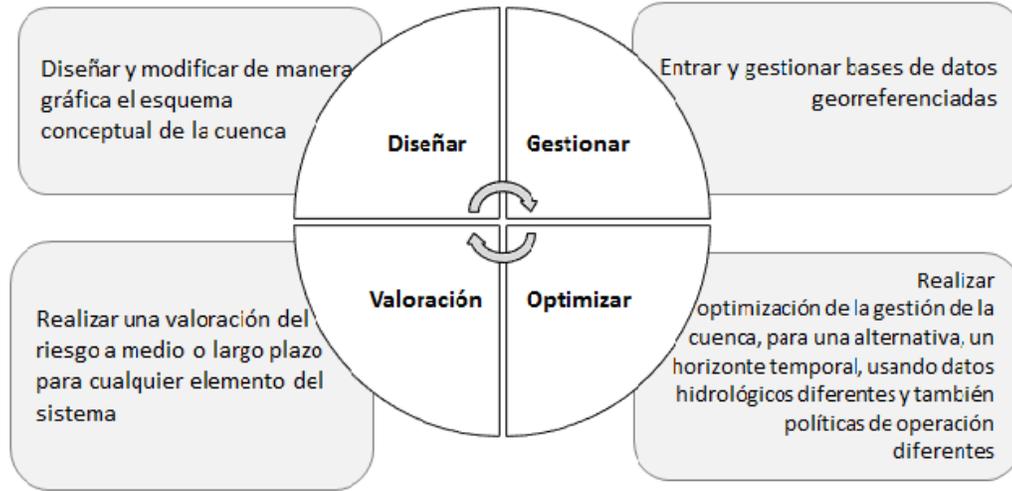


Figura 10. Tareas de gestión del modelo AQUATOOL
Fuente: (Molina & Pablo, 2002)

De acuerdo a los requerimientos de los modelos, de la capacidad de representar la realidad a la escala del interés del estudio, de la información que se tenga disponible, se determina aplicar el *WEAP*.

5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SERIES HIDROLÓGICAS

Los métodos estadísticos de series hidrológicas y la demanda de agua para uso agrícola son los tópicos claves para identificar las alternativas con que dispone el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca para satisfacer los requeridos de agua.

Se ilustran seis métodos estadísticos utilizados para la estimación de series hidrológicas.

5.5.1 Método por análisis de regresión

Para la aplicación de éste método se requiere seleccionar una serie de datos con un comportamiento similar, esto es, dentro de la misma área de influencia topoclimática, a la serie que tiene los datos faltantes. La serie de datos de la referencia,

debe contener el registro de datos completos en los períodos para los cuales faltan datos en la serie de estudio. Los valores de la serie de referencia se denotan como X_i , y los de la serie de estudio, cuyos datos no están completos, se denotan como Y_i . Para caracterizar los registros de las series, se toman aquellos períodos en los cuales los datos en ambas series están presentes, obteniéndose la media y desviación estándar para cada serie. Luego se estiman los coeficientes de la regresión de Y con respecto a X para los períodos donde los datos en ambas series están completos, es decir: (Allen, 2006).

$$\hat{Y}_i = a + bx \quad (10)$$

$$b = \frac{cov_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (13)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (14)$$

Donde:

a y b = las constantes de regresión

cov_{xy} = la covarianza entre X_i y Y_i

Si el coeficiente de regresión es diferente de cero estadísticamente, según prueba de t , al 5%, con un coeficiente de determinación mayor de un 75% y se cumplen los siguientes supuestos: linealidad del modelo, varianza constante, independencia y normalidad de los errores, se tendría un método estadístico para estimar los datos faltantes de la serie de estudio, simplemente reemplazando en la expresión obtenida, una vez identificado el tiempo en el cual falta el dato en la serie de tiempo, el valor correspondiente al mismo tiempo de ocurrencia del dato faltante de la serie de referencia.

5.5.2 Método de la razón

Este método consiste en obtener la razón q a partir de pares de estaciones meteorológicas, de tal manera que sus valores mensuales, anuales o medios, tienden a ser constantes. Es decir, para las estaciones A y B el procedimiento consiste en (Medina, 2008):

1. Una vez identificados en cada estación los datos comunes en ambas, obtener q como el cociente entre la sumatoria de los datos de la estación B (con datos faltantes), con respecto a la sumatoria de los datos de la estación A (con todos los datos), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (15)$$

Donde:

N = número de registros en cada estación

b_i = registro de precipitación i de la estación B

a_i = registro de precipitación i de la estación A

2. Luego de estimada q , se obtiene el valor faltante de la precipitación en la estación B , como:

$$b_j = q a_j \quad (16)$$

Donde:

b_j = precipitación estimada para el día faltante j

a_j = precipitación registrada en la estación de referencia el día j Este método es utilizado, además, para valores mensuales y anuales.

5.5.3 Método de interpolación con otras estaciones

El método de interpolación estima el dato de lluvia faltante, como el promedio de la precipitación ocurrida en tres estaciones adyacentes que están bajo la misma influencia topográfica y climática en el tiempo referente (dato faltante), siempre y cuando la precipitación anual de cada una de las tres estaciones adyacentes difiera descriptivamente, en menos del 10% de la precipitación anual de la estación con el dato faltante (Medina, 2008).

En ocasiones, no se cuenta con información completa, debido a situaciones como equipos no calibrados, deterioro en unidades de medición, mediciones inoportunas o deficiencias en el procedimiento mismo de la observación y la medición, entre otros.

$$D_j = \frac{a_j + b_j + c_j}{3} \quad (17)$$

Donde:

D_j : precipitación estimada para el día j

a_j, b_j, c_j : precipitación registrada en las estaciones de referencia el día j

5.5.4 Método de cociente-normal

El método de cociente-normal se aplica cuando la precipitación anual de cualquiera de las tres estaciones (estaciones de referencia), difiere más del 10% de la estación con el dato faltante. Para ello, se toma la precipitación anual de cada una de las tres (3) estaciones y se multiplica por la relación (cociente), entre la precipitación anual de la estación con el dato faltante y la precipitación anual de la estación de referencia (corrección estimada). Luego se obtiene el valor faltante como la suma del producto de precipitación ocurrida en la estación de referencia y la corrección estimada, dividida por tres (3), es decir (Medina, 2008):

$$D_j = \frac{a_j P_A + b_j P_B + c_j P_C}{3} \quad (18)$$

Donde:

D_j : precipitación anual estación el día j

a_j, b_j, c_j : precipitación registrada en las tres (3) estaciones de referencia el día j

$$P_A = \frac{\text{Precipitación anual dato faltante}}{\text{Precipitación anual referencia A}} \quad (\text{Igual para B y C}) \quad (19)$$

Estimación de datos faltantes mediante la media

Es posiblemente uno de los métodos más antiguos y sencillo para estimar datos faltantes.

Sigue el modelo: (Medina, 2008)

$$y = \alpha$$

Donde

Y = estimación del dato faltante

α = promedio obtenido con los registros de la variable de interés en otros tiempos. Aunque esta estrategia es sencilla, tiende a subestimar la variabilidad real (Medina, 2008).

5.5.5 Estimación de datos faltantes de una variable en función de otras variables

Consiste en disponer además de la serie con datos faltantes (variable Y), otras series de datos, de al menos dos variables (variables independientes), que describan a Y , de acuerdo con un modelo de regresión lineal múltiple, de tal manera que los coeficientes de regresión de las variables independientes sean estadísticamente diferentes de cero, según prueba de t al 5%, y un coeficiente de determinación múltiple mayor de un 75% (Medina, 2008).

El procedimiento como tal, es el siguiente:

- Estimar los coeficientes de regresión lineal múltiple (expresión generada), con la información de la variable dependiente (serie con datos faltantes) y sus correspondientes valores de las variables independientes.
- Corroborar que los coeficientes de regresión sean diferentes de cero, según prueba de t al 5%.
- Corroborar descriptivamente que el coeficiente de determinación múltiple sea mayor de un 75%.
- Estimar el valor faltante, utilizando la expresión generada, de acuerdo con los valores de las variables independientes que corresponde a la fecha del dato faltante (Y) (Medina, 2008).

5.5.6 Cadenas de *Markov*

Algunos autores estudiaron la aplicación de modelos de cadenas de *Markov* en series de tiempo para describir secuencias de días secos y lluviosos, para estimar la probabilidad asociada al dato faltante y con ella y de acuerdo con la función de densidad de probabilidad asociada a los eventos de variable de interés (la de los datos faltantes), se obtiene el valor del evento (dato faltante) (Medina, 2008).

5.5.7 Programa Suemulador

Es un software para llenar espacios vacíos en series climáticas diarias, basada en una cadena de *Markov* de orden dos en dos estados. La herramienta llamada *SueMulador* se ha validado y probado con éxito en estaciones ubicadas en zonas contrastantes de la geografía colombiana (Chica Ramírez, Peña Quiñones, Giraldo Jiménez, Obando Bonilla, & Riaño Herrera, 2014).

Los autores explican que el llenado de datos faltantes se puede estimar a partir de modelos interpolación o de series temporales ajustados a los datos disponibles, cuyos parámetros son estimados mediante la minimización del error cuadrático y la segunda de la simulación de los valores faltantes ajustando la serie diaria de clima a un proceso estocástico *Markoviano*, para así generar los estados futuros a partir de números aleatorios (Chica Ramírez et al., 2014).

Suemulador software genera datos diarios de precipitación, brillo solar, humedad relativa y temperaturas (mínima y máxima) a través de un proceso estocástico *markoviano*, para suplir los datos faltantes de las series climáticas de las estaciones meteorológicas ubicadas en las zonas ecuatoriales. La ventaja de Suemulador es que considerada la variabilidad climática intra-anual asociada al movimiento de la zona de confluencia intertropical e interanual relacionada con los cambios en los patrones del clima como consecuencia de la variación de la temperatura superficial del Océano Pacífico Tropical Central (El Niño y La Niña) para generar datos faltantes (Chica Ramírez et al., 2014).

6. METODOLOGÍA

La metodología se dividió según los objetivos en una serie de pasos que permiten finalmente analizar alternativas de solución para el abastecimiento de agua en la cuenca priorizada.

6.1 DIAGNÓSTICO DE OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL Y DEMANDA EN LAS CUENCAS DEL VALLE DEL CAUCA PARA PRIORIZAR LA ZONA DE INTERVENCIÓN

El diagnóstico se realizó a través de la recolección de información secundaria para las cuencas del Valle del Cauca y posteriormente el análisis de la información y selección de la cuenca a priorizar.

Recolección de información. Se recolectó la siguiente información para las cuencas del Valle del Cauca:

- Balances hídricos oferta y demanda de aguas superficiales para todas las cuencas del Valle del Cauca,
- Cálculo de índices de escasez (IUA), IRH, IVH para las cuencas del Valle del Cauca para la determinación de la tasa de uso de agua.

Posteriormente se tabuló la información existente y se realizó comparación entre los principales indicadores, para seleccionar la cuenca más crítica y en la cual se pueda realizar el análisis de abastecimiento.

6.2 CÁLCULO DE LA DEMANDA AGRÍCOLA EN LA CUENCA PRIORIZADA

6.2.1 Pre-procesamiento de la información

En la **Figura 11**, se presenta un diagrama que resume la metodología planteada para el cálculo de la demanda agrícola de agua en la cuenca. La cual se divide en tres componentes:

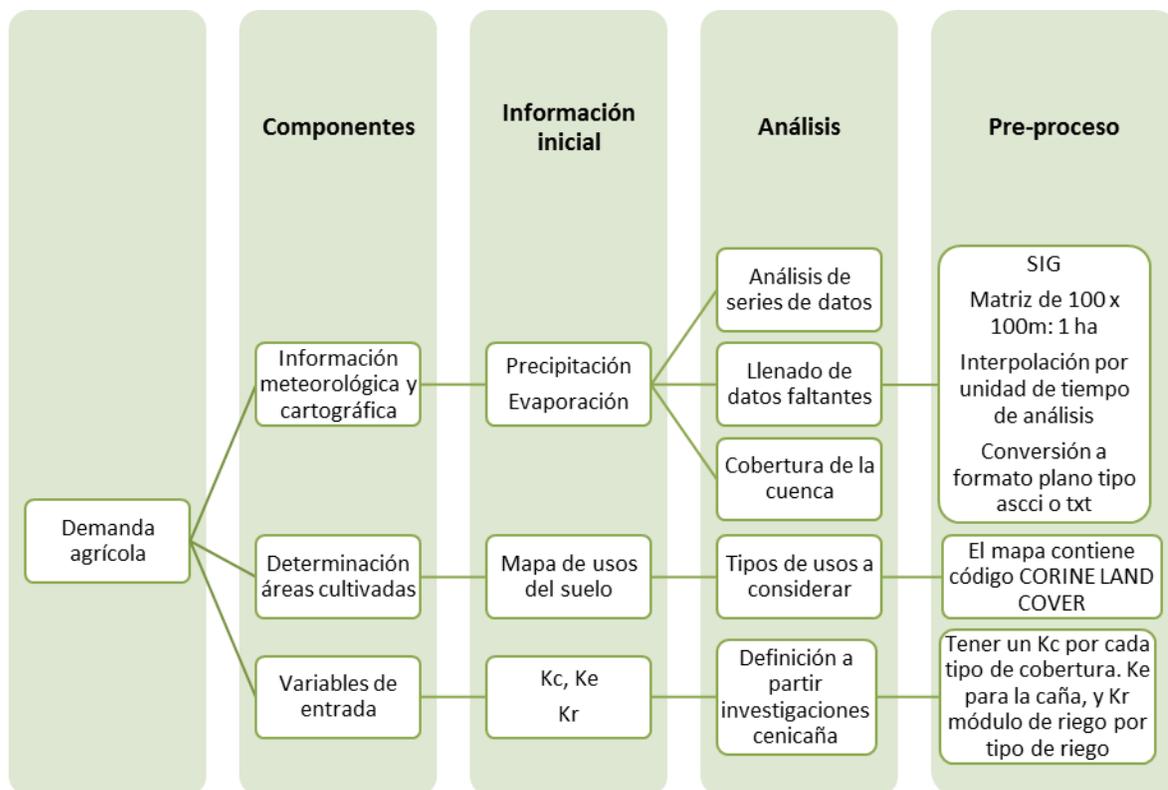


Figura 11. Esquema de metodología planteada para demanda agrícola

En el primer y segundo componente corresponden a la información meteorológica y cartográfica respectivamente, la cual se solicita a las diferentes entidades en la región como CVC, IDEAM y Cenicaña, se seleccionan las estaciones con la ubicación correcta y longitud de registros de más de 10 años. Los datos de precipitación y evaporación se analizan y se realiza llenado de datos faltantes a través del programa Suemulador.

Se solicitó información cartográfica de usos de suelo, hidrología y cuencas, se procesó y se definió el área de trabajo.

En el tercer componente, se analiza con información secundaria sustentada por el centro de investigación de la caña de azúcar Cenicaña: los coeficientes del cultivo (K_c), coeficiente de eficiencia del riego (K_r) y coeficiente de escorrentía (K_e), los cuales son requeridos en la ecuación 18, de cálculo de demanda agrícola. Se analiza también el área de los diferentes sistemas de riego adoptados en la agricultura de la caña de azúcar, y la distribución porcentual de la edad de los cultivos.

Finalmente, se espacializa en los planos el K_c y K_r distribuida en el área cultivada en caña de azúcar. Con los datos de las estaciones meteorológicas y uso del suelo, se

generan archivos planos de evaporación y precipitación en formato matricial, según la temporalidad definida, también se genera un archivo basado en el uso del suelo con las variaciones del K_c y K_r .

6.2.2 Procesamiento de la información

Para el procesamiento de la información se desarrolló una herramienta de cálculo de la demanda (anexo 10.1), que permitiera generar en forma de matrices y mapas el requerimiento de agua para cada cultivo. La herramienta se diseñó en Matlab (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices" es una herramienta de software matemático que ofrece un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio lenguaje M orientado a matrices fue desarrollado por MathWorks y Cleve Moler donde). El proceso de cálculo se observa en la **Figura 12**.

Los archivos planos en formato ascii generados en SIG, según la temporalidad definida se ingresan en dicha herramienta. A partir de los cuales, la herramienta genera archivos planos en matrices de las demandas de cada periodo contemplado y se genera un archivo con la sumatoria de las demandas, que puede procesarse en Excel para la realización de cálculos y análisis de información.

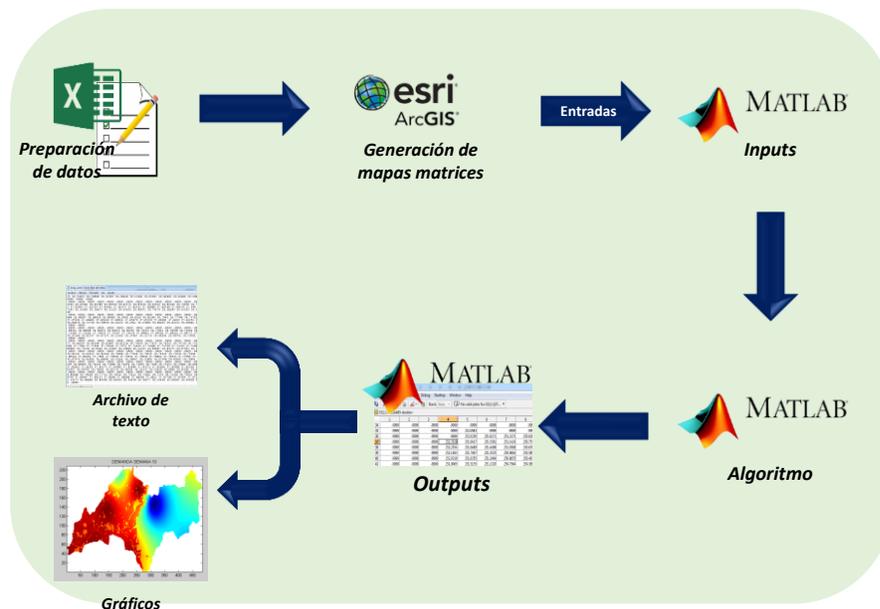


Figura 12. Esquema general para cálculo de la demanda de agua

6.3 DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA PRIORIZADA

6.3.1 Agua superficial

Se utilizó la oferta de aguas superficiales calculada por la autoridad ambiental en el estudio de balance oferta demanda del río Bolo para el año base 2017.

6.3.2 Aguas subterráneas

La oferta de agua subterránea se tomó de lo definido por la CVC en el estudio balance oferta demanda de agua, para el año base 2017. Esta información corresponde al caudal que puede ser explotado de un acuífero durante un tiempo sin provocar efectos no deseados, y está determinado por condiciones económicas (costo de inversión y operación del pozo, rentabilidad de la inversión, etc.), legales (legislación ambiental, derechos previamente adquiridos, etc.) o técnicas (infraestructura existente y características hidrológicas de la zona) que dependen de las circunstancias de cada región (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2017b).

6.4 DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA SATISFACER LA DEMANDA EN LA CUENCA PRIORIZADA

Teniendo en cuenta los requerimientos del modelo *WEAP*, de la capacidad que ofrece el modelo para representar la realidad a la escala del interés del estudio y de la información disponible se realizaron los siguientes pasos:

Desarrollo del modelo: entrada de datos y corridas iniciales definición de zonas de interés a analizar y según la disponibilidad de estaciones de control para la posterior calibración y validación del modelo.

Calibración: se calibró el modelo comparándolo con los datos reales que estaban disponibles.

Uso del modelo, generación de escenarios: la agricultura de la caña de azúcar como es una de las actividades económicas principales en el Valle del Cauca y como ya se ha expuesto en el documento, depende de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, donde su disponibilidad está sujeta a la capacidad de almacenamiento,

regulación de las cuencas y de la variabilidad climática que afecta la zona. Conocer e identificar los procesos predominantes en las cuencas permitirá desarrollar y optimizar herramientas para la gestión y planificación de los recursos hídricos de modo de predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca ante diferentes escenarios hidroclimáticos y de planificar y/o desarrollar planes de respuesta ante escenarios desfavorables. Por tanto, se planteó realizar los siguientes escenarios:

- **Escenarios de gestión en la demanda:** modificando eficiencias en los diversos sistemas de riego, en la conducción y aplicación.
- **Escenarios de obras hidráulicas:** presentar posibles opciones obras de almacenamiento o incremento de la oferta para periodos secos.

Dentro de las posibles alternativas de solución, el propósito es manejar y analizar alternativas factibles, su impacto en los objetivos múltiples y el riesgo asociado a ellos, su viabilidad económica y la posibilidad de ponerse en práctica en terreno. Las estrategias abarcarán gestión en la demanda, posibilidades de obras de regulación y almacenamiento, alternativas de aumento de la oferta en periodos secos, administración del agua.

7. RESULTADOS

7.1 DIAGNÓSTICO DE CUENCAS EN EL VALLE DEL CAUCA

De la información analizada para comparar el estado de la disponibilidad de las cuencas de los ríos del Valle del Cauca, se encontró que dos estudios son determinantes para la definición de la zona de priorización: los balances hídricos oferta demanda y el índice de escasez.

7.1.1 Balances hídricos oferta y demanda de aguas superficiales para las cuencas del Valle del Cauca

El balance oferta demanda realizado en el año 2008 por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC se resume en la **Tabla 9**, en dicha tabla se resaltan en rojo las cuencas que presentan déficit de agua (12 de las 14) y se observa que la mayoría presenta balance negativo en los meses de Julio y Agosto, pero que además las cuencas del río Amaime, Nima y el Cerrito presentan déficit en enero y adicionalmente en febrero en el Cerrito. De acuerdo con la tabla, la cuenca del río Bolo, al igual que otras cuencas de la región, es una de las que presenta balance más negativo para los meses de julio y agosto, con un total al año de solo 3,3 mm de agua, lo que indica que es altamente deficitaria.

Tabla 9. Resumen balance de aguas para cuencas del Valle del Cauca (mm de agua) para el año 2008. **Fuente:** (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2008)

No	Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1	Desbaratado	88,1	74,4	92,6	91,9	84,4	54,3	-75	-116,5	32,8	86,2	120,3	102,2	635,6
2	Fraile	51,6	37,4	50,1	49,2	41,3	22	-98,1	-135,4	10,3	45,1	75,1	61,2	209,9
3	Bolo	25,4	17,4	24,1	28,3	33,1	8,9	-104,9	-126,6	16,6	21,6	29,3	30,1	3,3
4	Amaime-Nima	-17,3	33,8	39,7	41,8	42,3	10,3	-84,5	-111,1	19,6	31,5	45,8	40,9	92,6
5	Cerrito	-77,3	-6,4	18,3	20,6	15,6	-34,6	-130,4	-131,9	2,0	14,7	27,4	20,4	-253,4
6	Sabaletas	19,2	31,8	42,0	55,0	43,0	-12,8	-107,6	-107,2	10,1	41,5	66,0	53,0	134,0
7	Guabas	1,5	68,2	95,8	110,4	97,2	-1,9	-111,7	-124,2	20	76,6	128,8	109,7	470,4
8	Sonso	14,1	34	39,2	48,5	53,6	47,2	-10,5	-5,5	22,2	33,5	45,4	48,8	365,7
9	Guadalajara	29,7	32,4	44	48,6	48,8	34,9	-42,9	-42,2	22,3	40,0	52,4	47,9	316,0
10	Tuluá	145,2	125,3	153,7	196,9	221,3	164,1	67,7	38,4	91,9	152,6	224	191,9	1773,2

Alternativas para satisfacer el requerimiento de agua de cultivos de caña de azúcar

11	San Pedro	17	17,5	24,7	25,3	20,5	12,5	-52,7	-37,2	12,6	17,3	24,8	22	104,3
12	Morales	15,3	14,2	21,1	30	32,4	22,4	-17,75	-27,2	12,6	27,7	37,9	27,9	196,6
13	Bugalagrande	73,8	83,2	92,4	130,2	132,7	104,6	42,4	11,5	55	110,6	150	133,9	1120,3
14	La Paila	6,8	44,3	61,7	105,5	110,5	70,7	8	-4,9	36,6	95,6	133	110,4	778,0

Posteriormente en el año 2017 (ver **Tabla 10**), se realizó nuevamente el balance, donde la demanda suma cuatro sectores, doméstico, industrial, pecuario y agrícola. El sector agrícola tiene una mayor demanda para los meses de junio, julio y agosto, periodo en los que el balance se presenta en la mayor parte de las cuencas del Valle del Cauca en negativo. La oferta del balance del 2017 tiene adicionalmente la oferta de aguas subterráneas que no fue tenida en cuenta en el balance del 2008, es por esta razón que los resultados del balance del 2017 son menores que el de 2008, lo que demuestra que a pesar del uso alternativo de aguas subterráneas la demanda supera la oferta.

La cuenca del río Bolo presenta para el mes de julio el balance negativo más alto (-69,6 mm) de todas las cuencas del Valle del Cauca, igual ocurre para el mes de agosto con un balance de -95,9 mm. Este déficit se presenta justo en los meses donde la demanda agrícola es mucho mayor. Estos datos pueden incidir para que la cuenca del Bolo presente el balance total más bajo del suroriente del departamento (Desbaratado, Fraile, Amaime-Nima, Cerrito, Sabaletas) con 526,8 mm (**Tabla 10**). Según estos resultados para la cuenca del río Bolo es necesario buscar una alternativa diferente para abastecimiento en períodos secos.

Tabla 10. Balance hídrico cuencas del Valle del Cauca para el año 2017
Fuente: adaptado de (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2017)

No	Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1	Desbaratado	130,5	112,8	132,1	125,9	124,3	107,9	11,8	-39,5	82,1	107,9	136,2	142,6	1174,5
2	Fraile	102,7	81,4	100,5	96,9	93,0	66,1	-34,2	-65,0	61,5	98,2	124,9	115,4	841,2
3	Bolo	69,7	61,6	69,8	71,1	74,9	67,8	-69,6	-95,9	59,2	64,5	73,4	80,2	526,8
4	Amaime-Nima	90,0	88,5	99,5	99,1	102,0	73,5	-17,5	-41,5	74,4	91,9	100,2	105,8	866,0
5	Cerrito	31,8	67,2	78,7	79,9	75,5	40,5	-58,6	-71,1	53,9	74,1	88,9	89,3	550,1
6	Sabaletas	91,5	94,6	115,6	120,8	109,9	57,4	-39,3	-47,4	71,1	112,7	140,7	132,9	960,5
7	Guabas	147,1	160,2	202,3	214,3	202,0	114,8	-4,5	-22,6	94,2	183,6	267,5	249,4	1808,2
8	Sonso	68,1	65,5	73,5	76,6	82,4	67,2	-22,9	-31,3	60,5	67,2	75,3	80,5	662,5
9	Guadalajara	60,2	52,2	67,2	69,3	71,4	59,8	-19,4	-28,1	47,5	63,6	72,6	72,0	588,3

Alternativas para satisfacer el requerimiento de agua de cultivos de caña de azúcar

10	Tulúa	234,6	208,3	271,9	322,7	402,4	332,4	224,1	130,5	175,4	264,6	351,1	303,6	3221,4
11	San Pedro	14,1	15,2	22,4	20,9	17,8	8,7	-66,9	-71,4	11,0	16,5	21,4	19,9	29,7
12	Morales	47,4	39,7	55,1	71,7	73,5	51,7	20,7	-1,4	36,5	63,1	81,3	69,1	608,6
13	Bugalagrande	145,0	124,9	145,8	175,5	180,0	147,2	92,6	51,0	97,7	150,8	195,0	192,1	1697,7
14	La Paila	66,8	57,8	77,6	127,7	121,4	80,0	23,3	-12,6	44,2	109,7	151,2	140,3	987,5
15	las cañas	-0,8	5,3	6,6	8,7	9,6	7,3	-17,0	-38,9	5,8	7,3	9,4	7,5	10,7
16	Obando	13,9	22,2	25,7	26,9	28,0	25,6	24,9	24,1	24,0	26,9	27,7	27,1	297,1
17	Los Micos	-24,7	12,7	21,4	28,6	33,7	23,8	3,7	-8,8	16,1	24,7	32,1	25,3	188,6
18	La Vieja	1.254,6	974,4	1.248,7	1.436,5	1.531,6	1.077,5	734,6	508,9	591,2	1.174,7	1.947,3	1.900,9	1.4342,2

En la **Figura 13** se observa la ubicación de las cuencas mencionadas en el departamento del Valle del Cauca. La cuenca del río Bolo está referenciada con el número 3.

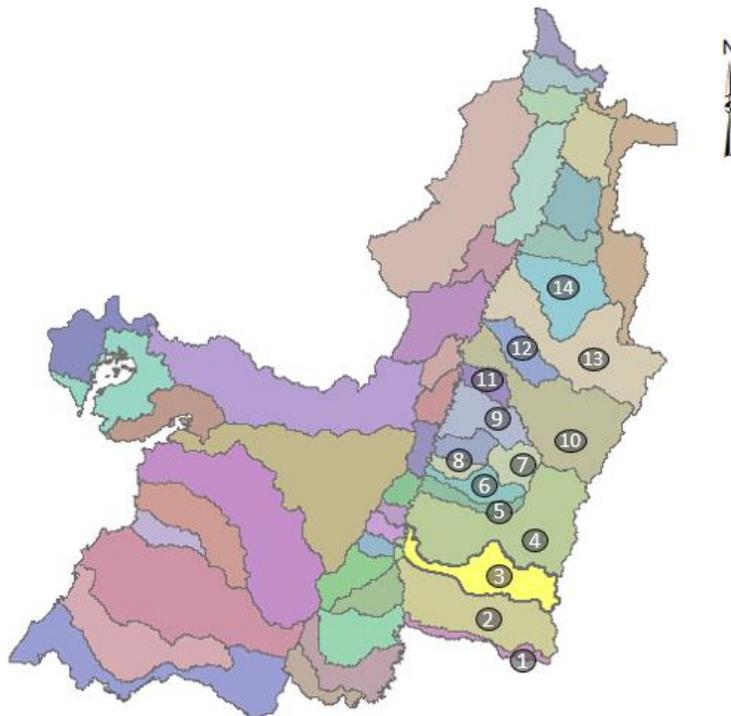


Figura 13. Ubicación de las cuencas del Valle del Cauca

Fuente: Adaptado de (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2006; Marín Valencia, 2010)

7.1.2 Índices de escasez

En la **Tabla 11** se observa que el índice de uso del agua IUA (antes índice de Escasez IE) para la cuenca del río Bolo presenta una valoración de crítico para el año

2017, y corresponde al octavo valor más alto entre las cuencas analizadas, ya que es superado ampliamente por las cuencas Las Cañas (20.287ha y 425,4 de IUA), El Cerrito (330,0 IUA), Los Micos (28.228 ha y 142,5 de IUA), Obando (19.901 ha y 132,1 de IUA), Sabaletas (131,1 IUA) y San Pedro (131,0 de IUA) que son cuencas relativamente pequeñas y presentan un porcentaje menor de presencia del cultivo de caña de azúcar en la zona consumidora, mientras que la cuenca del río Bolo tiene más del 50% del área en cultivo de caña de azúcar en la zona consumidora, lo que la hace una cuenca representativa para la problemática que se está analizando.

Tabla 11. Resumen por cuenca de índices de presión sobre recurso hídrico.
Fuente: adaptado de (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2017a)

No	Cuenca	índice de Escasez (IES)		IUA		Variación
		agua superficial-2007		Agua superficial – 2017		
		IE (anual) %	Valoración	IUA (anual) %	Valoración	
1	Desbaratado	73,1	Alto	69,4	Muy alto	3,7
2	Fraile	153,6	Alto	165,0	Crítico	-11,4
3	Bolo	110,2	Alto	103,8	Crítico	6,4
4	Guachal	146,5	Alto			
5	Amaime-Nima	88,8	Alto	78,8	Muy alto	10,0
6	El Cerrito	354,6	Alto	330,0	Crítico	24,6
7	Sabaletas	169,1	Alto	131,1	Crítico	38,0
8	Guabas	107,5	Alto	53,1	Muy alto	54,4
9	Sonso	48,2	Alto	73,1	Muy alto	-24,9
10	Guadalajara	64,4	Alto	56,1	Muy alto	8,3
11	Tulua	30,8	Medio	11,0	Moderado	19,8
12	San Pedro	81,4	Alto	131,0	Crítico	-49,6
13	Morales	64,5	Alto	23,7	Alto	40,8
14	Bugalagrande	38,3	Medio	10,5	Moderado	27,8
15	La Paila	47,4	Alto	21,9	Alto	25,5
16	Las Cañas	405,2	Alto	425,4	Crítico	-20,2
17	Obando	586,8	Alto	132,1	Crítico	454,7
18	Los Micos	222,2	Alto	142,5	Crítico	79,7
19	La Vieja	31,2	Medio	1,1	Bajo	30,1

7.2 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA PRIORIZADA O CUENCA DEL RÍO BOLO

7.2.1 Ubicación e hidrología del área de estudio

La cuenca del río Bolo se ubica en el flanco Occidental de la cordillera Central, en jurisdicción de Pradera, Palmira y Candelaria (ver **Figura 14**). Limita con el río Amaime al Norte, el Tolima al oriente, el valle geográfico del Río Cauca al occidente y la cuenca del río Fraile al sur. Posee 370 km², un gran porcentaje del área corresponde al

municipio de Pradera (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012b).



Figura 14. Ubicación cuenca del río Bolo
Fuente: (GeoCVC)

Desde su nacimiento, el río Bolo tiene una longitud de 64 Km, sus principales afluentes son:

- Ríos: Aguaclara, Bolo Blanco y Bolo Azul
- Quebradas: El Silencio, El Danubio, Los Negros, El muerto, Tamboral, El Tablón y La Leona.

La cuenca se ha delimitado por parte de CVC con 6 áreas de drenaje o subcuencas referenciadas por ha y el rango altitudinal, así: río bolo Azul, quebrada Bolo Blanco, Zona media, quebrada La Leona, río Aguaclara y Zona Plana (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012c).

Tabla 12. Subcuencas río Bolo
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012c)

Subcuenca	Área	Rango altitudinal
Subcuenca río Bolo Azul	9.618 ha	4.000 y 1.550 msnm
Subcuenca quebrada Bolo Blanco	4.262 ha	4.050 y 1.600 msnm
Zona media	2.724 ha	3.000 y 1.105 msnm
Subcuenca quebrada La Leona	1.613 ha	2.150 y 1.035 msnm
Subcuenca río Aguaclara	11.141 ha	1.850 y 1.000 msnm
Zona Plana	14.382 ha	1.000 y 940 msnm
Total	43.740 ha	

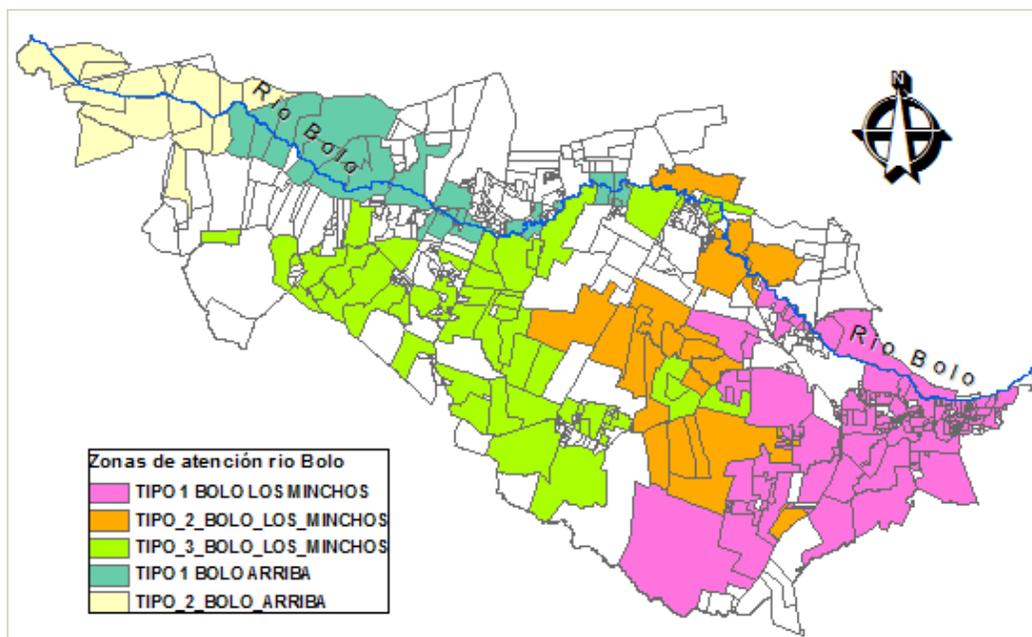


Figura 16. Zonas de atención río Bolo

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2006)

Adicionalmente, para cada zona de las mencionadas en la figura anterior se definieron reglas de operación como se observa en la **Tabla 13**. Allí se puede constatar que las zonas más críticas para la época del análisis eran (y siguen siendo) la zona 2 y 3 de los Minchos y la zona 1 Bolo arriba ya que alrededor de la mitad del área depende de aguas subterráneas. Adicionalmente, la zona 2 de los Minchos se abastece con caudales en la curva de duración entre 40% y 75% y la zona ZA2 arriba el 60% al 74%, es decir que el agua superficial está garantizada en promedio la mitad del tiempo. Se puede afirmar que el agua superficial cubre 6141 ha, el 75% del tiempo que corresponde al 25% del área de consumo. Lo cual la confirma la necesidad de requerimiento de agua en esta cuenca.

Tabla 13. Descripción del abastecimiento por zonas de atención
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2006)

ZONAS DE ATENCIÓN	AREA BENEFICIADA CON AGUAS SUPERFICIALES (ha)		AREA BENEFICIADA CON AGUAS SUBTERRÁNEAS O POZOS (ha)		TOTAL	ABASTECIMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL
ZA1 LOS MINCHOS	4.623	94%	306	6%	4.929	75% (C.D.C) del tiempo
ZA2 LOS MINCHOS	2.334	53%	2.059	47%	4.393	40% - 70% de la CDC y/o por los sobrantes que se pueden generar en la zona de

						atención 1 (Z1 Los Minchos)
ZA3 LOS MINCHOS	4.890	58%	3.568	42%	8.458	Excedentes de la CDC. por los sobrantes que se puedan generar en la zona de atención 1 y 2.
ZA1 ARRIBA	2.247	50%	2.270	50%	4.517	75% de la CDC
ZA2 ARRIBA	1.518	75%	496	25%	2.014	60% - 74%
OTRAS FUENTES	939	100%			939	
	16551		8700		25251	

El suministro de agua se realiza con fuentes superficiales y subterráneas en diferente proporción debido a que el porcentaje de disponibilidad de agua en el río no es permanente en el tiempo y difiere de una zona a otra como se pudo detallar en la **Tabla 13**. En la **Figura 17** se detallan los predios que tienen suministro de pozos profundos y los predios que se abastecen del río a través de sus 5 derivaciones y cauce principal.

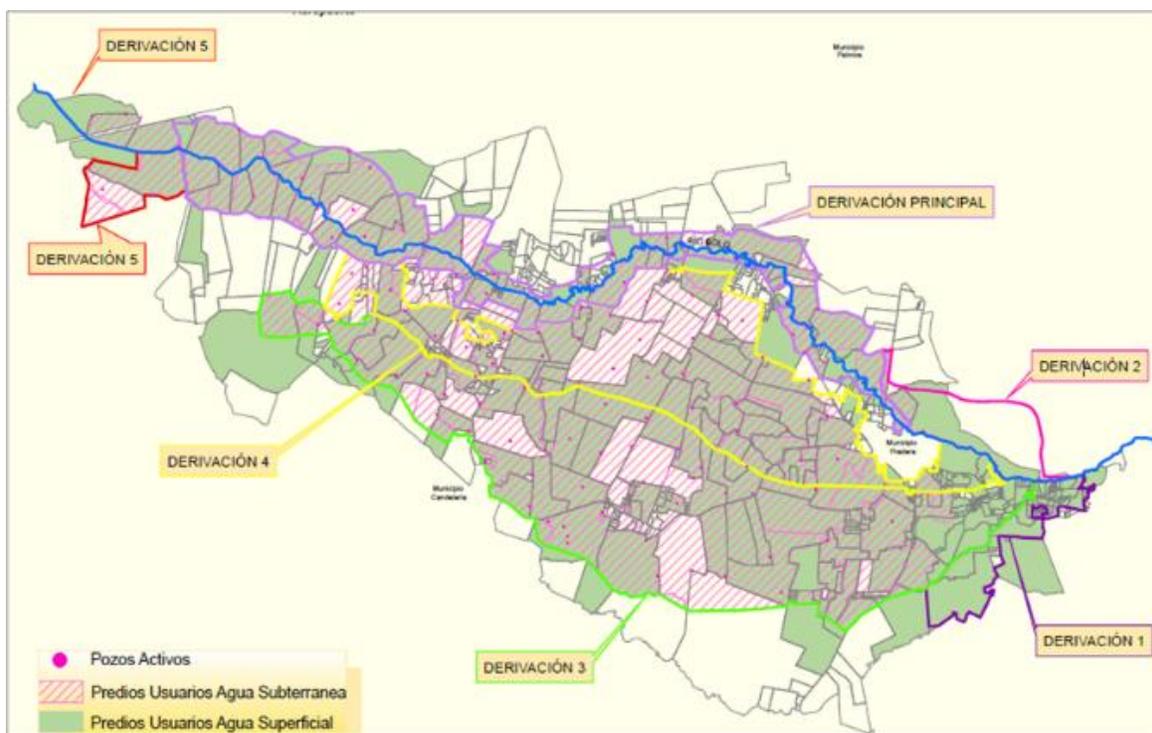


Figura 17. Distribución aguas superficiales y subterráneas
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2006)

Con la información analizada en el proyecto de administración de aguas del río Bolo y en la resolución reglamentaria del río Bolo (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012) se puede afirmar que el 62% del área se abastece de aguas superficiales, el 34% del área se abastece de aguas subterráneas y el 4% restante de otras fuentes de cuencas vecinas como el río Fraile, Párraga, zanjón zumbaculo entre otros (ver **Tabla 14**).

Tabla 14. Distribución de suministro de agua por fuente en cuenca del río Bolo
Fuente: Adaptado de (Corporación Autónoma del Valle del Cauca CVC, 2006)

Fuente de abastecimiento	Área (ha)	%
Aguas superficiales	15.612	62%
Aguas subterráneas	8.700	34%
Otras fuentes	939	4%
	25.251	100%

Embalses

En la cuenca del río no existen embalses, aunque algunos usuarios tienen reservorios prediales.

Captaciones y derivaciones

Las aguas subterráneas se captan a través de pozos profundos construidos por los propietarios de los predios. Según la reglamentación de corrientes del río Bolo (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2012b) en el bolo existen un total de 186 pozos perforados donde el 59% se encuentran activos y atienden un área aproximada de 8700 ha.

Existen 4 derivaciones colectivas, con sus respectivas subderivaciones y ramificaciones en canales abiertos en tierra o quebradas establecidas en terreno por varios km con captaciones a gravedad laterales y posteriormente particiones. Otras captaciones se realizan por bombeos directos del cauce principal o de las derivaciones y ramificaciones. Bajo estas condiciones existen pérdidas de agua como las que se ilustran en la figura antes de llegar a los predios que manejan distintos sistemas de riego.

Red de distribución

Existe una red de distribución en canales en tierra establecidos en el territorio tiempo atrás con vegetación riparia, que recorre varios kilómetros y en la cual se presentan pérdidas por evaporación e infiltración principalmente. Se ha calculado que existen aproximadamente 133 km de canales de distribución (ver **Tabla 15** y **Figura 18**).

Tabla 15. Canales de distribución río Bolo

Tramo	Km
Quebrada El Tamboral	2,40
Derivación 1 a Derivación 3	1,74
Derivación 3 a Derivación 4	1,55
Derivación 3 a Planta Castilla	3,12
Salsipuedes	4,50
El Muerto	2,20
El Cairo	2,30
Chumbum	6,60
El Cairo a Chumbum	1,70
Zanjón Bolito	10,92
Zanjón Guabinas	3,50
Candelillo	1,10
Subderivacion 1-3	1,60
Rio Bolo a la Union con Frayle	43,32
Estacion Los Minchos a Madre Vieja	22,31
Madre Vieja a la Unión con Fraile	21,01
Otros	5,00
	132,87

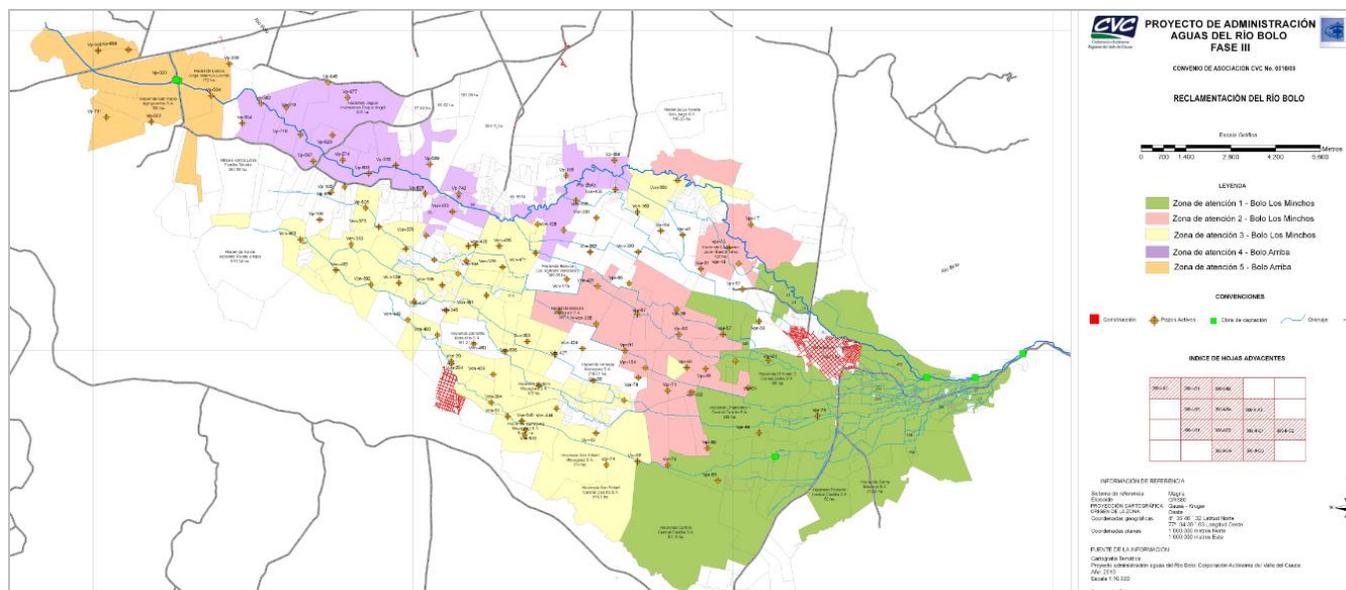


Figura 18. Red de distribución río Bolo

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2006)

7.2.3 Balance hídrico en la cuenca del río Bolo

En la **Tabla 16** se presenta el balance de oferta y demanda por mes y anualizado, donde se demuestra que para los meses de julio y agosto el déficit es provocado por la demanda agrícola, representada en su mayoría por el cultivo de caña de azúcar.

Tabla 16. Balance hídrico (mm) cuenca del río Bolo

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2017)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Oferta superficial	31,5	27,1	31,6	34,1	36,8	30,9	29,3	26,2	22,3	26,3	36,4	42,0	374,6
Oferta subterránea	42,5	38,4	42,5	41,1	42,5	41,1	42,5	42,5	41,1	42,5	41,1	42,5	500,2
OFERTA TOTAL	74,0	65,5	74,1	75,2	79,2	72,0	71,8	68,7	63,4	68,8	77,5	84,5	874,8
Demanda doméstica	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	13,5
Demanda industrial	2,3	2,1	2,3	2,2	2,3	2,2	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2	2,3	27,3
Demanda pecuaria	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	9,9
Demanda agrícola	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	137,1	160,3	0,0	0,0	0,0	0,0	348,1
DEMANDA TOTAL	4,2	3,9	4,2	4,1	4,2	4,1	141,4	164,6	4,2	4,3	4,2	4,3	348,1
BALANCE	69,7	61,6	69,8	71,1	74,9	67,8	-69,6	-95,9	59,2	64,5	73,4	80,2	526,8

7.3 CÁLCULO DE LA DEMANDA DE AGUA AGRÍCOLA PARA LA CAÑA DE AZÚCAR EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO

7.3.1 Determinación de las variables de entrada

Para aplicar la ecuación de requerimientos hídricos de la caña de azúcar, se requiere la siguiente información:

1. Resolución temporal a utilizar en el análisis y año de estudio,
2. Precipitación y Evaporación
3. Área sembrada de caña de Azúcar en el área de estudio y edad de los cultivos,
4. Coeficiente de cultivo, K_c
5. Coeficiente de eficiencia de riego, K_r
6. Precipitación efectiva, K_e

7.3.1.1 Análisis del periodo de análisis adecuado para la demanda de la caña

El cálculo de la demanda se realiza generalmente de forma mensual en los ejercicios de planificación de las entidades encargadas del manejo del recurso hídrico en la región, sin embargo, la distribución de la precipitación dentro del mes no necesariamente abastece el requerimiento del cultivo cuando lo necesita.

Se hizo el siguiente análisis con datos reales de campo tomados del ingenio Mayagüez, para definir cómo se debía realizar el cálculo de la demanda para caña de azúcar.

Para una hacienda de 80 ha con área de influencia de la estación Candelaria de la red automatizada de Cenicaña, con una eficiencia de riego de 56% en riego por gravedad en un cultivo que inició en enero y se cosechó en diciembre del año 2015, se realizó el cálculo de la demanda de forma mensual (**Tabla 17**).

$$Da = 10 \sum_{d=1}^{lp} \frac{[(Kc \times ET \rho) - \frac{(P \times Ke)}{100}]}{Kr} \times A$$

Se aplicó la ecuación (4)

descrita en el marco teórico para el cálculo de demanda agrícola, tanto para el periodo de análisis mensual como semanal. Primero se calculó la demanda acumulada mensual, aplicando la ecuación 4 se tienen en cuenta la precipitación y evaporación

mensual total, para la demanda acumulada semanal se aplica la ecuación 4 para cada semana es decir la precipitación semanal con la evaporación semanal.

Tabla 17. Cálculo semanal de requerimiento de riego para la hacienda Zainera.
Fuente: propia (datos sector)

Mes – edad de la caña	Demanda m ³	
	Acumulada mensual	Acumulada teniendo en cuenta sólo semanas con demanda
mes 1	0	0
mes 2	0	0
mes 3	-106.964	0
mes 4	-86.779	4.886
mes 5	104.107	34.136
mes 6	113.493	195.714
mes 7	104.507	109.793
mes 8	155.914	201.043
mes 9	121.414	199.607
mes 10	9.114	310.800
mes 11	-207.042	0
mes 12	-23.524	0
TOTAL DEMANDA (m3)	608.550	1.055.979
<i>Área de la hacienda (ha)</i>		80
<i>m³/ ha riego (dato campo)</i>		1390
<i>Área regada cálculo (demanda m³/ m³/ha)</i>	437,8	759,7
<i>Número de riegos calculados (Área total regada)/(Área de la hacienda)</i>	5	9

La demanda presentó semanas con demandas positivas a pesar que el cálculo mensual mostraba menos demanda o incluso déficit (datos negativos), en la demanda acumulada se tiene en cuenta los valores de demanda semanales positivos dentro del mes. En el mes 4 se puede observar que en el método mensual muestra que no necesita riego, mientras el método de cálculo semanal muestra que sí hubo un periodo de déficit de agua. El número de eventos de riego según el cálculo mensual de la **Tabla 17** es inferior al requerimiento evidenciado en campo, mientras los resultados del cálculo semanal coinciden con la información recolectada por los administradores de la hacienda, es decir que 9 riegos fue la demanda real que se presentó en campo para esta hacienda en el año 2015.

Se evaluó la posibilidad de hacerlo con acumulados decadiarios (acumulando la lluvia de 10 días), pero el formato semanal sirve para los escenarios de alternativas de turnos de riego, por tanto, la temporalidad definida es semanal.

Selección del año de análisis

Comportamiento histórico del ONI por trimestres resaltan en rojo los trimestres con el Índice Oceánico $>0,5$ lo que corresponde a un periodo El Niño y en azul los trimestres con valor del ONI menor $-0,5$ lo que corresponde a un periodo La Niña. Se tomó para el análisis el año 2013, ya que fue un año neutro en todos los trimestres.

7.3.1.2 Información meteorológica y cartográfica de la cuenca río Bolo

La información cartográfica fue solicitada a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Para la precipitación se seleccionaron 7 estaciones de la red hidroclimatológica de Cenicaña, y 3 estaciones de CVC, las que muestran en la **Tabla 18**. Estas estaciones fueron elegidas por presentar períodos concurrentes y ubicación representativa en la región y alrededor de ella.

De la información de la **Tabla 18** y de la se puede concluir que las precipitaciones más bajas de la cuenca se encuentran en la parte plana de la cuenca teniéndose precipitaciones anuales de entre 885 y 1.140 mm, mientras que en las partes más altas se pueden encontrar precipitaciones promedio anuales hasta de 1.522 mm. Con esta información se realizaron los mapas de precipitación para las 53 semanas de análisis.

Tabla 18. Precipitación media mensual multianual de las estaciones seleccionadas para la zona de estudio cuenca río Bolo

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Aeropuerto	56	57	81	124	97	59	31	45	52	90	114	80	885
Arroyohondo	72	63	87	147	115	69	41	43	49	95	108	89	978
Candelaria	74	75	110	140	116	76	30	34	61	94	123	96	1.031
Cenicaña	100	91	141	154	97	47	32	29	99	137	138	78	1.142
El Avelino	70	81	103	126	152	175	181	136	91	131	123	87	1.458
La Sirena	115	114	130	133	111	80	66	47	68	187	209	150	1.409
Los Minchos	66	156	79	222	150	30	8	46	30	168	154	131	1.240
Palmira san	72	87	134	125	99	50	36	34	65	124	131	97	1.054
Pradera	92	81	120	153	106	57	31	28	55	139	146	73	1.081
Ptar_cali	56	62	91	138	113	55	42	37	59	86	111	83	933

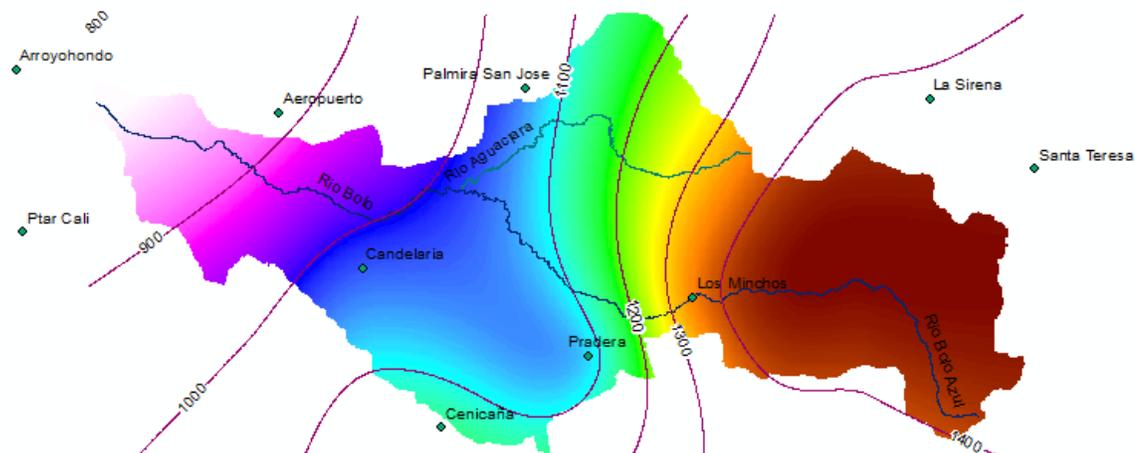


Figura 19. Isoyetas cuenca del río Bolo

Para la evaporación fueron seleccionadas 8 estaciones, que se observan en la **Figura 20** y en la **Tabla 19**, donde se observa que la variabilidad entre la zona plana de la cuenca y la parte alta oscila en 1.000 mm de diferencia. La sirena representa la estación que se encuentra en la parte alta de la cuenca, con un promedio mensual multianual de 438 mm, mientras que las estaciones de la parte plana presentan un comportamiento más uniforme, siendo la estación aeropuerto hacia el corregimiento de Rozo la del valor más alto de evaporación, lo que coincide ampliamente con el reconocimiento de esta zona como un área con una alta exigencia en riego para cultivos de caña de azúcar.

Tabla 19 Evaporación media mensual multianual de las estaciones seleccionadas para la zona de estudio cuenca río Bolo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
PTAR Cali	133	131	138	134	132	118	152	170	161	150	122	140	1 683
Aeropuerto	145	147	156	136	133	136	154	174	169	162	141	149	1 802
Arroyohondo	136	136	152	131	125	125	150	172	172	147	125	134	1 706
Candelaria	144	140	145	135	126	122	139	152	151	147	129	134	1 665
Cenicana	133	126	135	123	120	117	132	147	144	140	121	135	1 575
Palmira San José	132	122	133	119	115	111	131	137	136	134	119	114	1 502
Pradera	147	134	142	125	117	113	131	143	143	145	127	142	1 610
La Sirena	42	36	37	33	31	31	37	44	44	39	30	36	438

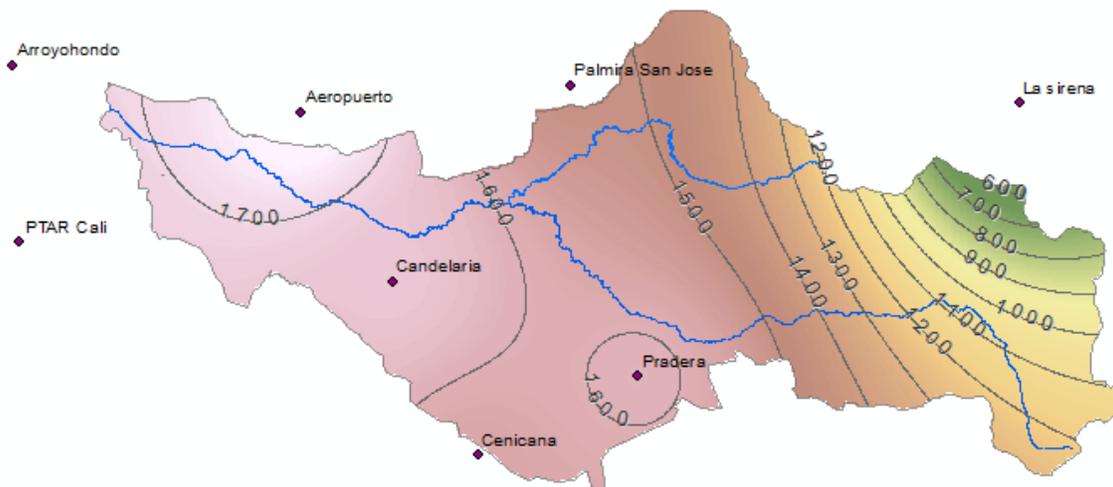
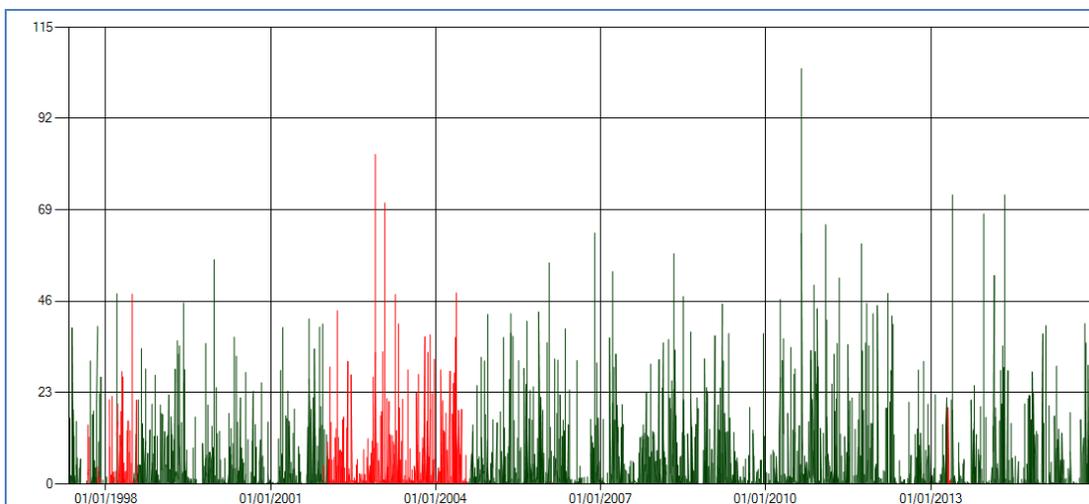


Figura 20. Isolíneas de evaporación cuenca río Bolo
Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos: previo a cualquier manipulación de la información, se realizó un control de la calidad de los parámetros climáticos estudiados. A la información le fueron aplicadas pruebas de consistencia, homogeneidad y chequeo de valores atípicos (*outliers*).

Datos Faltantes: una vez seleccionadas las estaciones de precipitación y evaporación a incluir en el estudio para el análisis de la demanda es necesario analizar las series de datos, inicialmente se encontró que se presentaban datos faltantes.

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó la versión 1 del programa Suemulador para completar las series de datos faltantes de precipitación y evaporación. (**Figura 21**). En rojo se observan los datos simulados o completados. Para realizar el llenado de datos faltantes primero se realizó una preparación previa de los formatos originales de los registros y se adaptaron a los formatos requeridos por el programa Suemulador en formato texto, tanto para precipitación como para evaporación.

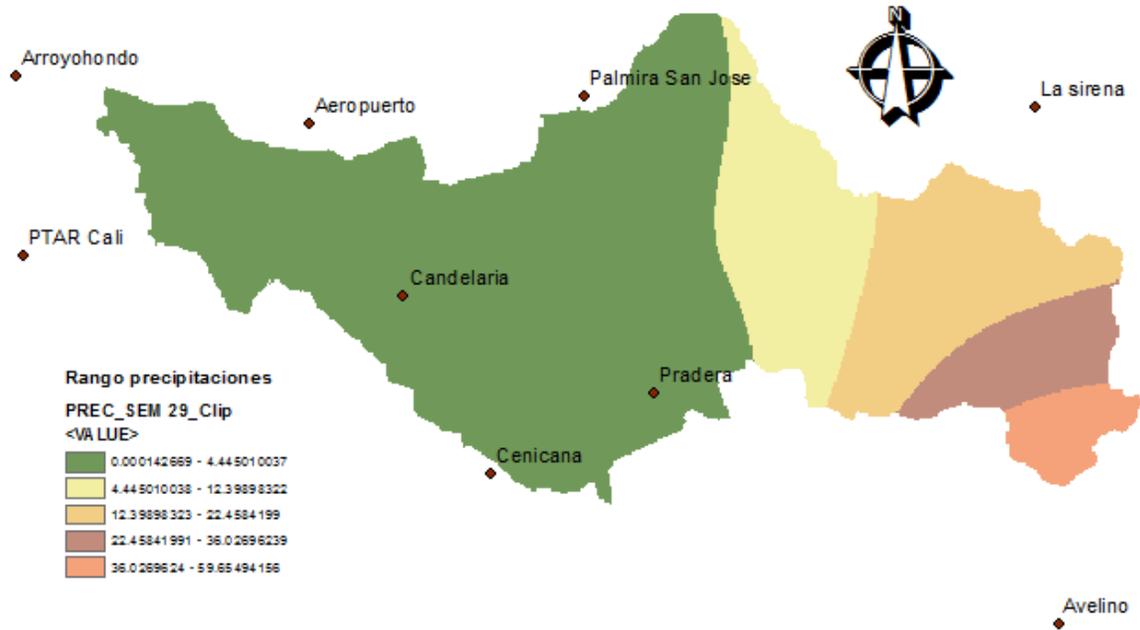


— Observado — Simulado

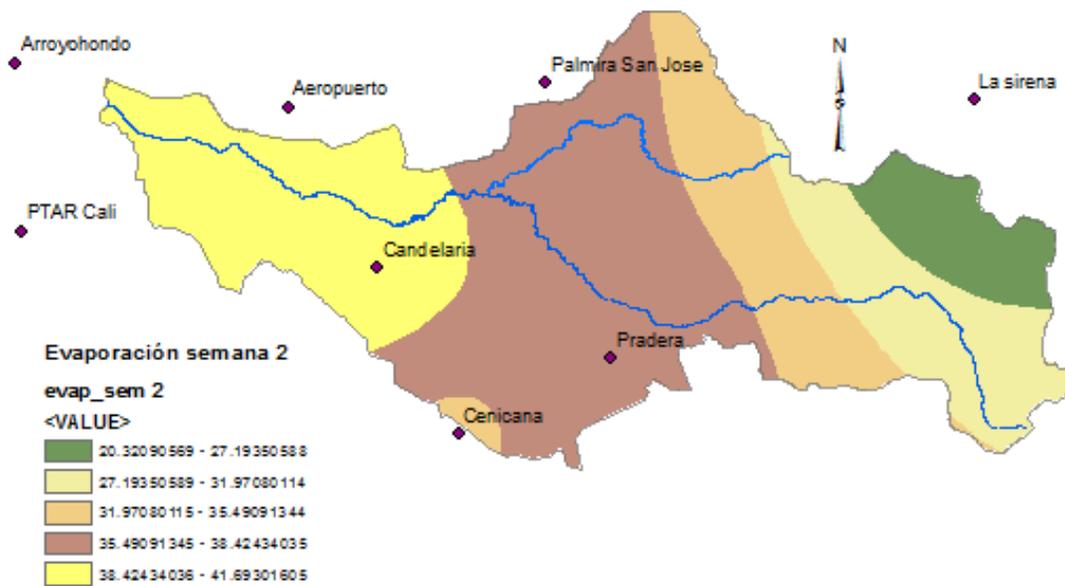
Figura 21. Resultado del llenado de datos faltantes realizado con el software Suemulador

Una vez corregida la información de precipitación y mediante el Sistema de Información Geográfica SIG, ArcGis los datos climáticos fueron espacialmente representados utilizando el método de interpolación IDW con resolución de 100 x 100 m (1 ha, unidad con que se trabaja en la agricultura de la caña) para toda la cuenca.

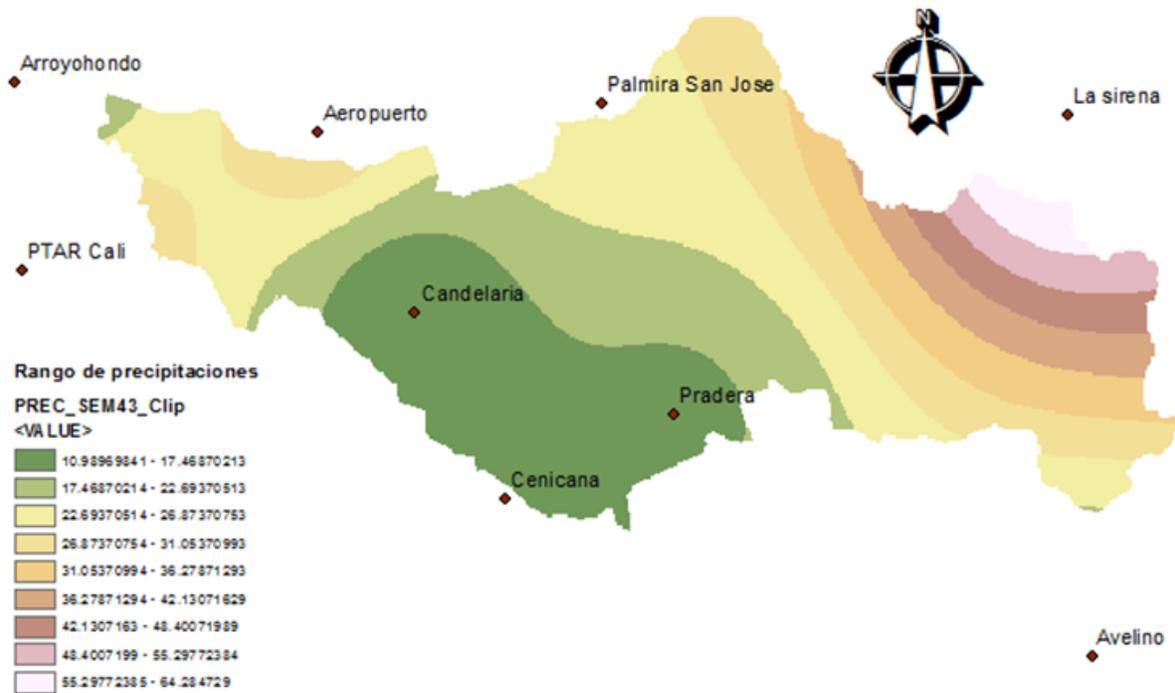
Los datos interpolados fueron precipitación semanal y evaporación representados en 53 mapas. En la **Figura 22. Mapas de precipitación y evaporación semanal interpolados por medio del método IDW**, ya que al realizar los ensayos con polígonos de Thiessen la distribución espacial de la lluvia no se veía bien representada, en la zona se muestran 4 ejemplos de los mapas generados, dos de precipitación y 2 de evaporación. En los mapas de precipitación se puede observar los rangos que existen en la cuenca según la ubicación geográfica, de manera que, en la parte alta se presentan las mayores precipitaciones (color naranja) mientras que la zona baja es más seca (verde), así mismo se puede observar la diferencia temporal del comportamiento de las lluvias entre la semana 43 y la semana 29, comportamiento que también se observa en la evaporación. Por esta razón, se considera de gran importancia la modelación con una alta resolución espacial y temporal.



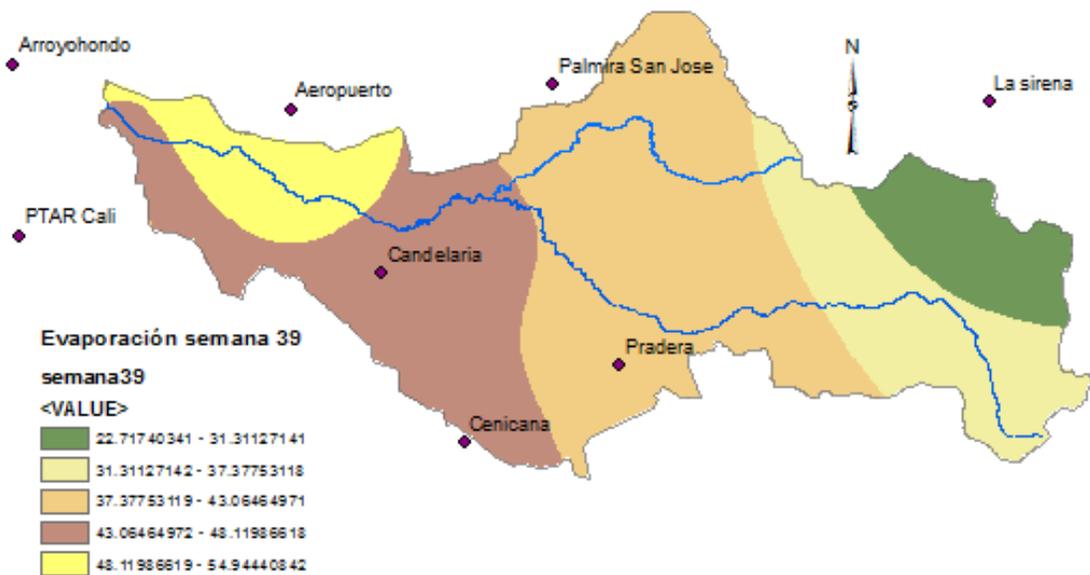
Precipitación para la semana 29 de 2013. Mes Julio.



Evaporación para la semana 2 de 2013. Mes Enero.



Mapa de Precipitación para la semana 43 de 2013. Mes Octubre.



Mapa de Evaporación para la semana 39 de 2013. Mes septiembre

Figura 22. Mapas de precipitación y evaporación semanal interpolados por medio del método IDW

7.3.1.3 Determinación del Coeficiente de cultivo, K_c

El coeficiente de cultivo, depende del tipo de cultivo y de la etapa de crecimiento en que se encuentre la planta. Para lo primero se requiere determinar el área sembrada de Caña de Azúcar y diferenciarlo de los otros cultivos, para lo cual se utiliza el mapa de Uso y Cobertura de la cuenca. Para este caso el mapa de uso y Cobertura del suelo se obtuvo de parte de la CVC para el año 2010, como se muestra en la **Figura 23**.

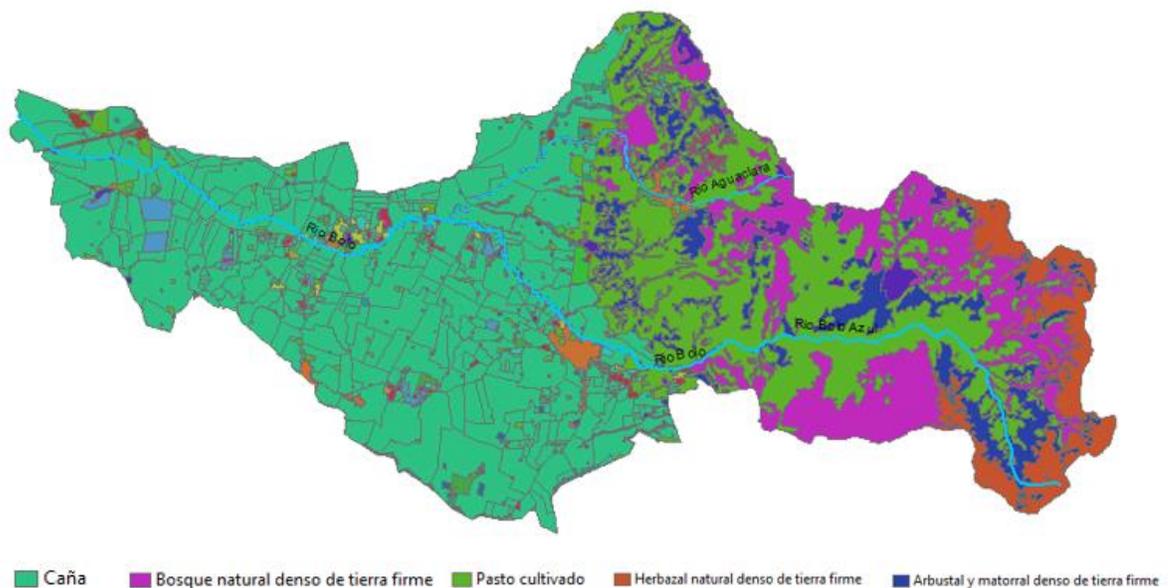


Figura 23. Mapa de uso del suelo en la cuenca del Río Bolo para el año
Fuente: Elaboración propia con datos de CVC

El uso predominante es en caña de azúcar (46%) como se puede ver en la **Figura 24**, seguido por pasto cultivado (22%). Los cultivos de caña de azúcar se encuentran establecidos en la parte plana de la cuenca.

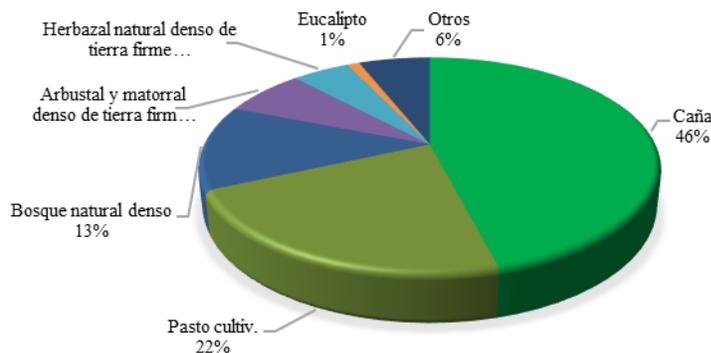


Figura 24. Gráfica de distribución porcentual de los usos del suelo en la cuenca del río Bolo

A partir de dicho mapa se extrajo el área que se encuentra cultivada en caña de azúcar. A partir de allí, se representó en forma de mapa la información de las edades de la caña en el terreno en el periodo de análisis, para esto se generaron mapas según la distribución teórica de edad de la caña como se detalla en la **Tabla 22**. Distribución del área en caña por edades y **Kc** correspondiente en el área de estudio (**Figura 25**).

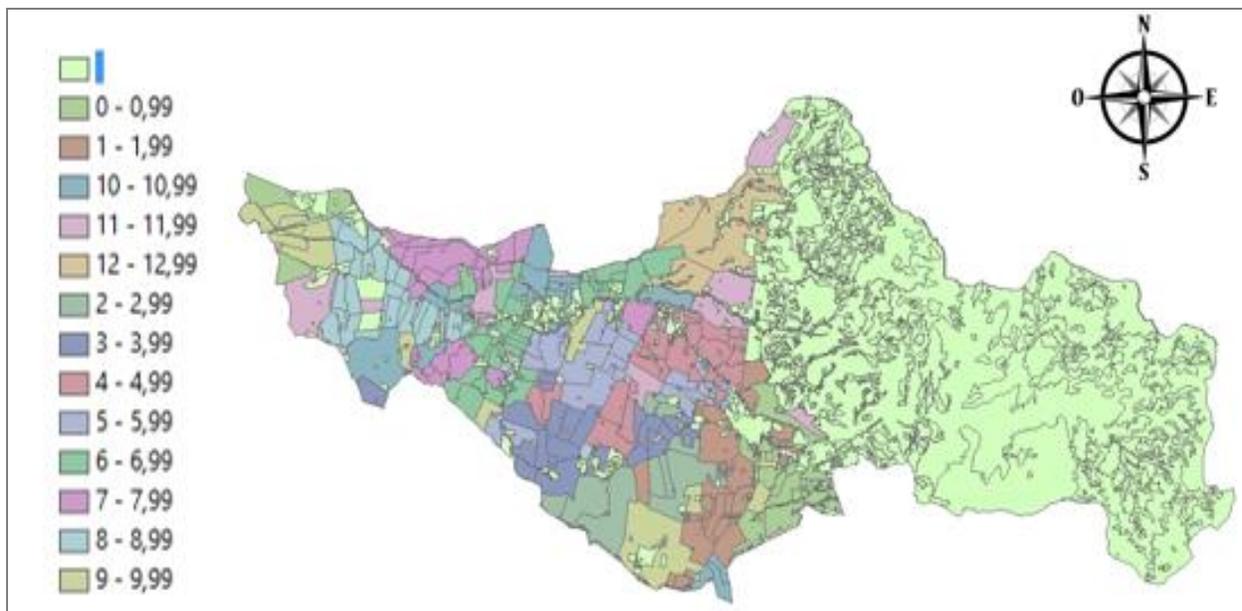


Figura 25. Representación espacial teórica de edades de la caña en la cuenca del río Bolo

Para la determinación del Coeficiente del cultivo a utilizar para la Caña de Azúcar se utilizaron los experimentos realizados por Cenicaña (Valderrama & Trujillo, 2004) en las condiciones ambientales del valle del río Cauca los que han permitido obtener valores de ET de 2,1 mm/día para el periodo de macollamiento (2 a 4 meses) y de 3,1 mm/día para el periodo de rápido crecimiento (4 a 10 meses). Adicionalmente, experimentos de evapotranspiración realizados en lisímetros de percolación con la plantilla y dos socas de las variedades CP 57-603 y MZC 74-275 han permitido encontrar que los requerimientos de agua de la caña de azúcar oscilan entre los 1.050 y 1.300 mm por un ciclo de 13 meses.

En trabajos más actualizados en zonas con nivel freático profundo (>1,2 m) y en condiciones climáticas normales con las variedades CC 85-92, CC 93-3.895 y CC 93-

4.418, se han obtenido los valores de **Kc** (coeficiente de cultivo) para convertir la evaporación del tanque clase A en evapotranspiración $ET = Kc \cdot E$, como se ve en Tabla 20. En las zonas con nivel freático entre 1 y 1,2 metros de profundidad, algunos de los valores de **Kc** se pueden reducir para aprovechar el aporte de agua capilar a partir del nivel freático, pues un nivel freático localizado a 1 metro de profundidad puede aportar hasta el 50% de los requerimientos de agua de la caña, según como se indica en la **Tabla 21**. Valores de Coeficientes de Cultivo **Kc** (Cruz, 2015).

Tabla 20. Valores de Coeficientes de Cultivo **Kc** según edad de cultivo – NF > 1.2m
Fuente: (Cruz, 2015)

Valor de Kc	Edad e la caña de azúcar (meses)
0,3	1-3
0,4	3-4
0,6	4-5
0,7	5-6
0,8	6-8
0,7	8-9
0,6	9-11

Tabla 21. Valores de Coeficientes de Cultivo **Kc** según edad de cultivo – NF < 1.2 m
Fuente: (Cruz, 2015)

Valor de kc	Edad de la caña de azúcar (meses)
0,5	4-6
0,6	6-8
0,5	8-10
0,4	10-11

De manera que, se requería determinar la distribución espacial de la Caña de Azúcar según las edades en la cuenca. Se conoce que la cosecha de la caña de azúcar en el Valle del Cauca se realiza actualmente con una edad promedio de corte de 13 meses, y se corta durante todos los meses del año por tanto se encuentra área sembrada de caña distribuida en los predios en todas las edades durante todos los meses, por tanto se asume una distribución normal de la edad de la caña como se observa en la **Tabla 22**. De manera que teniendo en cuenta que los NF en la zona se

encuentran casi siempre a profundidades mayores a 1,2 metros, se determinó utilizar los valores recomendados por Cruz Valderrama en la **Tabla 20**, a partir de la cual se obtuvieron los valores de **Kc**, para las edades de la caña como se muestra en la **Tabla 22**. Luego se realizó una asignación de edades de Caña por predio con la información suministrada por los cañeros y se asignaron los valores de **Kc**, según la **Tabla 22** obteniendo finalmente el mapa que se observa en la **Figura 26**. Para el ejercicio inicial de cálculo de la demanda de la Caña de Azúcar, se asumieron los demás cultivos con demanda cero ya que el valor de la demanda se asumirá a partir de la información de ejercicios de planificación realizados por la CVC.

Tabla 22. Distribución del área en caña por edades y Kc correspondientes

Edad	% de área	Kc
0 -2,99	7,69%	0,3
3 -3,99	7,69%	0,4
4 -4,99	7,69%	0,6
5 -5,99	7,69%	0,7
6 -7,99	7,69%	0,8
8 -8,99	7,69%	0,7
9 -10,99	7,69%	0,6

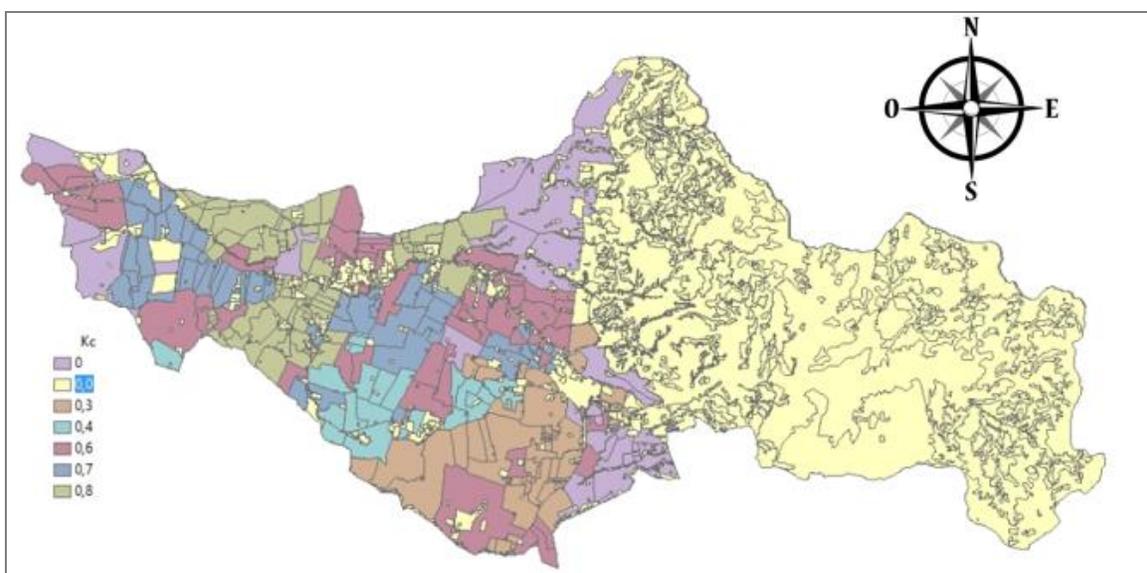


Figura 26. Representación espacial del Coeficiente de cultivo Kc para la cuenca del río Bolo

De manera, que juntando las áreas asignadas a cada Kc según la **Tabla 22**, se obtuvieron las áreas para cada Kc como se muestra en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Área cultivada según la edad del cultivo o *Kc*

<i>K_c</i>	ÁREA	ASIGNADO FINAL	TEÓRICO SEGÚN TABLA 22
NO RIEGO	5.586,30	22,40%	23,07%
0,3	3.856,01	15,00%	15,38%
0,4	1.913,75	7,70%	7,69%
0,6	5.886,88	24,00%	23,10%
0,7	3.874,08	16,00%	15,40%
0,8	3.874,39	16,00%	15,00%
	24.991,41	100,00%	100,00%

Kc para otros cultivos

Los valores de **Kc** para el resto de cultivos fueron tomados de las publicaciones de riego y drenaje de la Organización de Alimentos y Comida de las Naciones Unidas FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006) y se pueden observar en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Coeficiente de cultivo Kc para otros cultivos diferentes a la caña de azúcar

Código	Cultivo	Kc
2112	Eucalipto	0,7
2122	Otros árboles frutales	0,9
2123	Cítricos	0,7
2211	Otros cultivos	0,9
2212	Café	1,0
2213	Cacao	0,9
2214	Papaya	0,8
2215	Vid	0,7
2218	Maíz	0,8
2219	Algodón	1,0
2311	Otros cultivos	0,7
2313	Sorgo	0,7
2314	Soya	0,6
2316	Pasto de corte	1,0
2317	Pasto cultivado	1,1
2321	Otros cultivos	0,7
2322	Habichuela	0,7
2323	Maracuyá	0,5
2411	Asociación de cultivos	0,7
3111	Bosque natural denso	0,9
3135	Bosque de guadua y	0,9
3211	Arbustal y matorral	0,7
3311	Herbazal natural denso	0,7

7.3.1.4 Determinación de la eficiencia de riego (ei) - factor Kr

De acuerdo con la información recopilada por Cenicaña, la eficiencia de riego en el sector azucarero de Colombia presenta estos rangos: aplicación de riego por surcos: 40-60%, aspersion con cañones: 60-80%, de conducción: 70-85%, de almacenamiento en reservorios o embalses: 85-95%. Adicionalmente, los volúmenes de agua para el riego por surcos promedio para el sector es de 1.300 m³/ha (Cruz, 2015), y otras características de los sistemas de riego se muestran en la **Tabla 25**.

Los sistemas de riego por surcos y de riego por aspersion con cañones son los más usados en el cultivo de la caña de azúcar de la región, el primero se utiliza en el 79% del área y el segundo en el 21% (Cruz, 2015).

Tabla 25. Características de sistemas de riego de caña de azúcar en el Valle del Cauca.
Fuente: propia (datos sector)

Tipo de sistema de riego	Gravedad convencional	Gravedad ventanas	Aspersion	Goteo	Pivote
Eficiencias (%)					
Conducción(antes del predio)	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85
Almacenamiento	85-95	85-95	85-95	85-95	85-95
Aplicación	40-60	40-60	60-80		81%
Volúmenes de agua aplicados en riego/ evento de riego					
m ³ /ha aplicados	1.300	1.300	800		
Agua requerida	700	700	700	700	700
Pérdidas por percolación	70%	70%	Mínimas	Mínimas	Mínimas
Pérdidas por escorrentía	30%	30%	NO	NO	NO

A partir de dicho mapa se generó un mapa tipo ráster con códigos de eficiencia de riego y luego se convirtió en un archivo plano (1 donde no existe riego, 2 riego por surcos $Kr=0.5$ y 3 riego por aspersion $Kr=0.7$) necesario para alimentar el software.

Kr otros cultivos

Se asume el 40% de eficiencia para los otros cultivos y se usa 1 para los otros usos de la cuenca, que no requieren riego. En la **Tabla 26** se pueden observar las eficiencias de riego Kr por uso y en la **Figura 27**. Mapa de eficiencias de riego para caña de azúcar y otros cultivos la distribución de las mismas.

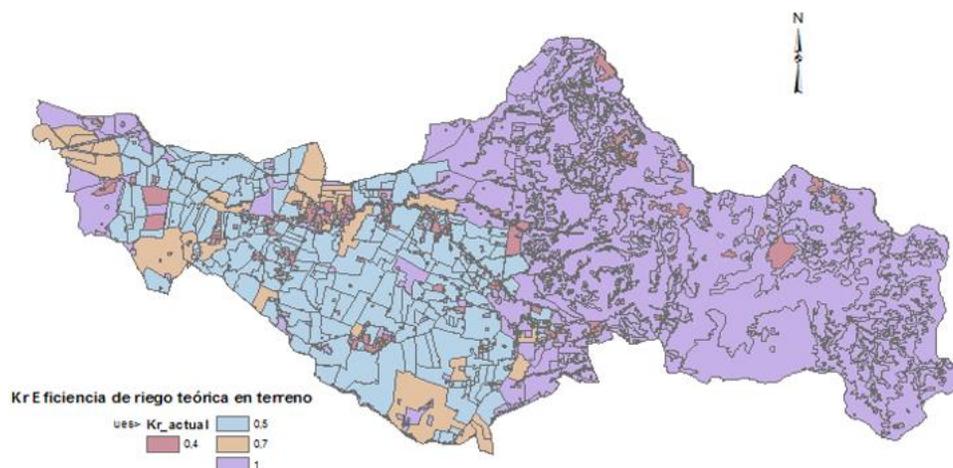


Figura 27. Mapa de eficiencias de riego para caña de azúcar y otros cultivos

Tabla 26. Eficiencia de riego Kr para otros cultivos y usos

Código	Nombre	Kr	código	Nombre	Kr
2111	Otros cultivos plantados densos arbóreos	0,4	2322	Pasto de corte	1,0
2112	Eucalipto	0,4	2323	Pasto cultivado	1,0
2122	Otros árboles frutales	0,4	2411	Otros cultivos plantados abiertos herbáceos	0,4
2123	Cítricos	0,4	3111	Habichuela	0,4
2211	Otros cultivos arbustivos plantados densos	0,4	3135	Maracuyá	0,4
2212	Café	0,4	3211	Asociación de cultivos	0,4
2213	Cacao	0,4		Bosque natural denso de tierra firme	1,0
2214	Papayo	0,4		Bosque de guadua y relictos boscosos	1,0
2215	Vid	0,4		Arbustal y matorral denso de tierra firme	1,0
2316	Otros cultivos herbáceos plantados densos	0,4	2218	Maíz	0,4
2317	Sorgo	0,4	2219	Algodón	0,4
2321	Soya	0,4	3311	Herbazal natural denso de tierra firme	1,0
			4122	Estanques artificiales	1,0

7.3.1.5 Determinación de la Precipitación efectiva Pe – factor Ke

Según la investigación “Precipitación efectiva en el cultivo de la caña de azúcar para programar riegos mediante balance hídrico” (Alarcon Muriel, 2012), la precipitación efectiva en el cultivo de la caña de azúcar es de alrededor del 80% para precipitaciones entre 1-12 mm y del 90% para precipitaciones superiores a 12 mm. Se

asume pues para el cálculo de la demanda un 85% de precipitación efectiva, teniendo en cuenta además que los suelos donde se encuentran establecidos los cultivos de caña de azúcar son micronivelados, con pendientes entre del 30% (30 m en 100 m), y en general son suelos de buena estructura, franca.

7.3.2 Resultados de la modelación en Matlab

El resumen de las demandas generado por el programa en Matlab, se presenta en la **Tabla 27** y en la **Figura 29**. En la tabla se resaltan en color rojo las semanas con demanda real de riego (cuando la evapotranspiración supera a la precipitación en la ecuación 18). Se observa que la sumatoria total de las semanas que tienen demanda y los excedentes de precipitación es negativa, lo que quiere decir que se puede contemplar el almacenamiento como una posible solución ya que la cuenca presenta excedentes de lluvia para cubrir las demandas de riego. Es decir, se puede almacenar en épocas de lluvia para luego regar con dichos excedentes en las épocas con mayor evapotranspiración.

Por otra parte, se observa que todos los meses en alguna de sus semanas requieren riego, excepto mayo. De hecho, se requeriría regar 27 de las 53 semanas es decir el 52% del tiempo. Se destacan los meses de junio, julio y parte de agosto donde los requerimientos de riego son de varias semanas y grandes cantidades. Es importante anotar que antes de llegar el mes de junio uno de los más críticos para cubrir las necesidades de la planta, en mayo, se tendrían los mayores excedentes por precipitación.

Tabla 27. Resultados del análisis de demandas para el año base 2013

Mes	Semana	Demanda	Condicion	Mes	Semana	Demanda	Condicion
ENE	1	2,432,610	Demanda	JUL	27	5,675,680	Demanda
	2	4,605,010	Demanda		28	4,464,580	Demanda
	3	2,334,665	Demanda		29	6,319,174	Demanda
	4	-275,630	Superavit		30	4,986,323	Demanda
	5	-85,700	Superavit		31	6,040,730	Demanda
FEB	6	-2,432,220	Superavit	AGO	32	-3,586,021	Superavit
	7	-397,800	Superavit		33	1,714,679	Demanda
	8	3,628,350	Demanda		34	6,041,287	Demanda
	9	2,765,610	Demanda		35	4,857,820	Demanda
				36	6,874,430	Demanda	

Alternativas para satisfacer el requerimiento de agua de cultivos de caña de azúcar

	10	1,413,972	Demanda		37	-3,229,800	Superavit
	11	-1,908,317	Superavit		38	4,658,910	Demanda
MAR	12	-6,947,908	Superavit	SEP	39	3,771,230	Demanda
	13	3,304,943	Demanda		40	-608,029	Superavit
	14	-538,340	Superavit		41	-4,486,742	Superavit
ABR	15	3,154,860	Demanda	OCT	42	-8,326,980	Superavit
	16	-	Superavit		43	772,132	Superavit
	17	-5,328,700	Superavit		44	-5,328,620	Superavit
	18	-	Superavit		45	3,075,240	Demanda
	19	-2,538,127	Superavit		46	1,618,043	Demanda
MAY	20	269,155	Demanda	NOV	47	-8,695,340	Superavit
	21	-	Superavit		48	-853,141	Superavit
	22	-	Superavit		49	-7,175,230	Superavit
	23	6,079,710	Demanda		50	2,862,334	Demanda
JUN	24	1,377,462	Demanda	DIC	51	2,908,414	Demanda
	25	6,559,088	Demanda		52	-7,515,610	Superavit
	26	6,820,243	Demanda		53	3,528,718	Superavit

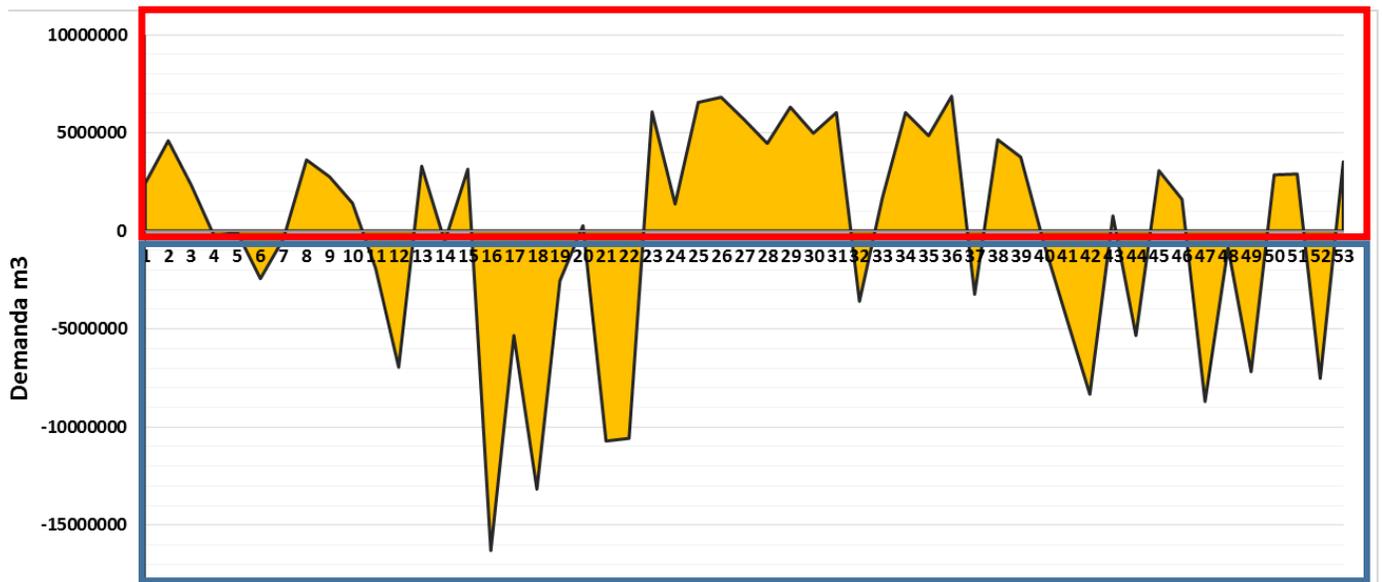


Figura 28 Resumen semanal de demanda para el año base analizado

Análisis gráfico de demanda y comprobación de resultados

Por otra parte, el análisis espacial de esta información se muestra en la Figura 29, donde están los 53 mapas de demanda obtenidos semana a semana para el año base de análisis (2013). En estos se observa la existencia de zonas con demanda (positivas o color rojo en el mapa) y de superávit de precipitación (negativas o color azul en el mapa). Para realizar un adecuado análisis gráfico y comprobación de resultados primero se hizo una comprobación de cálculos, luego se analizó la variabilidad semanal, se compararon los mapas con los de cobertura y finalmente se cruzó visualmente con el mapa de Kc.

Comprobación datos de demanda. Para comprobar los resultados de demanda, se realizó un cálculo no agregado en Excel aplicando la ecuación 18, ver anexo 1, asumiendo 50% eficiencia de riego, kc de 0.7 y Pe: 0.8, para evaluar aproximadamente los rangos de datos esperados y la coherencia por celda (1ha – 10.000 m²). Los resultados arrojaron datos máximos de demanda de 771.8 m³, para la estación aeropuerto en la semana 39, la que se muestra de forma detallada en la **Tabla 28**.

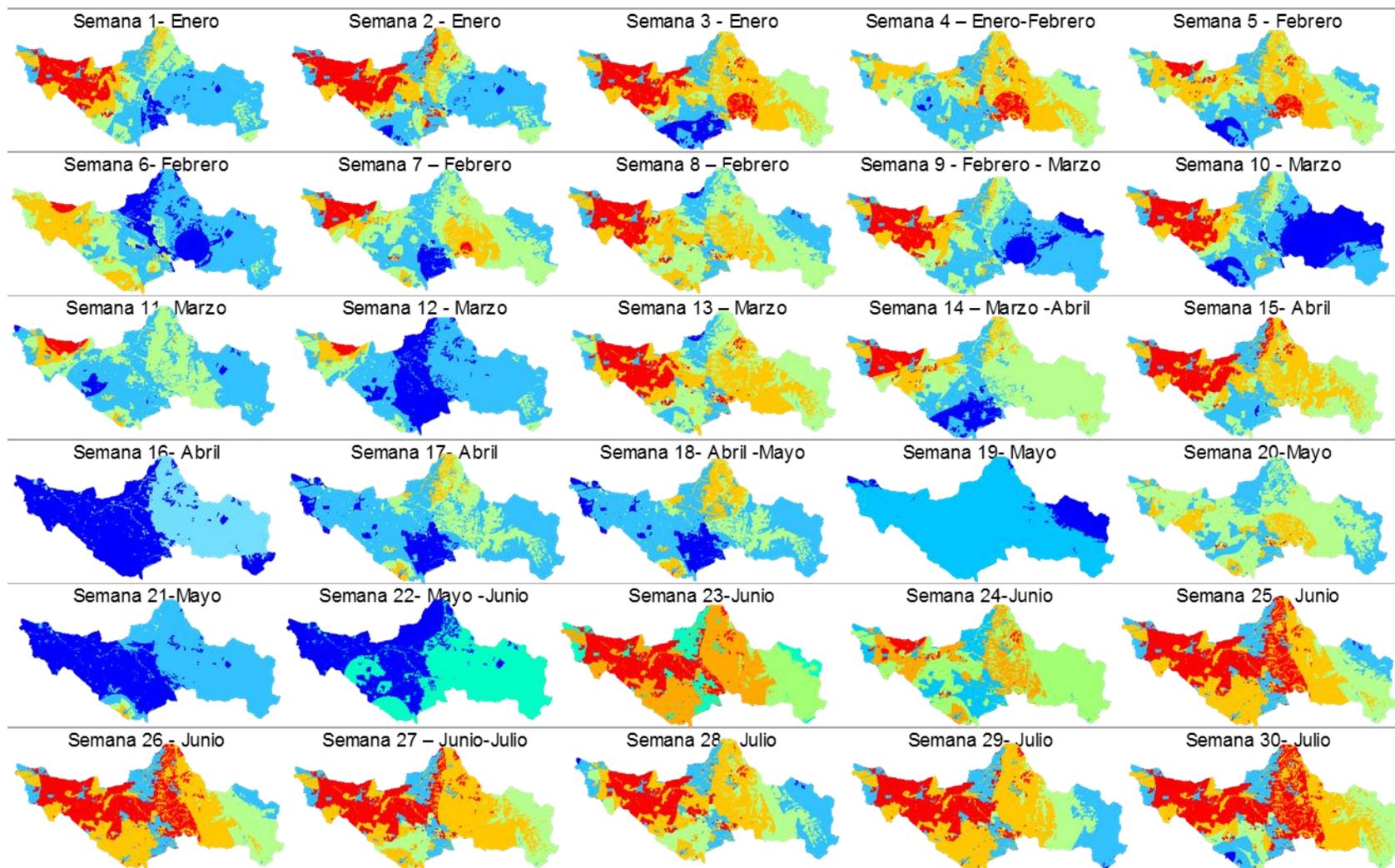
Tabla 28. Datos semana 39 (prueba de escritorio no distribuida)

Fecha	Evaporación (mm)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración cultivo (mm)	Precipitación neta (mm)	demanda m ³ (1 ha)
28-9-2013	7,0	0,0	4,90	0,0	98,0
27-9-2013	6,2	0,5	4,34	0,4	78,8
26-9-2013	8,5	0,0	5,95	0,0	119,0
25-9-2013	8,6	0,0	6,02	0,0	120,4
24-9-2013	8,5	0,0	5,95	0,0	119,0
23-9-2013	8,7	0,0	6,09	0,0	121,8
22-9-2013	8,2	0,0	5,74	0,0	114,8
Total			38,99	0,4	771,8

Explicado de otra forma en términos de riego se dice que se debe reponer a la planta 38.59 mm (evapotranspiración – precipitación) de lámina de agua a la planta consumidos en una semana, con una eficiencia de sistema de riego asumida del 50%,

se tendría que aplicar una lámina de 77.18 mm que para una hectárea equivalen a 771.8 metros cúbicos. Este dato es coherente con lo que se da en la práctica de riego de caña de azúcar en la zona, en la cual se aplica en un evento de riego hasta 1.400 m³/ha con una frecuencia de 15 a 20 días en la cual la planta consumirá el agua aplicada. Así entonces tenemos que los 771.8 m³ que arroja la herramienta de cálculo en dos semanas serían 1.543 m³ que es un dato promedio que se da en la práctica en la región.

Alternativas para satisfacer el requerimiento de agua de cultivos de caña de azúcar



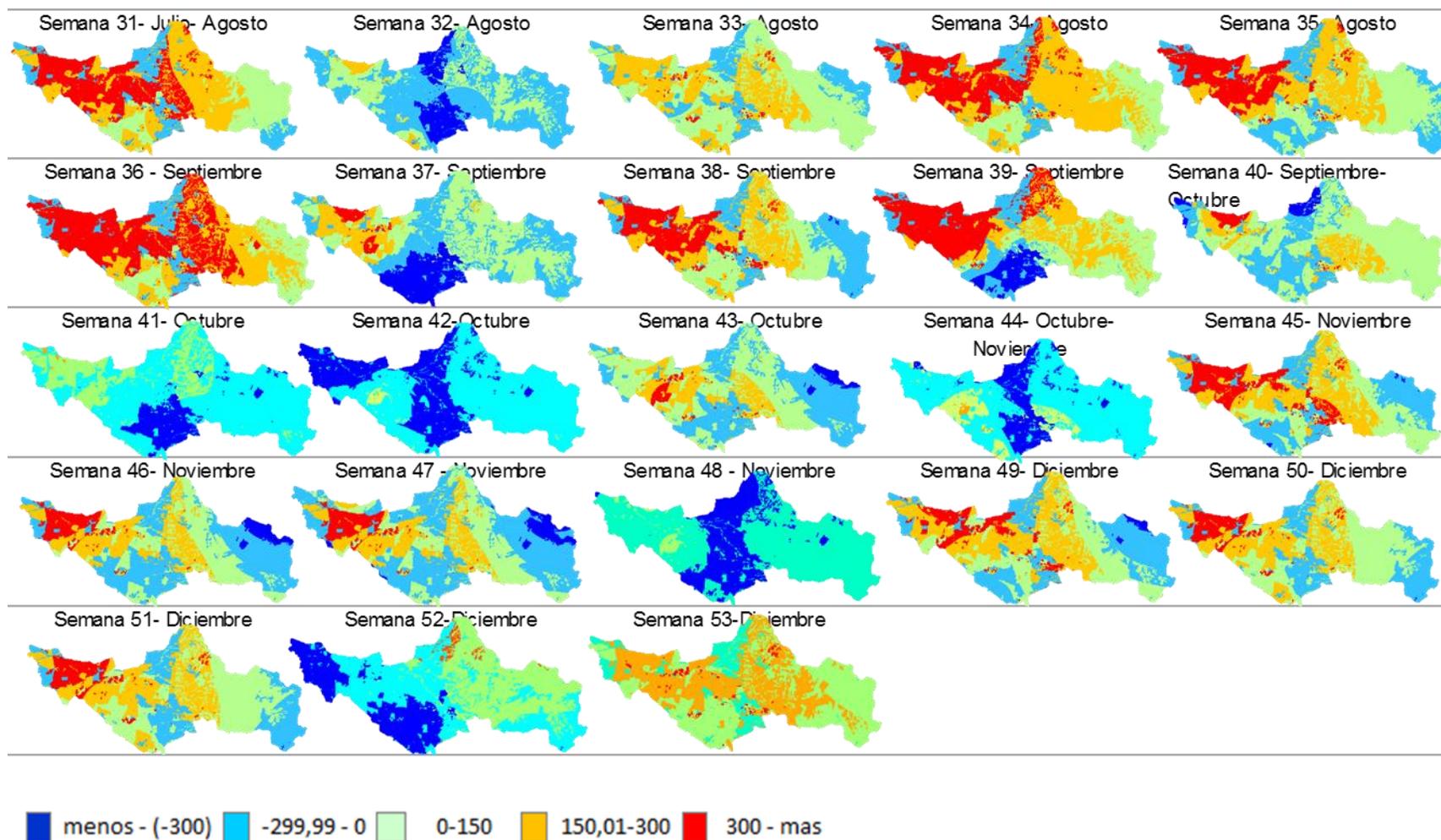


Figura 29. Mapas de Demanda semanal generados con la herramienta en Matlab

Análisis de la variabilidad semanal. En la *Figura 29* se muestran los 53 mapas de demanda dónde se observa la variabilidad esperada en las semanas dentro los meses catalogados como húmedos y secos. Para ilustrar mejor en la semana 19 y 21, para del mes de mayo se puede ver que no hay demanda es decir la oferta (precipitación) es mucho mayor que la demanda por eso en estas dos semanas se observan los mapas completamente azules lo que corresponde a rangos de demandas entre cero m^3 y $-300 m^3$, y menores a $-300 m^3$. Lo contrario sucede con las semanas 30, 31 y 34 donde se observan demandas en color rojo ($300 m^3$ por hectárea y mayores) en las zonas de la cuenca donde están los cultivos de caña de azúcar, estas semanas están dentro del mes de agosto que es un mes seco y estos resultados son los esperados.

Revisando todos los mapas semanales en muchos casos se nota variabilidad secuencial y gradual de una semana a otra, lo que permite deducir que los resultados son lógicos y reflejan la realidad de lo que ocurre entre la evapotranspiración y precipitación en el transcurso de las semanas y meses, como es el caso de las primeras 5 semanas que tienen un comportamiento similar y variación espacial secuencial. En la secuencia de la semana 32, 33 y 34 se observa que hay una semana de “transición”, así mismo al detallar la semana 32 los colores en su mayoría verdes y azules indican que no hay demanda de agua, en la semana 33 ya muestra unas zonas en amarillo que indican demanda entre 0 a $300 m^3/ha$, y en la semana 34 ya se detalla que existen áreas de demanda mayores a $300 m^3/ha$ en color rojo.

Por otra parte, existen semanas de cambios abruptos como el que se presenta entre la primera semana de junio (22) y segunda (23) de Junio. Al revisar los datos de precipitación de las estaciones donde se nota la variabilidad, se encuentra que la precipitación promedio es de 61 mm en la semana 22 y de menos de 1 mm para la semana 23, además la variación de la evaporación de la semana 23 respecto a la 22 es de 4.5 mm por tanto los mapas están reflejando verdaderamente la diferencia que se tiene entre estas semanas y que afecta radicalmente la demanda de una semana a la otra, razones que explican la variabilidad de una semana a otra.

En general se observa que enero, junio y julio, son los meses en que se presentan demandas en casi toda la zona estudiada durante la totalidad o casi la totalidad del mes. Luego en febrero los requerimientos de riego disminuyen porque la precipitación aumenta, pero en la zona norte del territorio se mantiene la necesidad de riego. Para marzo el riego se vuelve a requerir para toda la zona, iniciando por el norte y luego en el centro y nuevamente al norte. En abril la demanda se requiere en unas pocas zonas, casi siempre en la zona céntrica del área sembrada en caña. En mayo por otra parte, las zonas que requieren riego son muy pocas, presentándose los menores requerimientos de agua. En junio y julio, se incrementa la necesidad de riego de manera considerable siendo los meses de mayor demanda en toda la zona. La extensión de las zonas que requieren riego decrece para octubre, noviembre y diciembre, aunque en cada mes hay por lo menos una semana que requiere riego en toda el área.

En conclusión, el análisis visual permite afirmar que las semanas 19, 20, 21, 22 (mes de mayo) y 48 (noviembre) son las de menos demanda y mayor superávit. Por otro lado, se observa que las demandas se apegan casi totalmente al comportamiento bimodal de las precipitaciones, que corresponde a dos periodos húmedos y dos secos. De esta manera, se presenta mayor demanda en los meses de junio, julio, agosto, y el otro periodo en enero, febrero, marzo (periodos secos) a pesar que hay semanas que muestran excepciones y se observa superávit. Lo que confirma que el análisis promedio mensual “cubre” o tapa requerimientos de cultivo, y que la forma semanal muestra de forma adecuada las variaciones de la demanda en el terreno

Al observar los mapas de forma individual se encuentra que el valor máximo de demanda es de 1.057 m³/ha en la semana 39. (el dato de la prueba no distribuida fue de 778 m³/ha, **Tabla 28**) una distribución más detallada de los rangos y una ampliación en la **Figura 30**, de donde se puede concluir que los datos máximos de demanda se ubican en la zona cercana al Aeropuerto y Candelaria (zona occidental), las cuales se caracterizan por ser áreas muy secas con altas evaporaciones.

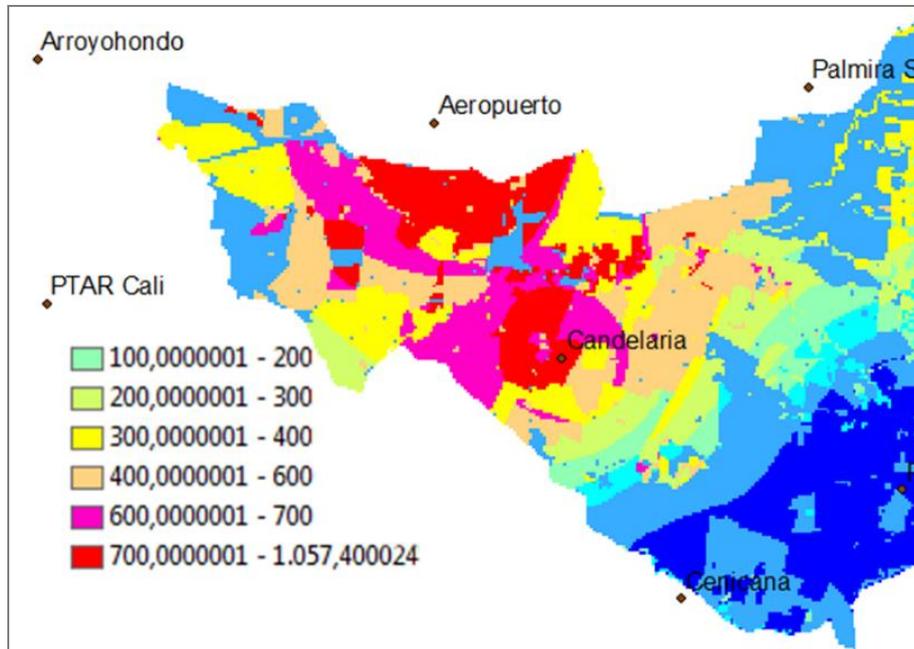


Figura 30. Mapa de demanda para la semana 30 (ampliación parte plana)

Análisis de demanda según cobertura de suelo. Para realizar este análisis se cruzó visualmente el mapa de cobertura de la **Figura 31** que muestra la divisoria de la cuenca entre la parte plana (marcada en azul en el mapa) y la parte alta (marcada con verde) con el mapa de la demanda para la semana 38 mostrado en la **Figura 32**.

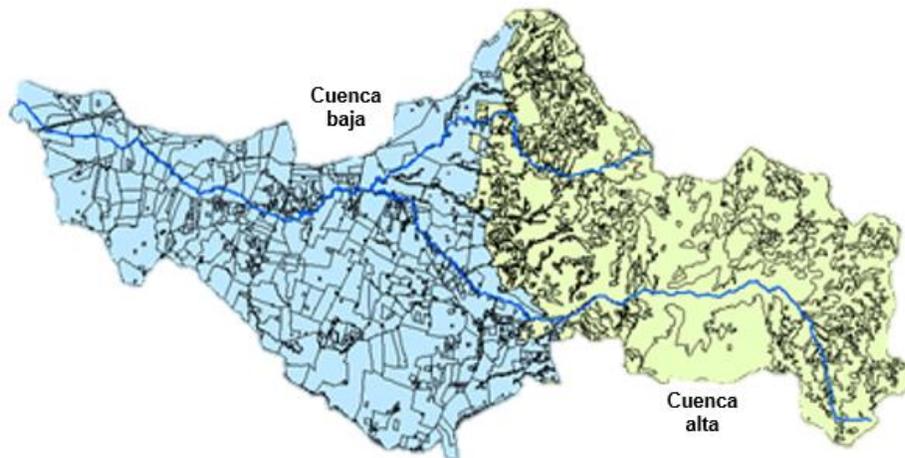


Figura 31. Divisoria cuenca alta y cuenca baja

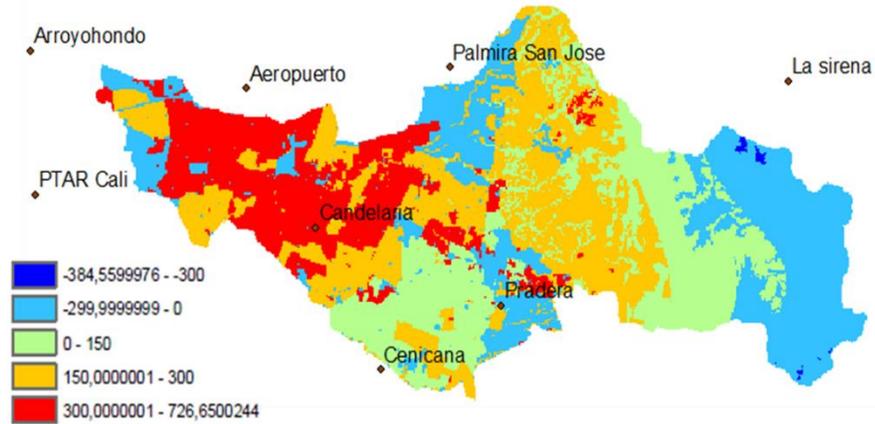


Figura 32. Mapa de demanda para la semana 38

En la cuenca alta se pueden observar demandas moderadas entre 0,1 y 150 m³/ha para las coberturas herbazal natural y bosque natural denso. La franja naranja que se muestra corresponde a demandas entre 151 y 300 m³/ha que en su mayoría se presentan para pastos. De igual forma, al comparar los mapas de precipitación y evaporación, se observa que hacia la parte más alta de la cuenca (derecha) la evaporación oscila entre 25 y 15 mm, mientras la precipitación entre 10 y 14 mm, de manera que se puede esperar que el balance en esta parte de la cuenca arroje resultados de requerimiento de agua (ver Figura 33).

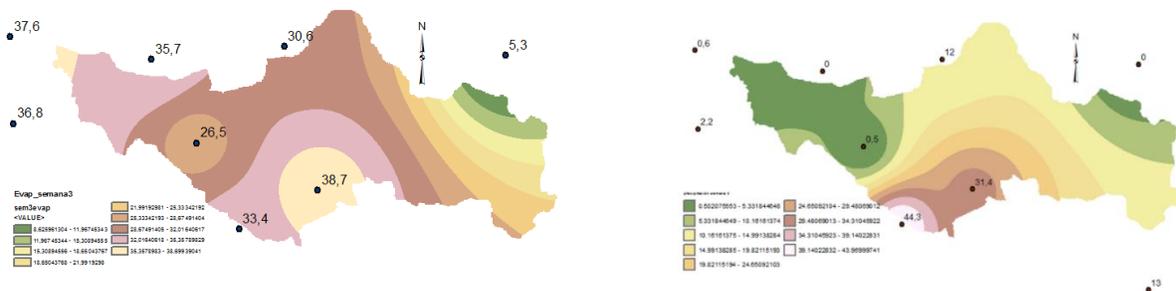


Figura 33. Evaporación y precipitación para la semana 38

Análisis con variabilidad de la demanda según la edad de la caña y la eficiencia de riego

Se observa que, para la mayoría de las semanas, existen zonas con demanda es decir aquellas coloreadas colores rojo o naranja en el mapa en alguna parte del área sembrada en Caña, pero que estas zonas varían ampliamente con las semanas. Estas

diferencias reflejan las variaciones de la edad de la caña, eficiencia de riego, la precipitación y evaporación.

Específicamente en la demanda de la semana 38 al cruzarla con el mapa de edad de la caña, representada por el coeficiente del cultivo K_c (**Figura 34**) las diferencias se marcan principalmente por los cambios de la variable K_c .

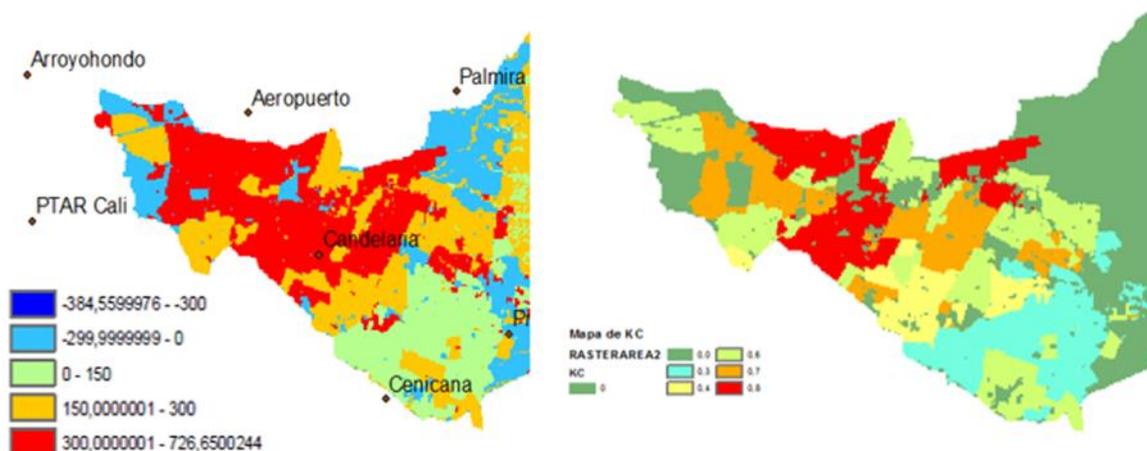


Figura 34. Mapas demanda semana 38 vs mapa coeficiente de riego (ampliación de la zona occidental de la cuenca o zona plana)

Otra variable que es fundamental en el comportamiento de las demandas de agua es la distribución de los sistemas de riego, donde el riego por gravedad es dominante y su eficiencia de sólo el 50% aumenta los requerimientos de agua. Mientras que el riego por aspersión está sólo en el 21% del área con una eficiencia del 70%, de manera que su impacto es bajo en disminuir las demandas de agua para el área cultivada. De manera, que existe una importante opción de disminución de estas demandas por medio de la mejora en la eficiencia de los sistemas de riego.

7.3.3 Cálculo de la demanda agrícola para otros cultivos

Los cálculos de demanda incluyeron toda la cobertura vegetal, sin embargo, se tienen en cuenta para la demanda las coberturas que en la práctica requieren riego. En la **Tabla 29** se observan los resultados de la demanda total de todos los otros cultivos en forma mensual en metros cúbicos.

Tabla 29. Demanda para otros usos agrícolas

CULTIVO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Sorgo, pasto cultivado, otros árboles frutales, maíz, cítricos, y otros	2.602.229	953.901	849.692	-1.242.025	-1.287.602	3.883.495	3.268.922	3.052.676	1.986.211	-503.917	344.055	1.322.963

7.4 DEMANDA DOMÉSTICA, INDUSTRIAL, PECUARIA, INDUSTRIAL Y AMBIENTAL

Para las demandas doméstica, industrial, pecuaria, industrial y ambiental se utilizó el estudio realizado de balance de agua del río Bolo 2017 realizado por la CVC. La metodología de cálculo por uso se detalla en la **Tabla 30** y la demanda se presenta en la **Tabla 30**.

Tabla 30. Descripción cálculo de demanda balance de agua cuenca río Bolo
Fuente: CVC, 2017

Demanda	Especificaciones CVC – Balance oferta demanda río Bolo 2017
Demanda de agua para uso pecuario-nodo - Pecuario	Para la estimación de esta demanda, se asume que la producción pecuaria se realiza solo en las zonas rurales. Para determinar la población, se utilizó la información del censo realizado por el ICA a comienzos del año 2016. La dotación de agua para cada especie, se adoptó de la resolución N°112-1183 del 8 de abril de 2005 de “CORNARE”.
Demanda de agua para uso doméstico-nodo Prada	Se utilizó la información publicada por el DANE referente a las estimaciones y proyecciones de población del año 2005 al 2020 para cada municipio del territorio nacional, y la cartografía existente en la CVC sobre información territorial administrativa, de la cual se determinó el área de cada municipio presente en la cuenca. Teniendo en cuenta lo estipulado en la reglamentación técnica del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, cuyo artículo 67 fue modificado por la resolución 2320 de 2009, que establece una dotación de agua para consumo doméstico de 150 litros/habitante/día, se estimó la demanda doméstica para la cuenca del río Bolo.
Demanda de agua para uso industrial-	Se estimó con base en el Registro Único Ambiental -RUA- del año 2014, en el cual se reporta el volumen de agua consumido por las empresas inscritas; para la cuenca del río Bolo, se tuvo en cuenta el volumen de agua registrado para el municipio de Pradera, cuya cabecera municipal se ubica por completo dentro de la cuenca. El volumen de agua consumido por las industrias manufactureras del municipio de Pradera para el año 2014 fue de 6'792.604 m ³ /año.
Demanda ambiental	Para determinar la demanda ambiental, se define un porcentaje de caudal que se debe mantener en la corriente, asociado al régimen de caudales característicos de la cuenca; para ello, se aplicó los conceptos propuestos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM–, para determinar la oferta hídrica superficial neta, que considera un factor de reducción para mantener el régimen de estiaje, en el documento “Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial”. El factor de reducción para mantener el régimen de estiaje estimado para el río Bolo es de 16%.

En la **Tabla 31** se observa la demanda en $m^3/1.000$ de cada uno de los usos descritos, siendo el mayor la demanda ambiental.

Tabla 31. Demanda de agua para otros usos en la cuenca del río Bolo
Fuente: CVC, 2017

USOS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	m ³ /1.000											
Doméstico	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281
Industrial	573	523	573	548	573	548	573	573	548	573	548	573
Pecuario	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
Ambiental	1.495	1.296	1.495	1.619	1.744	1.470	1.395	1.246	1.046	1.246	1.719	1.993

7.5 OFERTA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO

7.5.1 Análisis de caudales medios

La cuenca del río Bolo tiene la estación hidrométrica Los Minchos con datos a partir del año 1997, ubicada donde muestra la **Figura 35**.



Figura 35. Ubicación estación hidrométrica Los Minchos

Análisis de información

Se analizó la información con un algoritmo desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. Se recolectó la información de precipitación utilizada en la demanda con el caudal de la estación los Minchos (ver **Figura 36**).

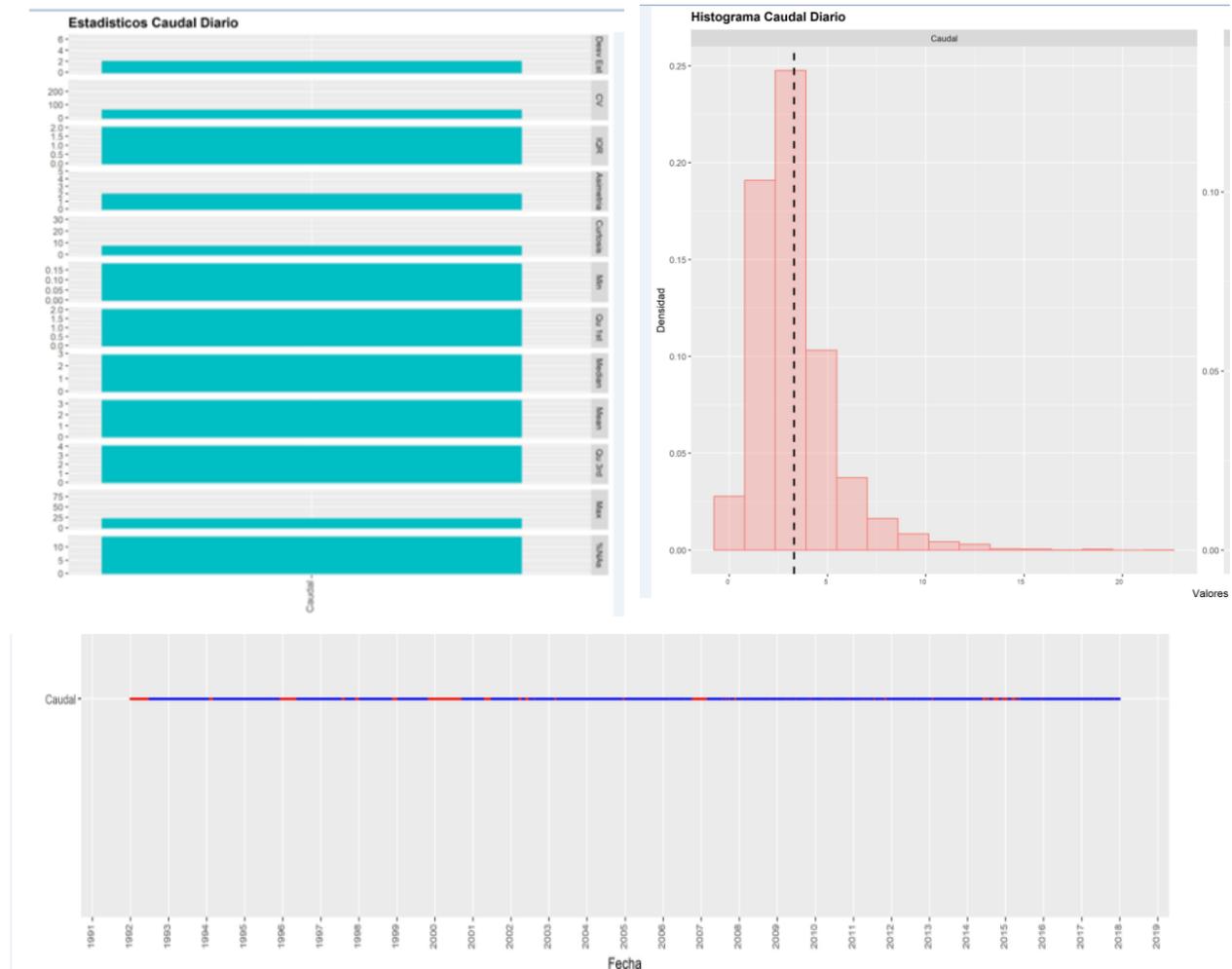


Figura 36. Análisis estadísticos de datos faltantes para la estación Los Minchos

Estadísticos

De los estadísticos de la **Tabla 32** se puede deducir que la información es continua, el porcentaje de faltantes es adecuado para trabajar ya que no supera el 30% en ningún año y que los años 2007, 2011 y 2014 presentan valores excepcionalmente altos. Se seleccionó el año 2013 que es un año neutro, igual que para los registros de precipitación y evaporación.

Tabla 32. Estadísticos básicos de la serie de la estación hidrológica Los Minchos

Estación	Periodo	Periodo Registro	Varianza	Desv Estándar	CV	IQR	Asimetría	Curtosis
Caudal	1992-2017	1992-07-01 2017-12-31	4.23	2.06	62.45	2.02	2.02	7.34
Min	Qu 1st	Mediana	Media	Qu 3rd	Max	n	Datos faltantes	Datos faltantes %
0,18	2,02	2,88	3,29	4,04	22,03	9.315	1.283	13,77

Llenado de datos faltantes

Con el programa Suemulador se procedió al llenado de datos faltantes para la serie desde el año 2003 (**Figura 37**).

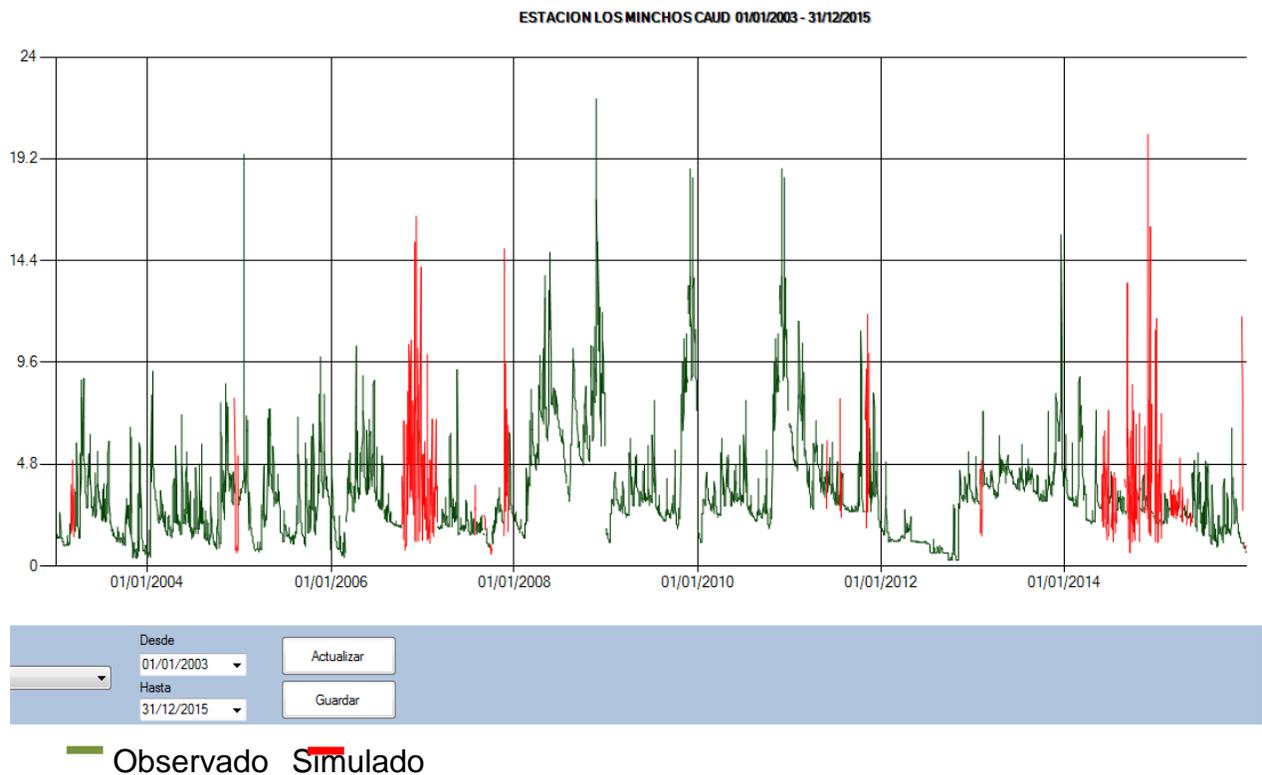


Figura 37. Resultados del llenado de datos faltantes realizado con el Suemulador para la estación Los Minchos

7.5.2 Curva de duración de caudal

Se realizó la curva de duración de caudales (ver **Figura 38**), la cual representa el régimen medio de los caudales de la corriente del río Bolo, la que muestra que el caudal oscila entre los 22,00 m³/s y 0,28 m³/s.

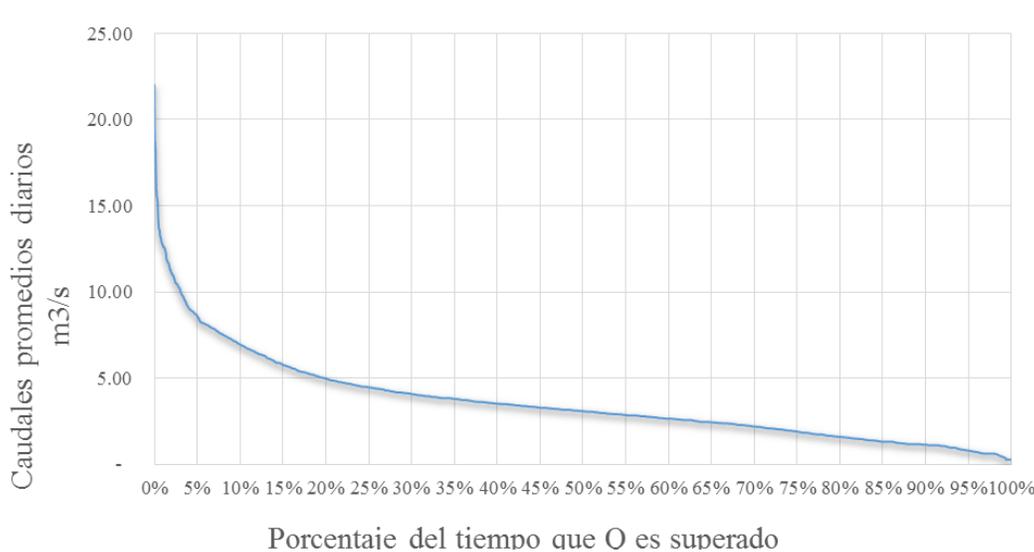


Figura 38. Curva de duración de Caudales de la estación Los Minchos

7.5.3 Índice de regulación de caudal

Para el cálculo de área total bajo la línea de la curva de los caudales medios diarios se generó la línea de mejor ajuste y su respectiva ecuación (**Figura 39**).

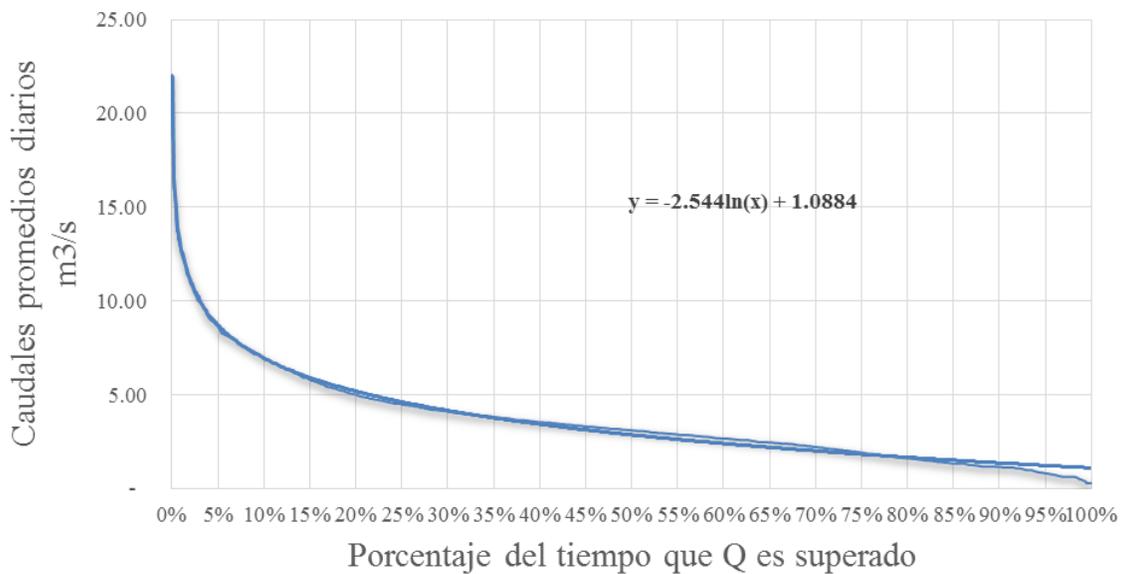


Figura 39. Línea de mejor ajuste de la Curva de duración de Caudal

Se calculó a través de la integral definida

$$V_t = \int_0^{100} -2.544 \ln(x) + 1.0844$$

$$V_t = - \frac{1272 \log(100) - 923272}{5}$$

$$V_t = 460.364$$

Teniendo en cuenta que el caudal medio de la serie es 3,63 m³/s, se calcula el área bajo la curva desde la probabilidad de excedencia del 38%:

$$V_p = \int_{38}^{100} -38.100(x) + 0,8424$$

$$V_p = - \frac{31800 \log(100) - 12084 \log(38) - 14.620.716}{125}$$

$$V_p = 116.509$$

Entonces, se tiene que

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} = \frac{116.509}{460.364} = 0,25$$

El dato de 0,25 difiere del presentado por el ENA 2014 donde para esta zona muestra un índice de regulación de caudales entre 0,65 y 0,75 (**Figura 40**).

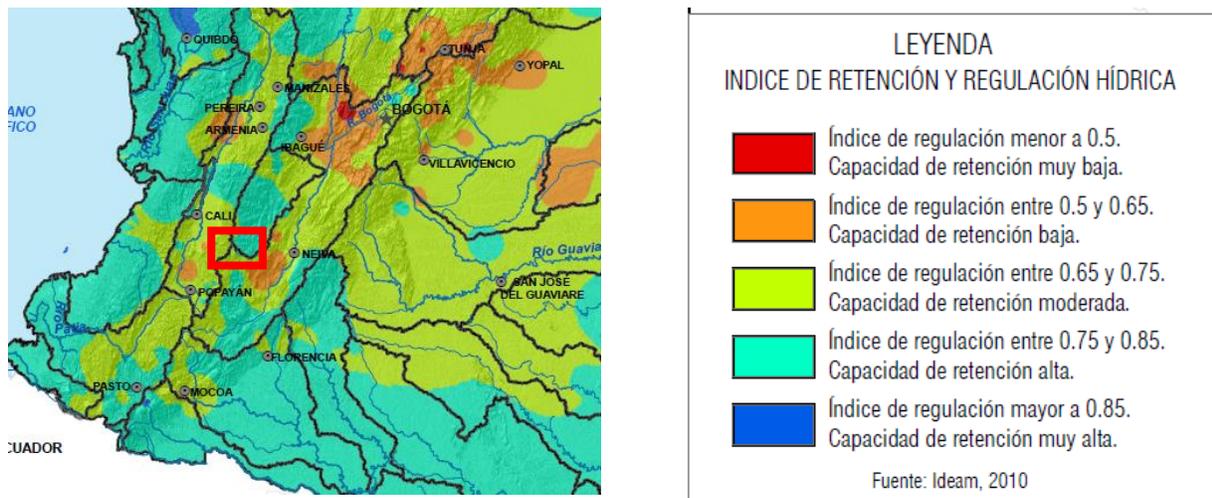


Figura 40. Mapa de IRH Colombia IDEAM
Fuente: (IDEAM, 2015)

7.5.4 Caudal ambiental

Según la metodología descrita en la **Figura 6. Diagrama de flujo para la determinación de la oferta hídrica superficial**, el caudal ambiental es el Q_{75} de la curva de duración de caudal, de manera que el caudal ambiental es de $1,87 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.5.5 Oferta hídrica superficial de la cuenca

La oferta hídrica superficial de la cuenca según la CVC es como se muestra en la **Tabla 33**.

Tabla 33. Resumen oferta de agua superficial para el río Bolo
Fuente: adaptado CVC, 2017

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta cauce principal Río Bolo (mm)	36,08	31,09	36,02	38,73	41,93	35,46	34,00	30,52	25,69	29,72	41,30	48,19
Oferta cauce principal Río Bolo (m^3/s)	3,36	3,20	3,35	3,72	3,90	3,41	3,16	2,84	2,47	2,77	3,97	4,48
Oferta afluente Agua clara (mm)	1,42	1,21	1,58	1,87	1,87	1,34	0,90	0,68	0,81	1,58	2,00	1,81
Oferta afluente Agua clara (m^3/s)	0,13	0,12	0,15	0,18	0,17	0,13	0,08	0,06	0,08	0,15	0,19	0,17

7.6 OFERTA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Actualmente en la cuenca del río Bolo, existe disponibilidad de aguas subterráneas porque se encuentran varios pozos construidos en el territorio como se observa en la **Figura 41**.

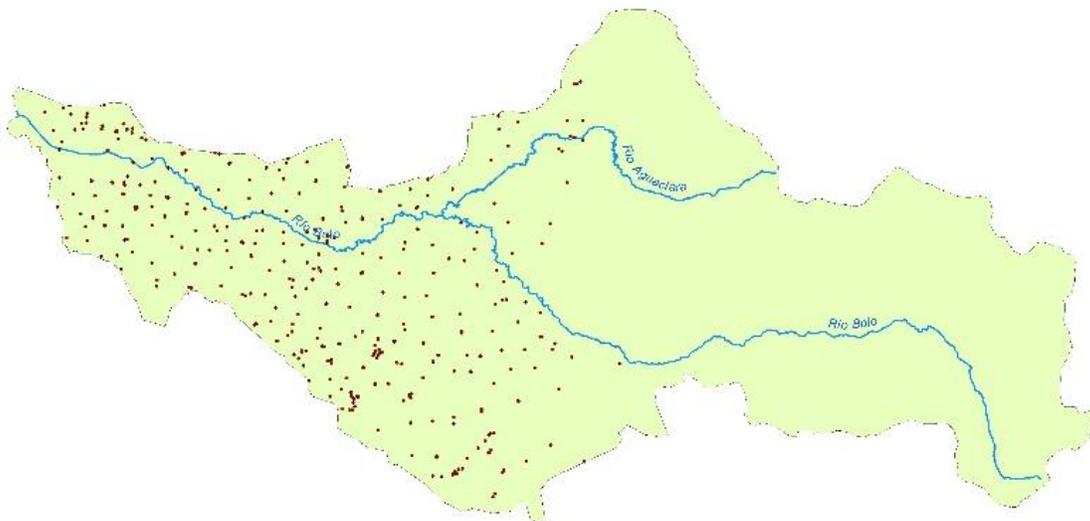


Figura 41. Pozos Cuenca del río Bolo
Fuente: Elaboración CVC, 2018

Para estimar el agua subterránea, se tiene en cuenta la información disponible en la CVC sobre el caudal explotable del acuífero para cada cuenca. Para la cuenca del río Bolo, el volumen total de agua subterránea es de 124,63 mm³/año. La **Tabla 34** muestra la oferta subterránea mensual de la cuenca del río Bolo, según cálculos realizados en el balance oferta demanda del río Bolo (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2017).

Tabla 34. Oferta superficial y sub-superficial total disponible de la cuenca río Bolo (mm)

Fuente: CVC, 2017

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
mm	42.5	38.4	42.5	41.1	42.5	41.1	42.5	42.5	41.1	42.5	41.1	42.5
Millones m ³	10.59	9.57	10.59	10.24	10.59	10.24	10.59	10.59	10.24	10.59	10.24	10.59

7.7 ANÁLISIS OFERTA DEMANDA

Para realizar el balance hídrico y el análisis de alternativas se eligió la plataforma del Sistema para Evaluación y Planeación del Agua (WEAP por sus siglas en inglés), que sirve como apoyo a la toma de decisiones considerando la oferta y la demanda de agua con prioridades asociadas, incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios, y permite estimar cambios en la demanda y en la oferta, a través de diversos escenarios. Finalmente, los requerimientos de la escala de interés y la información disponible permitieron el uso del modelo.

7.7.1 Esquema y desarrollo del modelo

Para realizar el esquema del modelo se identificó que el alcance del análisis de alternativas requiere una escala general. De manera que, los nodos de demandas se consideraron como se muestra en la **Figura 42**.

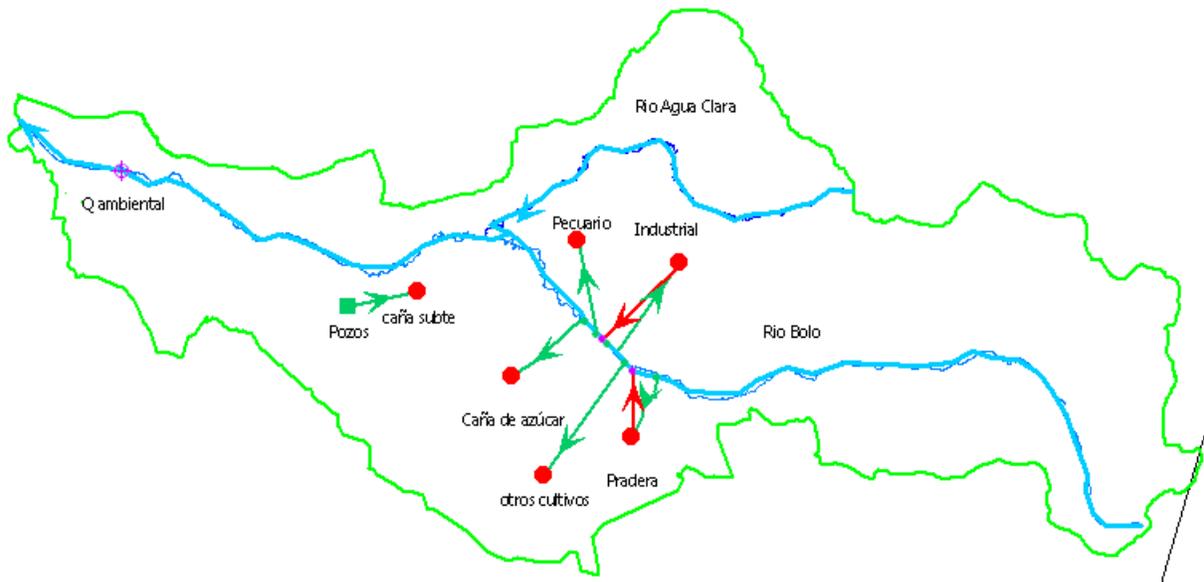


Figura 42. Esquema WEAP escenario actual (base)

Nodo Pradera: corresponde al uso doméstico explicado en el capítulo 7.3 CÁLCULO DE LA DEMANDA DE AGUA AGRÍCOLA PARA LA CAÑA DE AZÚCAR EN LA CUENCA , con un caudal de retorno del 80%.

Nodo Industrial: Corresponde a la demanda industrial explicada en el capítulo 7.4 DEMANDA DOMÉSTICA, INDUSTRIAL, PECUARIA, INDUSTRIAL Y AMBIENTAL caudal del retorno del 60%.

Nodo Pecuario: Corresponde a la demanda pecuaria explicada en el capítulo 7.4 DEMANDA DOMÉSTICA, INDUSTRIAL, PECUARIA, INDUSTRIAL Y AMBIENTAL.

Nodo 1 Caña de azúcar: Corresponde al 66% de la demanda total de Caña de azúcar, la que se reparte según la fuente de abastecimiento en un 62% abastecida por aguas superficiales y el 4% restante por otras fuentes según el estudio *Proyecto de administración de aguas del río Bolo*. Se incluye el área de otras fuentes porque esta área debería ser abastecida por la cuenca del río Bolo y para el ejercicio de planificación se debe tener presente (ver **Tabla 14. Distribución de suministro de agua por fuente en cuenca del río Bolo**) y **Tabla 35. Demanda actual por tipo de fuente**.

Nodo 2 Caña de azúcar. Corresponde al 34% de la demanda de caña de azúcar calculada con la herramienta Matlab, la cual es abastecida por aguas subterráneas según el estudio *Proyecto de administración de aguas del río Bolo, explicado en la descripción de la zona de priorización* (ver **Tabla 14.** Distribución de suministro de agua por fuente en cuenca del río Bolo). y **Tabla 35.** Demanda actual por tipo de fuente

Tabla 35. Demanda actual por tipo de fuente

Demanda abastecida por fuente m³			
Mes	Demanda total	34% subterráneas	66% superficiales
Enero	9.010.955	3.063.725	5.947.230
Febrero	3.563.940	1.211.740	2.352.200
Marzo			
Abril			
Mayo			
Junio	20,836,503	7,084,411	13,752,092
Julio	27,486,487	9,345,406	18,141,081
Agosto	15,902,195	5,406,746	10,495,449
Septiembre	4,592,311	1,561,386	3,030,925
Octubre			
Noviembre			
Diciembre			

Caudal ambiental. Este corresponde a la demanda ambiental calculada por la autoridad ambiental **Tabla 31.** Demanda de agua para otros usos en la cuenca del río Bolo.

Eficiencias: Según la **Tabla 25.** Características de sistemas de riego de caña de azúcar en el Valle del Cauca.

Fuente: propia (datos sector) las eficiencias de conducción en el Valle del Cauca están entre el 70 y el 85% en la conducción, para ingresarlas en WEAP, se asumieron entonces pérdidas del 23.1%.

Con esta información se corrió el programa. En la **Tabla 36.** *Resultados simulación WEAP-Escenario estado actual*, se observan los resultados presentados todos en metros cúbicos mes por mes. La primera parte de la tabla tiene el título “*caudales afluentes (oferta)*”, allí detalla el volumen del cauce principal Bolo, del río Agua Clara y de las aguas subterráneas, así mismo WEAP facilita una interfaz gráfica

donde se puede ver la oferta de cada fuente en la **Figura 43**. Resultado de la oferta en WEAP. **Figura 43**. La mayor oferta acumulada por las tres fuentes se presenta en el mes de diciembre con un valor de 23 millones de metros cúbicos mientras el menor valor se presenta para el mes de septiembre con 16 millones 874 mil metros cúbicos de agua.

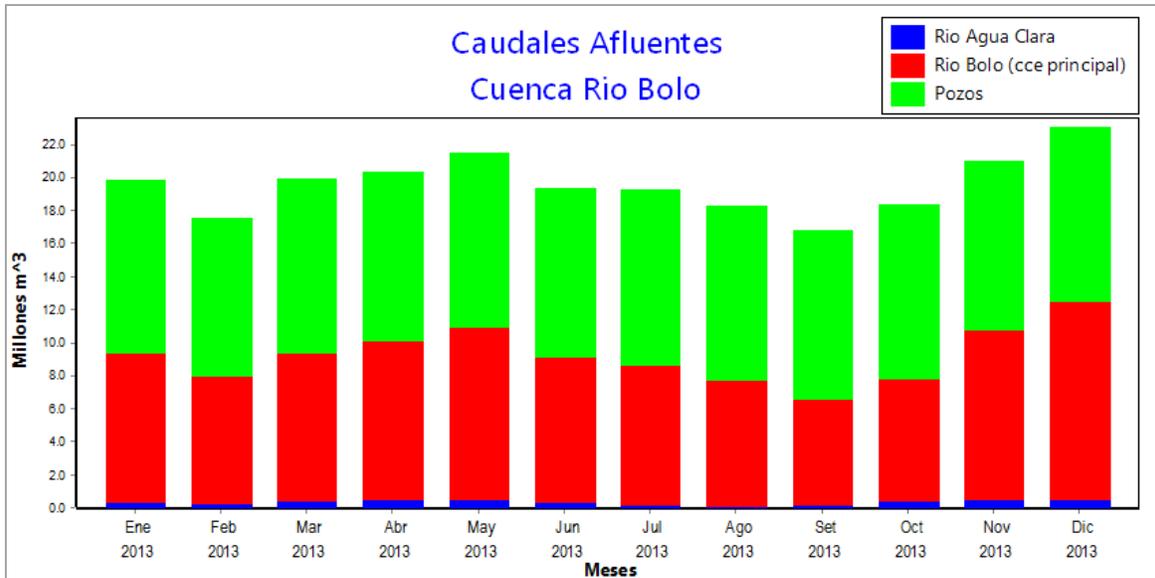


Figura 43. Resultado de la oferta en WEAP

Tabla 36. Resultados simulación WEAP-Escenario estado actual
Metros cúbicos/1000

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudales Afluentes (oferta)												
Rio Aguaclara	348	290	402	467	455	337	214	161	207	402	492	455
Rio Bolo cauce ppal	8,989	7,746	8,976	9,650	10,446	8,834	8,471	7,604	6,400	7,406	10,290	12,006
Pozos	10,589	9,567	10,589	10,240	10,589	10,240	10,589	10,589	10,240	10,589	10,240	10,589
Total	19,926	17,604	19,966	20,357	21,490	19,411	19,274	18,354	16,847	18,396	21,022	23,050
Caudales Efluentes del Área (Suministro)												
Caña_a. superficial	5,495	3,059	-	-	-	4,364	4,402	3,821	3,683	-	-	-
Industrial	229	209	229	219	229	219	229	229	219	229	219	229
Pecuario	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
PordebajodeQambiental	1,495	3,996	8,458	9,642	10,417	1,470	1,395	1,246	1,046	7,323	10,148	10,960
Pradera	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Caña_a. subterranea	3,064	1,212	-	-	-	7,084	9,345	5,407	1,561	-	-	-
otros_cultivos	1,862	517	435	-	-	2,862	2,403	2,213	1,403	-	160	1,017
Total	12,401	9,248	9,377	10,117	10,901	16,255	18,030	13,171	8,169	7,808	10,782	12,462
Demanda no Cubierta												
Caña_a. superficial	2,239	-	-	-	-	13,519	19,189	9,827	259	-	-	-
Industrial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pecuario	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Doméstico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Caña_a. subterranea	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
otros_cultivos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sum	2,239	-	-	-	-	13,519	19,189	9,827	259	-	-	-
Requerimiento de Suministro (incluyendo pérdidas, reuso) Demanda												
Caña_a. superficial	7,734	3,059	-	-	-	17,883	23,590	13,648	3,941	-	-	-
Industrial	573	523	573	548	573	548	573	573	548	573	548	573
Pecuario	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199
Doméstico	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281	281
Caña_a. subterranea	3,064	1,212	-	-	-	7,084	9,345	5,407	1,561	-	-	-
otros_cultivos	1,862	517	435	-	-	2,862	2,403	2,213	1,403	-	160	1,017
Total	13,713	5,791	1,488	1,028	1,053	28,858	36,392	22,321	7,934	1,053	1,188	2,070

La segunda parte de la tabla con el título “*requerimiento de suministro (incluyendo pérdidas, reuso)*” se observa de forma gráfica en la **Figura 44**. Aquí se presenta el volumen de agua requerido para cada uso, en su orden: caña de azúcar de aguas superficiales, industrial, pecuario, doméstico, caña que se abastece de aguas subterráneas y otros cultivos. En la figura se refleja claramente que la mayoría de la demanda está representada por la caña específicamente de las fuentes de aguas superficiales (barra de color azul en la figura) y la caña abastecida con aguas subterráneas (barra de color fucsia en la figura), seguida por el requerimiento de otros cultivos, siendo el mes de mayor demanda julio, seguido por junio y agosto. Al analizar la tabla de forma global, se nota claramente que el total de la demanda en los meses de junio, julio y agosto es mayor al volumen de los caudales afluentes explicados anteriormente.

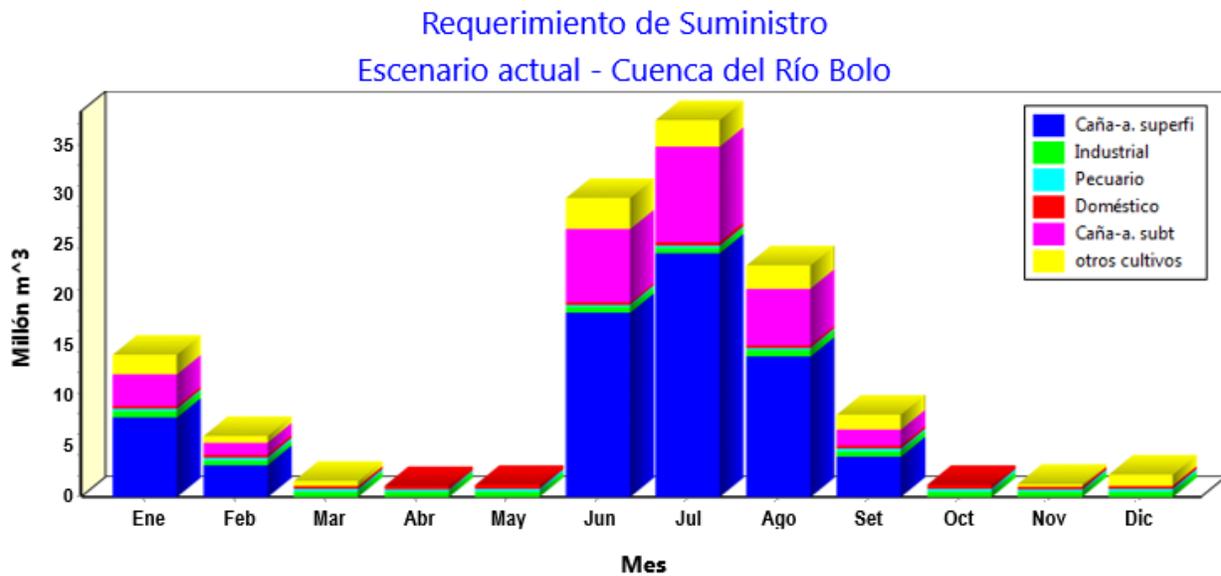


Figura 44. Demandas simuladas mediante WEAP

En la tercera parte de la tabla se pueden analizar “*los Caudales Efluentes del Área (Suministro)*”, que representan el volumen de agua que sí fue suministrado con las fuentes disponibles. Así mismo, al examinar detalladamente los usos para caña de azúcar por parte de aguas subterráneas, pecuario y otros cultivos, el volumen suministrado es igual al requerido, dicho de otro modo, las fuentes de agua alcanzaron a abastecer el total requerido de estos usos. Por otra parte, en el uso industrial el volumen efluente presentado en esta parte de la tabla, corresponde al 40% del

requerido, ya que el caudal de retorno estipulado en el modelo que es el 60%, así mismo, al comparar el volumen de agua del uso doméstico efluente es el 20% del volumen requerido puesto que el caudal de retorno es del 80%. Así las cosas, se puede concluir que todos requerimientos hídricos de los diversos usos se alcanzaron a abastecer con las fuentes disponibles excepto el de caña de azúcar-aguas superficiales.

Entonces, para la demanda de la caña de azúcar-aguas superficiales, en los meses de enero, junio, julio, agosto y septiembre el requerimiento es diferente a lo suministrado, mostrando así que la oferta de aguas superficiales expresadas en el modelo como río Bolo y río Aguaclara, no alcanza a abastecer la demanda de la caña. En concordancia con lo que ya se había explicado anteriormente el total de la demanda en varios meses es mayor a la oferta, y considerando que en WEAP la caña de azúcar –aguas superficiales tiene la última prioridad, es un resultado esperado que el agua no alcance a abastecer los caudales requeridos en estos meses.

Finalmente, en la última parte de la tabla (demanda no cubierta), se presentan los volúmenes de agua que no fueron cubiertos, es así, como el modelo demuestra que existe demanda no abastecida para los meses de enero, junio, julio, agosto. Si se suma la demanda no cubierta del año es de 45.032.183 m³.

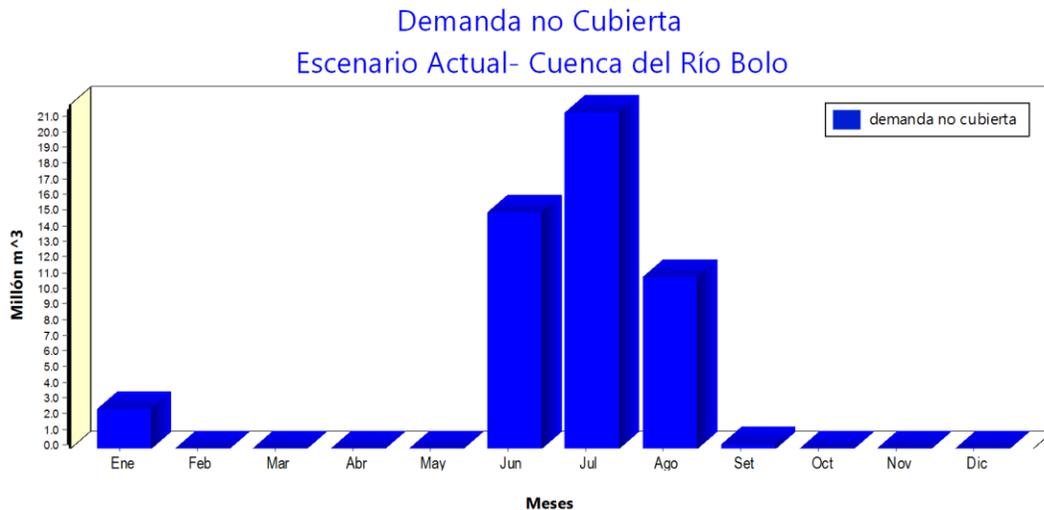


Figura 45. Demanda no cubierta - Escenario actual- WEAP

Basándose en los datos analizados en la cuenca del río Bolo existe un déficit hídrico, totalmente evidenciado en el terreno pues en la cuenca para enfrentar los altos requerimientos superiores a la oferta, se han tomado medidas de solución rápida como son: la reasignación de caudales a los usuarios, incremento de uso de aguas subterráneas y turnos de riego. Paralelamente se ha realizado un esfuerzo de planificación a través del trabajo de administración del agua del río Bolo, que estableció y dio la línea base de una regla de operación, que permite a su vez, hacer reusos de aguas drenadas, mantenimientos de algunos canales, entre otros. Es así como se ha logrado superar conflictos de usuarios del agua y garantizar en varias ocasiones el caudal ambiental.

No obstante, con el establecimiento de turnos de riego en los periodos más secos, se presenta detrimento en la producción de los cultivos, incumplimiento en los regímenes de operación de pozos y de caudal ambiental. Sumado además que los periodos secos son más prolongados y las precipitaciones con tendencia a disminuir en el tiempo (explicado en el capítulo 1), se puede concluir que dichas medidas no serán sostenibles en el tiempo. Considerando todos estos factores, a continuación, se realiza el análisis de alternativas de abastecimiento para la cuenca del río Bolo.

7.8 DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA SATISFACER LA DEMANDA EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO

En el análisis de alternativas se busca equilibrar el balance oferta demanda de agua en la cuenca del río Bolo. Para esto se proponen alternativas de reducción de la demanda considerando los posibles ahorros, y desde la oferta se tienen en cuenta primero los recursos disponibles denominados recursos convencionales y posteriormente los recursos no convencionales. Se pretende proveer el suministro de agua para satisfacer la demanda de caña de azúcar (demanda no cubierta), con el mínimo costo ambiental y económico, siguiendo el diagrama presentado en la **Figura 46**. Dicho de otra manera, como lo explica la FAO “*Las opciones para afrontar la escasez de agua pueden dividirse en aumento del suministro y gestión de la demanda. El aumento del suministro contempla el incremento del acceso a fuentes de agua convencionales, la reutilización de aguas de drenaje y de aguas residuales, los trasvases entre cuencas, la desalinización y el control de la contaminación*” (FAO, n.d.).

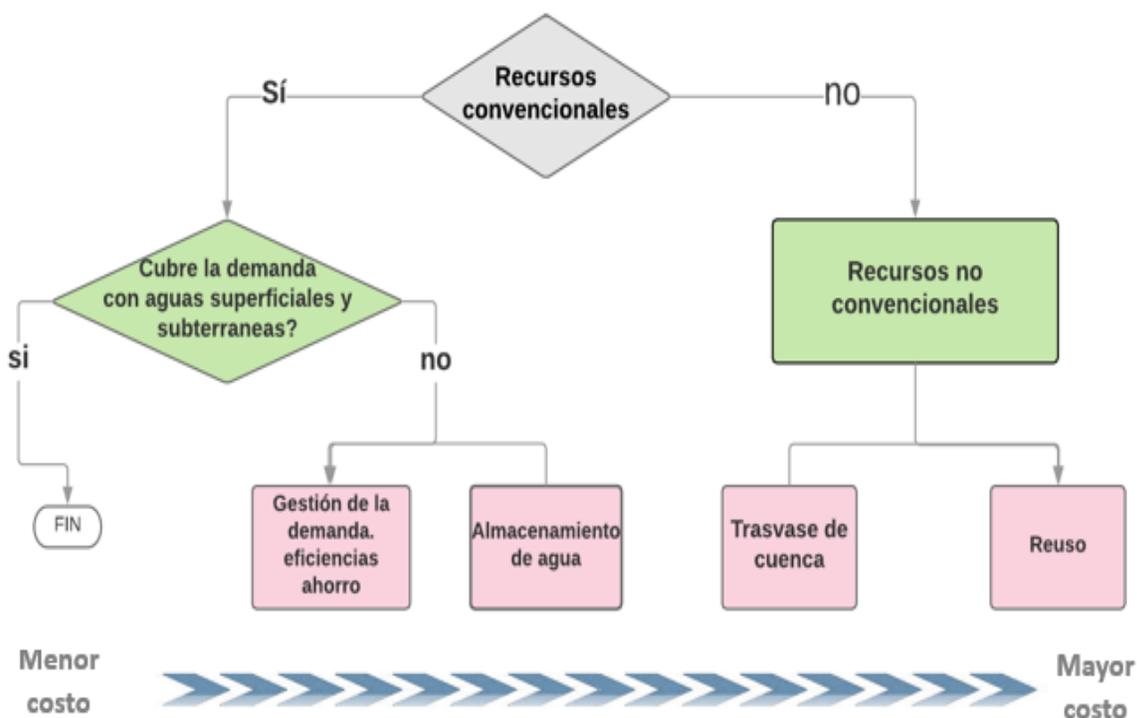


Figura 46. Diagrama de flujo de selección de alternativas
 Elaboración propia –diagramado con teoría de (Hernández Sancho & Mocholi Arce, 2007) y (AQUASTAT & FAO, 2009)

7.8.1 Recursos convencionales – Gestión en la demanda

La gestión de la demanda se define como el conjunto de acciones que controlan la demanda, ya sea aumentando la eficiencia del uso del agua como recurso natural, o re-asignando los recursos hídricos dentro de cada sector y entre los distintos sectores (FAO, 2013). Para la gestión de la demanda se analizaron primero las pérdidas, sus causas de ocurrencia y la posibilidad de disminuirlas. Las pérdidas de agua se presentan en la distribución de agua para riego desde la toma inicial del río hasta la aplicación en el cultivo, como se presenta en el esquema de la **Figura 47**.

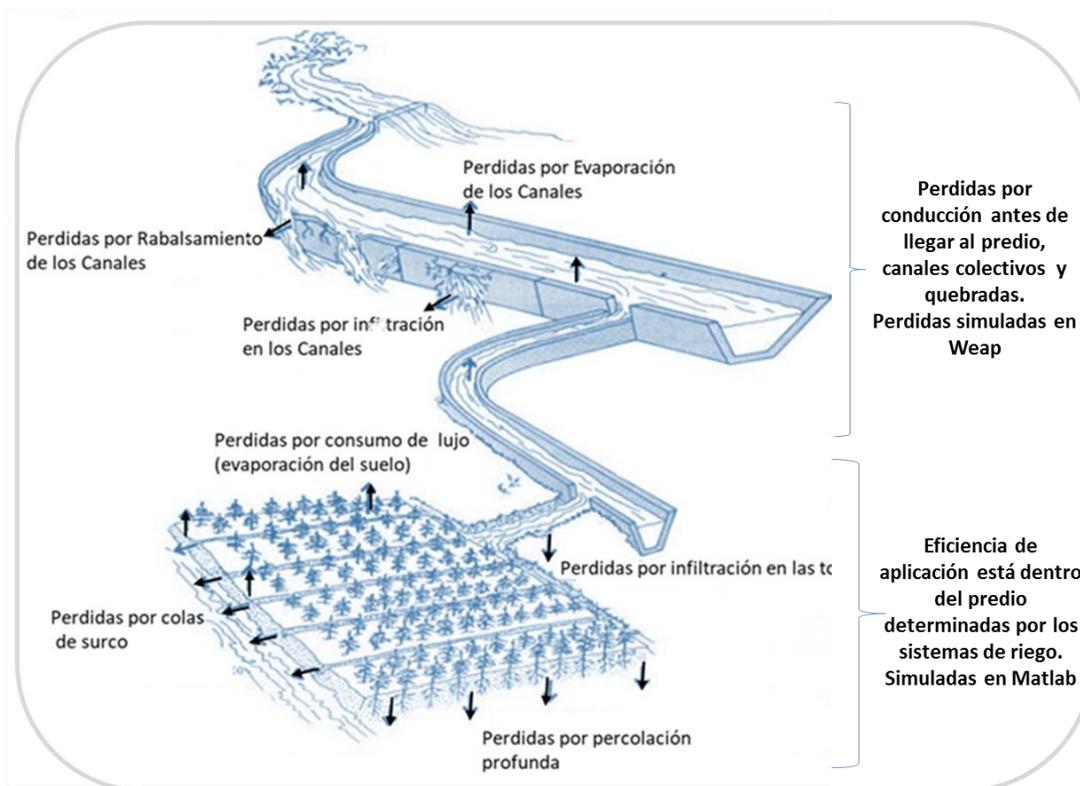


Figura 47. Esquema de pérdidas en la distribución de agua
Fuente: Adaptado de (Núñez, 2015)

Como ya se ha especificado en el numeral 7.2.2 Condiciones de distribución de agua cuenca río Bolo, existen varios kilómetros de canales abiertos constituidos en el terreno, estas pérdidas quedaron reflejadas en WEAP directamente en el nodo 2 en la conducción que entrega a la caña que se riega con aguas superficiales. Por otro lado, las eficiencias en la aplicación de agua en los predios se reflejaron en el cálculo de la demanda trabajada en la herramienta Matlab. Entonces se realizaron simulaciones con

varios escenarios que permiten evaluar el impacto en la demanda de las mejoras en las eficiencias de riego y la disminución de pérdidas en la conducción.

7.8.1.1 Disminución de pérdidas de agua en las conducciones colectivas (escenario 1)

Se encuentra que una opción factible es la disminución de pérdidas de agua en un 10% a través mantenimientos y revestimiento de algunos tramos. Se corre el modelo con esta alternativa y se observa que continúa la demanda no cubierta para la caña de azúcar como se observa en la **Figura 48**.

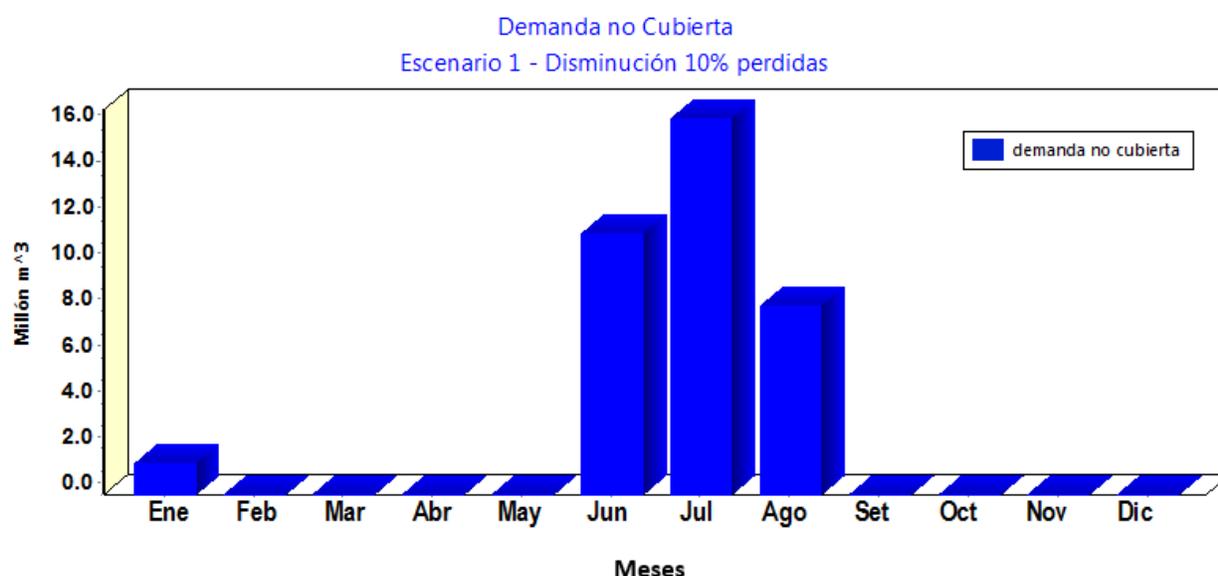


Figura 48. Demanda no cubierta para el escenario 1

Sin embargo, existe disminución de la demanda de la caña y de la demanda no cubierta, como se puede detallar en la **Tabla 37**. En el requerimiento de suministro se presenta un ahorro de 8.038.622 m³ equivalente a un 12%, respecto al escenario base (actual). La demanda no cubierta pasa entonces de 45.032.183 m³ a 37.540.560 m³ un ahorro de 7.491.624 m³ equivalentes a una disminución del 17%, que son ahorros significativos, si bien no alcanza a abastecer totalmente el requerimiento que se necesita, es una gestión importante de realizar dentro de la administración del agua en la cuenca. En términos de riego se puede afirmar que, si se pudiera cubrir la demanda

con 7 millones de metros cúbicos más, y si se asume que para un riego en la zona se gastan 1.400 m³/ha, esto equivaldría a poder aplicar un riego a 5.351 hectáreas.

Tabla 37. Comparación demanda no cubierta escenario 1 con escenario base

Mes	Requerimiento de Suministro caña / abast superficial		Demanda no cubierta caña / abast superficial	
	Escenario actual	Escenario 1 dism 10% pérdidas	Escenario actual	Escenario 1 dism 10%
	Ene	7,733,720	6,843,763	2,238,661
Feb	3,058,778	2,706,790	-	-
Mar	-	-	-	-
Abr	-	-	-	-
May	-	-	-	-
Jun	17,883,084	15,825,192	13,518,912	11,461,019
Jul	23,590,483	20,875,813	19,188,864	16,474,194
Ago	13,648,178	12,077,616	9,827,203	8,256,641
Sep	3,941,385	3,487,831	258,544	-
Oct	-	-	-	-
Nov	-	-	-	-
Dic	-	-	-	-
Total	69,855,628	61,817,006	45,032,183	37,540,560

7.8.1.2 Mejoras en las eficiencias de riego en los predios sembrados en caña de azúcar (Escenario 2)

Con el mapa de coberturas de la cuenca del río Bolo se adjudicó un nuevo atributo para asignarle a cada predio, y lograr una nueva distribución de eficiencias, modificando a un 30% del área en caña que actualmente se riega por sistemas de surcos que tienen eficiencias muy bajas (50%) a sistemas de riego tecnificados con eficiencias del 81%. Para lograr ver el efecto de las eficiencias en la demanda se hizo la modificación en las áreas con mayores **Kc**, de manera que la nueva distribución de eficiencias se muestra en la **Tabla 38** y en la **Figura 49**.

Tabla 38. Escenario de eficiencias de aplicación de riego

Escenarios	ESCENARIO ACTUAL			ESCENARIO 2		
	Área bajo riego	Eficiencia	% Area	Área bajo riego	Eficiencia	% Area
Riego por aspersión	4027	0.70	21%	4027	0.70	21%
Riego por surcos	15378	0.50	79%	9638	0.50	50%
Sistemas de riegos tecnificados	0	0		5740	0.81	30%
Área Total	19405		100%	19405		100%

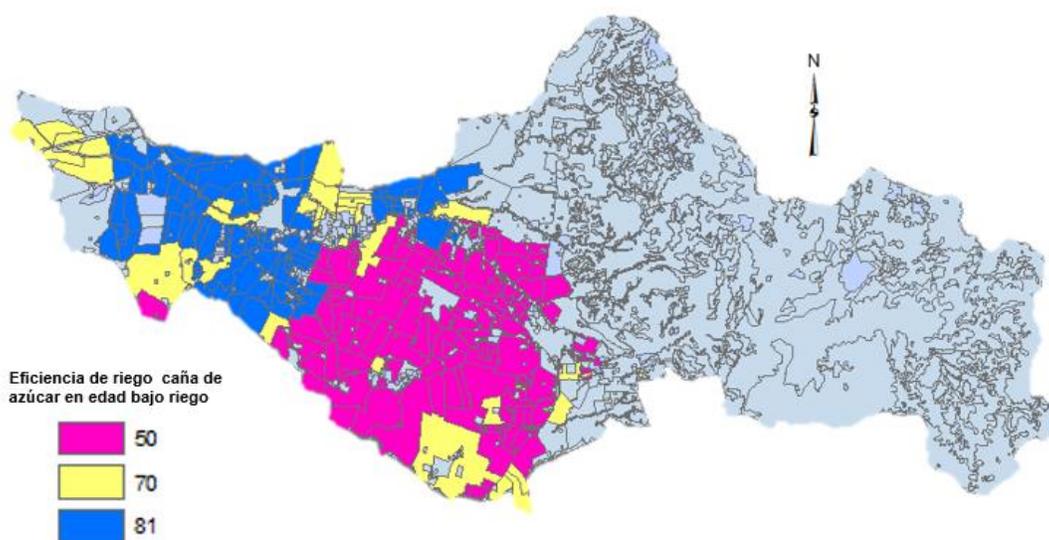


Figura 49. Eficiencia de riego en caña de azúcar- 30% el área con eficiencias de 81%- Escenario 2

Se corrió el modelo en Matlab y se obtuvo el resultado que se encuentra en la tabla 39 en la que se observa que la reducción en la demanda total de la caña es del 29%. A nivel mensual se presentan porcentajes de ahorro de hasta el 80% como es el caso del mes de diciembre, 73% en el mes de septiembre, y en menor escala para los meses de junio y julio en que el ahorro fue del 18% y 19% respectivamente, esta variabilidad en los ahorros se debe a la distribución espacial de las diferentes variables como el **Kc** y el mismo **Kr**.

Tabla 39 Demanda Calculada en Matlab escenario
Demanda m³

Mes	Escenario actual	Escenario 2	% reducción
ENERO	9,010,955	5,187,085	42%
FEBRERO	3,563,940	1,140,742	68%
MARZO			
ABRIL			
MAYO			
JUNIO	20,836,503	17,078,643	18%
JULIO	27,486,487	22,392,287	19%
AGOSTO	15,902,195	11,777,531	26%
SEPTIEMBRE	4,592,311	1,226,371	73%
OCTUBRE			
NOVIEMBRE			
DICIEMBRE			
	81,392,391	58,802,659	28%

Seguidamente, con estos resultados se volvió a correr el modelo en WEAP para obtener el nuevo balance oferta demanda que se muestra a continuación.

Tabla 40. Comparación de la demanda no cubierta para el escenario 2 con el escenario actual

Mes	Requerimiento de Suministro caña / abast superficial		Demanda no cubierta caña	
	Escenario actual	Escenario 2	Escenario actual	Escenario 2
Ene	7,733,720	4,451,854	2,238,661	
Feb	3,058,778	979,050	-	
Mar				
Abr				
May				
Jun	17,883,084	14,657,873	13,518,912	10,293,700
Jul	23,590,483	19,218,348	19,188,864	14,816,729
Ago	13,648,178	10,108,154	9,827,203	6,287,179
Sep	3,941,385	1,052,542	258,544	
Oct	-		-	-
Nov	-	-	-	
Dic	-	0	-	
Total	69,855,628	50,467,822	45,032,183	31,397,608

La **Tabla 40**, muestra una disminución significativa en el requerimiento de suministro por parte de la caña de azúcar que pasan de 69 millones de m^3 a 50 millones, al igual que en la demanda no cubierta que disminuyó en $13.634.576 m^3$. Hay que mencionar, además que en el mes de enero la demanda se alcanzó a cubrir incrementando la eficiencia de riego en 5.740 hectareas (ver **Figura 50**).

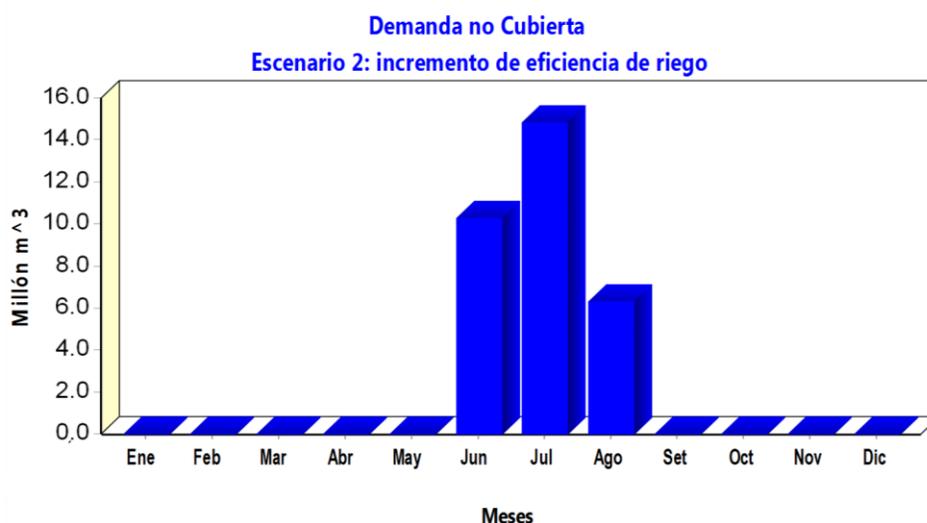


Figura 50. Resultados de demanda no cubierta para el escenario 2

Por otra parte, se unieron los escenarios 1 y 2, es decir se evaluó conjuntamente la disminución de pérdidas en la distribución en un 10% y el incremento de la eficiencia a un 81% en 5.740 hectáreas. El resultado de combinar los escenarios 1 y 2 es la disminución de $18.696.069 m^3$ con respecto al escenario actual o base, cabe señalar que aún con los ahorros obtenidos, se continúa sin cubrir la demanda en los meses del periodo seco junio, julio y agosto con un total de $25.195.381 m^3$.

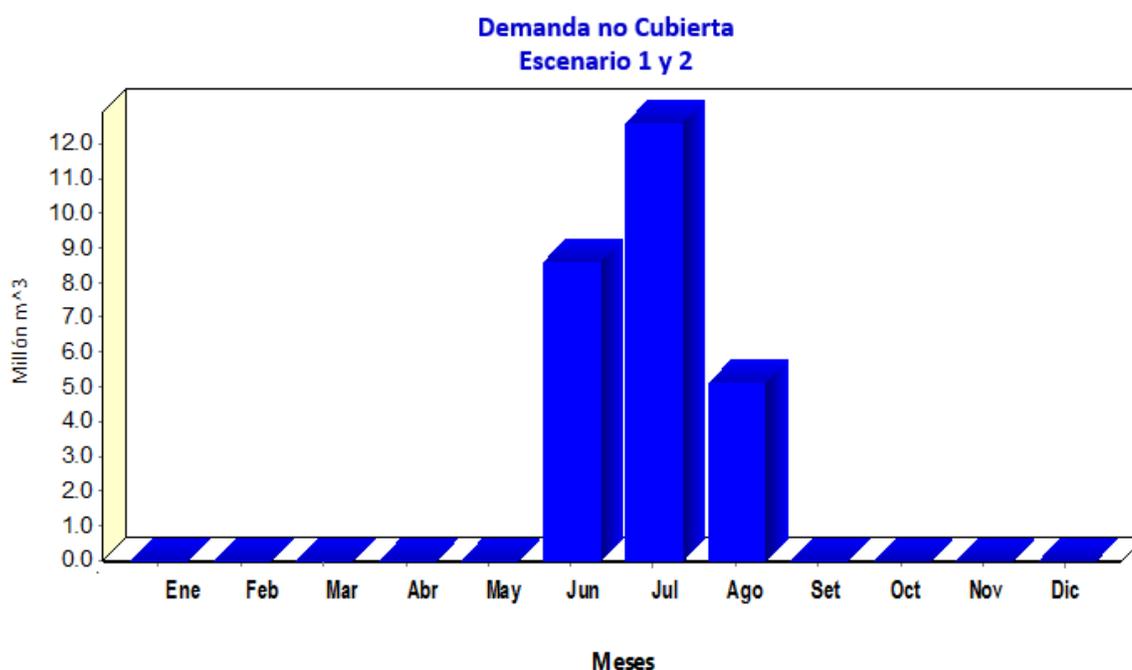


Figura 51. Demanda no Cubierta Escenario 1 y 2

Tabla 41. Demanda de agua escenario 1 y 2

Mes	Requerimiento de Suministro caña / abast superficial		Demanda no cubierta caña	
	Escenario actual	Escenario 1 Y 2	Escenario actual	Escenario 1 Y 2
Ene	7,733,720	3,939,558	2,238,661	
Feb	3,058,778	866,386		
Mar				
Abr				
May				
Jun	17,883,084	12,971,121	13,518,912	8,606,948
Jul	23,590,483	17,006,800	19,188,864	12,605,181
Ago	13,648,178	8,944,960	9,827,203	5,123,985
Sep	3,941,385	931,421	258,544	
Oct				
Nov				
Dic				
Total	69,855,628	44,660,247	45,032,183	26,336,115

7.8.1.3 Eficiencia de 81% para toda el área bajo riego (Escenario 3)

El tercer escenario consiste en cambiar todo el sistema de riego a riego tecnificado con eficiencia del 81% en toda el área bajo riego (ver **Figura 52**), a continuación se corrió el modelo en Matlab, y los resultados arrojaron que al comparar el escenario actual con el escenario 3 se obtiene una reducción del 41% en los requerimientos de los cultivos (ver **Tabla 42**).

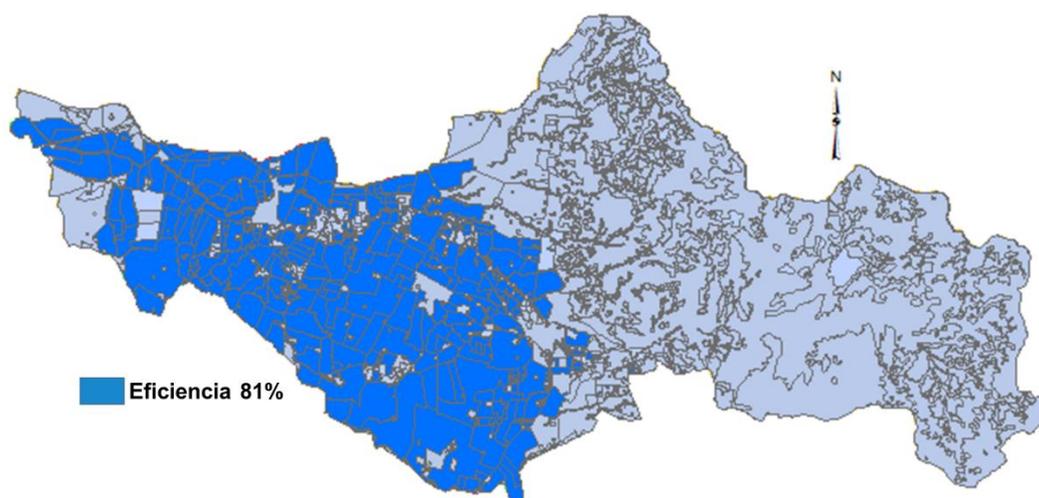


Figura 52. Eficiencia de riego en caña de azúcar con edad bajo riego- Escenario 3

Tabla 42. Demanda de agua escenario 3

Mes	Demanda m ³			%
	Escenario	Escenario	Escenario	
ENERO	9,010,955	5,187,085	4,783,904	47%
FEBRERO	3,563,940	1,140,742	1,100,02	69%
MARZO				
ABRIL				
MAYO				
JUNIO	20,836,503	17,078,643	13,443,821	35%
JULIO	27,486,487	22,392,287	17,721,419	36%
AGOSTO	15,902,195	11,777,531	9,436,225	41%
SEPTIEMBRE	4,592,311	1,226,371	1,650,733	64%
OCTUBRE				
NOVIEMBRE				
DICIEMBRE				
	81.392.391	58.802.659	48.136.126	41%

En la **Figura 53**, se ilustra claramente la disminución demanda, tomando como ejemplo la semana 38 que representa el escenario actual en contraste con el escenario 3 dónde la eficiencia de riego es máxima. En la figura se destaca el cambio de la demanda de rojo a amarillo, es decir pasa de tener más de 300 m³/ha en demanda a un rango entre 150 y menor a 300 m³/ha, de igual forma se nota el incremento de área en color verde es decir demandas entre 0-150 m³/ha.

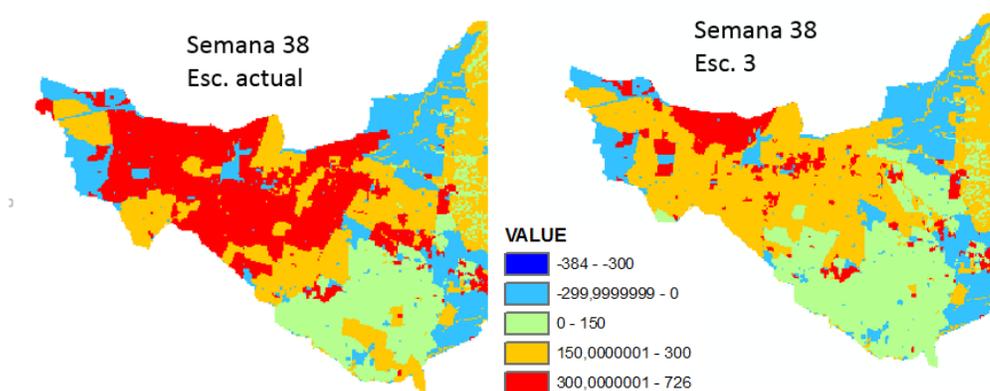


Figura 53. Comparación gráfica de los requerimientos para la semana 38 entre el actual y el escenario 3

Luego de analizar la demanda con toda el área bajo riego con eficiencia del 81%, se ingresaron los registros a WEAP conservando la disminución de pérdidas en la conducción en un 10% y se obtuvieron los resultados presentados en la **Figura 54** y **Tabla 43**.

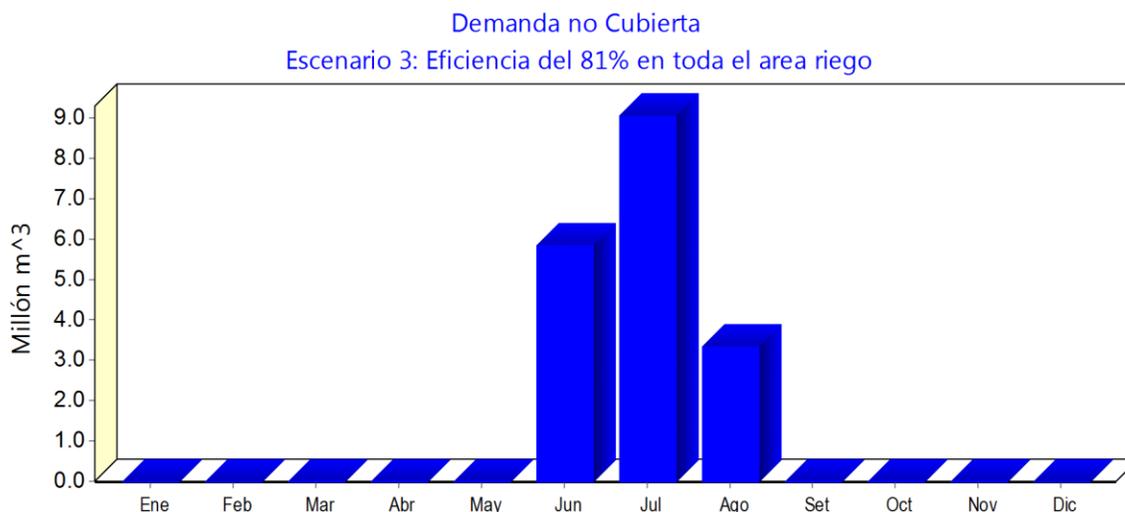


Figura 54. Resultados de demanda no cubierta para el escenario 3

Tabla 43. Demanda no cubierta para el escenario 3

Mes	Requerimiento de Suministro caña /		Demanda no cubierta caña	
	Escenario actual	Escenario 3	Escenario actual	Escenario 3
Ene	7,733,720	3,633,345	2,238,661	-
Feb	3,058,778	835,461	-	-
Mar	-	-	-	-
Abr	-	-	-	-
May	-	-	-	-
Jun	17,883,084	10,210,497	13,518,912	5,846,324
Jul	23,590,483	13,459,306	19,188,864	9,057,687
Ago	13,648,178	7,166,753	9,827,203	3,345,778
Sep	3,941,385	1,253,721	258,544	-
Oct	-	-	-	-
Nov	-	-	-	-
Dic	-	-	-	-
Total	69,855,628	36,559,083	45,032,183	18,249,789

Se obtiene una diferencia de 26.782.394 m³, que equivale a una disminución del 59% de volumen de agua que con la gestión de eficiencias máxima de riego se podría utilizar para abastecer la demanda de agua requerida para cultivos de caña de azúcar, cabe destacar que, se sigue presentando déficit en los meses de junio, julio y agosto en un total de 18.249.789 m³.

En síntesis, la gestión simulada en la demanda de caña de azúcar lograda a partir de mejorar la eficiencia de riego en los predios es 33 millones de metros cúbicos equivalentes al 41%, (**Figura 55**) y posteriormente al realizar el balance oferta demanda en weap se refleja en la disminución de la demanda no cubierta para toda la cuenca en 26 millones de metros cúbicos equivalentes a un 59% de ahorro.

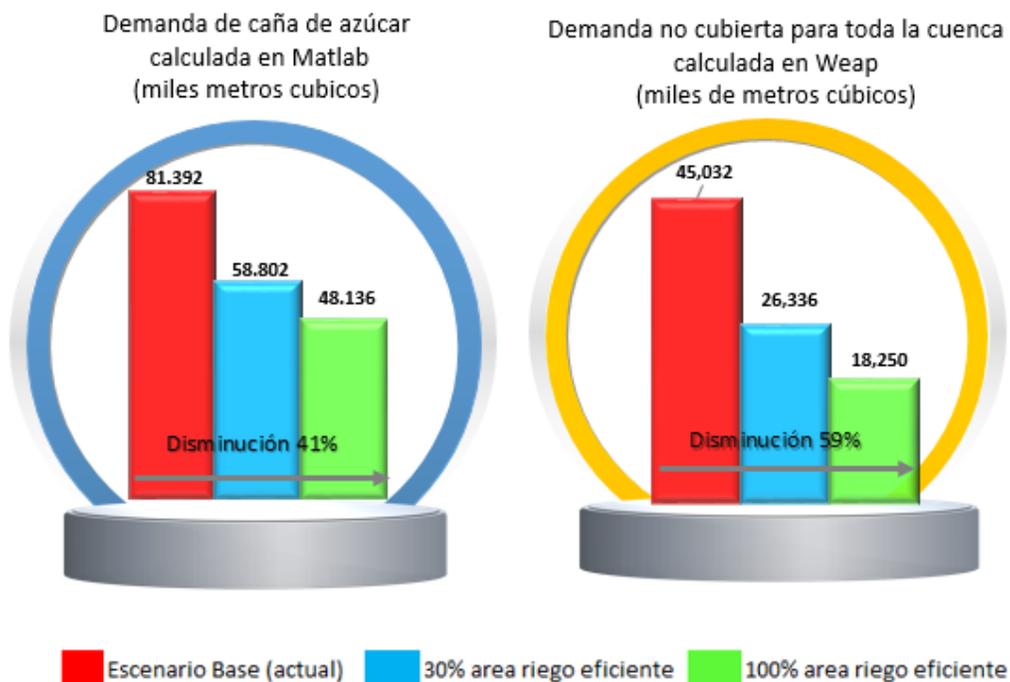


Figura 55. Resumen de ahorros de agua por escenario

Reasignación aguas subterráneas- aguas superficiales

Al revisar globalmente los resultados de los diferentes escenarios, se encuentra que en la medida que se incrementan las eficiencias en toda el área de la caña de azúcar, se libera disponibilidad de agua subterráneas en los meses críticos de junio, julio y agosto, es así como en la **Tabla 44** y en la **Figura 56**, se detalla la disponibilidad del agua subterránea y se compara con la demanda no cubierta en cada uno de los escenarios, es así como del escenario 1 al 3 se incrementa la disponibilidad significativamente y al reducirse la demanda no cubierta, en el escenario 3 es cercano

el volumen disponible de aguas subterráneas 17.613.102 metros cúbicos de aguas subterráneas disponibles.

Tabla 44. Variación de la disponibilidad de aguas subterráneas por escenario

	Agua subterr. Disponible	Demanda no cubierta	Agua subterr. Disponible	Demanda no cubierta
MES	Escenario actual		Escenario 1	
Junio	1.225.858	18.390.106	1.225.858	15.771.662
Julio	3.173.126	14.317.669	3.173.126	12.163.551
Agosto	5.182.054	9.827.203	5.182.054	8.256.641
Total	9.581.037	42.534.978	9.581.037	36.191.855
MES	Escenario 2		Escenario 3	
Junio	2.838.362	12.169.642	4.411.458	8.655.653
Julio	4.570.322	9.042.488	5.821.161	6.248.358
Agosto	6.584.439	5.123.985	7.380.483	3.345.778
Total	13.993.123	26.336.115	17.613.102	18.249.789

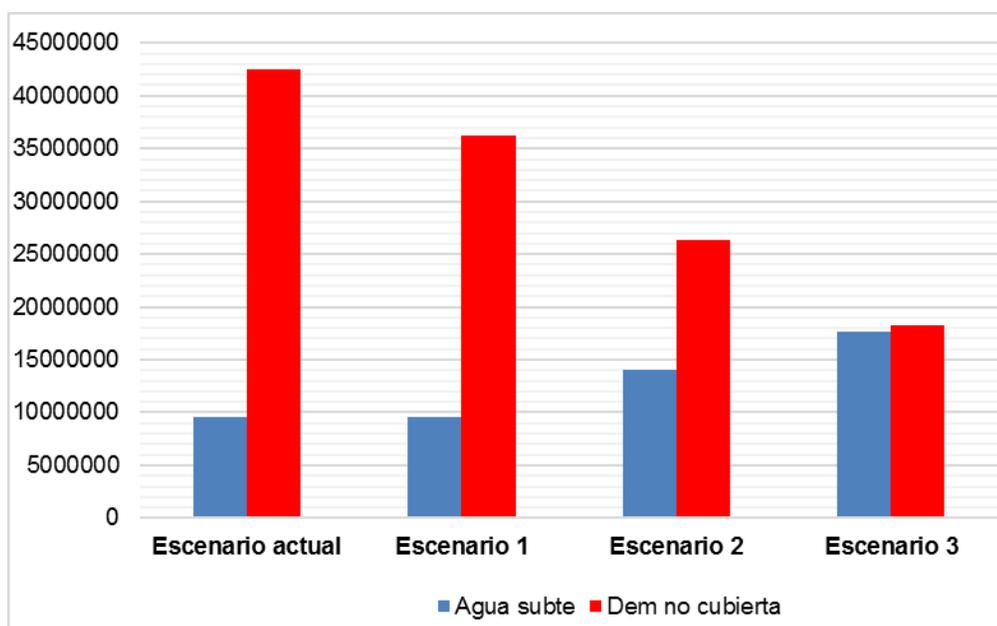


Figura 56. Variación de la disponibilidad de aguas subterráneas por escenario

Considerando los resultados analizados, podría pensarse que como en esta cuenca hay interconectividad entre los sistemas de aguas subterráneas y superficiales

y muchas áreas son administradas por usuarios en común, los pozos podrían ampliar su área de influencia con la misma capacidad instalada y de esta forma liberar oferta de aguas superficiales para otros predios. A este tipo de acciones la FAO, en su estudio de cómo afrontar la escasez de agua en agricultura (FAO, 2013) ha denominado reasignación de agua.

Con esta medida se procura aprovechar al máximo los recursos hídricos disponibles en la cuenca, aunque es conveniente resaltar que es indispensable acompañar estas acciones con análisis costo beneficio pues los costos de regar con pozos son muy superiores al de regar con aguas superficiales, las entidades encargadas de la coordinación de la gestión integral de recurso hídrico deben garantizar una distribución equitativa de los beneficios a todos los usuarios y fortalecer las asociaciones de usuarios, revisar políticas ambientales, adaptar normas y usar mecanismos de incentivos, para que los usuarios puedan realizar las inversiones necesarias y requerida. Esto implica gestión conjunta entre entes públicos privados y ONG. Un caso exitoso de manejo de aguas subterráneas con los usuarios es en Andhra Pradesh –India, donde conformaron Comités de Gestión de Aguas subterráneas (GMC, por las siglas en inglés), alrededor de 500.000 usuarios que determinan juntos la mejor forma de usar las reservas hídricas.

Continuando con el orden del diagrama de flujo de selección de alternativas, pueden darse opciones complementarias.

7.8.1.4 Almacenamiento de agua

Al iniciar la alternativa de almacenamiento de agua, se encontró que en la *Evaluación Regional Del Agua Valle Del Cauca – 2017*, (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, 2017), ha pensado en la implementación de proyectos para mitigar efectos de la variabilidad climática, por lo que a comienzos de los años 90 dentro del “Plan del agua” se planteó la necesidad de hacer estudios de prefactibilidad y factibilidad de diferentes alternativas de conformación de embalses de regulación de caudales que permitieran la interceptación y el almacenamiento de los excesos que se producen y transitan por los cauces en los periodos húmedos, y ser aprovechados en los periodos secos con objetivos multipropósito.

Dentro de dichos estudios se encuentra el estudio de factibilidad de la opción de conformación de un embalse de regulación en la quebrada Vilela -La Leona con trasvase de aguas desde el río Bolo con objetivos multipropósito dentro de la misma cuenca, entre ellas abastecimiento de acueductos en épocas de déficit por sequía y abastecimiento de agua para uso agrícola, pecuario e industrial en épocas de escasez por sequía. De los estudios realizados la CVC concluyó que no es posible regular picos de crecientes dado el bajo volumen disponible como resultado de las condiciones topográficas del terreno (ver **Figura 57**).

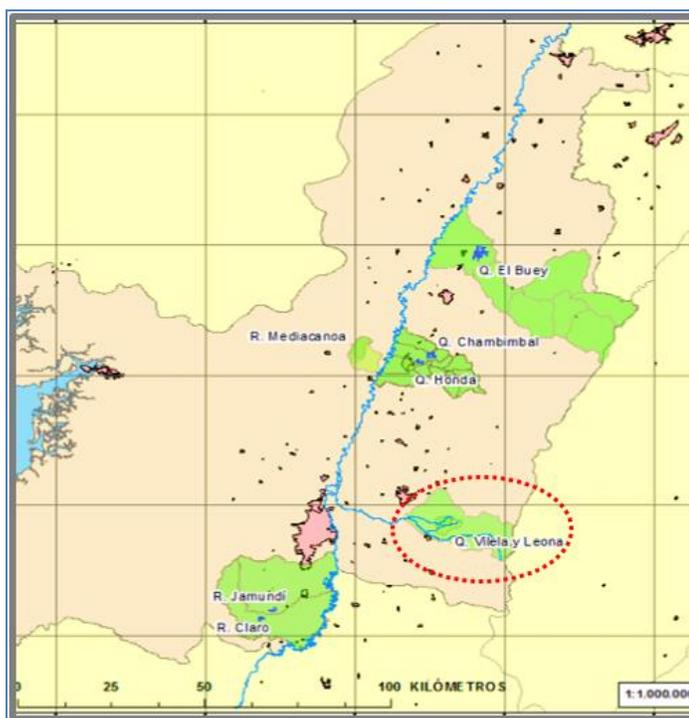


Figura 57. Localización de opciones de regulación de caudales mediante la conformación de embalses en el Valle del Cauca – estudios 2015 -2016

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, 2017)

En segunda instancia, la construcción de nuevos embalses cada vez está más cuestionada por consideraciones económicas, sociales y medioambientales (FAO, 2013), y por otra parte no se ve en la cuenca otra ubicación que permitiera cumplir con los requisitos topográficos para un gran almacenamiento. Podría pensarse en almacenamientos aislados dentro de las haciendas agrícolas que contribuyan a aumentar la disponibilidad de agua a nivel predial, para esto se requeriría un análisis a una escala más pequeña que no está en el alcance de este proyecto.

7.8.2 Recursos no convencionales

7.8.2.1 Trasvase de otras cuencas (Escenario 4)

Al analizar la región y ver las posibles cuencas cedentes, se encuentra que el río Cauca tiene la oferta posible para abastecer la demanda razonable que no está satisfecha por el río Bolo después de asumir que las otras alternativas están agotadas y que la gestión en la demanda está realizada, evitando el detrimento de la producción de los cultivos, cumpliendo el caudal ambiental y cumpliendo el régimen de operación de los pozos. Por tal razón, como escenario 4 se modeló un trasvase desde el río Cauca hasta la cuenca específicamente los predios de caña de azúcar, el modelo se detalla en la **Figura 58**.

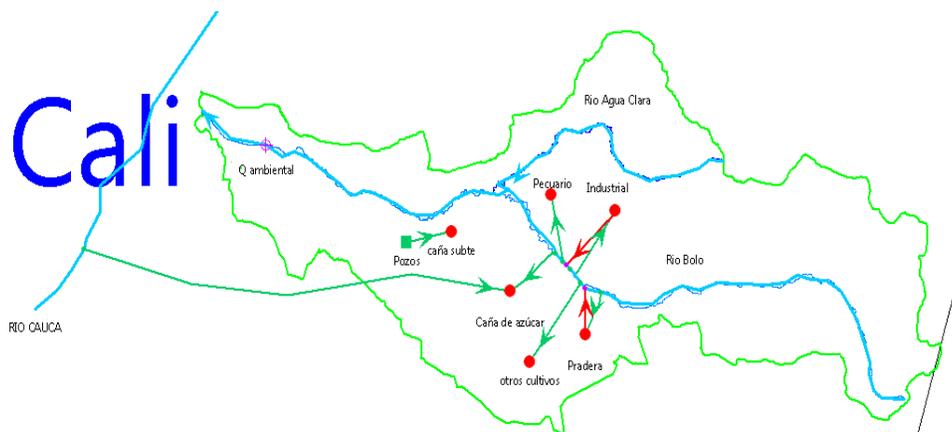


Figura 58. Modelo WEAP escenario 4 trasvase de otras cuencas

Los resultados están descritos en la **Tabla 45** y **Figura 59** considerado abastecimiento para junio de 3.4 m³/s, julio 2.4 y en agosto 1,3 m³/s.

Tabla 45. Metros cúbicos propuestos para ceder desde el río Cauca
Caudal de Cabecera (Mensual) (m³/s)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RIOCAUCA	0	0	0	0	0	3,4	2,4	1,3	0	0	0	0

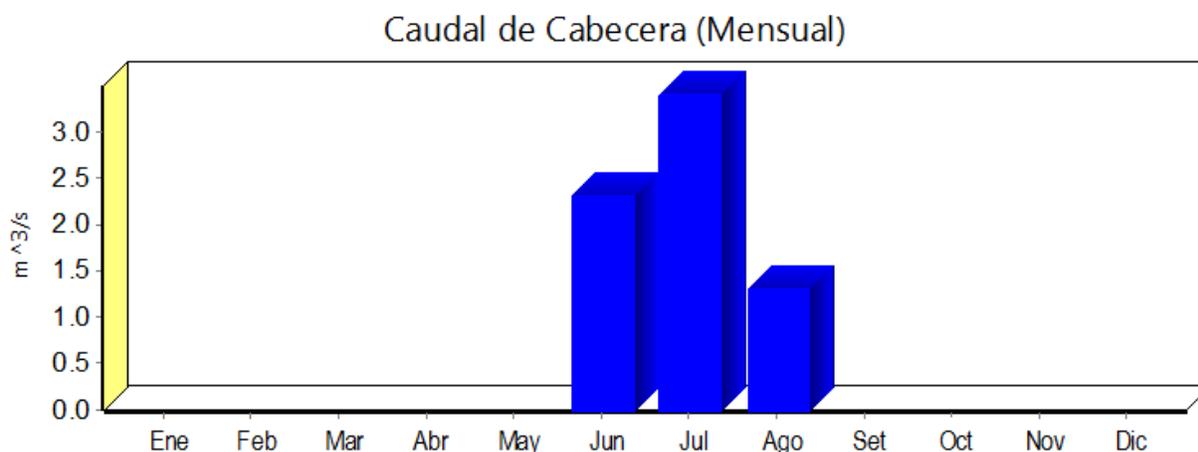


Figura 59. Metros cúbicos propuestos para ceder desde el río Cauca

Retomando lo explicado anteriormente, es necesario recalcar que estas medidas deben tener un análisis costo beneficio, y una coordinación y control gubernamental, privado y de asociación de usuarios. Como ejemplo de éxito de trasvase de cuenca internacional es el del río Santa en Perú. Finalmente con esta alternativa como complemento a la gestión en la demanda se lograría cubrir la demanda de la cuenca del río Bolo. Ver

Figura 60

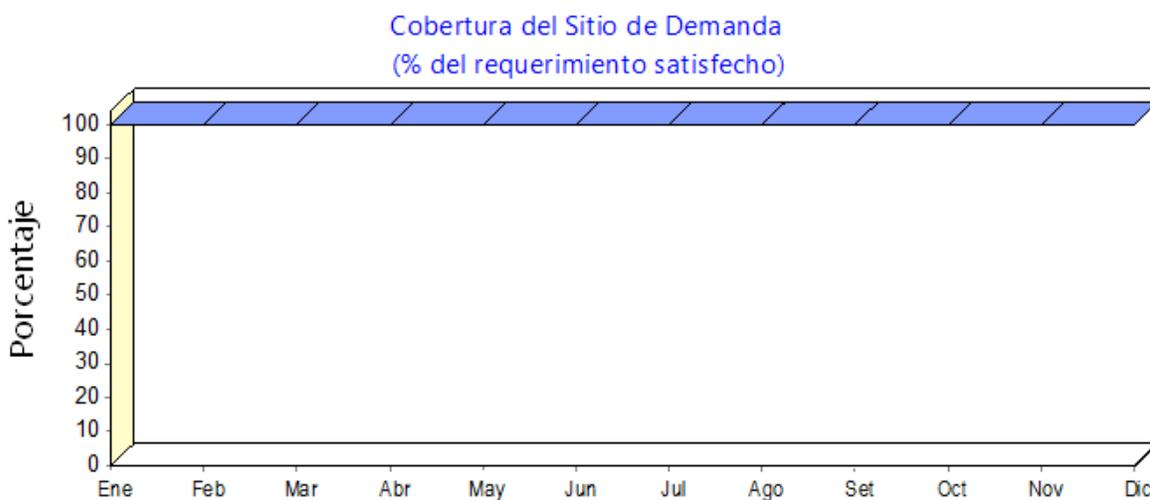


Figura 60. % de requerimiento satisfecho- Escenario 4 trasvase de cuencas

7.8.2.2 Reuso y reutilización

La adopción de medidas de reciclaje de agua a través de reutilización de aguas residuales urbanas es una alternativa que debe tenerse en cuenta desde el punto de

vista social, ambiental y sanitario. “Se estima que en todo el mundo unos 20 millones de hectáreas de tierras agrícolas se riegan con aguas residuales” (FAO, 2013). Se realizó un análisis de las posibilidades de reuso significativas en la cuenca del río Bolo, y se encontró que la ciudad de Palmira tiene proyectada la construcción de la Planta de tratamiento de aguas residuales, aunque la ciudad se encuentra en la cuenca del río Amaime, la ubicación de la PTAR es vecina de la cuenca consumidora del río Bolo, según se puede corroborar en la **Figura 61**.

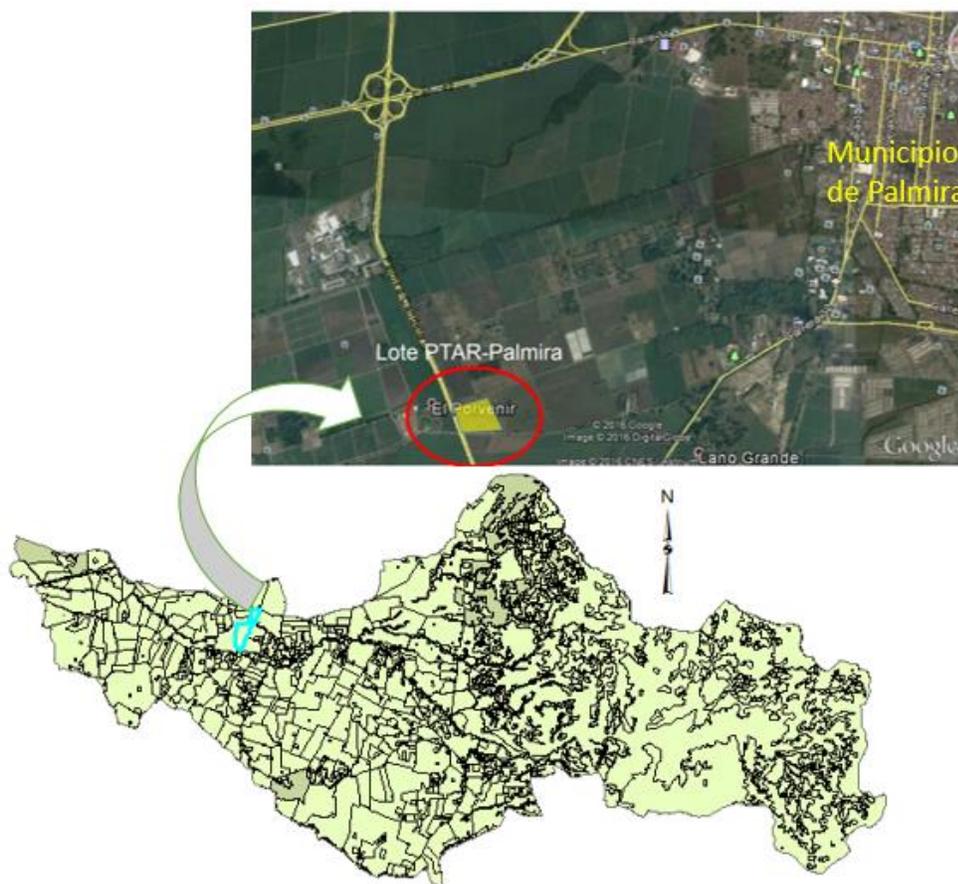


Figura 61. Ubicación del PTAR ciudad de Palmira (Valle)
Fuente: Adaptado presentación Alcaldía Municipal de Palmira

La PTAR recogerá vertimientos de 6 cuencas urbanas a través de canales interceptores con 22.749 metros de longitud, que finalmente llegan a la planta ubicada fuera de la zona urbana en medio de predios establecidos en caña de azúcar y limítrofe con la cuenca del río Bolo. Después de tratar el agua, se calcula transportará en promedio aproximadamente 1m^3 , en un recorrido que se puede precisar en la **Figura**

62 donde se compara con un mapa ampliado de la hidrografía de la cuenca del río Bolo, y permite ver que el recorrido del agua contempla recargas de algunos zanjones que están en el área de estudio.

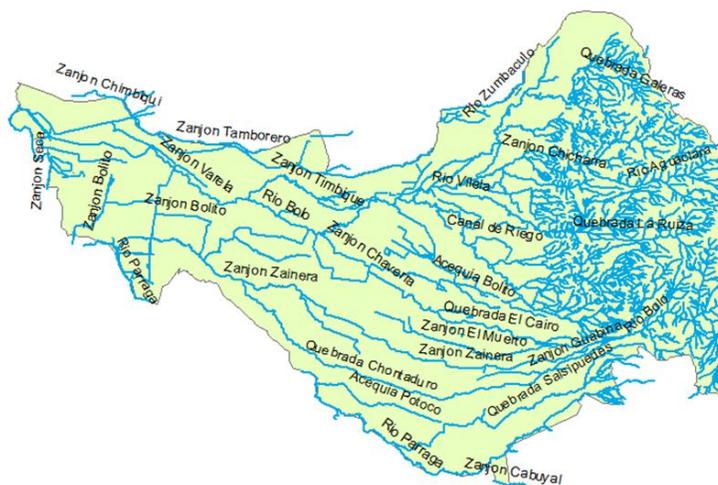


Figura 62. Recorrido aguas tratadas PTAR Palmira
Fuente foto: Adaptado presentación Alcaldía Municipal de Palmira

Acorde con este análisis se evidencia la viabilidad de realizar un reúso en la cuenca consumidora del río Bolo. A continuación, se presenta el esquema realizado en el modelo WEAP, teniendo como base el escenario 3.

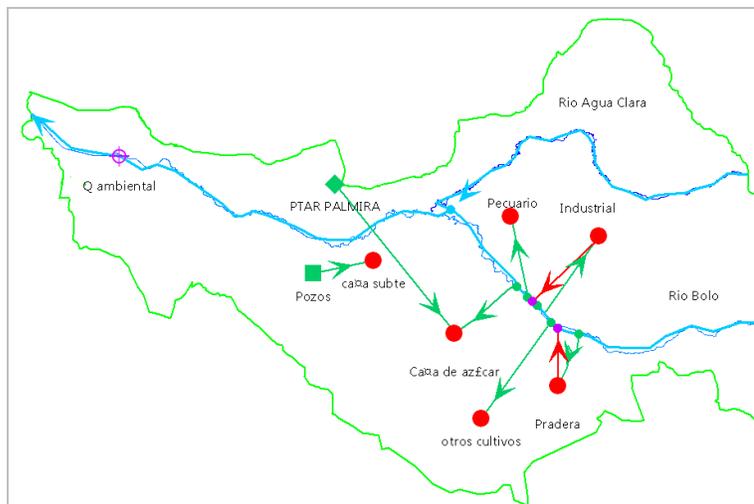


Figura 63. Esquema WEAP escenario 5. Alternativa de reuso

Los resultados muestran disminución del 40% en la demanda no cubierta respecto al escenario 3 (ver **Figura 64** y **Tabla 46**).

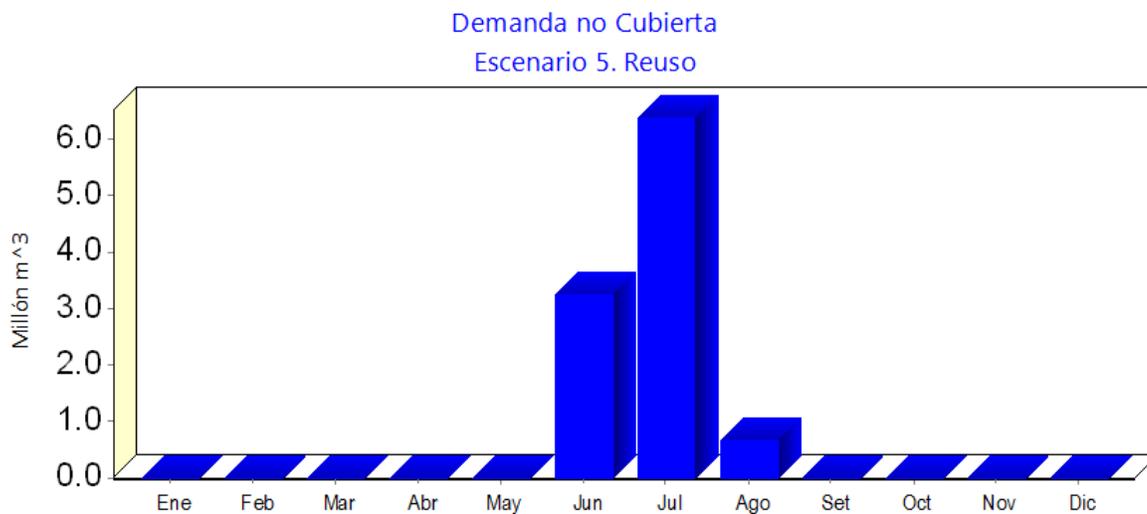


Figura 64. Demanda no cubierta para el escenario 5

Tabla 46. Comparación demanda no cubierta escenarios actual 3 y 5

Mes	Demanda no cubierta		
	Escenario	Escenario 3	Escenario 5
Ene	2,238,661		
Feb			
Mar			
Abr			
May			
Jun	13,518,912	5,846,324	3,254,324
Jul	19,188,864	9,057,687	6,379,287
Ago	9,827,203	3,345,778	667,378
Sep	258,544	-	-
Oct			
Nov			
Dic			
Total	45,032,183	18,249,789	10,300,989

Otro planteamiento puede ser unir los escenarios 4 y 5, la cantidad de agua a bombear sería 1 m³ menos para el río Cauca.

El análisis que se realizó fue de cantidad, pero es necesario tener en cuenta que la calidad del agua tratada es muy relevante en este caso, ya que la normatividad para uso de aguas tratadas en agricultura tiene varias exigencias que deberán revisarse antes de cualquier otro, es el primer punto en un análisis de viabilidad para reuso de aguas urbanas en agricultura.

8. CONCLUSIONES

Zona de priorización

Como primer objetivo se propuso realizar un análisis detallado de la situación de presión hídrica en el Valle del Cauca para determinar la zona prioritaria para realizar el estudio. Al respecto se obtuvo que la cuenca del río Bolo, al presentar un índice de uso de agua (IUA) crítico y el balance hídrico más negativo en los meses secos de las cuencas analizadas en el Valle del Cauca, fue priorizada como zona de intervención y de estudio. Después de desarrollar la metodología establecida se pudo constatar que la cuenca del río Bolo efectivamente presenta una condición de déficit alta en periodos secos, donde la demanda agrícola no alcanza a ser cubierta con la oferta de agua disponible, confirmando así las condiciones de priorización por la cual fue escogida, a pesar de las medidas de solución que se han tomado en la cuenca como turnos de riego y administración del recurso el problema de desabastecimiento no está solucionado.

Cálculo de la demanda

El segundo objetivo propuesto planteaba el cálculo de las demandas de los diferentes usos en la zona priorizada, lo que se logró mediante el desarrollo de una herramienta programada en Matlab. Para el cálculo adecuado de la demanda agrícola de la caña de azúcar, se desarrolló una herramienta en Matlab a través de matrices generadas en SIG la cual permite realizar análisis distribuido espacio-temporal para determinar la variabilidad de los requerimientos hídricos de la planta, así como de las necesidades de riego, según la variabilidad climática de la zona.

- Dentro de los datos de entrada de la herramienta se encuentra la precipitación y evaporación, se encontró que la mejor representación del modelo se dio con un análisis más distribuido con generación de mapas de precipitación y evaporación calculados con el método IDW, pues con polígonos de Thiessen que fue el otro método ensayado, la simulación no resulta acertada con respecto a los valores

observados en la zona, sin embargo, el algoritmo tiene la posibilidad de trabajar con los dos métodos.

- La principal ventaja del algoritmo desarrollado en Matlab, es que presenta el resultado de demanda por celdas (unidad de hectárea) lo que permitió obtener mapas de demanda para cada semana del año analizado. Los resultados de las matrices se encuentran en formato ascii y deben ser procesados por un sistema de información geográfico para una adecuada interpretación. Hay que mencionar además que el cálculo se puede realizar en cualquier temporalidad que se requiera anual, mensual o semanal.
- Los resultados de demanda distribuida en la cuenca del río Bolo arrojaron resultados demarcando zonas más deficitarias hacia la desembocadura de la cuenca en la zona del Aeropuerto y Candelaria caracterizada en la región por ser muy secas. Así mismo se pudo comprobar comparando con un cálculo no distribuido, que los datos arrojados de demanda son coherentes con los datos reales de riego, es así como, por ejemplo, la sumatoria de dos semanas (15 días similar a la frecuencia de riego) arroja una demanda de 1543 m³/ha para el sistema de riego por gravedad, siendo este un dato de cantidad real de agua aplicada promedio en un evento de riego en la zona.
- El modelo desarrollado permite simular escenarios de mejores eficiencias de riego y evaluar su impacto en la demanda para una cuenca, y por tanto se constituye como una herramienta de planificación sencilla utilizada para la agricultura y asociaciones de usuarios, a escala predial para la selección de sistemas de riego según disponibilidad de las fuentes de agua para evaluar cumplimientos ambientales, fuentes alternas y turnos de riego.
- Dentro de análisis de alternativas de abastecimiento para caña de azúcar en el Valle del Cauca, es indispensable realizar análisis detallados del comportamiento de la demanda de agua agrícola, la herramienta desarrollada en

Matlab permitió simular edades de la caña y eficiencias de riego que representan las condiciones que se encuentra en el campo. Se analizaron las épocas críticas discriminándolas por cada semana, además de realizar el análisis de las zonas con dificultades de abastecimiento por precipitación, es decir de aquellas zonas de cultivos de caña con déficits de humedad.

- En la agricultura, afrontar la escasez de agua es una necesidad y en la industria de la caña de azúcar dicha condición impone un reto más alto por las elevadas demandas en el Valle del Cauca no solo por los ingenios azucareros que están en toda la región sino por la población que ha traído urbanismo y contaminación. Ante este panorama generar una herramienta que permite hacer un análisis en las cuencas de demanda resulta importante porque permite obtener datos reales y exhibidos en un espacio geográfico a través de mapas, de esta forma, se mejora la planificación por sectores para evitar un desabastecimiento.

Oferta de agua

- El tercer objetivo propuesto era la estimación de la oferta superficial y subterránea para lo que se realizó un análisis de la información secundaria con que se contaba. Se encontró que la Corporación Autónoma del Valle de Cauca-CVC, usaba modelos hidrológicos ajustados y actualizados de la zona en cuestión, por lo que se tomó la decisión de realizar la simulación con los resultados que tenía la Corporación. Se consideró además que la información secundaria suministrada por la CVC, contaba con la desagregación requerida para el estudio, esto es caudales de cauce principal, caudales subcuenca del río agua clara, y oferta de aguas subterráneas que era un dato vital dentro de la investigación que ya que aproximadamente el 40% de la demanda agrícola se abastece con aguas subterráneas.
- Se encontró que la oferta de aguas subterráneas de la manera cómo se gestiona actualmente presenta disponibilidad, ya que en esta cuenca hay interconectividad entre los sistemas de aguas subterráneas y superficiales y

muchas áreas son administradas por usuarios en común, los pozos podrían ampliar su área de influencia con la misma capacidad instalada y de esta forma liberar oferta de aguas superficiales para otros predios. Si se analiza la cuenca como un todo, podría abastecerse con los recursos que ya están disponibles dentro de la cuenca. Por otro lado, las condiciones específicas de la tenencia, ubicación y uso de los pozos hacen que esa posibilidad sea muy difícil para llevarse a cabo con las condiciones legales ambientales actuales y la falta de incentivos.

Análisis de alternativas

El cuarto objetivo planteado consistía en definir posibles alternativas de solución para satisfacer la demanda en la cuenca priorizada, para lo cual se plantearon diferentes opciones como se muestra a continuación.

- Con apoyo de la plataforma WEAP, se estableció un modelo para las condiciones actuales de la cuenca del río Bolo, incluyendo la demanda calculada en Matlab, las eficiencias de conducción y las condiciones de oferta subterráneas y superficiales planteadas por la CVC. Con este modelo se realizó un balance hídrico que permitió ver que para los meses de enero, junio, julio, agosto y septiembre existe demanda no cubierta 45 millones de m³. El escenario base o actual contempla el cumplimiento de caudal ambiental, uso de pozos establecido por la autoridad, sin turnos de riego, dicho de otra forma, está mostrando el déficit agrícola respetando todas los requerimientos y demandas legales.
- Teniendo como base la demanda no cubierta de 45 millones de m³ del escenario actual, el análisis de alternativas buscó equilibrar el balance oferta demanda, con 5 escenarios contemplados en WEAP: tres escenarios sobre gestión de la demanda y dos escenarios de aumento de suministro. **1)** gestión en la demanda, por medio del ahorro por pérdidas en canales comunitarios de distribución, **2)** gestión de la demanda, mediante mejora en eficiencias de aplicación de riego en el 30% del área a disponible para riego **3)** mejora de eficiencias en el 100% del

área bajo riego. **4)** gestión de la oferta por medio del incremento de suministro usando recursos no convencionales, como el uso de aguas residuales y **5)** gestión de la oferta por medio del trasvase de cuencas, buscando el mínimo costo ambiental y económico.

- En cuanto a la gestión de la demanda primero se evaluó la posibilidad de reducir pérdidas en los sistemas de conducción actuales. Suponiendo una mejora en la disminución de pérdidas de conducción en un 10%, se logra una reducción se logra una reducción de un 17% en la totalidad de demanda no cubierta.
- Como segunda medida se contempló la mejora en las eficiencias de riego a través del cambio de tecnologías y/o control de mediciones y administración dentro de los predios. Se evaluaron 2 escenarios de gestión 1) cambiando un 30% del área actualmente regada por surcos a riego por sistemas y medida que lleven la eficiencia del 50% al 81%, y 2) cambiar todo el sistema de riego por surcos a riego tecnificados, cambiando la eficiencia del 50% al 81%, conservando la reducción en ambos casos la reducción de pérdidas en canales colectivos. Del primer escenario se logra una reducción en la demanda no cubierta en 23.3% con respecto al escenario base y para el segundo escenario se logra una disminución del 59% en las demandas no cubiertas.
- En definitiva aun colocando el mayor nivel de tecnificación viable en las fincas cañeras del (81% de eficiencia en el riego) y disminuyendo las pérdidas en los canales regionales, no se logra disminuir totalmente la demanda no cubierta para los meses secos (junio, julio y agosto), sin embargo se logra un nivel de disminución significativa de la demanda no cubierta del 59%, que a su vez genera disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca, lo que permite generar otra acción en la demanda que es la re-asignación de recursos, en este caso entre subterráneos y superficiales, se encontró que el volumen de agua liberado para los pozos es el 96% de la demanda no cubierta. Bajo condiciones específicas que garanticen los mismos derechos para los usuarios, se podría dar

la ampliación de cobertura de los pozos para liberar la presión sobre las aguas superficiales.

- Se evaluó la posibilidad de realizar almacenamiento de agua ya que existe superávit de precipitación. Esta alternativa ya fue evaluada por la CVC que en 2017 realizó estudios para evaluar la factibilidad de realizar embalses. Dicha alternativa fue desechada ya que se concluyó que no es posible regular picos de crecientes dado el bajo volumen disponible como resultado de las condiciones topográficas del terreno. De manera que esta alternativa no fue contemplada en este estudio.
- Como cuarta alternativa se planteó un trasvase desde el río Cauca, para lo cual se evaluó las necesidades de oferta adicionales después de la gestión de la demanda, y si se cubría el caudal ambiental y el régimen de operación de los pozos ya implementados. De esta manera se concluyó que se requerirían 3.4 m³/s, julio 2.4 y en agosto 1,3 m³/s con lo que se lograrían cubrir la totalidad de las demandas no cubiertas.
- Como quinta alternativa gestionando la oferta se planteó la adopción de medidas de reciclaje a través del uso de aguas residuales. Esto es factible solamente si se construye la PTAR en la ciudad de Palmira, proyecto que se encuentra actualmente en gestión. Se contempla la posibilidad de utilizar 1 m³ de dichas aguas residuales, con lo que se lograría una disminución del 40% con respecto al escenario 3 de gestión de la demanda. También se evaluaron de manera conjunta los escenarios 4 y 5, con lo que se reduciría en 1m³ el requerimiento adicional para el río Cauca.
- Al revisar todas las alternativas planteadas en conjunto se puede concluir que la problemática actual que se presenta en la cuenca es compleja y no se puede resolver con una sola acción, sino que se requiere la acción conjunta de gestión de la demanda y el incremento de suministro.

- Si bien es necesario hacer un análisis costo beneficio del incremento de las eficiencias de riego y tener esta herramienta como parte de un análisis de otras alternativas de abastecimiento de agua, es importante que los agricultores del Valle del Cauca, como usuarios principales del recurso hídrico participen de una forma propositiva en las inquietudes y propuestas de soluciones regionales para el agua y se puedan hacer análisis futuros para planificaciones de inversión a medio y largo plazo, teniendo en cuenta que la sostenibilidad del recurso hídrico es la sostenibilidad de la agricultura de la caña de azúcar.
- Retomando todas las alternativas evaluadas en la cuenca y analizando las experiencias internacionales donde siempre que coexisten el desarrollo agrícola y el desarrollo urbano lo que hace que tienda a incrementarse el conflicto de agua, se requiere de visiones nuevas de todas las partes para diseñar estrategias efectivas para afrontar la escasez de agua: entidades gubernamentales, agricultores, sector privado y ONGS. Debe pensarse que las alternativas de ahorro de agua requieren inversiones primero individuales y luego colectivas, que deben contar con los incentivos y políticas de apoyo necesarios para los agricultores que garanticen la igualdad de derechos para el que invierte y gestiona la eficiencia del recurso, ya que el agua es un recurso colectivo que el ahorro en una parte de la cuenca beneficiará a toda la cuenca y los demás usuarios.

Herramientas informáticas

Paralelamente al análisis realizado para alternativas de abastecimiento, en este trabajo de grado se pudo constatar la facilidad y aplicabilidad del programa Matlab para cálculo de matrices en la demanda de agua utilizando matrices de shapes generados en arcgis, de igual forma WEAP puede ser utilizado para realizar análisis de escenarios de abastecimiento de agua de forma práctica para la agricultura.

RECOMENDACIONES

- Es necesario que el análisis de alternativas pueda complementarse con un análisis de viabilidad económica, para poder comparar el costo versus el beneficio y así evaluar la viabilidad de las inversiones requeridas.
- El análisis de alternativas de la cuenca del río Bolo debe ampliarse por su posibilidad de obtener soluciones conjuntas con la cuenca completa del Guachal. Así mismo se puede pensar en generar soluciones conjuntas para otras cuencas que tienen características similares.
- Las alternativas de solución son una mezcla de varias soluciones integradas y políticas que deben promover acercamientos y acuerdos y que integren todas las partes.
- El modelo de análisis de demanda puede mejorarse creando rutinas en SIG que generen de forma más automática matrices de precipitación y evaporación, ya que son procesos largos de realizar de forma manual y se incrementa las posibilidades de errores.
- Para el cálculo de demanda se puede mejorar la simulación de los datos de edad de la caña, buscando metodologías a través de imágenes que permitan conocer o acercarse a datos más reales de edad de la caña ubicados geográficamente en un momento determinado. Esta alternativa (calendarios agrícolas) no se pudo evaluar en la gestión de la demanda por falta de datos.
- Se puede ampliar el análisis modificando las condiciones climáticas por ejemplo en fenómeno de El niño y ver el impacto en el balance oferta demanda.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon Muriel, S. L. (2012). Precipitación efectiva en el cultivo de caña de azúcar para programar riegos mediante balance hídrico. In *Tecnicaña, Memorias IX Congreso-Tecnicaña Atalac* (pp. 556–566). Cali, Colombia.
- Allen, R. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia.
- Alonso, E., Corominas, J., & Hürlimann, M. (2013). Volumen III. Palma de Mallorca. In *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)*.
- AQUASTAT, & FAO. (2009). *Taller de expertos sobre métodos de evaluación de recursos hídricos y usos del agua – Latino América*. Santiago de Chile. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i2077b/i2077b00.pdf>
- Asocaña. (2011). Presentación Informe Anual de Asocaña 2010-2011. consultado en agosto 2015.
- Asocaña. (2017). *El Sector Azucarero Colombiano En La Actualidad*.
- Cámara de Comercio de Cali. (2012). Azúcar líder de la agroindustria en el Valle. En línea. *Revista Accion*, 148. Retrieved from <http://www.ccc.org.co/azucar-lider-de-la-agroindustria-en-el-valle/>
- Centro de Cambio Global. (2009). *Guía Metodológica. Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Universidad Católica de Chile. Retrieved from http://weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- Chica Ramírez, H. A., Peña Quiñones, A. J., Giraldo Jiménez, J. F., Obando Bonilla, D., & Riaño Herrera, N. M. (2014). SueMulador: Herramienta para la Simulación de Datos Faltantes en Series Climáticas Diarias de Zonas Ecuatoriales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7365–7373. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n2.44179>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2006). *Proyecto de administración de aguas del río Bolo Fase II. Convenio de Asociación No 009 de 2006: CVC – PROAGUA*.

- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2008). *Balances de agua Cuencas Valle del Cauca*. Retrieved from <http://www.cvc.gov.co>.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2012a). *Reglamentación Integral participativa para la Gestión de las Aguas Subterráneas*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2012b). *Reglamentación integral participativa para la gestión de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca*. Retrieved from <https://www.cvc.gov.co/tematicas/recurso-hidrico/agua-subterranea/cantidad-de-agua>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2012c). *Resolución 0100 No. 0600-0652*.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2013). Boletín hidroclimatológico.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2017a). *Balance oferta-demanda de agua. Cuenca del río Bolo*.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. (2017b). *Evaluación Regional del Agua, Valle del Cauca 2017. Dirección Técnica Ambiental- CVC*. Santiago de Cali. Retrieved from https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-10/EVALUACION_REGIONAL_AGUA_Ajustes2018_2.pdf
- Cruz, J. R. (2015). *Manejo Eficiente Del Riego En El Cultivo De La Caña De Azúcar En El Valle Geografico Del Río Cauca*. (CENICAÑA, Ed.).
- DANE. (2017). Series de Población.
- De Bievre, B., Coello, X., & Keizer, O. (2008). Caracterización de la Oferta Hídrica, Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Hoya de Quito. UICN-Sur Ecuador. Retrieved from <http://infoagua-guayllabamba.ec/index.php/disponibilidad-de-agua/analisis-de-oferta-hidrica>
- Falkenmark, M., & Molden, D. (2008). Wake Up to Realities of River Basin Closure. *International Journal of Water Resources Development*, 24(2), 201–215. <https://doi.org/10.1080/07900620701723570>
- FAO. (n.d.). *Afrontar la escasez de agua-Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Figuroa Castrillón, A. (2017). *Elaboración del programa de uso eficiente y ahorro de*

- agua para el municipio de Puerto Tejada de acuerdo con la Ley 373 de 1997. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. Retrieved from <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/9665/1/T07333.pdf>*
- Flórez-Tuta, N., Zution-Gonçalves, I., Feitosa, D. R. C., Agnellos-Barbosa, E. A., Deus, F. P. de, Diego-Ribeiro, M., & Eiji-Matsura, E. (2013). Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia*, 47(2), 107–119.
- Gaur, A., Biggs, T. W., Gumma, M. K., Parthasaradhi, G., & Turrall, H. (2008). Water Scarcity Effects on Equitable Water Distribution and Land Use in a Major Irrigation Project—Case Study in India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(1), 26–35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:1(26))
- Gonzalo, H., Domínguez, E., Marín, R., & Vanegas, R. (2004). *Metodología para el cálculo del Índice de Escasez de Agua Superficial*.
- Hernández Sancho, F., & Mocholi Arce, M. y. (2007). Modelo para la gestión óptima de la oferta de agua en un área territorial. In *XV Jornadas de ASEPUMA y III Encuentro Internacional* (p. Actas 15(1):1-11.). Universidad de Valencia, España. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/26458834_Modelo_para_la_gestion_optima_de_la_oferta_de_agua_en_un_
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010. Capítulo 5: Estimación De La Demanda De Agua* (Instituto). Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=874&conID=910>
- Luna González, C., Cock, J., Palma, A., Díaz, L., & Moreno, C. (1995). Análisis de la productividad en la agroindustria azucarera de Colombia y perspectivas para aumentarla. Cali: Cenicaña. *El Cultivo de la Caña en la zona azucarera de Colombia. CENICAÑA*, 373–394.
- Marín Valencia, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. Ingeniería Civi. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7128?show=full>

- Medina, R. (2008). Summary for Policymakers. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (pp. 1–30). Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Minambiente, & IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- Minambiente, & IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Consolidación del Marco Conceptual del Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC, 199.
- Ministerio del medio ambiente. (2014). *Estudio Nacional del 2014*.
- Molina, A., & Pablo, J. (2002). Validación y calibración de un sistema de apoyo a la decisión (SAD), como herramienta para la administración de los recursos hídricos de cuencas mexicanas. In *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México*.
- Nosetto, M., & Jobbagy, E. (2014). Plantaciones forestales: sus servicios e impactos hidrológicos. Cómo compatibilizar la producción con la conservación. *Producción Forestal*, 8(1), 18–20. Retrieved from <http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/14643>
- Ortiz, C., Vélez, M., & Villegas, C. (2006). Consideraciones técnicas sobre la metodología para el cálculo de las Tasas por Uso del Agua (TUA). *Avances En Recursos Hidráulicos*, 13, 99–110. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/download/9342/9985>
- Padowski, J. C., & Gorelick, S. M. (2014). Global analysis of urban surface water supply vulnerability. *Environmental Research Letters*, 9(10), 1–8. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/104004/meta>
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 155 de 2004. Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones (2004).
- Procaña. Presentación del Sector de la Caña (2014). Retrieved from http://www.procana.org/new/images/content/botones-articulos/Presentacion_del_Sector_de_la_Cana.pdf
- Rangel, J., MamadouBa, K., Kelso, H., & Magaña, F. (2013). Estimación de la demanda hídrica del trigo y sorgo en el Estado de México mediante la recalibración de KT.

- Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(Supl.1), 72–76. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542013000500013&script=sci_arttext&tlng=pt
- Rojas, G., & Pagador, C. (2000). C. La Cuenca de Gestión del Río Snata y el Proyecto Chavimochic. *Seminario Taller La Gestión Del Agua, La Autogestión Administrativa y Financiera: Experiencia Nacional e Internacional. La Libertad (Peru). 16-17 Mar 2000.*, 1–15.
- Rosenzweig, C., Strzepek, K. M., Major, D. C., Iglesias, A., Yates, D. N., McCluskey, A., & Hillel, D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change*, 14(4), 345–360. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.09.003>
- Salazar Oliveros, J. C. (2016). *Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales (CDC) en cuencas no instrumentadas. Caso de aplicación para Colombia en los departamentos de Santander y Norte de Santander. Trabajo de profundización presentado como requisito parcia pa.* Universidad Nacional de Colombia Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/56437/20/JuanC.SalazarOliveros.2016.pdf>
- Searcy, J. K. (1959). *Flow-Duration Curves. Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Technique.* (U. S. D. of T. Interior, Ed.). Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1542A>
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO. *Riego y Drenaje*, 66. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015001461>
- Texeira, P., Pannunzio, A., & Borello, L. (2013). Impacto del fenómeno “El Niño – Oscilación del Sur” sobre la evapotranspiración de la localidad de San Pedro, Buenos Aires, Argentina, para el periodo 2005-2011. *Revista de Climatología*, 13, 27–34. Retrieved from <http://webs.ono.com/reclim7/reclim13c.pdf>
- Torres, J., Cruz, J., & Villegas, F. (2004). *Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar.* Cali: Cenicaña.
- Valderrama, R. C., & Trujillo, F. V. (2004). El Manejo Del Riego En Caña De Azúcar, (33), 73.

Venot, J., Jella, K., Bharati, L., George, B., Biggs, T., Rao, P., ... Acharya, S. (2010). Farmers' Adaptation and Regional Land-Use Changes in Irrigation Systems under Fluctuating Water Supply, South India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(9), 595–609. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000225](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000225)

10.ANEXOS

10.1 CODIGO FUENTE EN MATLAB PARA CALCULO DE LA DEMANDA AGRICOLA

```

%BALANCE HÍDRICOS
%Zambrano, J., Arias, Y.
%2016

%Esta herramienta sirve para generar balances hídricos de cultivos en un
%área determinada
%-----
%Nombre variables
%ETP=Mapa de ETP para una semana específica de toda la cuenca
%PPT=Mapa de PPT para una semana específica de toda la cuenca generado a
% partir de los polígonos de thiessen, este mapa se requiere en ascii
% generado desde algún SIG
%C=Factor de escorrentía para hallar precipitación neta
%Kc=Mapa de coeficiente de la planta (donde no existan cultivos será cero)
%Kr=factor de riego
%-----
%% Cargue de datos y generación mapas de precipitación y evaporación
% Esta metodología es con polígonos de thiessen, el usuario puede decidir
% cuál utilizar
tic
opcion=input('seleccione la manera de cargar la información Polígonos de thiessen (1) o interpolada (2):'
);

if opcion==1
    %en esta opción se cargan los datos por medio de polígonos de thiessen
    Thi=load('thiessen_2.txt');
    tablappt=xlsread('semanalCli.xlsx','Precipitación');
    tablaevt=xlsread('semanalCli.xlsx','Evaporacion');
    PPT=zeros(size(Thi,1),size(Thi,2));
    EPT=zeros(size(Thi,1),size(Thi,2));
    numperiodos=size(tablappt,1);
    filas=size(EPT,1);columnas=size(EPT,2);
elseif opcion==2
    numperiodos=input('indique el número de periodos a analizar: ');
    filas=input('indique el número de filas del mapa a analizar: ');
    columnas=input('indique el número de columnas del mapa a analizar: ');
end

D=cell(numperiodos,1);

```

```

D(:)={zeros(filas,columnas)};
Kr=load('KR matlab.txt');
Kc=load('cobertura4.txt');
codigosKc=xlsread('codigosKc.xlsx','Hoja3');
codigosKc(:,3:numperiodos+3)=0;
sumasDPos(:,1:2)=codigosKc(:,1:2);
sumasDPos(:,3:numperiodos+3)=0;
MapaKc=zeros(size(Kc,1),size(Kc,2));
for k=1:size(Kc,1)
    for h=1:size(Kc,2)
        if Kc(k,h)~-9999
            CodKc=Kc(k,h);
            [fil,~]=find(codigosKc(:,1)==(CodKc));
            MapaKc(k,h)=codigosKc(fil,2);
        end
    end
end
Ke=0.8; %OJO
%Kr=0.75;

%% CALCULOS PERIODOS POR PERIODO
for i=1:numperiodos
    if opcion==1
        for k=1:size(Thi,1)
            for h=1:size(Thi,2)
                if Thi(k,h)~-9999
                    Plu=Thi(k,h);
                    [~,col]=find(tablappt(1,:)==(Plu));
                    PPT(k,h)=tablappt(i+2,col);
                    EPT(k,h)=tablaevt(i+2,col);
                end
            end
        end
    elseif opcion==2
        %% Cargue de datos y generación mapas de precipitación y evaporación
        %%Este procedimiento es con mapas interpolados de ppt y evt, se requieren los
        %%mapas
        [~,txt]=xlsread('entrada.xlsx');
        filenppt=strcat(txt(i+2,1),'.txt');
        filenevt=strcat(txt(i+2,2),'.txt');
        PPT=load(char(filenppt));
    end
end

```

```

EPT=load(char(filenevt));
%D{i,1}={zeros(size(EPT,1),size(EPT,2))};
end
%% CÁLCULOS FINALES
D{i,1}=(MapaKc.*EPT-Ke*PPT)*100*100./(1000*Kr);      %para una celda de 100*100 m3/semana
D{i,1}(Kc==-9999)=-9999;                            %Corrección de la matriz para que quede como mapa
%% SUMATORIAS FINALES
%se buscan las sumas de cada demanda por tiempo y por tipo de cobertura
for k=1:size(Kc,1)
    for h=1:size(Kc,2)
        if Kc(k,h)~-9999
            CodKc=Kc(k,h);
            [fil,~]=find(codigosKc(:,1)==(CodKc));
            codigosKc(fil,i+2)=codigosKc(fil,i+2)+D{i,1}(k,h);
            if D{i,1}(k,h)>0
                sumasDPos(fil,i+2)=sumasDPos(fil,i+2)+D{i,1}(k,h);
            end
            %en la tabla de códigos se almacenará la sumatoria por cada
            %periodo por cada tipo de cobertura. Se suma la demanda
            %tanto positivas como negativas, de manera que se obtiene el
            %balance. Si aún así da un valor positivo quiere decir que
            %sí hay demanda.
        end
    end
end
end
%% IMPRESIÓN DE MAPAS
%Escribir la información de salida de demanda o excedente en la matriz D
texto1='Demanda';texto2=num2str(i);texto3='.txt';
nombreadarchivo=strcat(texto1,texto2,texto3);
dlmwrite(nombreadarchivo,D{i,1},'-append','delimiter','\t');

end
codigosKc(:,size(codigosKc,2))=sum(codigosKc',';
    dlmwrite('sumasDemanda',codigosKc,'-append','delimiter','\t');
toc

```

10.2 ANEXO 1. CALCULO NO DISTRIBUIDO DE DEMANDA APLICANDO FORMULA 18

Estación	Sem1	Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6	Sem7	Sem8	Sem9	Sem10	Sem11	Sem12	Sem13	Sem14	Sem15	Sem16	Sem17	Sem18	Sem19	Sem20
Aeropuerto	418,60	589,40	499,80	139,60	313,00	360,60	525,60	524,20	442,20	539,40	535,20	442,00	430,60	515,60	581,80	-509,00	-332,80	11,60	-319,40	36,60
Arroyohondo	408,80	548,80	516,80	403,60	195,00	282,00	453,80	463,60	433,60	475,20	-541,00	77,00	57,40	537,60	365,82	-816,80	-349,60	-344,80	-487,00	192,00
Candelaria	385,00	557,20	363,00	-141,00	180,40	-43,60	-23,60	260,49	341,20	424,20	-317,20	-210,00	457,20	126,40	402,00	-677,20	-168,60	-1217,00	149,80	95,00
Cenicana	384,00	-238,60	-241,20	152,20	-445,80	367,60	414,60	425,60	122,80	-484,40	354,60	262,60	239,40	-221,00	52,40	-1066,60	507,00	-181,00	-33,60	254,40
Palmira San Jose	399,00	506,80	236,40	282,60	206,00	-848,20	-153,40	-244,00	343,80	330,60	79,60	-815,00	-178,80	88,00	368,40	-538,80	296,40	-417,52	-73,60	-249,40
Pradera	467,60	593,60	39,40	263,00	283,00	126,93	-397,20	355,60	318,80	442,80	-35,91	-1078,73	354,20	-201,80	-12,40	-466,60	-561,00	-307,60	167,40	271,20
PTAR Cali	408,80	533,40	480,00	418,40	205,60	338,40	442,00	445,00	420,40	433,40	434,40	319,60	166,40	321,40	558,20	-639,80	-20,49	-204,80	326,28	353,28
La Sirena	124,00	-747,00	74,20	-120,80	-258,80	-246,00	-196,60	-552,40	-884,60	-1313,00	-693,80	40,60	59,20	67,40	92,00	-234,00	-240,20	-26,60	-1576,00	-47,00
Maximo	467,60	593,60	516,80	418,40	313,00	367,60	525,60	524,20	442,20	539,40	535,20	442,00	457,20	537,60	581,80	-234,00	507,00	11,60	326,28	353,28
Mínimo	124,00	-747,00	-241,20	-141,00	-445,80	-848,20	-397,20	-552,40	-884,60	-1313,00	-693,80	-1078,73	-178,80	-221,00	-12,40	-1066,60	-561,00	-1217,00	-1576,00	-249,40

Estación	Sem21	Sem22	Sem23	Sem24	Sem25	Sem26	Sem27	Sem28	Sem29	Sem30	Sem31	Sem32	Sem33	Sem34	Sem35	Sem36	Sem37	Sem38	Sem39
Aeropuerto	-524,20	-603,20	432,40	358,00	530,60	527,40	449,80	418,40	517,80	572,80	526,40	152,20	227,40	516,40	561,20	642,40	316,00	488,80	771,80
Arroyohondo	-624,80	-1339,00	432,60	65,60	540,40	548,80	481,60	-332,20	490,00	471,60	536,20	-238,00	138,20	537,60	546,60	657,20	-233,20	530,40	688,20
Candelaria	-608,00	-224,60	415,60	64,00	425,00	448,20	373,80	426,20	422,80	431,40	414,00	-5,00	133,20	435,40	443,40	522,40	294,40	405,20	668,40
Cenicana	459,20	102,40	408,80	392,20	446,40	454,60	394,00	363,00	450,80	-143,60	332,00	413,80	430,40	305,40	1,40	301,00	-884,00	262,40	-90,20
Palmira San Jose	-123,60	-1137,00	398,80	87,80	450,80	431,80	392,20	381,20	399,40	434,80	367,00	-311,20	7,20	393,80	368,20	333,00	64,40	210,40	492,80
Pradera	-911,73	-128,37	410,00	99,00	453,60	481,40	358,00	380,80	400,40	532,00	441,80	-542,00	282,40	346,20	253,60	489,60	-271,91	345,42	-356,08
PTAR Cali	-185,46	-1127,49	454,37	354,79	356,03	390,20	480,07	-3,40	477,40	479,00	481,60	256,60	293,03	514,69	565,43	521,60	459,71	579,60	286,66
La Sirena	-1,80	-254,20	-187,80	15,20	-437,40	-281,80	12,20	-421,60	-188,80	78,00	57,00	-10,00	-192,20	82,80	-79,00	78,00	-37,00	-395,00	114,40
Maximo	459,20	102,40	454,37	392,20	540,40	548,80	481,60	426,20	517,80	572,80	536,20	413,80	430,40	537,60	565,43	657,20	459,71	579,60	771,80
Mínimo	-911,73	-1339,00	-187,80	15,20	-437,40	-281,80	12,20	-421,60	-188,80	-143,60	57,00	-542,00	-192,20	82,80	-79,00	78,00	-884,00	-395,00	-356,08

Estación	Sem40	Sem41	Sem42	Sem43	Sem44	Sem45	Sem46	Sem47	Sem48	Sem49	Sem50	Sem51	Sem52	Sem53
Aeropuerto	458,20	-5,40	-684,80	45,00	-296,80	525,80	450,60	157,80	285,40	-33,00	321,60	414,20	-282,40	252,00
Arroyohondo	-731,80	352,80	-518,40	298,40	-84,40	463,40	424,40	43,40	-919,60	-357,00	295,20	367,20	-1048,20	232,40
Candelaria	26,40	-10,60	42,40	297,40	125,00	210,80	154,80	-517,60	-89,00	32,00	243,60	170,80	-199,60	233,80
Cenicana	74,00	10,60	57,80	258,20	236,60	-71,20	89,40	-180,00	297,80	-340,20	-74,00	375,40	-579,00	226,80
Palmira San Jose	-246,20	-59,40	-740,40	9,60	-810,40	264,00	164,40	226,00	-254,80	-1124,40	352,80	191,40	262,45	197,00
Pradera	321,16	-473,11	-443,32	219,45	-280,91	497,00	171,00	-899,75	404,06	-265,80	451,60	139,40	-27,01	273,00
PTAR Cali	55,40	195,60	-181,60	-180,80	102,00	394,00	473,40	101,20	125,40	16,40	359,20	368,20	-894,40	219,80
La Sirena	80,80	-696,20	-151,80	-1026,00	-287,60	-702,60	-1163,20	-754,40	-797,20	-445,40	-916,40	-17,60	210,80	115,60
Maximo	458,20	352,80	57,80	298,40	236,60	525,80	473,40	226,00	404,06	32,00	451,60	414,20	262,45	273,00
Mínimo	-731,80	-696,20	-740,40	-1026,00	-810,40	-702,60	-1163,20	-899,75	-919,60	-1124,40	-916,40	-17,60	-1048,20	115,60

10.3 ANEXO 2. PUBLICACIONES Y PREMIOS

10.3.1 Artículos de congresos publicados

- XXVIII Congreso latinoamericano de hidráulica. Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018.
Se postuló un resumen con la metodología para cálculo de demanda agrícola, para el XXVIII Congreso latinoamericano de hidráulica, el cual fue seleccionado para modalidad de **presentación oral** en Buenos Aires (Argentina).
- XI Congreso ATALAC, Tecnicaña. Cali. Colombia. Septiembre 24-28, 2018.

10.3.2 Premio

El proyecto “Alternativas para satisfacer el requerimiento hídrico en los cultivos de caña de azúcar del Valle del Cauca” tuvo reconocimiento en el sector cañicultor. Su impacto le mereció que la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, conocida como Tecnicaña, lo nombrara como mejor trabajo académico en la categoría de campo. Bajo el título “Propuesta de una metodología de Análisis Distribuido de las Necesidades Hídricas para el Cultivo de la Caña de Azúcar en el Valle del Cauca”, se presentó como ponencia durante el XI Congreso ATALAC – TECNICAÑA del 24 al 28 de septiembre de 2018.

A continuación, se encuentran los dos artículos presentados.

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DISTRIBUIDO DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS PARA EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA

Arias Arias, Yobana
Ingeniera Agrícola/Esp. Ingeniería hidráulica y ambiental
Estudiante Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia
Mayagüez S.A
yoarias@ingeniomayaguez.com

Zambrano Nájera, J.
Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Ingeniería Civil
jdzambranona@unal.edu.co

RESUMEN

En los últimos años debido al aumento de la demanda y las repercusiones del cambio climático, se ha incrementado la falta de disponibilidad de agua y en periodos secos intensos existen zonas en las cuales no se alcanzan a cubrir las necesidades hídricas del cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca (Colombia). Dicha disponibilidad depende en gran medida del riego complementario, ya que las precipitaciones no alcanzan a abastecer las necesidades de agua del cultivo durante los periodos secos. El objetivo de esta investigación es desarrollar una herramienta que permita calcular la demanda de agua de forma espacial y semanal, de manera que se pueda realizar un cálculo de demanda regional más real. La herramienta fue desarrollada en matlab y permite realizar balances hídricos a nivel predial para el periodo de análisis que se requiera, en este caso semanal. Se realizó el análisis del impacto en la demanda de la mejora del riego, por medio de un análisis de sensibilidad de esta, lo que permite concluir que una mejor gestión sobre la eficiencia del riego, logrados a través del uso de sistemas de riego tecnificados, permitiría cubrir las necesidades de riego con las fuentes de agua existentes.

Palabras clave: Eficiencia de riego, balance hídrico, planificación de recurso hídrico, caña de azúcar, oferta y demanda hídrica

ABSTRACT

In recent years due to the increase in demand and climate changes, the lack of water availability has increased and during dry periods there are areas where water needs for sugar cane irrigation crop. Were not sufficient in the Valle del Cauca (Colombia). This water availability depends to a large extent on the complementary surface irrigation, since

precipitations are not enough to supply crop water needs. The objective of this research is to develop a tool that allows to calculate water demand weekly. In a determined area a realistic regional water demand calculation can be made and simulate the variation in demand by increasing irrigation efficiency or replacing areas with more technological irrigation systems. The tool was developed in matlab and allows water balances at farm level for a period of analysis required, in this case weekly. The analysis of the impact on the demand of the irrigation improvement was carried out, to conclude that a better management for the irrigation efficiency would reach irrigation needs with the existing sources of water.

Keywords: Irrigation, water balance, water resource planning, sugar cane, water offer and demand.

Introducción

En el Departamento del Valle del Cauca Colombia, se vienen presentando conflictos por el uso del agua desde hace algunos años. Estos se atribuyen al incremento de la demanda de todos los usos, no solamente al incremento en el uso agrícola, a la disminución de la oferta hídrica superficial y a la falta de gobernabilidad de las entidades encargadas. A su vez los incrementos en la demanda se presentan porque los cultivos existentes en el Valle tienen requerimientos de riego suplementarios, y por otros usos como el doméstico que superan las proyecciones de planificación. Con respecto a la demanda el área sembrada en caña de azúcar pasó de 140 mil hectáreas en 1990 a 238 mil hectáreas en 2016 (Asocaña, 2017), y se ha detectado que las precipitaciones no son suficientes para cubrir las necesidades de agua de la planta, por lo que el riego complementario se ha tomado como práctica habitual en el 95% del área cultivada en el Valle del Cauca (Torres, 2004).

Adicionalmente, la oferta se ha visto reducida principalmente en los períodos secos del fenómeno del Niño que cada vez han sido más prolongados e intensos y con precipitaciones tendientes a disminuir en el Valle del Cauca. Las fuentes de abastecimiento para esta zona están constituidas principalmente por el río Cauca, sus tributarios y por pozos de aguas subterráneas, sobre las cuales en los últimos años se han producido conflictos por el uso de agua debido a las grandes presiones hídricas.

También se ha constatado que los sistemas de planificación son muy débiles ya que, aunque se han realizado balances de agua por cuenca y reglamentaciones de corrientes, por parte de la Autoridad Ambiental, CVC Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, no se han planteado soluciones definitivas con lo que la situación se ha visto agravada. Por estas razones, este trabajo realiza un análisis espacio-temporal para determinar la variabilidad de los requerimientos hídricos de la planta, así como de las necesidades de riego, según la variabilidad climática de la zona. Este trabajo fue propuesto y auspiciado por el ingenio Mayagüez S.A.,

como actor dentro de la gestión del recurso hídrico en aras de buscar una propuesta y tener una visión regional en la planificación del recurso hídrico en el Valle del Cauca.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realiza en las cuencas ubicadas en la margen derecha del río Cauca en el Valle del Cauca, Colombia. El departamento se encuentra ubicado al Suroccidente del territorio colombiano, formando así parte de las regiones Andina y Pacífica, contando con una superficie de 22.140 km², con una población de 4.660.438 personas (DANE, proyección 2016), presenta una hidrografía de numerosas corrientes que están conformadas en dos vertientes que son: la del Pacífico y la del Río Cauca. En las partes planas del río Cauca se encuentran la mayoría de los cultivos de caña de azúcar y otros cultivos como sorgo, soya, café, plátano, así como ciudades medianas, pueblos y corregimientos, industrias. Por otra parte, en las partes altas de esta cuenca se encuentra vegetación de páramo.

Metodología

Inicialmente, se realizó un diagnóstico de balance hídrico, para el cual se utilizó información de balances oferta-demanda de las cuencas de la margen derecha del río Cauca realizadas de manera agregada, y reglamentaciones de corrientes que es el procedimiento mediante el cual se distribuye su aprovechamiento de agua, teniendo en cuenta las características biofísicas, sociales y económicas de su zona de influencia, además de las condiciones actuales y futuras de la oferta y manejo del agua.

Con esta información se estableció que la cuenca del río Bolo se encuentra entre las zonas que deben tener prioridades de intervención, debido a la baja disponibilidad de agua en periodos secos. La cuenca hidrológica del río Bolo tiene 43.736,52 hectáreas y de acuerdo a los balances hídricos de CVC tiene periodos no abastecidos en los meses de julio y agosto (Corporación autónoma regional del Valle del Cauca -CVC, 2017).

Determinación de la demanda

La demanda de caña de azúcar (ver esquema metodológico **Figura 65**) se calculó de forma espacial aplicando la ecuación 1 (IDEAM, 2015) en cada hectárea cultivada. Para esto, primero se obtuvo el uso agrícola con la información de los mapas de Cobertura y uso del suelo,

obtenidos de la CVC, en resolución 100x100 m. Adicionalmente, se requieren mapas de Precipitación y Evapotranspiración semanal.

$$Da = 10 \sum_{d=1}^{df} \left[\frac{(Kc \times ETp) - \frac{(P \times Ke)}{100}}{Kr} \right] \times A$$

Ecuación 1

Donde

Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha).

10: es el factor que aplica para convertir a m³/ha

d=1 a df: Periodo análisis de la demanda

Kc: coeficiente cultivo

ETp: evapotranspiración de referencia potencial

P: precipitación en mm

Ke: coeficiente de escorrentía

Kr: coeficiente de eficiencia de riego

A: área sembrada

Precipitación y evapotranspiración

Para la información de precipitación y evapotranspiración fueron usadas 7 estaciones, las cuales fueron adquiridas a través de Cenicaña (Centro de investigación de la caña de azúcar) y CVC. Se realizó un control de la calidad de las series utilizadas y se hizo llenado de datos faltantes utilizando el software Suemulador (Chica, 2014) basado en las cadenas de Markov. Esta información fue representada espacialmente, en ArcGis de forma semanal obteniendo 52 mapas de cada variable climática, por el método interpolación mediante distancia inversa ponderada IDW que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de estaciones.

El coeficiente del cultivo de caña de azúcar (**Kc**), se obtuvo a partir de reportes de experimentos realizados por Cenicaña (Cruz Valderrama, 2015), Dichos reportes indican que, en condiciones ambientales del Valle del Cauca, la caña de azúcar puede desarrollar valores según la edad que van desde 0.3 hasta 0.8. Para generar los mapas de edad de la caña se adjudicó un atributo por polígono según la distribución teórica de edad de la caña como se puede observar en la **Figura 66**.

La eficiencia de riego (Kr), en el sector azucarero de Colombia presenta estos rangos: 40-60% para aplicación de riego por surcos, 60-80% para aspersión con cañones. Adicionalmente, el

volumen de agua para el riego por surcos promedio para el sector es de 1300 m³/ha (Cruz Valderrama, 2015) El método de riego por surcos y de riego por aspersión con cañones son los más usados en el cultivo de la caña de azúcar de la región. El primero se utiliza en el 79% del área y el segundo en el 21% (Cruz Valderrama, 2015). Con estos datos se adjudicó un atributo para espacializar los porcentajes de área de cada sistema de riego (**Figura 67**).

El coeficiente para determinar precipitación efectiva en el cultivo de la caña de azúcar (**Ke**) es alrededor del 80% en precipitaciones entre el 1-12 mm y del 90% en precipitaciones superiores al 12mm (Cruz Valderrama, 2015). Se asume para el cálculo de la demanda un 85% de precipitación efectiva.

Finalmente, se diseñó en Matlab (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") (mathworks) una herramienta de cálculo de la demanda, para las 53 semanas del año con datos medios, utilizando los mapas antes citados (en forma de matrices en ascci). El programa realiza automáticamente el cálculo indicado en la ecuación 1, celda por celda lo que corresponde a una hectárea, a partir del cual se obtienen salidas gráficas de demanda en cada semana y se genera un archivo de la sumatoria de las demandas por tipo de cultivo (en este caso caña de azúcar) y por periodos. La herramienta genera semana por semana una matriz de demanda espacializada, donde se puede detectar la existencia de zonas con demanda (positivas) y las de superávit (negativas), como se puede observar en **Figura 68**, Estas diferencias se deben a variaciones de la edad de la caña, eficiencia de riego, en la precipitación y evaporación.

Análisis de sensibilidad

Con la herramienta indicada, se construyeron varios escenarios de eficiencias de riego, para evaluar su impacto sobre los requerimientos de agua en el cultivo. Para esto se propusieron 3 escenarios de la siguiente manera:

Tabla 47. Escenarios simulados para diferentes áreas con eficiencia de riego

Escenarios	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
	Área bajo riego	Eficiencia	Área bajo riego	Eficiencia	Área bajo riego	Eficiencia
Riego por aspersión	4027	0.70	4027	0.70		
Sistemas de riegos tecnificados	0	0	4821	0.81	19405	0.81
Riego por surcos	15378	0.50	10557	0.50	0	0
Área Total	19405		19405		19405	

Resultados y discusión

Uso de la herramienta

Se trabajó con registros del año 2013 por ser un año neutro no afectado por fenómeno de niña y niño para ver el comportamiento normal, en la cuenca del río Bolo.

Los resultados de la herramienta se encuentran en las salidas gráficas de la figura 5, donde se observa el cambio de comportamiento de los requerimientos de agua al cabo de 10 semanas, las celdas más rojas representan las áreas de mayor demanda de agua mientras las celdas azules muestran las áreas que tienen superávit. La variabilidad que se observa en los mapas para cada celda se debe a la generación de precipitación y evaporación con el método IDW, donde cada celda (1 ha) tiene la información de varias estaciones, diferente si hubiera usado el método de polígonos de Thiessen ampliamente utilizado por los agricultores, donde la información espacial por celda es utilizada de una sola estación.

La herramienta calcula la demanda según la ecuación 1, en metros cúbicos (m^3) y arroja un archivo plano que puede trabajarse en SIG o en Excel, realizar cálculos y análisis como la gráfica de la **Figura 69** (demanda positiva y superávit negativa). En dicha figura se ve la variación mensual y semanal, por ejemplo el mes de marzo, es un mes regularmente lluvioso, y por tanto es tomado en los balances de agua para planificación regional del recurso como un mes sin requerimiento de riego, en la figura 6, se observa sin embargo que entre las semanas 10 y parte de la semana 11 se tiene requerimiento de riego, así mismo se logra observar este mismo caso en las semanas 42, 45, 46, 50, 51. Lo que indica que la planificación de riego en cultivo no puede realizarse a escala mensual, ya que se obtienen resultados no apropiados.

Análisis de sensibilidad e impacto en la disponibilidad de agua

Para poder realizar un análisis del impacto de la variación de la eficiencia de riego observando la oferta disponible en la cuenca del río Bolo, se utilizaron los cálculos de oferta superficial y subterránea disponible para agricultura, priorizando primero los usos doméstico, industrial, pecuario y ambiental, realizados por la autoridad ambiental en el balance hídrico de la cuenca del río Bolo (CVC) para el 2017, y se realizó un balance oferta demanda para cada escenario.

Escenario 1. Actual. Este escenario corresponde a las condiciones actuales en la cuenca, se presenta el déficit en los meses de enero, febrero junio, julio agosto y septiembre (Ver Tabla 2), solo abasteciéndose con las aguas superficiales. Al incluir las aguas subterráneas el déficit continúa en menor proporción para todos los meses mencionados, menos para febrero y diciembre (Ver tabla 3).

Escenario 2. 50% riego gravedad, 50% aspersión, 50% tecnificado Se observa disminución en el déficit de los meses enero – febrero y de junio a septiembre hasta de un 30%, considerando oferta superficial (Tabla 2), y de hasta el 60% considerando aguas subterráneas (Tabla 3). Aún así, no se alcanza abastecer el requerimiento usando las aguas subterráneas. El

mayor impacto se produce para el mes de diciembre donde se logra una gran reducción del déficit.

Escenario 3. 100% riego tecnificado. Para este escenario se encuentra que se reduce considerablemente el déficit en el balance con aguas superficiales, logrando una disminución de hasta el 139% para los mismos meses del escenario 2 y en el balance con aguas subterráneas se alcanzaría a satisfacer totalmente la demanda.

En la **Figura 70**, se puede observar la comparación de los resultados de los diferentes escenarios.

Tabla 48. Balance hídrico (mm) considerando solamente oferta hídrica superficial, para los tres escenarios de eficiencia de riego considerados

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta superficial	27.30	23.20	27.40	30.00	32.60	26.80	25.10	22.00	18.20	22.10	32.30	37.80
Escenario 1												
Demanda Escenario 1	110.22	39.94	8.76	-	-	184.23	144.18	113.52	78.31	-	-	42.25
Balance Escenario 1	-82.9	-16.7	18.6	30.0	32.6	-157.4	-119.1	-91.5	-60.1	22.1	32.3	-4.4
Escenario 2												
Demanda Escenario 2	91.87	36.97	15.47	-	-	147.07	115.86	94.06	68.97	-	-	33.63
Balance Escenario 2	-64.6	-13.8	11.9	30.0	32.6	-120.3	-90.8	-72.1	-50.8	22.1	32.3	4.2
Variación Esc2-Esc1	-23%	-23%	-30%			-24%	-25%	-22%	-17%			-2691%
Escenario 3												
Demanda Escenario 3	67.14	25.91	6.30	-	-	47.59	39.73	13.35	-	-	-	24.70
Balance Escenario 3	-39.8	-2.7	21.1	30.0	32.6	-20.8	-14.6	8.7	18.2	22.1	32.3	13.1
Variación Esc3-Esc1	-54%	-110%	11%			-89%	-91%	-114%	-139%			-5481%

Tabla 49. Balance hídrico (mm) considerando oferta hídrica superficial y subterránea, para los tres escenarios de eficiencia de riego considerados

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta superficial	27.30	23.20	27.40	30.00	32.60	26.80	25.10	22.00	18.20	22.10	32.30	37.80
Oferta subterránea	42.50	38.40	42.50	41.10	42.50	41.10	42.50	42.50	41.10	42.5	41.10	42.50
Total oferta	69.80	61.60	69.90	71.10	75.10	67.90	67.60	64.50	59.30	64.60	73.40	80.30
Escenario 1												
Demanda Esc1	110.22	39.94	8.76	-	-	184.23	144.18	113.52	78.31	-	-	42.25
Balance total Esc1	-40.4	21.7	61.1	71.1	75.1	-116.3	-76.6	-49.0	-19.0	64.6	73.4	38.1
Escenario 2												
Demanda Esc.2	91.87	36.97	15.47	-	-	147.07	115.86	94.06	68.97	-	-	33.63
Balance total Esc. 2	-22.1	24.6	54.4	71.1	75.1	-79.2	-48.3	-29.6	-9.7	64.6	73.4	46.7
Variación Esc2-Esc1	-50%	12%	-10%			-33%	-39%	-43%	-61%			20%

Escenario 3

Demanda Esc.3	67.14	25.91	6.30	-	-	47.59	39.73	13.35	-	-	-	24.70
Balance total Esc. 3	2.7	35.7	63.6	71.1	75.1	20.3	27.9	51.2	59.3	64.6	73.4	55.6
Variación Esc3-Esc1	-118%	55%	4%			-122%	-144%	-222%	-510%			42%

Conclusiones

- Esta metodología permite simular la edad de los cultivos de caña y modificar el Kc considerando escenarios más cercanos a la realidad.
- La herramienta permite tener un cálculo de la demanda de agua para la caña de azúcar que es el cultivo predominante en la cuenca, y de interés para el sector, lo más preciso posible teniendo en cuenta la variabilidad de la edad y de la eficiencia de riego, lo que permite evaluar la gestión en las eficiencias de los sistemas de irrigación.
- Es una herramienta de planificación, que en el estudio se está realizando para una cuenca, pero que puede realizarse a escala predial, para la selección de sistemas de riego según disponibilidad de las de fuentes de agua, para evaluar cumplimientos ambientales, fuentes alternas y turnos de riego.
- Esta herramienta permite realizar análisis de las épocas críticas, discriminándolas por cada semana. Además, permite realizar el análisis de las zonas con dificultades de abastecimiento por precipitación, es decir de aquellas zonas de cultivos de caña con déficits o superávits de humedad.
- Si bien es necesario hacer un análisis costo beneficio del incremento de las eficiencias de riego y tener esta herramienta como parte de un análisis de otras alternativas de abastecimiento de agua, es importante que los agricultores como usuarios principales del recurso hídrico participen de una forma positiva en las inquietudes y propuestas de soluciones regionales de la planificación del agua y se puedan hacer análisis futuros para de inversión a medio y largo plazo, teniendo en cuenta que las sostenibilidad del recurso hídrico repercute directamente en la factibilidad técnica, ecológica, y social de la caña de azúcar.

Referencias

- Asocaña. (2018). *Desempeño de la Agroindustria de la caña en Colombia 2016 - 2017*. Cali: Obtenido de <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- Chica, H. P. ((2014).). *SueMulador: Herramienta para la Simulación de Datos Faltantes en Series Climáticas Diarias de Zonas Ecuatoriales*. R . revista Facultad Nacional de Agronomía, 67(2), 7365-7373. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/44179/45464>.

Corporación autónoma regional del Valle del Cauca (CVC). (2017). *BALANCE OFERTA – DEMANDA DE AGUA CUENCA DEL RIO BOLO*. CALI.

Cruz Valderrama, J. R. (2015). *MANEJO EFICIENTE DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE GEOGRAFICO DEL RÍO CAUCA*. Cali, Colombia.

IDEAM. ((Mayo de 2015)). *Estudio Nacional del Agua 2014*. 486 págs. . Bogota: Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.

Torres, J. C. (2004). *Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar*. Cali: Cenicaña.

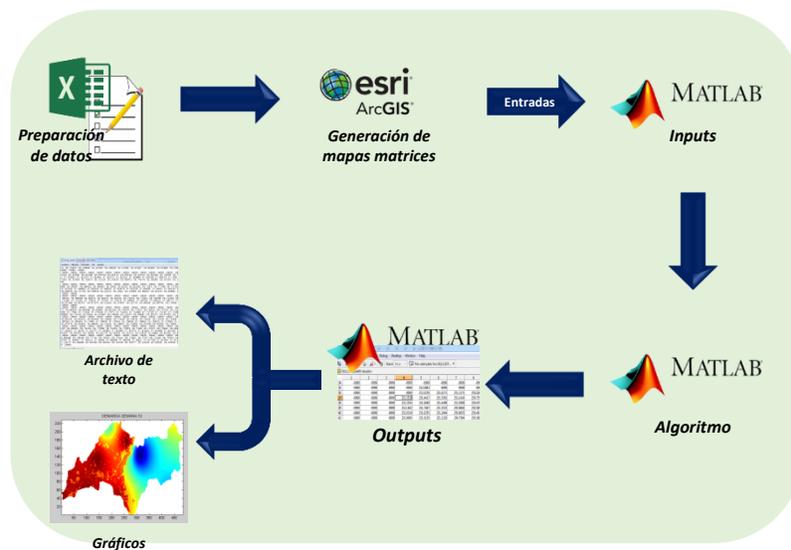


Figura 65. Esquema general para cálculo de la demanda de agua

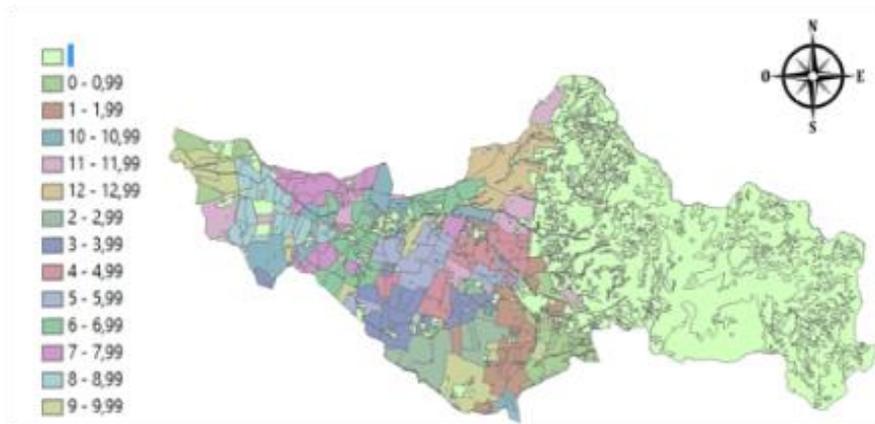


Figura 66. Distribución espacial de área por edad

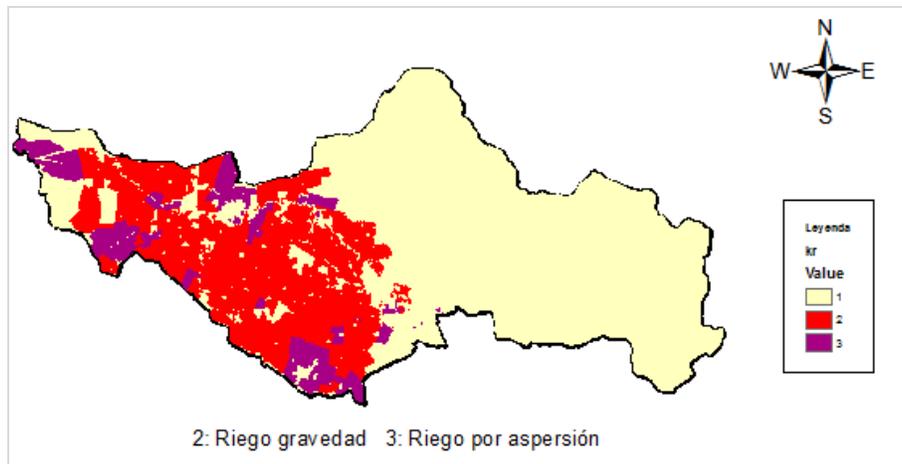


Figura 67. Distribución espacial simulado sistemas eficiencia de sistemas de riego

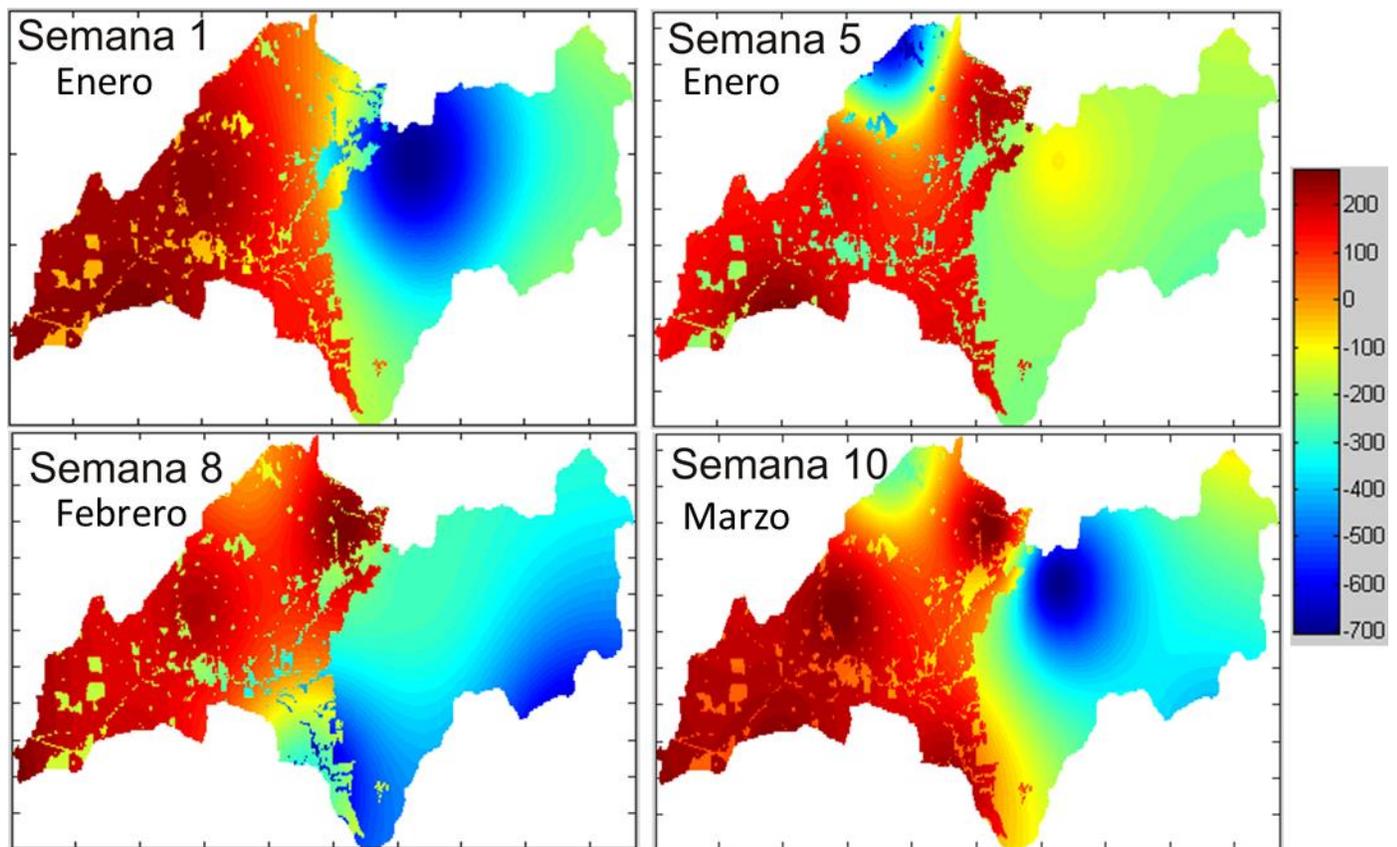
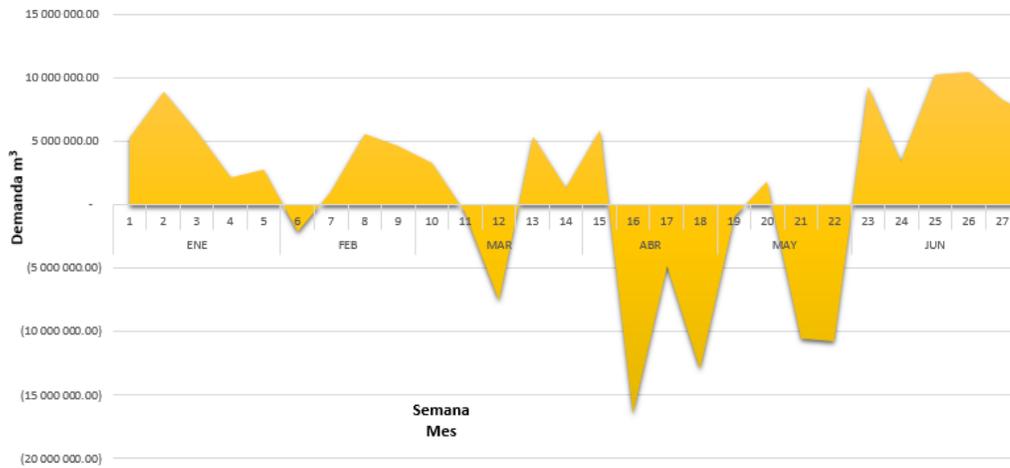


Figura 68. Resultados gráficos de la herramienta de modelación, para las demandas de caña de azúcar de la zona de estudio para diferentes semanas de análisis

ENE					FEB			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5 240 700	8 956 400	5 831 300	2 194 800	2 758 100	-2 150 000	956 470	5 582 900	4 662 800
MAR					ABR			
10	11	12	13	14	15	16	17	18
3 328 900	-520 980	-7 504 800	5 353 400	1 328 100	5 884 100	-16 510 000	-4 859 200	-12 968 000
MAY				JUN				
19	20	21	22	23	24	25	26	27
-1 012 500	1 828 300	-10 586 000	-10 771 000	9 366 300	3 395 800	10 290 000	10 435 000	8 270 400



JUL				AGO				
28	29	30	31	32	33	34	35	36
6 892 900	8 785 800	8 153 500	8 846 300	-2 876 100	1 870 000	9 422 500	7 176 500	10 137 000
SEP				OCT				
37	38	39	40	41	42	43	44	
-157 160	8 949 200	6 421 700	2 535 900	-2 559 100	-8 710 200	3 168 200	-4 886 600	
NOV				DIC				
45	46	47	48	49	50	51	52	
5 911 000	4 129 200	-8 487 600	-919 050	-7 354 400	5 320 100	5 054 600	-6 067 500	

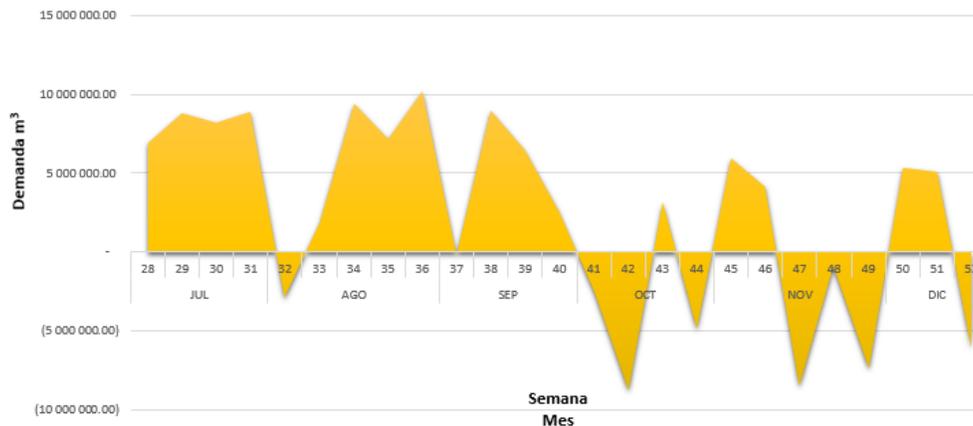


Figura 69. Demanda semanal

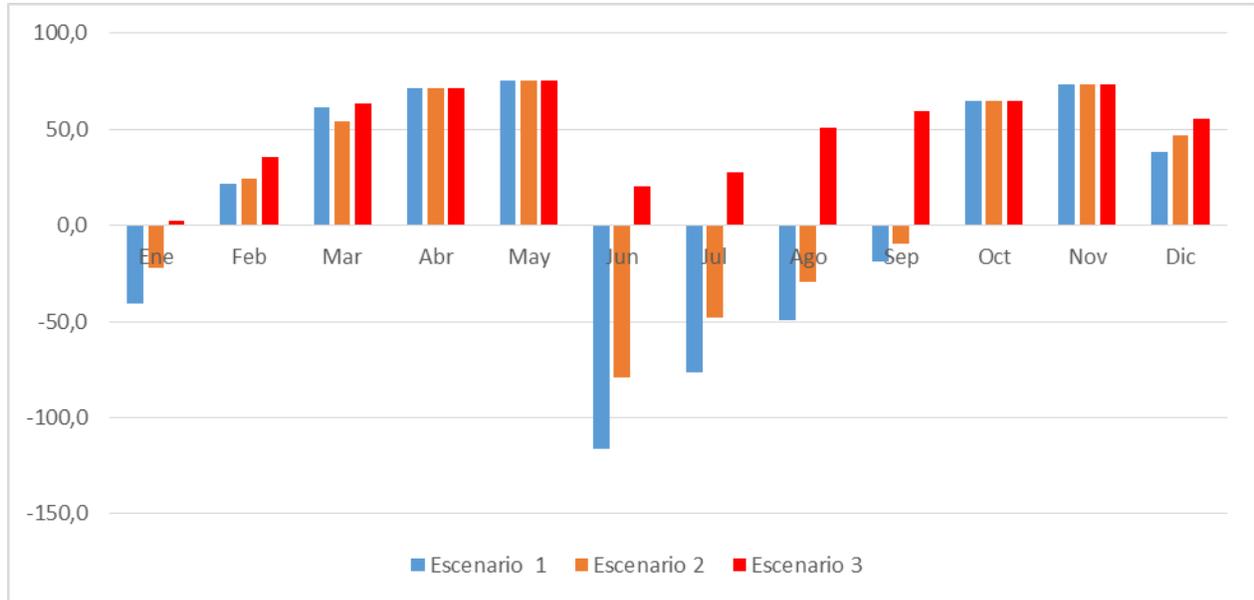


Figura 70. Comparación resultado de escenarios balance oferta demana agrícola(mm)

IAHR

AIH

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DISTRIBUIDO
DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS PARA EL CULTIVO DE LA CAÑA**

Arias Arias, Y. *, Zambrano Nájera, J. **

*Estudiante Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia, yoarias@ingeniomayaguez.com

**Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil, jdzambanona@unal.edu.co

DE AZÚCAR EN EL VALLE DEL CAUCA

*Arias Arias, Y. *, Zambrano Nájera, J. ***

**Estudiante Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia,
yoarias@ingeniomayaguez.com*

***Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil,
jdzambanona@unal.edu.co*

RESUMEN

En los últimos años debido al aumento de la demanda y las repercusiones del cambio climático, se ha incrementado la falta de disponibilidad de agua y en periodos secos intensos existen zonas en las cuales no se alcanzan a cubrir las necesidades hídricas del cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca (Colombia). Dicha disponibilidad depende en gran medida del riego complementario, ya que las precipitaciones no alcanzan a abastecer las necesidades de agua del cultivo durante los periodos secos. El objetivo de esta investigación es desarrollar una herramienta que permita calcular la demanda de agua de forma espacial y semanal, de manera que se pueda realizar un cálculo de demanda regional más real. La herramienta fue desarrollada en matlab y permite realizar balances hídricos a nivel predial para el periodo de análisis que se requiera, en este caso semanal. Se realizó el análisis del impacto en la demanda de la mejora del riego, por medio de un análisis de sensibilidad de esta, lo que permite concluir que una mejor gestión sobre la eficiencia del riego puede ser parte de la solución para abastecimiento de la demanda para riego, priorizando en el análisis los demás usos entre ellos doméstico, ambiental, industrial que se encuentran en la cuenca y que son de vital importancia social y ambiental.

Palabras clave: Eficiencia de riego, balance hídrico, planificación de recurso hídrico, caña de azúcar, oferta y demanda hídrica

ABSTRACT

In recent years due to the increase in demand and climate changes, the lack of water availability has increased and during dry periods there are areas where water needs for sugar cane irrigation crop were not covered in the Valle del Cauca (Colombia). This water availability

depends to a large extent on the complementary surface irrigation, since precipitations are not enough to supply crop water needs. The objective of this research is to develop a tool to calculate the water demand in a spatial and weekly way, thus a more realistic regional demand calculation can be made. The tool was developed in matlab and allows water balances at the farm level for the period of analysis required, in this case weekly. The analysis of the impact on the demand for irrigation improvement was carried out, which allows us to conclude that a better management on irrigation efficiency can be part of the solution to supply the demand for irrigation, prioritizing in the analysis the other uses among them domestic, environmental, industrial that are in the basin and that are of vital social and environmental importance.

Keywords: Irrigation, water balance, water resource planning, sugar cane, water offer and demand.

INTRODUCCIÓN

En el Departamento del Valle del Cauca (Figura 1), Colombia se vienen presentando conflictos por el uso del agua desde hace algunos años. Estos se atribuyen al incremento de la demanda, a la disminución de la oferta hídrica superficial y a la falta de gobernabilidad. A su vez los incrementos en la demanda se presentan porque los cultivos existentes en el Valle tienen requerimientos de riego suplementarios, y porque otros usos como el doméstico superan las proyecciones de planificación.

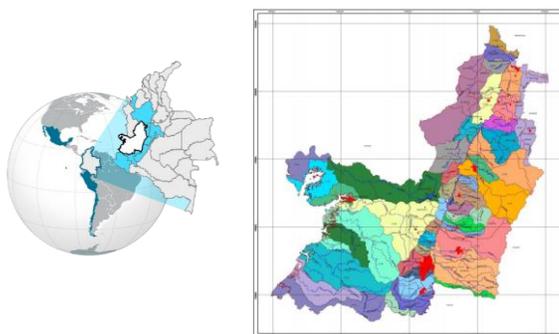


Figura 71.- Cuencas del Valle del Cauca (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, 2013)

Con respecto a la demanda el área sembrada en caña de azúcar pasó de 140 mil hectáreas en 1990 a 238 mil hectáreas en 2016 (Asocaña, 2017) y se ha detectado que las precipitaciones no son suficientes para cubrir las necesidades de agua de la planta, por lo que el riego se ha tomado como práctica habitual en el 95% del área cultivada en el Valle del Cauca (Cruz & Trujillo, 2004).

Adicionalmente a los incrementos de la demanda, la oferta se ha visto reducida principalmente en los períodos secos del fenómeno del Niño que cada vez han sido más prolongados y con precipitaciones con tendencia a disminuir. En el Valle del Cauca las fuentes de abastecimiento están constituidas principalmente por el río Cauca, sus tributarios y por pozos de aguas subterráneas, sobre las cuales en los últimos años se han producido conflictos por el uso de agua debido a las grandes presiones hídricas. También se ha constatado que los sistemas de

planificación son muy débiles ya que, aunque se han realizado estudios diagnósticos como el estudio de balances de agua por cuenca y reglamentaciones de corrientes, por parte de la Autoridad Ambiental, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, no se han planteado soluciones definitivas con lo que la situación se ha visto agravada.

Por estas razones, este trabajo realiza un análisis espacio-temporal para determinar la variabilidad de los requerimientos hídricos de la planta, así como de las necesidades de riego, según la variabilidad climática de la zona.

La situación en que se encuentran las cuencas del Valle del Cauca no es una problemática nueva, ya que se ha venido presentado en otras cuencas en el mundo, como explican (Falkenmark & Molden, 2008): “Conforme se desarrollan las sociedades, los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas se usan cada vez más, para fines agrícolas, domésticos e industriales trayendo como consecuencia, la reducción de la capacidad para cumplir con las crecientes demandas de diversos sectores e intereses”. Las sociedades pueden adaptarse a esto de diversas maneras: con reasignación de agua, gestión de la demanda o transferencias entre cuencas como el principal medio de tratar con el problema. Sin embargo, existen las medidas de "solución rápida", como la explotación de aguas subterráneas, superficiales mal planificada, o reasignación injusta de agua a los usuarios, trayendo como consecuencia sobre explotación de las aguas subterráneas, dejando un limitado o nulo caudal ambiental. Ejemplo de estos casos son los ríos Colorado (U.S.A), Amarillo (China), cuencas del río Jordán (Israel), el río Murray-Darling en Australia y el río Indo en la India y Pakistán.

Efectivamente estas soluciones rápidas que también se presentan en la región, son las que se deben evitar y la propuesta de este trabajo es realizar un análisis de posibles alternativas para una zona crítica (cuenca del río Bolo), para esto se desarrolló una herramienta que permite realizar un análisis distribuido de las necesidades hídricas para el cultivo de la caña de azúcar y hacer un análisis de posibles soluciones para el abastecimiento de agua para esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realiza en las cuencas ubicadas en la margen derecha del río Cauca en el Valle del Cauca, Colombia. El departamento se encuentra ubicado al Suroccidente del territorio colombiano, formando así parte de las regiones Andina y Pacífica, contando con una superficie de 22.140 km², presenta una hidrografía de numerosas corrientes que están conformadas en dos vertientes que son: la del Pacífico y la del río Cauca. En las partes planas del río Cauca se encuentran la mayoría de los cultivos de caña de azúcar y otros cultivos como sorgo, soya, café, plátano, así como ciudades medianas, pueblos y corregimientos, industrias. Por otra parte, en las partes altas de esta cuenca se encuentra vegetación de páramo.

METODOLOGÍA

Diagnóstico

Inicialmente, se realizó un diagnóstico del balance oferta-demanda de las cuencas de la margen derecha del río Cauca realizadas de manera agregada, así mismo se evaluaron los planes de ordenamiento de cuenca y la reglamentación de corriente que es el procedimiento mediante el cual se distribuye su aprovechamiento de agua, teniendo en cuenta las características biofísicas, sociales y económicas de su zona de influencia, además de las condiciones actuales y futuras de la oferta y manejo del agua.

Cálculo de la demanda agrícola

La demanda agrícola se calculó siguiendo la metodología esquematizada en la **Figura 72**, se calcula de forma espacial para cada hectárea del cultivo.

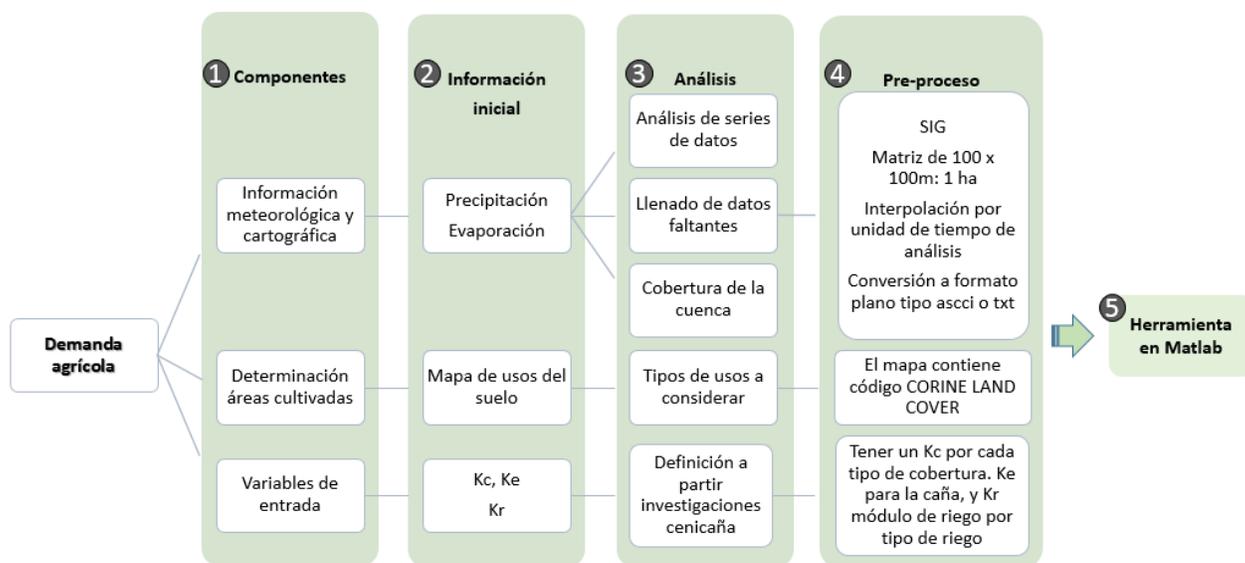


Figura 72.- Esquema de metodología planteada para demanda agrícola

La demanda de caña de azúcar se calculó de forma espacial aplicando la ecuación 1 (IDEAM, 2015) en cada hectárea cultivada. Para esto, primero se obtuvo el uso agrícola con la información de los mapas de Cobertura y uso del suelo, obtenidos de la CVC, en resolución 100x100 m. Adicionalmente, se requirieron mapas de Precipitación y Evapotranspiración semanal.

$$Da = \sum_{d=1}^{df} \left[\frac{(KcxEtp) - \frac{(Pxke)}{100}}{Kr} \right] xA \quad [1]$$

Donde

Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha).

10: es el factor que aplica para convertir a m³/ha

lp: duración del periodo de crecimiento

Kc: coeficiente cultivo

ETp: evapotranspiración de referencia potencial

P: precipitación en mm

Ke: coeficiente de escorrentía

Kr: coeficiente de eficiencia de riego

Información inicial y análisis

Para la información de precipitación y evapotranspiración fueron usadas 7 estaciones, las cuales fueron adquiridas a través de Cenicaña (Centro de investigación de la caña de azúcar) y CVC. Se realizó un control de la calidad de las series utilizadas y se hizo llenado de datos faltantes utilizando el software Suemulador (Chica, 2014) basado en las cadenas de Markov.

El coeficiente del cultivo de caña de azúcar (K_c), se obtuvo a partir de reportes de experimentos realizados por Cenicaña (Cruz Valderrama, 2015), los que indican que, en condiciones ambientales del Valle del Cauca, la caña de azúcar puede desarrollar valores según la edad que van desde 0.3 hasta 0.8.

La eficiencia de riego (K_r), en el sector azucarero de Colombia presenta estos rangos: 40-60% para aplicación de riego por surcos, 60-80% para aspersión con cañones. Adicionalmente, el volumen de agua para el riego por surcos promedio para el sector es de 1300 m³/ha (Cruz Valderrama, 2015). Los métodos de riego por surcos y de riego por aspersión con cañones son los más usados en el cultivo de la caña de azúcar de la región. El primero se utiliza en el 79% del área y el segundo en el 21% (Cruz Valderrama, 2015).

El coeficiente para determinar precipitación efectiva en el cultivo de la caña de azúcar (K_e) es alrededor del 80% en precipitaciones entre el 1-12 mm y del 90% en precipitaciones superiores al 12mm (Cruz Valderrama, 2015). Se asume para el cálculo de la demanda un 85% de precipitación efectiva.

Preproceso

La información de precipitación y evaporación fue representada espacialmente, en ArcGis de forma semanal obteniendo 52 mapas de cada variable climática, por el método interpolación mediante distancia inversa ponderada IDW, que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de estaciones.

Para generar los mapas de edad de la caña, que modifica la variable K_c se adjudicó un atributo por polígono según la distribución teórica de edad de la caña como se puede observar en la Figura 73.

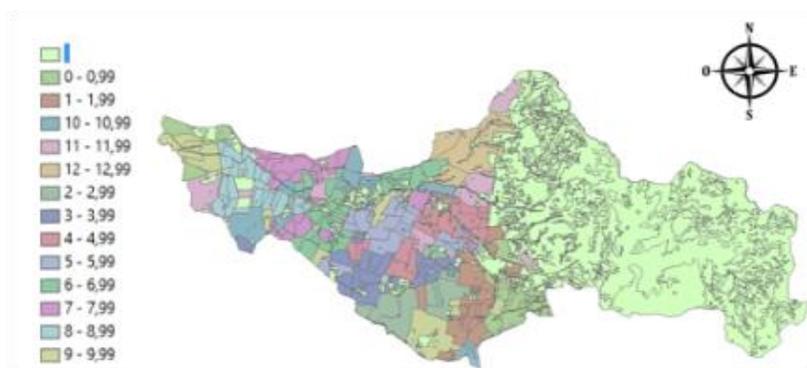


Figura 73. -Distribución espacial de área por edad

Para espacializar los datos de Kr se adjudicó un atributo según los porcentajes de área de cada sistema de riego (ver **Figura 74**).

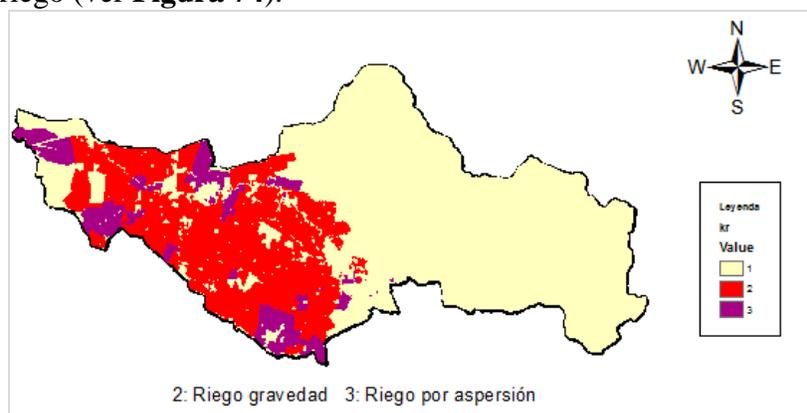


Figura 74. Distribución espacial simulado sistemas eficiencia de sistemas de riego

Herramienta en Matlab

Finalmente, se diseñó en Matlab (una herramienta de cálculo de la demanda, para las 53 semanas del año con datos medios, utilizando los mapas antes citados (en forma de matrices en ascci). El programa realiza automáticamente el cálculo indicado en la ecuación 1, celda por celda lo que corresponde a una hectárea, a partir del cual se obtienen salidas gráficas de demanda en cada semana y se genera un archivo de la sumatoria de las demandas por tipo de cultivo (en este caso caña de azúcar) y por periodos.

Análisis de sensibilidad

Se construyeron tres escenarios de eficiencias de riego, para evaluar su impacto sobre los requerimientos de agua en el cultivo de la siguiente manera:

Tabla 50.- Escenarios simulados para diferentes áreas con eficiencia de riego

Escenarios	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
	Área bajo riego	Eficiencia	Área bajo riego	Eficiencia	Área bajo riego	Eficiencia
Riego por aspersión	4027	0.70	4027	0.70		

Sistemas de riegos tecnificados	0	0	4821	0.81	19405	0.81
Riego por surcos	15378	0.50	10557	0.50	0	0
Área Total	19405		19405		19405	

RESULTADOS

Diagnóstico

Como se puede observar en la *Figura 75* y la *Figura 76* el uso del suelo del río Bolo indica que el 46% del área de la cuenca se encuentra en cultivos de caña de azúcar, como el cultivo requiere riego para su establecimiento representa la demanda de agua predominante en la cuenca, por tanto el análisis del estudio se enfocó en la demanda de caña de azúcar.

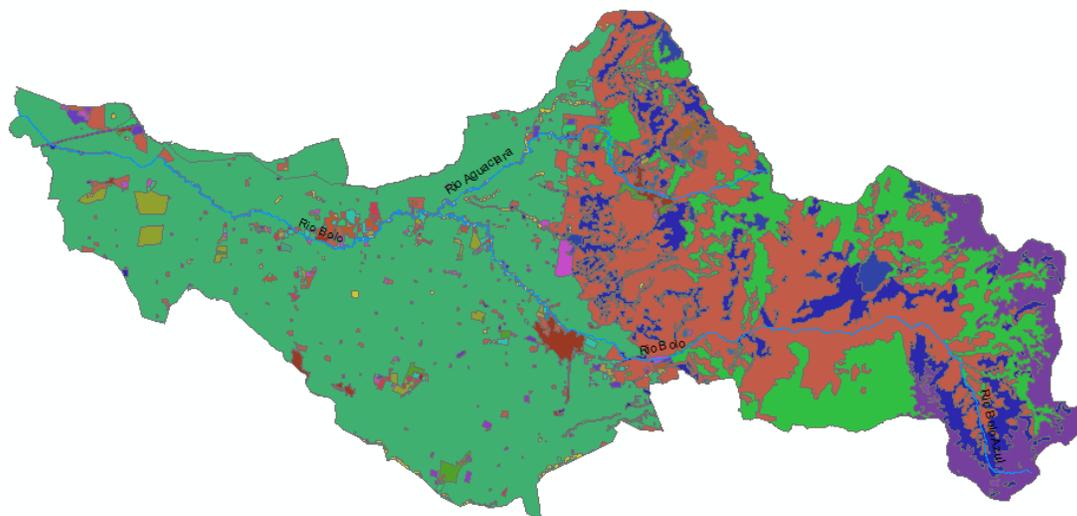


Figura 75.- Plano de uso del suelo cuenca río Bolo

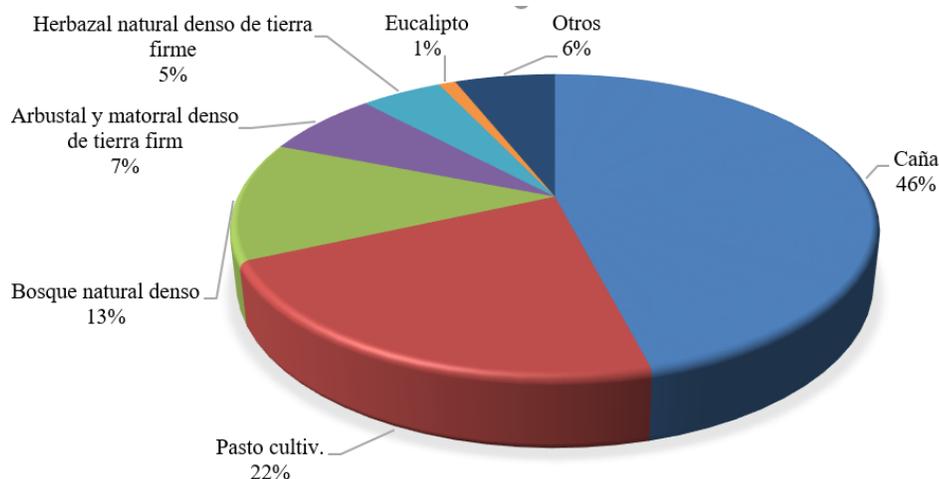


Figura 76. - Porcentaje uso del suelo cuenca río Bolo

Para realizar el cálculo de demanda primero se obtuvo el uso agrícola con la información de los mapas de cobertura y uso del suelo obtenidos en resolución 100 x 100m. Adicionalmente, se requieren mapas de precipitación y evapotranspiración semanal obtenidos mediante la red de estaciones hidrometeorológicas de la CVC y Cenicaña.

Con la información secundaria se estableció que la cuenca del río Bolo, se encuentra entre las zonas que deben tener prioridades de intervención, debido a la baja disponibilidad de agua en periodos secos. La cuenca hidrológica del río Bolo tiene 43.736,52 hectáreas tiene periodos no abastecidos más específicamente los meses de julio y agosto.

La cuenca del río Bolo presenta para el mes de julio el balance negativo más crítico (-69,6 mm) de todas las cuencas analizadas, igual ocurre para el mes de agosto con un balance de -95,9mm (ver **Figura 77**). Adicionalmente es una de las cuencas con IAU (índice de agua superficial) críticos en la zona (ver **Tabla 51**).

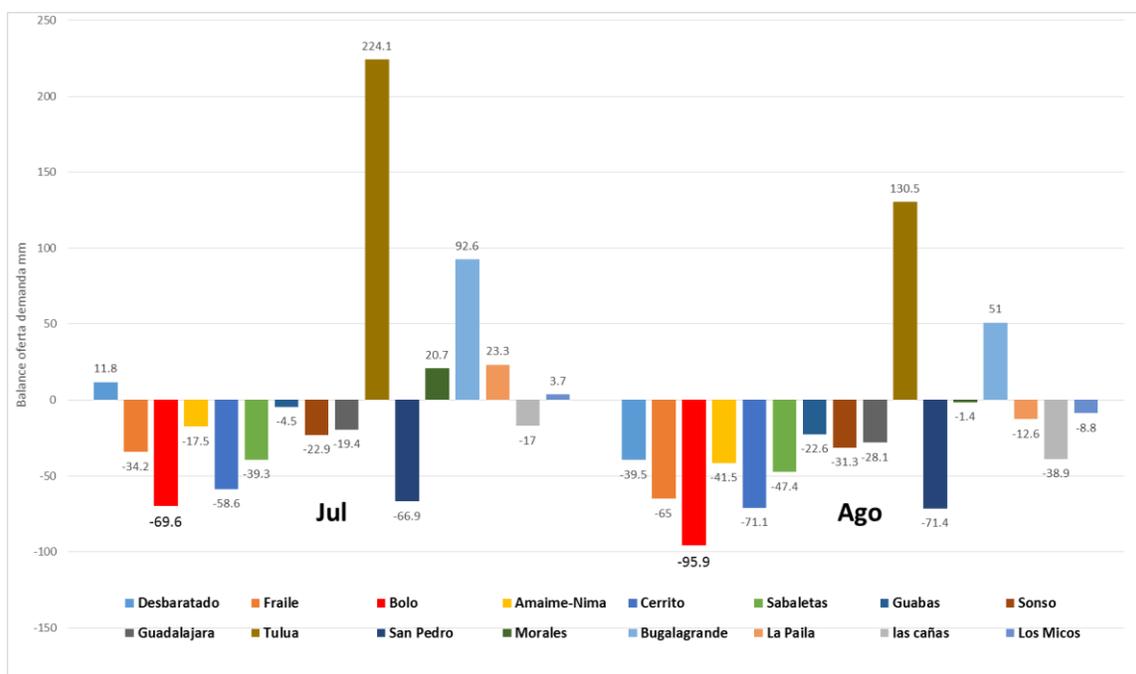


Figura 77.- Balance oferta demanda cuencas analizadas con información secundaria

Tabla 51- Resumen IAU por cuenca

Cuenca	IE (anual) %	Valoración
Las Cañas	425.4	Crítico
El Cerrito	330	
Fraile	165	
Los Micos	142.5	
Obando	132.1	
Sabaletas	131.1	
San Pedro	131	
Bolo	103.8	
Amaime-Nima	78.8	Muy alto
Sonso	73.1	
Desbaratado	69.4	
Guadalajara	56.1	Alto
Guabas	53.1	
Morales	23.7	
La Paila	21.9	Moderado
Tuluá	11	
Bugalagrande	10.5	

Resultados del modelo en matlab

Se trabajó con registros del año 2013 por ser un año neutro no afectado por fenómeno de La Niña o El Niño para ver el comportamiento normal, en la cuenca del río Bolo. Los resultados de la herramienta se encuentran en las salidas gráficas de la figura 8 donde se observa el cambio de comportamiento de los requerimientos de agua al cabo de 10 semanas, las celdas más rojas representan las áreas de mayor demanda de agua mientras las celdas azules muestran las áreas que no tienen requerimiento hídrico o tienen superávit. La variabilidad que se observa en los mapas para cada celda se debe a la generación de precipitación y evaporación con el método IDW, donde cada celda (1 ha) tiene la información de varias estaciones, diferente si hubiera usado el método de polígonos de Thiessen ampliamente utilizado por los agricultores, donde la información espacial por celda es utilizada de una sola estación.

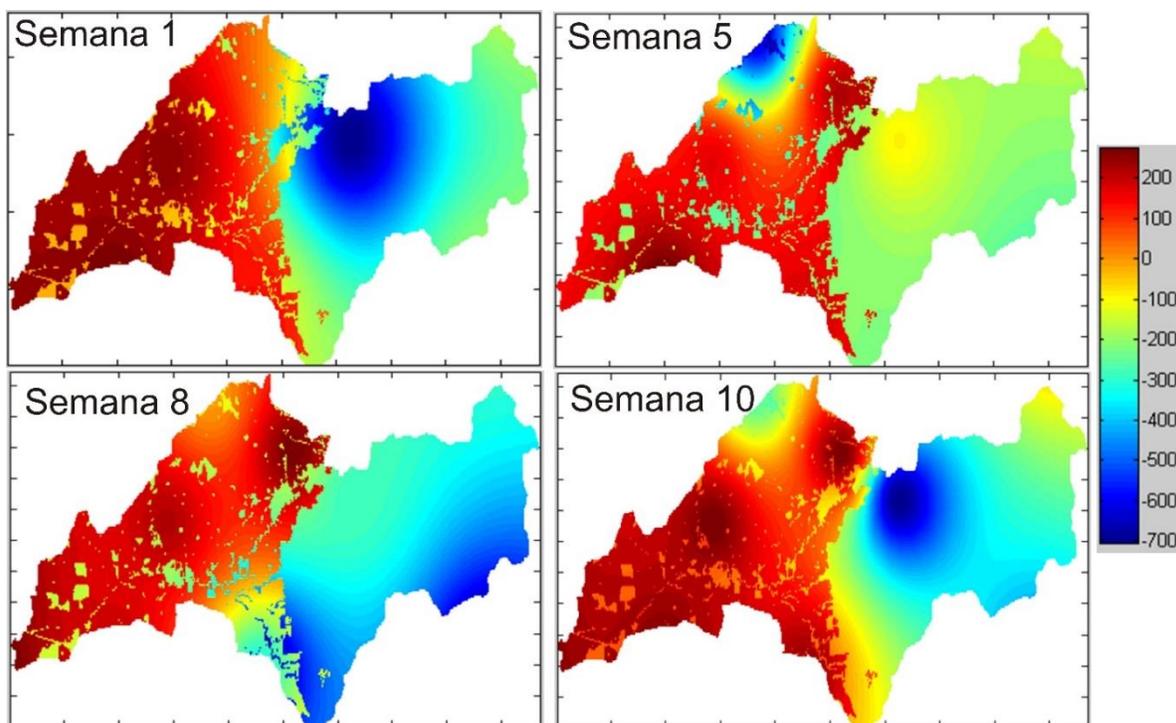
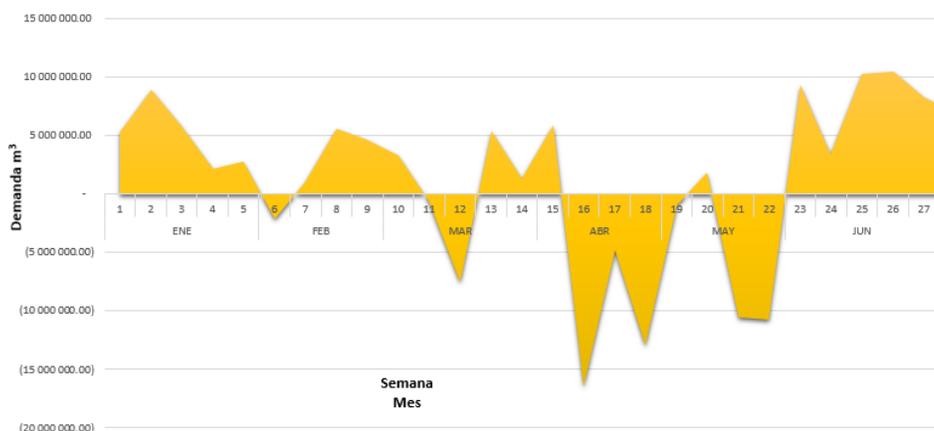


Figura 78. - Resultados gráficos de la herramienta de modelación, para las demandas de caña de azúcar de la zona de estudio para diferentes semanas de análisis

La herramienta calcula la demanda según la ecuación 1, en metros cúbicos (m^3) y arroja un archivo plano que puede trabajarse en SIG o en Excel, que permite realizar cálculos y análisis como la gráfica de la Figura 76. (demanda positiva y superávit negativa). En dicha figura se observa la variación mensual y semanal, por ejemplo el mes de marzo, es un mes regularmente lo presentan como mes sin requerimiento de riego, se observa sin embargo que entre las semanas 10 y parte de la semana 11 se tiene requerimiento de riego, así mismo se logra observar este mismo caso en las semanas 42, 45, 46, 50, 51.

Mostrando así que el análisis a escala semanal es más preciso al momento de realizar un análisis de requerimiento de riego, pues la escala mensual puede registrar resultados no apropiados.

ENE					FEB			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5 240 700	8 956 400	5 831 300	2 194 800	2 758 100	-2 150 000	956 470	5 582 900	4 662 800
MAR					ABR			
10	11	12	13	14	15	16	17	18
3 328 900	-520 980	-7 504 800	5 353 400	1 328 100	5 884 100	-16 510 000	-4 859 200	-12 968 000
MAY				JUN				
19	20	21	22	23	24	25	26	27
-1 012 500	1 828 300	-10 586 000	-10 771 000	9 366 300	3 395 800	10 290 000	10 435 000	8 270 400



JUL				AGO					
28	29	30	31	32	33	34	35	36	
6 892 900	8 785 800	8 153 500	8 846 300	-2 876 100	1 870 000	9 422 500	7 176 500	10 137 000	
SEP				OCT					
37	38	39	40	41	42	43	44		
-157 160	8 949 200	6 421 700	2 535 900	-2 559 100	-8 710 200	3 168 200	-4 886 600		
NOV				DIC					
45	46	47	48	49	50	51	52		
5 911 000	4 129 200	-8 487 600	-919 050	-7 354 400	5 320 100	5 054 600	-6 067 500		

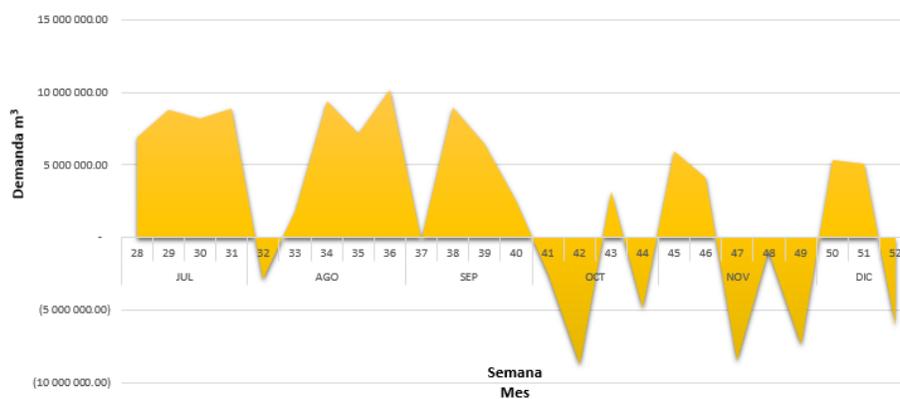


Figura 79. -Demanda semanal

Análisis de sensibilidad

- Variación de eficiencias de riego

Para poder realizar un análisis del impacto de la variación de la eficiencia de riego observando la oferta disponible en la cuenca del río Bolo, se utilizaron los cálculos de oferta superficial y subterránea disponible para agricultura, priorizando primero los usos doméstico, industrial, pecuario y ambiental, realizados por la autoridad ambiental en el balance hídrico de la cuenca del río Bolo (CVC) para el 2017, y se realizó un balance oferta demanda para cada escenario.

Escenario 1. Actual. Este escenario corresponde a las condiciones actuales en la cuenca, se presenta el déficit en los meses de enero, febrero junio, julio agosto y septiembre (Ver Tabla 48), solo abasteciéndose con las aguas superficiales. Al incluir las aguas subterráneas el déficit continúa en menor proporción para todos los meses mencionados, menos para febrero y diciembre (**Tabla 48**)

Escenario 2. 50% riego gravedad, 50% aspersión, 50% tecnificado Se observa disminución en el déficit de los meses enero – febrero y de junio a septiembre hasta de un 30%, considerando oferta superficial (Tabla 2), y de hasta el 60% considerando aguas subterráneas (Tabla 3). Aún así, no se alcanza abastecer el requerimiento usando las aguas subterráneas. El mayor impacto se produce para el mes de diciembre donde se logra una gran reducción del déficit.

Escenario 2. 100% riego tecnificado. Para este escenario se encuentra que se reduce considerablemente el déficit en el balance con aguas superficiales, logrando una disminución de hasta el 139% para los mismos meses del escenario 2 y en el balance con aguas subterráneas se alcanzaría a satisfacer totalmente la demanda.

Tabla 52. -Balance hídrico (mm) considerando solamente oferta hídrica superficial, para los tres escenarios de eficiencia de riego considerados

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta superficial	27.30	23.20	27.40	30.00	32.60	26.80	25.10	22.00	18.20	22.10	32.30	37.80
Demanda Escenario 1	110.2 2	39.94	8.76	-	-	184.23	144.18	113.5 2	78.31	-	-	42.25
Balance Escenario 1	-82.9	-16.7	18.6	30.0	32.6	-157.4	-119.1	-91.5	-60.1	22.1	32.3	-4.4
Demanda Escenario 2	91.87	36.97	15.47	-	-	147.07	115.86	94.06	68.97	-	-	33.63
Balance Escenario 2	-64.6	-13.8	11.9	30.0	32.6	-120.3	-90.8	-72.1	-50.8	22.1	32.3	4.2
Variación Esc2- Esc1	-23%	-23%	-30%			-24%	-25%	-22%	-17%			- 2691 %
Demanda Escenario 3	67.14	25.91	6.30	-	-	47.59	39.73	13.35	-	-	-	24.70

Balance Escenario 3	-39.8	-2.7	21.1	30.0	32.6	-20.8	-14.6	8.7	18.2	22.1	32.3	13.1
Variación Esc3-Esc1	-54%	-110%	11%			-89%	-91%	-114%	-139%			-5481%

Tabla 53.- Balance hídrico (mm) considerando oferta hídrica superficial y subterránea, para los tres escenarios de eficiencia de riego considerados

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta superficial	27.30	23.20	27.40	30.00	32.60	26.80	25.10	22.00	18.20	22.10	32.30	37.80
Oferta subterránea	42.50	38.40	42.50	41.10	42.50	41.10	42.50	42.50	41.10	42.5	41.10	42.50
Total oferta	69.80	61.60	69.90	71.10	75.10	67.90	67.60	64.50	59.30	64.60	73.40	80.30

Demanda Esc1	110.22	39.94	8.76	-	-	184.23	144.18	113.52	78.31	-	-	42.25
Balance total Esc1	-40.4	21.7	61.1	71.1	75.1	-116.3	-76.6	-49.0	-19.0	64.6	73.4	38.1

Demanda Esc.2	91.87	36.97	15.47	-	-	147.07	115.86	94.06	68.97	-	-	33.63
Balance total Esc. 2	-22.1	24.6	54.4	71.1	75.1	-79.2	-48.3	-29.6	-9.7	64.6	73.4	46.7
Variación Esc2-Esc1	-50%	12%	-10%			-33%	-39%	-43%	-61%			20%

Demanda Esc.3	67.14	25.91	6.30	-	-	47.59	39.73	13.35	-	-	-	24.70
Balance total Esc. 3	2.7	35.7	63.6	71.1	75.1	20.3	27.9	51.2	59.3	64.6	73.4	55.6
Variación Esc3-Esc1	-118%	55%	4%			-122%	-144%	-222%	-510%			42%

Conclusiones

- Esta metodología permite simular la edad de los cultivos de caña y modificar considerando escenarios más cercanos a la realidad.
- La herramienta permite tener un cálculo de la demanda de agua para la caña de azúcar que es el cultivo predominante en la cuenca, lo más preciso posible teniendo en cuenta la variabilidad de la edad y de la eficiencia de riego, lo que permite evaluar la gestión en las eficiencias de los sistemas de irrigación.

- Es una herramienta de planificación, que en el estudio se está realizando para una cuenca, pero que puede realizarse a escala predial, para la selección de sistemas de riego según disponibilidad de las fuentes de agua, para evaluar cumplimientos ambientales, fuentes alternas de agua y turnos de riego.
- Esta herramienta permite realizar análisis de las épocas críticas, discriminándolas por cada semana. Además, permite realizar el análisis de las zonas con dificultades de abastecimiento por precipitación, es decir de aquellas zonas de cultivos de caña con déficits o superávits de humedad.
- Si bien es necesario hacer un análisis costo beneficio del incremento de las eficiencias de riego, y que el escenario planteado sería un ideal ya que no todas las tecnologías de riego son aplicables a todos los terrenos, tener herramientas de este tipo, representan un apoyo para analizar y buscar otras alternativas de abastecimiento de agua u otras acciones.
- Es importante que los agricultores como usuarios principales del recurso hídrico participen de una forma propositiva en las inquietudes y propuestas de soluciones regionales de la planificación del agua y se puedan hacer análisis futuros para de inversión a medio y largo plazo, teniendo en cuenta que la sostenibilidad del recurso hídrico repercute directamente en la factibilidad técnica, ecológica, y social de la caña de azúcar.

Referencias

- Asocaña. (2017). *Desempeño de la Agroindustria de la caña en Colombia 2016 - 2017*. Cali: Obtenido de <http://www.asocana.org/modules/documentos/9353.aspx>.
- Chica, H. P. ((2014).). *SueMulador: Herramienta para la Simulación de Datos Faltantes en Series Climáticas Diarias de Zonas Ecuatoriales*. R . revista Facultad Nacional de Agronomía, 67(2), 7365-7373. Obtenido de <https://dehttps://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/44179/45464>.
- Corporación autónoma regional del Valle del Cauca (CVC). (2017). *BALANCE OFERTA – DEMANDA DE AGUA CUENCA DEL RIO BOLO*. CALI.
- Cruz Valderrama, J. R. (2015). *MANEJO EFICIENTE DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL VALLE GEOGRAFICO DEL RÍO CAUCA*. Cali, Colombia.
- IDEAM. ((Mayo de 2015)). *Estudio Nacional del Agua 2014*. 486 págs. . Bogota: Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.
- Torres, J. C. (2004). *Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar*. Cali: Cenicaña.

Reconocimiento TECNICAÑA mejor trabajo académico en la categoría de campo

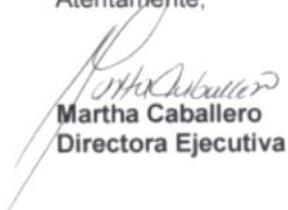


Santiago de Cali, 27 de mayo de 2019

CERTIFICACIÓN

La Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, Tecnicaña, certifica que el trabajo académico "*Propuesta de una Metodología de Análisis Distribuido de las Necesidades Hídricas para el Cultivo de la Caña de Azúcar en el Valle del Cauca*", realizado por la ingeniera **Yobana Arias Arias** y **Jeannette Zambrano Nájera** y presentado como ponencia durante el **XI Congreso ATALAC – TECNICAÑA**, del 24 al 28 de Septiembre de 2018 en la ciudad de Cali, Valle del Cauca, fue reconocido como mejor trabajo académico en la categoría de **campo**.

Atentamente,



Martha Caballero
Directora Ejecutiva



www.tecnica.org
Tels. (+57) 665 3252
(+57) 315 525 7337
tecnica@tecnica.org
Cali-Colombia