



Determinación del índice de escasez de tres fuentes hídricas principales de la región

Suroeste Antioqueño.

Diana Paola Robles Castaño

Informe de práctica para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor

Silvana Arias Arias, MSc Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Robles Castaño,2023)
Referencia	Robles Castaño, D.P., (2023). <i>Determinación del índice de escasez de tres fuentes hídricas principales de la región suroeste antioqueño</i> . [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín UdeA.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado:

A Dios quien ha sido mi guía y fortaleza; su amor y fidelidad me motivaron a continuar cada día a esforzarme por este tan anhelado sueño.

A mi madre y abuela, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me permitieron llegar a cumplir un sueño; gracias por enseñarme a encarar las adversidades sin desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad de Antioquia, por haberme permitido formarme, gracias a todos mis profesores, quienes con su enseñanza hicieron que pueda crecer día a día, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

Mi más sincero agradecimiento a la Corporación Autónoma del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), a mis compañeros de trabajo por haberme acompañado tan cerca, y de manera tan efectiva, en el desarrollo de mi práctica.

Finalmente, muchas gracias a mis asesores Silvana Arias y Rigoberto Arroyave, quienes fueron una luz de claridad en medio de tantas incertidumbres, gracias por sus incalculables y maravillosos aportes.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2 Marco teórico	14
3 Marco geográfico	17
4 Metodología	21
5 Resultados	24
5.1 Morfometría de la cuenca	24
5.1.1 La Cedrona	24
5.1.2 Corinto	28
5.1.3 Remolino	31
5.2 Análisis climatológico	34
5.3 Balance hídrico	36
5.4 Oferta hídrica	37
5.4.1 Oferta hídrica La Cedrona	37
5.4.2 Oferta hídrica Corinto	38
5.4.3 Oferta hídrica Remolino	39
5.5 Demanda hídrica	39
5.5.1 Demanda hídrica La Cedrona	41
5.5.2 Demanda hídrica Corinto	44
5.5.3 Demanda hídrica Remolino	46

5.6. Índice de escasez	48
6 Análisis	50
7 Conclusiones	51
Referencias	52
Anexos	54

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología de trabajo	21
Tabla 2. Parámetros morfológicos	22
Tabla 3. Parámetros Morfométricos La Cedrona	25
Tabla 4. Coeficiente de compacidad	26
Tabla 5. Factor de forma	26
Tabla 6. Cálculo de la elevación media microcuenca La Cedrona.	27
Tabla 7. Parámetros Morfométricos Corinto.....	29
Tabla 8. Cálculo de la elevación media microcuenca Corinto.	30
Tabla 9. Parámetros Morfométricos Remolino	32
Tabla 10. Cálculo de la elevación media microcuenca Remolino.	33
Tabla 11 Balance hídrico.....	37
Tabla 12. Oferta hídrica La Cedrona.....	37
Tabla 13. Oferta hídrica Corinto	38
Tabla 14. Oferta hídrica Remolino.....	39
Tabla 15. Área sembrada La Cedrona.....	42
Tabla 16. Huella hídrica La Cedrona	43
Tabla 17. Área sembrada Corinto	45
Tabla 18. Huella hídrica Corinto.....	45
Tabla 19. Área sembrada Remolino	47
Tabla 20. Huella hídrica Remolino	48
Tabla 21. Categorías del índice de escasez	49
Tabla 22. Índice de escasez La Cedrona	49
Tabla 23. Índice de escasez Corinto.....	49
Tabla 24. Índice de escasez Remolino	49

Lista de figuras

Ilustración 1. Localización del área de estudio.	17
Ilustración 2. Microcuenca La Cedrona	18
Ilustración 3. Microcuenca Corinto.....	19
Ilustración 4. Microcuenca Remolino	20
Ilustración 5. Clasificación de los ríos de acuerdo a la curva hipsométrica.....	27
Ilustración 6. Curva hipsométrica La Cedrona.....	28
Ilustración 7. Curva hipsométrica Corinto	31
Ilustración 8. Curva hipsométrica Remolino.....	33
Ilustración 9. Datos de temperatura y precipitación La Cedrona	35
Ilustración 10. Datos de temperatura y precipitación Corinto	35
Ilustración 11. Datos de temperatura y precipitación Remolino	36
Ilustración 12. Resultado del ETo en la microcuenca La Cedrona	43
Ilustración 13. Resultado del ETo en la microcuenca Corinto.....	45
Ilustración 14. Resultado del ETo en la microcuenca Remolino	47

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CORANTIOQUIA	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
ETO	Evapotranspiración del cultivo
FAO	Organización de las Naciones Unidas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
RAC	Requerimientos de Agua del Cultivo
SIG	Sistemas de Información Geográfica Especialista

Resumen

La escasez de recursos hídricos es un problema mundial y local, ocasionado por el progreso persistente y sin precedentes de la sociedad. El sector agrícola es el principal consumidor del recurso hídrico, y a su vez, los efectos de la escasez hídrica en el sector agrícola pueden implicar pérdidas de productividad significativas, afectando las economías locales y globales. Este proyecto se centró en la subregión Suroeste del departamento de Antioquia, en la cual, el sector agrícola se caracteriza por tener cultivos permanentes, principalmente cultivo de café y plátano. El objetivo del proyecto es determinar los índices de escasez de tres cuerpos hídricos que hacen parte de la Cuenca Rio San Juan, correspondiente a la Oficina Territorial Citará. Este índice de escasez se determinó mediante el análisis de la oferta y la demanda hídrica, de acuerdo con la metodología propuesta por el IDEAM, con el fin de establecer su disponibilidad y plantear recomendaciones para su conservación. La oferta hídrica y la demanda de agua se determinaron mediante las características morfométricas de cada cuenca (forma, el relieve y la hidrografía) y con base en la población actual y las actividades agrónomas, industriales, domésticas presentes en las mismas, respectivamente. Con esta información se calculó el índice de escasez.

Palabras clave: Índices de escasez, recursos hídricos, oferta, demanda.

Abstract

The scarcity of water resources is a global and local problem, caused by the persistent and unprecedented progress of society. The agricultural sector is the main consumer of water resources, and in turn, the effects of water scarcity in the agricultural sector can involve significant productivity losses, affecting local and global economies. This project focuses on the Southwest subregion of the department of Antioquia, in which the agricultural sector is characterized by permanent crops, mainly coffee and bananas. The objective of the project was to determine the Water Scarcity Indices of three water bodies that are part of the San Juan River Basin, corresponding to the Citará Territorial Office. This Water Scarcity Indices were determined by analyzing water supply and demand, in accordance with the methodology proposed by IDEAM, in order to establish its availability and make recommendations for its conservation. The water supply was determined by the morphometric characteristics of each basin (shape, relief and hydrography) and the water demand was determined based on the current population and the agricultural, industrial and domestic activities. With this information, the scarcity index was calculated.

Keywords: Scarcity indices, water resources, supply, demand.

Introducción

Los recursos hídricos son uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo sostenible de la sociedad, la economía y la ecología. Están disponibles a nivel superficial y subterráneo y permiten la subsistencia de la población humana y de los ecosistemas. Según el último informe de la Organización Meteorológica Mundial, habrá 5 mil millones de personas en el mundo enfrentando escasez de recursos hídricos para 2050 (Vliet , Jones & Florke, 2021).

Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica, debido a que cuenta con una gran cantidad de ecosistemas que producen agua (sin incluir los mares) que podría distribuirse a la población y a la industria. Sin embargo, en las últimas décadas, la demanda de agua ha incrementado significativamente con la intensa actividad humana, el aumento de la población y la expansión industrial y agrícola, el desarrollo de la economía social y la aceleración de la urbanización (Verma & Haritash, 2020).

Debido al mencionado progreso persistente de la sociedad, los seres humanos están explotando y utilizando recursos hídricos limitados sin precedentes, por lo que la escasez de estos recursos ha pasado de ser un problema regional y mundial (Organización de Naciones Unidas (ONU-DAES), 2014). El conflicto entre la oferta y la demanda de recursos hídricos se vuelve cada vez más grave, y problemas como la escasez de agua y el deterioro del medio ambiente hídrico se han convertido en factores restrictivos para el desarrollo social. Es por esta razón que en Colombia se ha venido realizando una valoración objetiva de esta problemática, mediante la propuesta diseñada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2004); la cual consiste en calcular la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible, luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y caudal ecológico.

El sector agrícola es el principal consumidor del recurso hídrico, por lo tanto, es previsible el impacto adverso que tendrá la escasez hídrica (FAO, 2013). A partir de esta problemática, se eligió la subregión Suroeste del departamento de Antioquia, en la cual, el sector agrícola se caracteriza por tener cultivos permanentes, principalmente cultivo de café, producto que abarca el 72 % de la tierra cosechada, siendo esta la subregión productora de café más importante de Antioquia (Cámara de comercio de Medellín para Antioquia, 2015). En menor medida se destaca

el cultivo de plátano, que concentra el 15 % del área. Los efectos de la escasez hídrica en el sector agrícola pueden verse reflejados en las pérdidas de productividad, ocasionando desde pérdidas económicas, hasta limitar el crecimiento o desarrollo la región.

La Ley 99 de 1993; la cual tiene como objetivo de conservar, defender, coordinar y administrar los recursos naturales de Colombia, dio vida a las corporaciones autónomas regionales en el país (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1993). En esta región hace presencia la Corporación Autónoma Regional del Centro Antioquia CORANTIOQUIA la cual opera en 80 municipios del departamento de Antioquia y está dividida en territoriales, específicamente para la zona de interés hace presencia la Oficina Territorial Citará, la cual pretende promover la protección y el cuidado de los recursos naturales de 8 municipios que son: Andes, Jardín, Betania, Betulia, Salgar, Concordia, Ciudad Bolívar y Hispania. CORANTIOQUIA se encarga de otorgar concesiones y/o permisos para las actividades, domésticas, agrícolas, porcícolas, etc.

Dada esta problemática que afecta el recurso hídrico disponible en la región, este proyecto buscó determinar los índices de escasez de tres cuerpos hídricos que hacen parte de la Cuenca Rio San Juan, correspondiente a la Oficina Territorial Citará; llamadas La Cedrona ubicada en el municipio de Andes, Corinto ubicada en el municipio de Hispania y Remolino ubicada en el municipio de Ciudad Bolívar; mediante la metodología del análisis entre la oferta y la demanda hídrica propuestas por el IDEAM adoptada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial a través de la Resolución 865 de 2004 (Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), con apoyo de un sistema de información geográfico.

El propósito de este estudio es definir el potencial hídrico de las cuencas ya indicadas, de las cuales se abastecen varios predios ubicados en los municipios de Andes, Hispania y Ciudad Bolívar, las cuales han garantizado durante muchos años el abastecimiento de agua para consumo humano, actividades agrícolas, pecuarias, entre otras. Es importante determinar el estado actual de las tres fuentes hídricas que hacen parte de la Oficina Territorial Citará, para evaluar la relación demanda-oferta hídrica de las tres fuentes, de tal manera que con el resultado presentado se ayude a los organismos del Estado involucrados en la gestión ambiental (CORANTIOQUIA), a tomar medidas necesarias en los planes de ordenamiento del uso de los recursos naturales.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar el índice de escasez de 3 fuentes hídricas principales de la región Suroeste Antioqueño mediante la metodología de relación de demanda y oferta hídrica presentada por el IDEAM, como herramienta en la toma de decisiones futuras respecto a concesiones de agua.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la oferta hídrica superficial de las tres fuentes mediante la metodología del IDEAM.
- Calcular la demanda del suelo a partir de las características socioeconómicas y culturales de cada región objetivo.
- Determinar el índice de escasez en las tres fuentes hídricas mediante la metodología del IDEAM, y de acuerdo con los resultados realizar un análisis en relación a las actividades socioeconómicas y culturales

2 Marco teórico

El recurso hídrico es uno de los principales integrantes de los ecosistemas naturales; es vital para la subsistencia humana y gran contribuyente en la estabilidad y regulación de los entornos, del medio ambiente, por lo tanto, se convierte en un factor que determina la supervivencia de la fauna y flora del planeta (Fernández, 2012). Sin embargo, su acelerado deterioro puede atribuirse a factores de intervención humana y según estudios los primeros impactos del recurso hídrico se evidenciaron a partir de la mitad del siglo XIX, debido a la revolución industrial y el incremento poblacional de la época, en la cual las actividades antrópicas han incidido de forma directa en el recurso hídrico (FAO, 2020).

La escasez de los recursos hídricos surge como un problema ambiental importante a nivel mundial (Cosgrove & Rijsberman, 2000). A medida que se incrementa la escasez; la competencia por los recursos hídricos se intensificará, puesto que se estima que la demanda urbana e industrial sobrepasará a la agrícola (FAO, 2011), incrementando así la actual relación entre actividades antropogénicas y el agua disponible; esta relación contempla que la demanda de agua es considerada más importante que su disponibilidad (Ávila, 2008).

A pesar de que la escasez de agua se intensificará a nivel mundial, muchas de las causas que la generan pueden anticiparse, evitarse o mitigarse (FAO, 2013). Debido a lo anterior las entidades gubernamentales deben implementar acciones de control de la demanda de agua, con el fin de que se haga un uso eficiente de la misma. Sin embargo, la falta de información y la omisión de estas acciones han ocasionado un incremento del índice de escasez (Orr, Cartwright & Tickner, 2010).

Dado que el recurso hídrico no solo genera bienestar a los seres vivos, sino que también actúa como materia prima de los diferentes sectores económicos, como se mencionó anteriormente. Por este motivo es de suma importancia contar con indicadores que reflejen el estado del agua. En Colombia, para determinar las regiones donde la demanda de agua del conjunto de actividades socioeconómicas ha alcanzado niveles críticos, se implementa un indicador del IDEAM, el cual además de la demanda de agua de la población y los sectores productivos, toma en cuenta restricciones de la oferta hídrica superficial por efecto de la irregularidad temporal de los caudales anuales y de la severidad de los periodos de estiaje en los ríos colombianos.

El índice de escasez fue construido a partir de las relaciones de presión sobre el recurso hídrico presentadas en la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo (UN-Consejo Económico y Social, 1997), donde se indicó que la escasez de agua está relacionada con el uso excesivo, generando conflictos entre las comunidades y colocando en riesgo las necesidades de los ecosistemas. Según la propuesta, la relación oferta-demanda es una medida de presión, dado que en los casos en que la demanda de agua representa más del 20% de la oferta neta de agua disponible en una región, este valor activa señales de gestión y prevención, tanto en la protección de la fuente como en el control de la demanda, de manera que se reduzca el riesgo de desabastecimiento de agua en el futuro (IDEAM, 2004).

La expresión de cálculo del índice de escasez en su forma porcentual es:

$$I_e = \frac{D_t}{O_n} * 100\% \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- I_e : Índice de escasez [%].
- D_t : Demanda total de agua [m³].
- O_n : Oferta hídrica superficial neta [m³].

Para Colombia, el IDEAM introdujo en 1998 la siguiente escala de valoración para las categorías del índice de escasez (IDEAM, 1998):

- a) Alto – la demanda supera el 50% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora.
- b) Medio-Alto – el nivel de demanda de agua se encuentra entre el 20 y 50% de la oferta neta.
- c) Medio – Los requerimientos de agua están entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica neta.
- d) Mínima – la demanda de agua se encuentra entre el 1 y el 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente.
- e) No significativo – demanda menor al 1% de la oferta hídrica neta.

El primer paso para realizar la evaluación del índice de escasez es la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico en una unidad hidrográfica determinada, más conocido como balance hídrico. Esta ecuación general del balance hídrico involucra todas las entradas y salidas de agua en una unidad hidrográfica, por lo que el conocimiento de la distribución, movimiento, cantidad, permanencia y transporte del agua son indispensables en su estimación (OMM, 2012).

El uso de esta ecuación tiene la ventaja de permitir la comparación de las cantidades estimadas para diferentes periodos de tiempo bajo condiciones hidrológicas similares (año húmedo, seco y medio), por lo que para la estimación de la oferta hídrica a escala nacional y en términos anuales es la adecuada (IDEAM, 2020).

El balance hídrico especifica que el total de agua que penetra a un sistema debe ser igual al agua que sale más la diferencia entre los contenidos final e inicial: es decir: ingreso = egreso + saldo.

En el caso de un suelo con vegetación el balance es:

$$P = ET + E + I + (H_f - H_i) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- P = Precipitación
- ET = Evapotranspiración
- E = Escorrentía infiltración
- I = Infiltración
- $(H_f - H_i)$ = Cambio en la humedad del suelo (final - inicial)

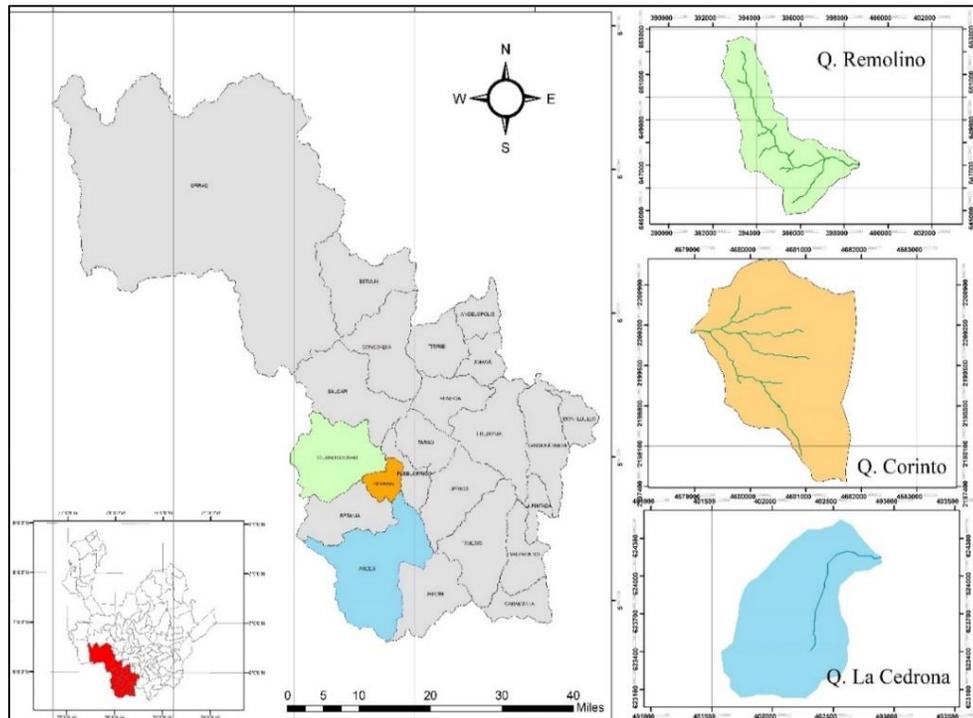
Hoy en día, se tienen herramientas computacionales de sistemas de información geográfica como QGIS y ArcGIS que permiten a partir de un mapa de líneas elaborado con valores de climatológicos reales; hallar valores medios de precipitación, escorrentía y evaporación, para un área específica y esto junto con la morfología de la cuenca, ayudan a encontrar el resultado final el balance hídrico.

3 Marco geográfico

El área de estudio corresponde a tres microcuencas pertenecientes al Río San Juan, este se encuentra ubicado Suroccidente del Departamento de Antioquia sobre el flanco Oriental de la Cordillera Occidental (**Ilustración 1**). La cuenca del río San Juan se encuentra en su mayoría en la territorial de Citará y aproximadamente un 3% en la territorial de Cartama sobre la vertiente oriental de la cordillera occidental; incluye áreas en jurisdicción de los municipios de Andes (28,56%), Salgar (18,74%), Ciudad Bolívar (18,46%), Jardín (14,18%), Betania (12,80%), Hispania (4,09%), Tarso (1,62%) y Pueblorrico (1,55%). Es considerada como la mayor cuenca del costado occidental de la porción antioqueña de la cuenca del río Cauca (Bioscain San Juan & CORANTIOQUIA, 2020).

Ilustración 1

Localización del área de estudio

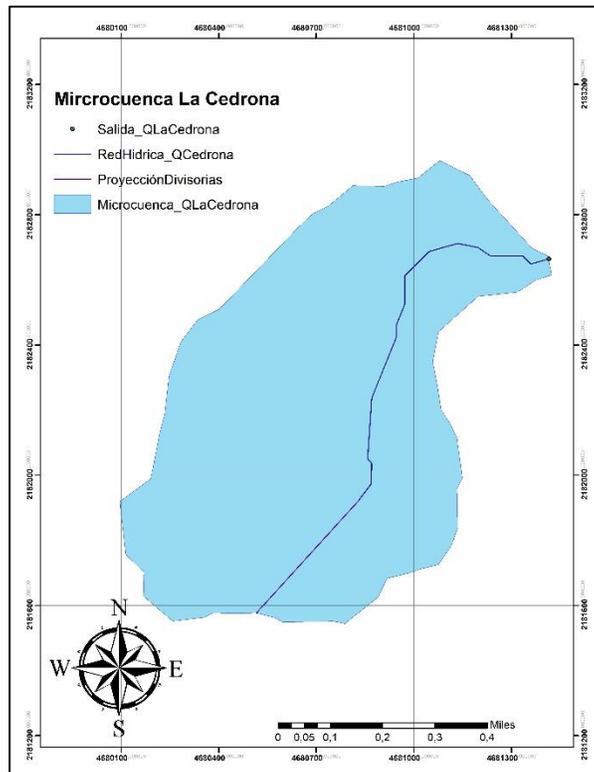


Las tres microcuencas son las siguientes: La Cedrona, Corinto, Remolino.

- La Cedrona: La cuenca hidrográfica que es objeto de estudio de este trabajo, se encuentra localizada en el corregimiento de Santa Rita del municipio de Andes Antioquia, entre las coordenadas $75^{\circ} 53' 14.772''\text{W}$ y $5^{\circ} 38' 17.286''\text{N}$ (lugar de nacimiento) y $75^{\circ} 52' 57.075''\text{W}$ y $5^{\circ} 38' 20.512''\text{N}$ (lugar de desemboca de Río San Juan). La cuenca limita al norte con la Quebrada La Chaparrala, por el este con la cuenca del Río San, por el sur con la Quebrada la Pava y por el Oeste con la Quebrada El Líbano (**Ilustración 2**).

Ilustración 2

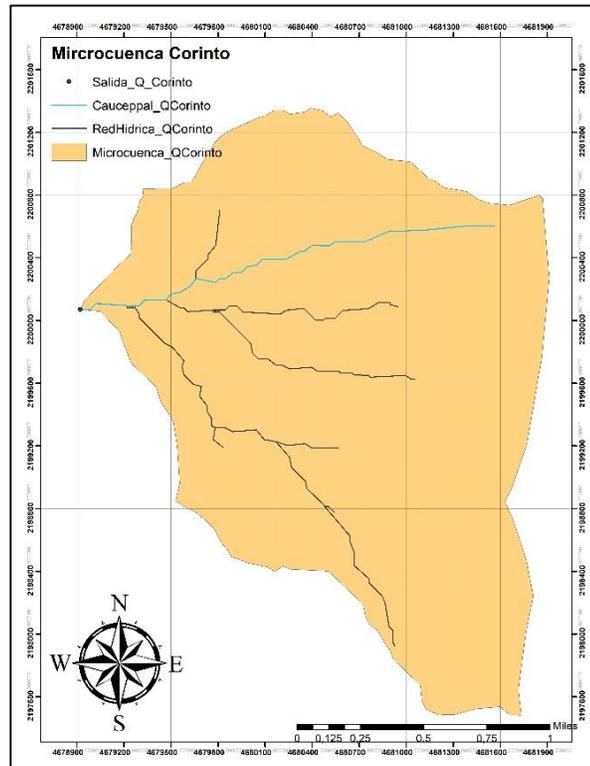
Microcuenca La Cedrona



- Corinto: La cuenca hidrográfica que es objeto de estudio de este trabajo de investigación se encuentra localizada entre la Vereda El Silencio y La Cuelga del municipio de Hispania Antioquia, entre las coordenadas $75^{\circ} 52' 33.584''\text{W}$ y $5^{\circ} 48' 29.268''\text{N}$ (lugar de nacimiento) y $75^{\circ} 54' 3.329''\text{W}$ y $5^{\circ} 48' 12.74''\text{N}$ (lugar de desemboca de Río San Juan). La cuenca limita al norte con la Quebrada La Tirana, por el este con el Río Mulatos, por el sur con la Quebrada El Cacique y por el Oeste con la cuenca del Río San (**Ilustración 3**).

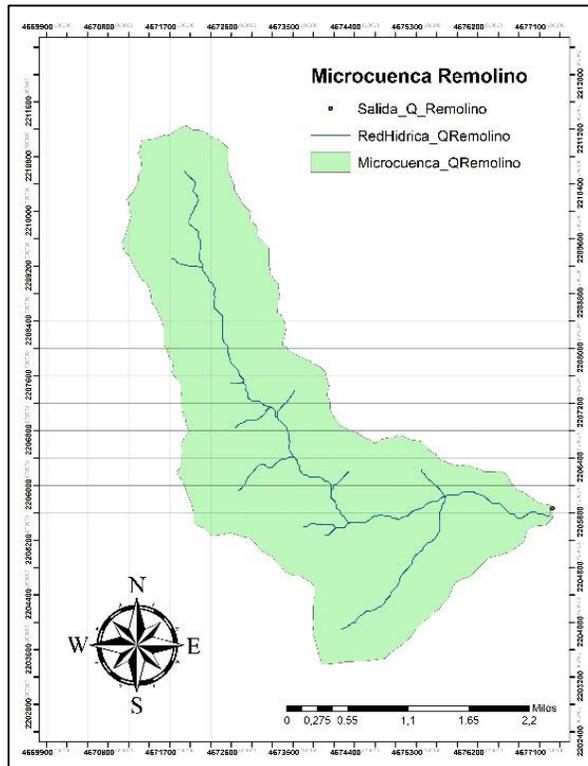
Ilustración 3

Microcuenca Corinto



- Remolino: La cuenca hidrografía que es objeto de estudio de este trabajo, se encuentra localizada en el corregimiento de Alfonso López del municipio de Ciudad Bolívar Antioquia, entre las coordenadas $75^{\circ} 58' 3.34''\text{W}$ y $5^{\circ} 54' 9.632''\text{N}$ (lugar de nacimiento) y $75^{\circ} 54' 54.446''\text{W}$ y $5^{\circ} 51' 13.56''\text{N}$ (lugar de desemboca de Rio San Juan). La cuenca limita al norte con la Quebrada La Hondura, por el este con el Rio San Juan, por el sur con El Rio Bolívar, y por el Oeste con la Quebrada San Miguel (**Ilustración 4**).

Ilustración 4
Microcuenca Remolino



4 Metodología

El tipo de investigación a utilizada para el análisis del proyecto es descriptiva y cuantitativa, dado que se registró el procedimiento, características y resultados en las siguientes fases del trabajo:

Tabla 1

Metodología de trabajo

Objetivo 1: Determinar oferta hídrica	Actividad 1: Caracterización de las tres fuentes hídricas, mediante la búsqueda de los parámetros morfométricos (físicos e hídricos)
	Actividad 2: Búsqueda de información referente a distribución espacial de la temperatura, evaporación, precipitación y evapotranspiración.
	Actividad 3: Determinación de la oferta hídrica superficial de la cuenca.
Objetivo 2: Calcular la demanda del suelo	Actividad 1: Búsqueda de las actividades agropecuarias, industriales, domésticas, etc.
	Actividad 2: Búsqueda de los parámetros socioeconómicos, como lo son censos poblacionales mediante el DANE, para la obtención de demanda de las tres fuentes hídricas.
	Actividad 3: Determinación el caudal de demanda hídrica.
Objetivo 3: Cálculo del índice de escasez	Actividad 1: Determinación del índice de escasez mediante la información recolectada.
	Actividad 2: Análisis de la oferta, demanda e índice de escases de la cuenca mediante la propuesta del IDEAM.
	Actividad 3: Propuesta de soluciones y/o recomendaciones al manejo del recurso hídrico.

Objetivo 1: Determinar la oferta hídrica

En esta primera etapa se realizó una búsqueda exhaustiva de información en las entidades públicas (IDEAM), páginas web de entes territoriales, bases de datos de las corporaciones autónomas regionales, etc., todo esto con la finalidad de recopilar datos de los aspectos morfológicos de las cuencas. Los principales parámetros morfométricos se dividen en: Parámetros físicos y parámetros hídricos.

Tabla 2*Parámetros morfológicos*

Parámetros físicos	Parámetros hídricos
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de la cuenca • Área de la cuenca • Perímetro de la cuenca • Longitud de la cuenca • Forma de la cuenca • Pendiente media de la cuenca 	<ul style="list-style-type: none"> • Cauce: Altura mayor, Altura menor y diferencia entre altitudes (msnm) • Longitud del cauce principal (km)

Dichos parámetros se hallaron con la ayuda de la herramienta de ArcGIS, de la cual se utilizaron las siguientes funciones: Interpolación, IDW, Kriging y Spline que sirve para generar mapas de isoyetas a través de métodos matemáticos y geoestadísticos, y 3D Analyst Tools, esta tiene opciones para el cálculo de las líneas de drenajes de la cuenca a partir de las curvas de nivel del terreno. También facilita la definición de características morfométricas de la cuenca. Adicionalmente se recolectó la información de las características netamente biofísicas del territorio como lo son: temperatura, precipitación, evaporación y evapotranspiración.

Objetivo 2: Cálculo de la demanda hídrica

La demanda hídrica fue determinada con base a características socioeconómicas y culturales como lo son: demografía, infraestructura de servicios públicos, actividades productivas y sociales, todas estas características se resumen en el uso del suelo.

Objetivo 3: Determinación del índice de escasez

Esta metodología se basa en la relación de demanda de agua y oferta hídrica superficial (IDEAM, 2004) (**Ecuación 1**). Mediante la cual se calculó la demanda de agua total sobre la oferta hídrica.

Por ello se determinó de la siguiente manera:

Demanda total de agua [m³]: La demanda hídrica se puede obtener a partir de las distintas utilidades del recurso hídrico, utilizando la siguiente ecuación:

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- DT = Demanda Total de agua.
- DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico.
- DUI = Demanda de Agua para uso Industrial.
- DUS = Demanda de Agua para el Sector Servicios.
- DUA = Demanda de Agua para Uso Agrícola.
- DUP = Demanda de agua para uso pecuario.

Oferta hídrica superficial neta [m³]: La oferta hídrica se determina a partir de la oferta total utilizando la siguiente ecuación:

$$O_n = O_t * (1 - R_e - R_{it}) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- O_n = Oferta hídrica superficial total (m³).
- R_e = Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje.
- R_{it} = Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

Y por último se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la fase del cálculo de índice de escasez; para así determinar el estado de las tres fuentes hídricas. Además, se realizará una comparación morfológica y socioeconómico entre las tres cuentas para evidenciar cuál de estas se tiene mayor impacto de escasez, y cual seria las causas de tal hecho. Finalmente se realizarían propuestas de soluciones y/o recomendaciones al manejo del recurso hídrico.

5 Resultados

5.1 Morfometría de la cuenca

La morfometría es la forma de una cuenca proyectada en un plano horizontal, se utiliza para analizar variables lineales de una superficie, lo cual permite caracterizar los rasgos propios de las cuencas hidrográficas en valores numéricos. Adicionalmente, sirve para realizar comparaciones entre varias cuencas, conocer la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos (CVC & Consorcio POMCA Quindío, 2017).

Para la caracterización morfométrica en primer lugar se localizaron los puntos de salida, con la creación de un shapefile de geometría tipo punto, teniendo en cuenta coordenadas de los puntos de salida o puntos de desfogue, obtenidas en documentos de concesiones de agua otorgadas por la Oficina Territorial Citará de CORANTIOQUIA, esto con el fin de usar este polígono como archivo geoespacial en el buscador de datos de instalaciones satelitales de Alaska (ASF Data Search Vertex) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y así descargar el Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés), mediante un tipo de búsqueda geográfica en el conjunto de datos ALOS PALSAR. A continuación, se presenta el cálculo de los parámetros Morfométricos de las tres microcuencas, a partir de los insumos como el Modelo Digital de Terreno, la red de drenaje y la delimitación de cuencas a una escala 1:25.000 (**Tabla 3,7 y 9**).

5.1.1 La Cedrona

En la **Tabla 3**, se presentan los parámetros morfométricos de la microcuenca, la cual por su área corresponde a un tamaño pequeño, según el coeficiente de compacidad se clasifica en oval redonda a oval oblonga (**Tabla 4**), infiriendo que la magnitud de una escorrentía generada por la precipitación será de menor rango, por lo cual, la cuenca es poco susceptible a presentar crecientes súbitas. Para reafirmar la información anterior, se puede decir que según el coeficiente de forma (**Tabla 5**), tiene una forma alargada y su valor es muy bajo, por lo cual está menos sujeta a crecientes altas.

Tabla 3
Parámetros Morfométricos La Cedrona

	Parámetros Morfométricos	Unidad	Valores obtenidos	Observación
Generales	Área (A)	km ²	1,10	De acuerdo al tipo de área se clasifica con un tamaño pequeño.
	Perímetro (P)	km	5,00	El perímetro corresponde a la sumatoria de todos los lados de la superficie de la microcuenca.
	Longitud Cauce principal (Lc)	km	1,22	Se tomó desde el punto más alejado de la microcuenca hasta al cierre de la microcuenca y corresponde a la distancia entre estos dos puntos.
	Proyección a la divisoria (Pd)	km	0,47	Estimación prolongando longitud del cauce principal hasta la divisoria.
	Longitud de la cuenca (L)	km	1,69	Sumatoria de la distancia en línea recta, entre la longitud del cauce principal y la proyección a la divisoria.
Forma	Ancho promedio (Ap)	km	0,65	El ancho promedio de la microcuenca corresponde a: Dónde: $Ap = \frac{A}{L}$ Ap: Ancho promedio A: Área de la cuenca L: longitud de la cuenca
	Coefficiente de compacidad (Kc)	-	1,34	Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud de divisoria y el perímetro de la circunferencia. $K_c = \frac{0,282P}{A^{\frac{1}{2}}}$ Dónde: Kc: Coeficiente de compacidad P: Perímetro A: Área de la cuenca

	Factor de forma (Kf)	-	0,74	Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. $K_f = \frac{A_p}{L_c^2}$ Dónde: Kf: Factor de forma promedio Ap: Ancho promedio Lc: Longitud Cauce principal
	Índice de alargamiento (Ia)	-	3,74	Relaciona la longitud del cauce, medida en el sentido principal y el ancho máximo. $I_a = \frac{L}{A_p}$ Dónde: Ia: Índice de alargamiento L: Longitud de la cuenca Ap: Ancho promedio
Relieve	Elevación promedio	msnm	1591	Es uno de los parámetros más determinantes de la oferta hídrica y del movimiento del agua a lo largo de la cuenca.
	Elevación máxima	msnm	1870	
	Elevación mínima	msnm	1293	

Tabla 4
Coefficiente de compacidad

Categoría	Rango	Definiciones
Kc1	1,0 – 1,25	Forma casi redonda a oval – redonda.
Kc2	1,25 – 1,5	Forma oval – oblonga.
Kc3	1,50 – 1,75	Forma oval – oblonga a rectangular – oblonga.

Los valores de Kc nunca serán inferiores a 1. El grado de aproximación de este índice indicará la tendencia a concentrar fuerte volúmenes de agua de escurrimiento, siendo más acentuado cuando más cercano sea a la unidad, lo que quiere decir que entre más bajo sea Kc mayor será la concentración del agua.

Fuente. (CVC & Consorcio Pomca Quindio, 2017).

Tabla 5
Factor de forma

Valor Kf	Definiciones
<10	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
= 1,0	Cuenca cuadrada
> 1,0	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes altas que una de la misma área y mayor factor de forma.

Fuente. (CVC & Consorcio Pomca Quindio, 2017).

Adicionalmente, con la información consignada en el mapa de curvas de nivel dentro del área de la cuenca (**Ilustración 2**), se realiza el cálculo de la elevación media.

Tabla 6

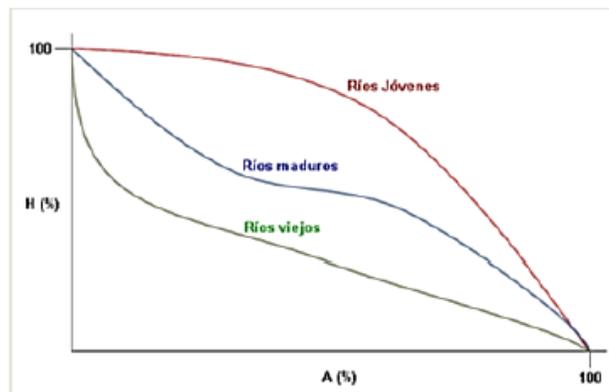
Cálculo de la elevación media microcuenca La Cedrona.

Datos de elevación						
MIN	MAX	Cota (msnm)	Área (km ²)	Área acumulada (km ²)	Porcentaje del área (%)	Porcentaje de área Acumulada (%)
1813	1870	1842	0,038	0,038	3,480	3,480
1755	1812	1784	0,063	0,101	5,687	9,167
1697	1754	1726	0,067	0,168	6,040	15,207
1640	1696	1668	0,111	0,279	10,058	25,265
1582	1639	1611	0,147	0,426	13,326	38,591
1524	1581	1553	0,209	0,635	18,942	57,533
1467	1523	1495	0,197	0,833	17,867	75,400
1409	1466	1438	0,205	1,038	18,560	93,960
1351	1408	1380	0,051	1,089	4,654	98,614
1293	1350	1322	0,015	1,105	1,386	100
Área total de la cuenca			1,104			

En forma alternativa la elevación media se puede encontrar mediante la construcción de la curva hipsométrica, donde se lee la elevación para el 50% del valor área. Para la cuenca de estudio el valor de la elevación media es de 1591 m.s.n.m. Además, podemos conocer por medio de la curva hipsométrica la edad dicha cuenca (**Ilustración 5**).

Ilustración 5

Clasificación de los ríos de acuerdo a la curva hipsométrica

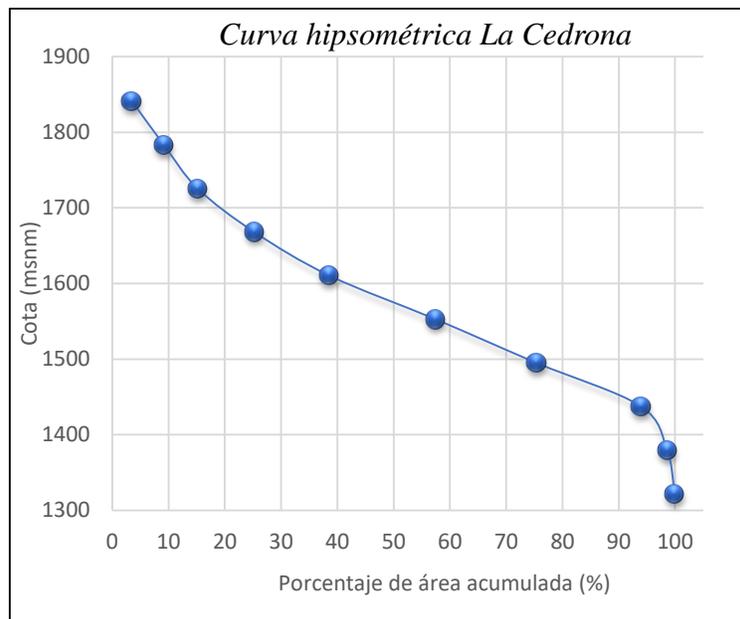


Fuente: (CVC & Consorcio Pomca Quindío, 2017).

De lo anterior se puede decir que la microcuenca la Cedrona, de acuerdo a la curva hipsométrica generada (**Ilustración 6**), es denominada un río maduro (presentes en valles amplios, son estables y con gran capacidad de carga).

Ilustración 6

Curva hipsométrica La Cedrona.



5.1.2 Corinto

En la **Tabla 7**, se presentan los parámetros morfométricos de la microcuenca, la cual por su área corresponde a un tamaño pequeño, según el coeficiente de compacidad se clasifica en redonda a oval redonda (**Tabla 4**), infiriendo que el índice está más aproximado a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento, la cuenca esta susceptible a presentar crecientes súbitas. Para reafirmar la información anterior, se puede decir que según el coeficiente de forma (**Tabla 5**), tiene una forma alargada y lo cual indica que esta propensa a crecientes moderadas.

Tabla 7
Parámetros Morfométricos Corinto

	Parámetros Morfométricos	Unidad	Valores obtenidos	Observación
Generales	Área (A)	km ²	7,17	De acuerdo con el tipo de área se clasifica con un tamaño pequeño.
	Perímetro (P)	km	11,74	El perímetro corresponde a la sumatoria de todos los lados de la superficie de la microcuenca.
	Longitud Cauce principal (Lc)	km	3,00	Se tomó desde el punto más alejado de la microcuenca hasta al cierre de la microcuenca y corresponde a la distancia entre estos dos puntos.
	Proyección a la divisoria (Pd)	km	0,18	Estimación prolongando longitud del cauce principal hasta la divisoria.
	Longitud de la cuenca (L)	km	3,18	Sumatoria de la distancia en línea recta, entre la longitud del cauce principal y la proyección a la divisoria.
Forma	Ancho promedio (Ap)	km	2,25	El ancho promedio de la microcuenca corresponde a: Dónde: $Ap = \frac{A}{L}$ Ap: Ancho promedio A: Área de la cuenca L: longitud de la cuenca
	Coficiente de compacidad (Kc)	-	1,24	Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud de divisoria y el perímetro de la circunferencia. $Kc = \frac{0,282P}{\sqrt{A}}$ Dónde: Kc: Coficiente de compacidad P: Perímetro A: Área de la cuenca
	Factor de forma (Kf)	-	0,80	Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. $Kf = \frac{Ap}{Lc^2}$ Dónde: Kf: Factor de forma Ap: Ancho promedio Lc: Longitud Cauce principal
	Índice de alargamiento (Ia)	-	2,66	Relaciona la longitud del cauce, medida en el sentido principal y el ancho máximo. $Ia = \frac{L}{Ap}$ Dónde: Ia: Índice de alargamiento L: Longitud de la cuenca Ap: Ancho promedio

Relieve	Elevación promedio	msnm	1387	Es uno de los parámetros más determinantes de la oferta hídrica y del movimiento del agua a lo largo de la cuenca.
	Elevación máxima	msnm	1910	
	Elevación mínima	msnm	908	

Adicionalmente, con la información consignada en el mapa de curvas de nivel dentro del área de la cuenca (**Ilustración 3**), se realiza el cálculo de la elevación media.

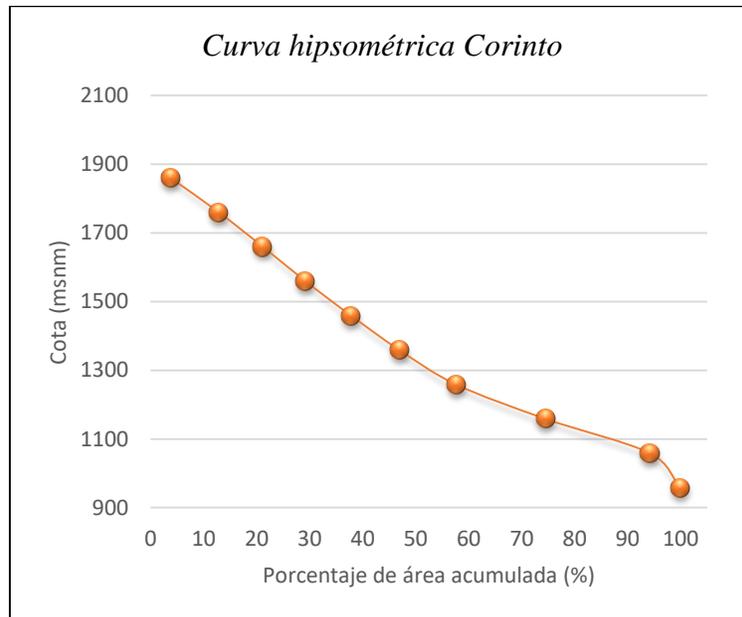
Tabla 8
Cálculo de la elevación media microcuenca Corinto.

Datos de elevación						
MIN	MAX	Cota (msnm)	Área (km ²)	Área acumulada (km ²)	Porcentaje del área (%)	Porcentaje de área Acumulada (%)
1810	1910	1860	0,271	0,271	3,777	3,777
1710	1809	1760	0,654	0,925	9,120	12,896
1610	1709	1660	0,595	1,520	8,300	21,197
1510	1609	1560	0,575	2,095	8,015	29,212
1410	1509	1460	0,616	2,711	8,597	37,809
1309	1409	1359	0,656	3,367	9,153	46,961
1209	1308	1259	0,769	4,136	10,722	57,683
1109	1208	1159	1,210	5,346	16,873	74,556
1009	1108	1059	1,412	6,758	19,691	94,247
908	1008	958	0,413	7,170	5,753	100
Área total de la cuenca			7,170			

De lo anterior se puede decir que la microcuenca la Cedrona, de acuerdo a la curva hipsométrica generada (**Ilustración 7**), es denominada un río maduro (presentes en valles amplios, son estables y con gran capacidad de carga).

Ilustración 7

Curva hipsométrica Corinto



5.1.3 Remolino

En la **Tabla 9**, se presentan los parámetros morfométricos de la microcuenca, la cual por su área corresponde a un tamaño pequeño, según el coeficiente de compacidad se clasifica en oval redonda a rectangular oblonga (**Tabla 4**), infiriendo que el índice está más alejado del grado uno (1) esta microcuenca no contiene fuertes volúmenes de agua de escurrimiento, la cuenca no presentará crecientes súbitas. Para reafirmar la información anterior, se puede decir que según el coeficiente de forma (**Tabla 5**), tiene una forma alargada lo cual indica una forma con propensión a crecientes moderadas más aun teniendo en cuenta que el área de interés es la parte inicial de la cuenca, donde el volumen captado no alcanza a producir crecientes importantes.

Tabla 9
Parámetros Morfométricos Remolino

	Parámetros Morfométricos	Unidad	Valores obtenidos	Observación
Generales	Área (A)	km ²	18,64	De acuerdo al tipo de área se clasifica con un tamaño pequeño.
	Perímetro (P)	km	23,69	El perímetro corresponde a la sumatoria de todos los lados de la superficie de la microcuenca.
	Longitud Cauce principal (Lc)	km	9,94	Se tomó desde el punto más alejado de la microcuenca hasta al cierre de la microcuenca y corresponde a la distancia entre estos dos puntos.
	Proyección a la divisoria (Pd)	km	0,63	Estimación prolongando longitud del cauce principal hasta la divisoria.
	Longitud de la cuenca (L)	km	10,57	Sumatoria de la distancia en línea recta, entre la longitud del cauce principal y la proyección a la divisoria.
Forma	Ancho promedio (Ap)	km	1,76	El ancho promedio de la microcuenca corresponde a: Dónde: $Ap = \frac{A}{L}$ Ap: Ancho promedio A: Área de la cuenca L: longitud de la cuenca
	Coefficiente de compacidad (Kc)	-	1,55	Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud de divisoria y el perímetro de la circunferencia. $Kc = \frac{0,282P}{\sqrt{A}}$ Dónde: Kc: Coeficiente de compacidad P: Perímetro A: Área de la cuenca
	Factor de forma (Kf)	-	0,19	Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. $Kf = \frac{Ap}{Lc^2}$ Dónde: Kf: Factor de forma Ap: Ancho promedio Lc: Longitud Cauce principal

	Índice de alargamiento (Ia)	-	11,27	Relaciona la longitud del cauce, medida en el sentido principal y el ancho máximo. $I_a = \frac{L}{Ap}$ Dónde: Ia: Índice de alargamiento L: Longitud de la cuenca Ap: Ancho promedio
Relieve	Elevación promedio	msnm	1366	Es uno de los parámetros más determinantes de la oferta hídrica y del movimiento del agua a lo largo de la cuenca.
	Elevación máxima	msnm	2154	
	Elevación mínima	msnm	703	

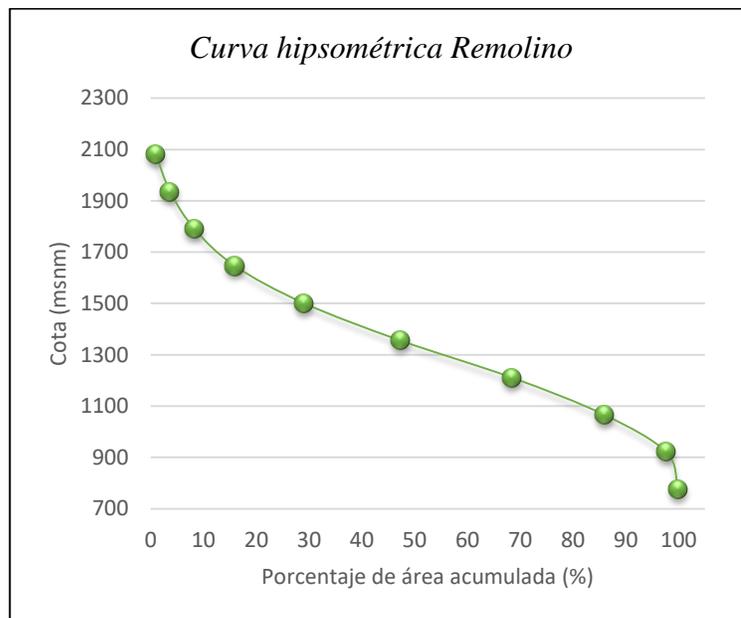
Adicionalmente, con la información consignada en el mapa de curvas de nivel dentro del área de la cuenca (**Ilustración 4**), se realiza el cálculo de la elevación media.

Tabla 10

Cálculo de la elevación media microcuenca Remolino.

Datos de elevación						
MIN	MAX	Cota (msnm)	Área (km ²)	Área acumulada (km ²)	Porcentaje del área (%)	Porcentaje de área Acumulada (%)
2009	2154	2082	0,179	0,179	0,960	0,960
1864	2008	1936	0,508	0,687	2,728	3,688
1719	1863	1791	0,852	1,539	4,570	8,257
1574	1718	1646	1,435	2,974	7,697	15,955
1429	1573	1501	2,441	5,414	13,095	29,050
1284	1428	1356	3,394	8,808	18,210	47,260
1139	1283	1211	3,953	12,761	21,207	68,467
994	1138	1066	3,268	16,029	17,533	86,000
849	993	921	2,183	18,212	11,711	97,711
703	848	776	0,427	18,638	2,289	100
Área total de la cuenca			18,638			

De lo anterior se puede decir que la microcuenca la Cedrona, de acuerdo a la curva hipsométrica generada (**Ilustración 8**), es denominada un río maduro (presentes en valles amplios, son estables y con gran capacidad de carga).

Ilustración 8*Curva hipsométrica Remolino***5.2 Análisis climatológico**

Para el análisis climatológico se analizaron temperatura y precipitación a nivel mensual; los mencionados anteriores establecen la fluctuación de las condiciones atmosféricas y su distribución espacio-temporal. Este análisis se basó en la información proporcionada por la Unidad de Investigación Climática Temperature (CRUTEM) que se encuentra relacionada con Google Earth Pro, es un conjunto de datos derivados de las temperaturas del aire cerca de la superficie terrestre registradas en las estaciones meteorológicas de todos los continentes de la Tierra (Harris, et al., 2020).

Para la microcuenca La Cedrona y Remolino se tomaron datos de la variable precipitación y temperatura desde el año 1901 al 2019, mientras que en la microcuenca Corinto solo se estimó desde el año 1980 hasta el 2019.

A continuación, se presentarán los datos por cada microcuenca:

Ilustración 9

Datos de temperatura y precipitación La Cedrona

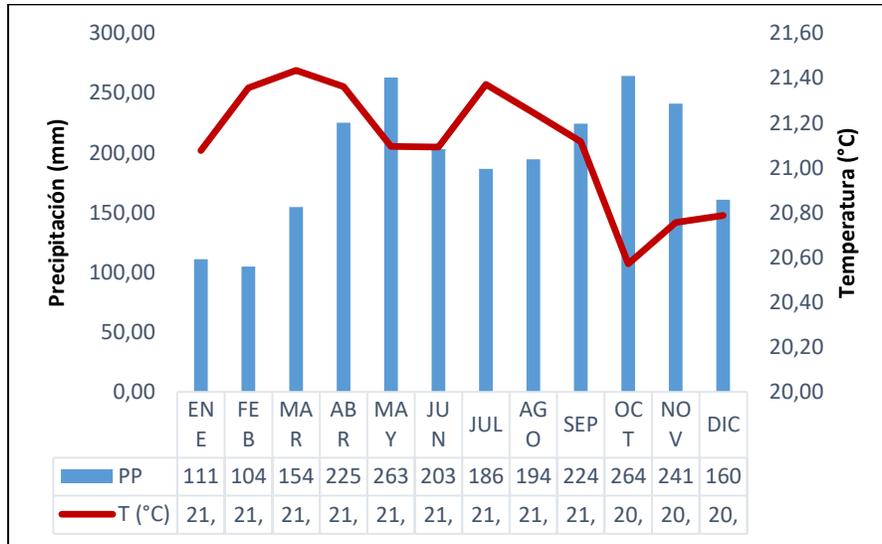


Ilustración 10

Datos de temperatura y precipitación Corinto

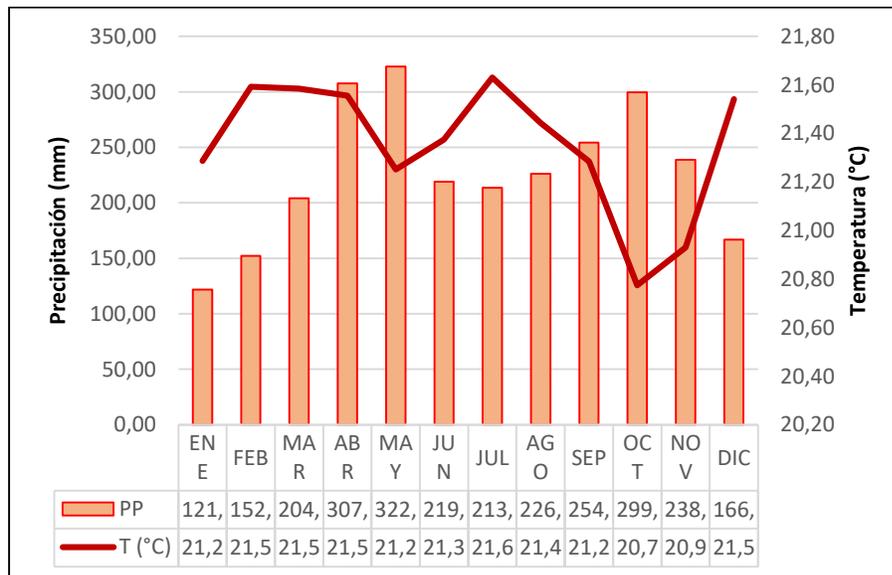
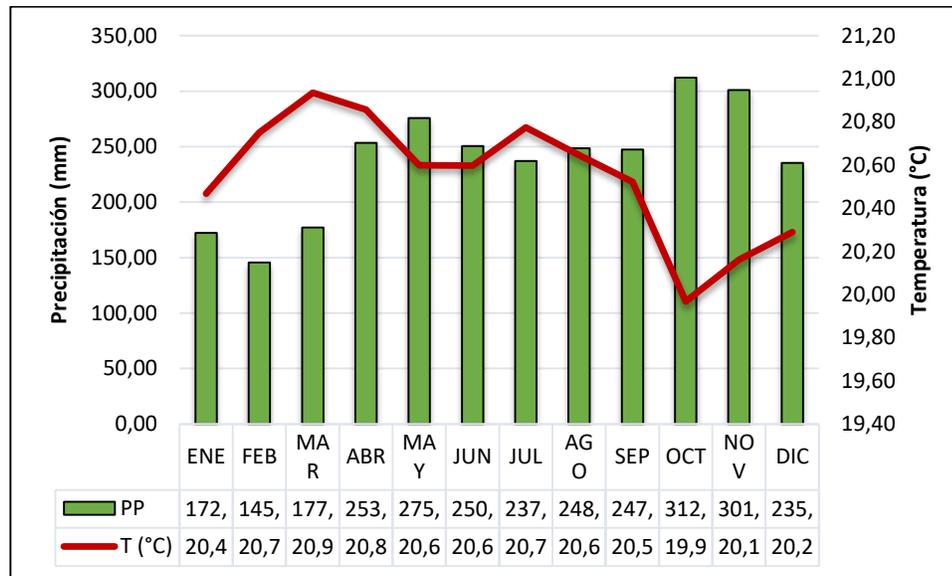


Ilustración 11

Datos de temperatura y precipitación Remolino



5.3 Balance hídrico

El balance hídrico es un método para estimar la cantidad de agua que puede existir en un área durante un período de tiempo determinado. Usando un enfoque numérico, la entrada de aguas pluviales se compara con la salida (evaporación y escorrentía).

Para la distribución espacial de la lluvia y la temperatura sobre el área de la cuenca se realizó teniendo en cuenta la información de las estaciones climatológicas cercanas a cada microcuenca.

El Balance hídrico deberá cumplir lo siguiente:

$$\sum PP = ETR + Exceso \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- PP = Precipitación

A continuación, se presentan los resultados del Balance Hídrico correspondiente a cada cuenca (**Tabla 11**):

Tabla 11*Balance hídrico*

La Cedrona			Corinto			Remolino		
ETR	Exceso	Σ PP	ETR	Exceso	Σ PP	ETR	Exceso	Σ PP
1243,65	1090,36	2334	1258,34	1468,78	2727,12	1210,78	1645,52	2856,30

5.4 Oferta hídrica

La determinación de la oferta hídrica se obtuvo mediante el cálculo del balance hídrico a nivel medio mensual multianual, el cual corresponde al volumen total de agua que fluye por la fuente abastecedora tomando como entrada la precipitación, mientras que las salidas corresponden a la infiltración y evaporación real. La oferta hídrica de la Cuenca se calcula multiplicando la cantidad de precipitación anual por el área de la cuenca. Adicionalmente se determinó la *Oferta Hídrica Neta*, la cual corresponde al volumen de agua que ofrece la fuente hídrica (en millones de metros cúbicos – hm³), que resulta después de aplicar los factores de reducción por fuentes frágiles y de reducción por régimen de estiaje.

A continuación, se presentarán los cálculos de cada cuenca:

5.4.1 Oferta hídrica La Cedrona**Tabla 12***Oferta hídrica La Cedrona*

	Valor	Unidad	Equivalencia	Unidad
Precipitación anual	1090,36	mm	1,09	m
Área de la cuenca	1,1	km ²	1100000	m ²
Oferta hídrica Total/Año	1199390,57			m ³

OFERTA HÍDRICA NETA DE LA CUENCA	
Reducción por calidad del agua (25%)	0,25
Reducción por caudal ecológico (25%)	0,25
TOTAL	599695,285

Teniendo en cuenta que la oferta hídrica disponible de la microcuenca La Cedrona es 599695,285 m³ año promedio para una superficie total de 100 Ha. Teniendo en cuenta que la superficie de la estación experimental es de 68 hectáreas, la oferta hídrica disponible para la microcuenca quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Oferta hídrica disponible La Cedrona} = \frac{599695,285 \text{ m}^3 * 68 \text{ Ha}}{100 \text{ Ha}} = 407792,794 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

5.4.2 Oferta hídrica Corinto

Tabla 13

Oferta hídrica Corinto

	Valor	Unidad	Equivalencia	Unidad
Precipitación anual	1468,78	mm	1,47	m
Área de la cuenca	7,17	km ²	7170563	m ²
Oferta hídrica Total/Año	10532009,56			m ³

OFERTA HÍDRICA NETA DE LA CUENCA	
Reducción por calidad del agua (25%)	0,25
Reducción por caudal ecológico (25%)	0,25
TOTAL	5266004,778

Teniendo en cuenta que la oferta hídrica disponible de la microcuenca Corinto es 5266004,778 m³ año promedio para una superficie total de 717 Ha. Teniendo en cuenta que la superficie de la estación experimental es de 368 hectáreas, la oferta hídrica disponible para la microcuenca quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Oferta hídrica disponible Corinto} = \frac{5266004,778 \text{ m}^3 * 368 \text{ Ha}}{717 \text{ Ha}} = 2702775,116 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

5.4.3 Oferta hídrica Remolino

Tabla 14

Oferta hídrica Remolino

	Valor	Unidad	Equivalencia	Unidad
Precipitación anual	1645,52	mm	1,65	m
Área de la cuenca	18,64	km ²	18635855,46	m ²
Oferta hídrica Total/Año	30665687,01			m ³

OFERTA HÍDRICA NETA DE LA CUENCA	
Reducción por calidad del agua (25%)	0,25
Reducción por caudal ecológico (25%)	0,25
TOTAL	15332843,51

Teniendo en cuenta que la oferta hídrica disponible de la microcuenca Remolino es 15332843,51m³ año promedio para una superficie total de 1864 Ha. Teniendo en cuenta que la superficie de la estación experimental es de 499,1145 hectáreas, la oferta hídrica disponible para la microcuenca quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Oferta hídrica disponible Remolino} = \frac{15332843,51\text{m}^3 * 499,11\text{Ha}}{1864\text{Ha}} = 4105603,283 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

5.5 Demanda hídrica

La metodología para hallar la demanda hídrica se realizó mediante el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica, la cual es considerada como un indicador integral de la apropiación de los recursos hídricos frente a la medida tradicional y respectiva de la extracción de agua (Arjen Y. Hoekstra et al. 2021). La huella hídrica tiene tres componentes: la huella hídrica verde (evaporación y transpiración de agua suministrada de la lluvia en la producción del cultivo), la huella hídrica azul (evaporación del agua de irrigación suministrada de las fuentes de agua superficiales y

subterráneas renovables) y la huella hídrica gris (volumen de agua dulce contaminada en el proceso de producción).

La huella hídrica agrícola correspondió a la sumatoria de la huella hídrica de cada microcuena asociada a los distintos cultivos y esta fue calculada de acuerdo a la **ecuación 9**:

$$HH_{subcuena} = \sum_{cultivos} RAC \times \sum_{cultivos} \text{área cultivada} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- Área cultivada hace referencia a las sumatorias de las áreas sembradas de cultivos.
- RAC corresponde a la sumatoria de los requerimientos de agua azul, verde y gris de los cultivos ubicados en las microcuenas.

El RAC se calculó mediante la **ecuación 10**:

$$RAC = Kc \times ET0 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- Kc es el coeficiente de evapotranspiración del cultivo tomado de FAO.

Para la diferenciación entre RAC azul y verde, se tomó la diferencia entre el RAC del cultivo y la precipitación efectiva (**Ecuación 11**).

$$RAC_{azul} = RAC - P_{efectiva} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- Pefectiva: se relaciona con el agua que efectivamente llega al cultivo.

El proceso de estimación se realizó mediante los datos de referencia del 3er Censo Nacional Agropecuario (CNA)(Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016), realizado en el año 2013 y publicado en el año 2016, debido a que ofrece información agropecuaria y rural mediante la identificación, ubicación y clasificación de las variables reportadas, entre los

aportes del censo está la identificación de productores agropecuarios, sus características socio demográficas básicas y el inventario agrícola, pecuario y de plantaciones forestales cuantificando el área sembrada y la producción.

Para la demanda hídrica para uso doméstico se realizó una proyección de la demanda hídrica actual teniendo en cuenta la dotación máxima recomendada por el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y regulada con la resolución 330 del 8 de junio de 2017 emanada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Colombia. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017), se efectúa el cálculo del caudal máximo y la demanda de agua para uso doméstico.

Para la demanda hídrica para uso agrícola se tuvo en cuenta la cobertura del suelo, la cual, definen a partir de criterios ambientales los usos del suelo (**Anexo 2**). Según los usos del suelo, los polígonos se asocian con áreas de mosaicos de cultivos, en el caso del ítem 2.2.2. (Café en el 100% del área), ítems 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4 y 2.4.5, se considera que tienen un área sembrada de café que no llega al 100% del área del polígono, entonces se asume una distribución proporcional al área del polígono con relación a todos los polígonos de mosaicos; y los ítem (3.2.3.1 y 3.2.3.2) corresponden a vegetación secundaria, es decir, área en la que en algún momento se establecieron cultivos agrícolas y que estos fueron abandonados dando origen a la regeneración natural y al desarrollo de los árboles del cultivo abandonado.

También es importante tener en cuenta los coeficientes de evapotranspiración de los cultivos (K_c), fue tomado de FAO (Villegas & Torres, 1977).

5.5.1 Demanda hídrica La Cedrona

- *DUD* = Demanda de Agua para Uso Doméstico

Como demanda doméstica se tiene la demanda necesaria para suplir de agua a la población beneficiada la microcuenca La Cedrona, por el cual una vereda es la beneficiada esta es llamada La Cedrona la cual cuenta con 180 personas, información recolectada en campo.

La dotación bruta la establece las normas RAS mediante la siguiente expresión:

$$dbruta = \frac{Dneta}{(1-\%P)} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Dneta = 140 \frac{L}{s}$$

$$\%Pérdidas = 25\%$$

$$Dbruta = 186.6 \frac{L}{Hab * Día}$$

$$DUD = 180 \text{ hab} * 0,1866 \frac{m^3}{(\text{hab} * \text{día})} * 365 \text{ días}$$

$$DUD = 12259,62 \frac{m^3}{año}$$

- **DUA = Demanda de Agua para Uso Agrícola**

A partir del Censo Nacional Agropecuario (CNA), se encontró que para el año 2013 el área sembrada de los distintos cultivos generados en la vereda la Cedrona fue de 68 ha (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016) (**Tabla 15**).

Tabla 15

Área sembrada La Cedrona

Cultivo 1 16100100110	Cultivo 2 16100100107	Total área sembrada por ciclo (ha)
Café castilla	Café variedad Colombia	68
51	17	

Para el cálculo de la huella hídrica de los cultivos producidos, se realizaron a partir de los datos meteorológicos presentados en la **ilustración 9**, se procedió a calcular ETo en el Software Cropwat 8.0 (Smith, 1992), obteniendo los resultados que se muestran en la **ilustración 12**.

Ilustración 12

Resultado del ETo en la microcuenca La Cedrona

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
Enero	15,6	21,1	96	67	11,8	25,7	4,05
Febrero	15,4	21,4	95	67	11,9	27,1	4,36
Marzo	15,1	21,4	95	67	12,1	28,3	4,57
Abril	15,2	21,4	96	65	12,3	28,4	4,59
Mayo	15,0	21,1	94	62	12,4	27,4	4,39
Junio	15,0	21,1	96	60	12,5	26,8	4,25
Julio	14,9	21,4	98	60	12,4	26,9	4,30
Agosto	14,9	21,3	96	62	12,3	27,8	4,46
Septiembre	15,0	21,1	98	70	12,1	28,0	4,47
Octubre	15,5	20,6	98	79	12,0	27,4	4,28
Noviembre	15,4	20,8	98	77	11,9	26,0	4,03
Diciembre	15,0	20,8	96	60	11,8	25,2	3,92
Promedio	15,2	21,1	96	66	12,1	27,1	4,31

Fuente: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

Tabla 16

Huella hídrica La Cedrona

Cultivo 1 16100100110	Cultivo 2 16100100107
3175,25	

Por lo tanto, la demanda hídrica para el uso agrícola de la microcuenca La Cedrona fue de:

$$DUA = 3175,25 \frac{m^3}{año}$$

Para calcular la huella hídrica azul se realizó un promedio en el RAC, los datos de precipitación se tomaron del balance hídrico, obteniendo los resultados mostrados en la **ecuación 5**.

$$\text{RAC azul} = \text{RAC} - \text{Pefectiva}$$

$$\text{RAC azul} = 3,88 - 2334$$

$$\text{RAC azul} = -2330,12$$

Debido a que el resultado fue negativo se concluye que no se requiere de agua azul o de riego, es decir, solo se abastece agua verde.

Los términos **DUI**, **DUS** y **DUP** tienen un valor de cero debido a que no existe demanda hídrica para los sectores industrial, pecuario y servicios de esta fuente son muy bajos.

5.5.2 Demanda hídrica Corinto

- **DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico**

Como demanda doméstica se tiene la demanda necesaria para suplir de agua a la población beneficiada la microcuenca Corinto, por el cual las veredas beneficiadas son llamadas El Llanete, El Silencio y La Cuelga, con una totalidad de 404 habitantes, información tomada del Censo Nacional, (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016).

Teniendo en cuenta la **ecuación 12**, se tiene que para la microcuenca Corinto la dotación bruta, fue el siguiente:

$$DUD = 404 \text{ hab} * 0,1866 \frac{m^3}{(\text{hab} * \text{día})} * 365 \text{ días}$$

$$DUD = 27516,036 \frac{m^3}{\text{año}}$$

- **DUA = Demanda de Agua para Uso Agrícola**

A partir del Censo Nacional Agropecuario (CNA), se encontró que para el año 2013 el área sembrada de los distintos cultivos generados en las veredas que se benefician de la microcuenca Corinto fue de 368 ha (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016) (**Tabla 17**).

Tabla 17

Área sembrada Corinto

Cultivo 1 112201001	Cultivo 2 123201001	Cultivo 3 123401001	Cultivo 4 124201001	Cultivo 5 131301001	Cultivo 6 159201001	Cultivo 7 16100100107	Cultivo 8 16100100110	Total Área sembrada por ciclo (ha)
Maíz Blanco	Pepino	Tomate	Arveja verde	Plátano	Yuca	Café variedad Colombia	Café castilla	368
0,137	3,333	55,725	3,333	94,459	55,897	154,615	0,870	

Para el cálculo de la huella hídrica de los cultivos producidos, se realizaron a partir de los datos meteorológicos presentados en la **ilustración 10**, se procedió a calcular ETo en el Software Cropwat 8.0 (Smith, 1992), obteniendo los resultados que se muestran en la **ilustración 13**.

Ilustración 13

Resultado del ETo en la microcuenca Corinto

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	19.0	26.0	83	58	11.9	25.7	4.57
Febrero	19.0	26.0	84	55	11.9	27.1	4.88
Marzo	19.0	26.0	86	55	12.1	28.3	5.13
Abril	19.0	26.0	87	55	12.3	28.4	5.13
Mayo	20.0	26.0	87	53	12.4	27.4	4.99
Junio	19.0	26.0	84	53	12.5	26.8	4.79
Julio	19.0	27.0	83	53	12.4	26.9	4.89
Agosto	19.0	27.0	82	55	12.3	27.8	5.09
Septiembre	19.0	26.0	83	60	12.1	28.0	5.09
Octubre	19.0	25.0	87	67	12.0	27.4	4.84
Noviembre	19.0	25.0	88	65	11.9	26.0	4.53
Diciembre	19.0	26.0	85	58	11.8	25.2	4.44
Promedio	19.1	26.0	85	57	12.1	27.1	4.87

Fuente: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

Tabla 18

Huella hídrica Corinto

Cultivo 1 (m3/año)	Cultivo 2 (m3/año)	Cultivo 3 (m3/año)	Cultivo 4 (m3/año)	Cultivo 5 (m3/año)	Cultivo 6 (m3/año)	Cultivo 7 (m3/año)	Cultivo 8 (m3/año)
Maíz Blanco	Pepino	Tomate	Arveja verde	Plátano	Yuca	café variedad Colombia	café castilla
9,596	184,820	3.740,555	223,729	5.789,226	2.610,152	8.168,099	

Por lo tanto, la demanda hídrica para el uso agrícola de la microcuenca Corinto fue de:

$$DUA = 20726,18 \frac{m^3}{año}$$

Para calcular la huella hídrica azul se realizó un promedio en el RAC, los datos de precipitación se tomaron del balance hídrico, obteniendo los resultados mostrados en la **ecuación 5**.

$$RAC \text{ azul} = RAC - Pefectiva$$

$$RAC \text{ azul} = 5 - 2727,12$$

$$RAC \text{ azul} = -2722,12$$

Debido a que el resultado fue negativo se concluye que no se requiere de agua azul o de riego, es decir, solo se abastece agua verde.

Los términos **DUI**, **DUS** y **DUP** tienen un valor de cero debido a que no existe demanda hídrica para los sectores industrial, pecuario y servicios de esta fuente son muy bajos.

5.5.3. Demanda hídrica Remolino

- **DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico**

Como demanda doméstica se tiene la demanda necesaria para suplir de agua a la población beneficiada la microcuenca Remolino, por el cual las veredas beneficiadas son llamadas Amaranto La Hondura, y Remolino, con una totalidad de 778 habitantes, información tomada del Censo Nacional (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016).

Teniendo en cuenta la **ecuación 12**, se tiene que para la microcuenca Remolino la dotación bruta, fue el siguiente:

$$DUD = 778 \text{ hab} * 0,1866 \frac{m^3}{(\text{hab} * \text{día})} * 365 \text{ días}$$

$$DUD = 52988,802 \frac{m^3}{año}$$

- **DUA = Demanda de Agua para Uso Agrícola**

A partir del Censo Nacional Agropecuario (CNA), se encontró que para el año 2013 el área sembrada de los distintos cultivos generados en las veredas que se benefician de la microcuenca Remolino fue de 368 ha (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2016) (**Tabla 19**).

Tabla 19

Área sembrada Remolino

Cultivo 1 159201001	Cultivo 2 191999056	Cultivo 3 16100100101	Cultivo 4 16100100105	Cultivo 5 16100100107	Cultivo 6 16100100110	Cultivo 7 16100600000	Total Área sembrada por ciclo (ha)
Yuca	Fríjol	Café Tipica - Pajarito- Nacional- Arabigo	Café caturra	Café variedad Colombia	Café castilla	Café catimor	535,603
36,478	0,010	21,029	27,475	172,747	262,454	15,410	

Para el cálculo de la huella hídrica de los cultivos producidos, se realizaron a partir de los datos meteorológicos presentados en la **ilustración 11**, se procedió a calcular ETo en el Software Cropwat 8.0 (Smith, 1992), obteniendo los resultados que se muestran en la **ilustración 14**.

Ilustración 14

Resultado del ETo en la microcuenca Remolino

The screenshot shows the 'ETo Penman-Monteith Mensual' software window. The location is set to Colombia with an altitude of 1400 m, latitude of 5.00° N, and longitude of 75.00° W. The table below displays the monthly and average values for various meteorological and evapotranspiration parameters.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	16.0	23.0	83	67	11.8	25.7	4.25
Febrero	17.0	24.0	84	67	11.9	27.1	4.66
Marzo	17.0	24.0	86	67	12.1	28.3	4.92
Abril	17.0	23.0	87	65	12.3	28.4	4.85
Mayo	17.0	23.0	87	62	12.4	27.4	4.65
Junio	17.0	24.0	84	60	12.5	26.8	4.60
Julio	16.0	24.0	83	60	12.4	26.9	4.60
Agosto	16.0	24.0	82	62	12.3	27.8	4.77
Septiembre	16.0	23.0	83	70	12.1	28.0	4.75
Octubre	16.0	23.0	87	79	12.0	27.4	4.57
Noviembre	16.0	23.0	88	77	11.9	26.0	4.29
Diciembre	16.0	23.0	85	70	11.8	25.2	4.15
Promedio	16.4	23.4	85	67	12.1	27.1	4.59

Fuente: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

Tabla 20*Huella hídrica Remolino*

Cultivo 1 159201001	Cultivo 2 191999056	Cultivo 3 16100100101	Cultivo 4 16100100105	Cultivo 5 16100100107	Cultivo 6 16100100110	Cultivo 7 16100600000
1.606,801	0,652	24.733,120				

Por lo tanto, la demanda hídrica para el uso agrícola de la microcuenca Remolino fue de:

$$DUA = 26340,572 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Para calcular la huella hídrica azul se realizó un promedio en el RAC, los datos de precipitación se tomaron del balance hídrico, obteniendo los resultados mostrados en la **ecuación 5**.

$$\text{RAC azul} = \text{RAC} - \text{Pefectiva}$$

$$\text{RAC azul} = 4,36 - 2856,30$$

$$\text{RAC azul} = -2851,94$$

Debido a que el resultado fue negativo se concluye que no se requiere de agua azul o de riego, es decir, solo se abastece agua verde.

Los términos **DUI**, **DUS** y **DUP** tienen un valor de cero debido a que no existe demanda hídrica para los sectores industrial, pecuario y servicios de esta fuente son muy bajos.

5.6. Índice de escasez

El índice de escasez corresponde a la relación porcentual entre la demanda de agua atribuyéndole todos los usos que se le asignan y la oferta hídrica neta teniendo en cuenta la reducción por calidad del agua y caudal ecológico, el método aplicado corresponde al elaborado por el IDEAM.

Una vez calculado el índice se puede relacionar en una de las cinco categorías establecidas por el IDEAM (IDEAM, 1998) (**Tabla 21**), las cuales señalan el estado de la corriente, los

resultados mayores al 50% infieren una demanda alta, señalando la condición más crítica debido a que los aprovechamientos del recurso son superiores a la mitad de la oferta hídrica de la corriente; rangos inferiores al 50% indican que se puede realizar un aprovechamiento del recurso.

Tabla 21

Categorías del índice de escasez

Categoría	Rango	Color	Explicación
Alto	>50%	Rojo	Demanda alta
Medio alto	21-50%	Naranja	Demanda apreciable
Medio	11-20%	Amarillo	Demanda baja
Mínimo	1-10%	Verde	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Azul	Demanda no significativa

Con base en los resultados obtenidos de la oferta y demanda hídrica se procede a generar el índice de escasez empleando la **Ecuación 1**, a continuación, se presentará los resultados por cada microcuenca:

Tabla 22

Índice de escasez La Cedrona

Oferta hídrica (m ³)	Demanda hídrica (m ³)	Índice de escasez (%)
407792,794	15434,870	3,785

Tabla 23

Índice de escasez Corinto

Oferta hídrica (m ³)	Demanda hídrica (m ³)	Índice de escasez (%)
2702775,116	48242,213	1,785

Tabla 24

Índice de escasez Remolino

Oferta hídrica (m ³)	Demanda hídrica (m ³)	Índice de escasez (%)
4105603,283	79329,375	1,932

6 Análisis

De acuerdo con los parámetros morfológicos hallados para las tres microcuencas se establece que:

Las microcuencas la Cedrona y Corinto, son de tipo oval redonda a oval oblonga de acuerdo al coeficiente de compacidad y según el coeficiente de forma es alargada, por lo que las microcuencas son poco susceptibles a presentar crecientes súbitas. En cambio, la microcuenca Remolino, se clasifica en oval redonda a rectangular oblonga, donde se encuentra propensión a crecientes moderadas más aun teniendo en cuenta que el área de interés es la parte inicial de la cuenca, donde el volumen captado no alcanza a producir crecientes importantes.

De acuerdo con los valores arrojados en el índice de escasez se tiene que las microcuencas Corinto y Remolino, se encuentra en la categoría <1%, es decir, se califica de bajo a muy bajo y la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible. Por lo tanto, estas microcuencas ofrecen un alto potencial como fuente abastecedora de agua para las veredas de las correspondientes microcuencas, sin ninguna afectación notable de la flora y la fauna.

La microcuenca La Cedrona, se encuentra en la categoría 1-10%, es decir, se califica demanda no baja con respecto a la oferta disponible, sin embargo, al realizar un análisis entre las tres microcuencas, se tiene que está es la que mayor demanda tiene en los recursos en el sector agrícola, y por último del doméstico, por lo tanto, se requieren efectuar medidas preventivas para la gestión del recurso hídrico.

7 Conclusiones

El índice de escasez es un indicador de presión sobre el recurso, y brinda información valiosa sobre el comportamiento de la oferta hídrica superficial y la demanda, lo cual puede ser útil en las ocasiones en que no se cuenta con información hidrológica y de usos del agua.

A partir de los resultados obtenidos se tiene que las microcuencas ofrecen un alto potencial como fuente abastecedora de agua para las veredas de las correspondientes, sin embargo, para mejorar este potencial hídrico es fundamental introducir una gestión integrada, que requiere la aplicación de políticas socioeconómicas, es decir, involucrar a los habitantes a mejorar las prácticas de saneamiento.

Con los resultados obtenidos, se logró suministrar una información precisa para la continuación de las concesiones de aguas futuras, por la cual, a partir de los datos calculados de oferta y demanda, CORANTIOQUIA deberá definir políticas para la planificación, ordenamiento, manejo y utilización sostenible del recurso hídrico con base en las demandas y los diferentes usos tales como: El abastecimiento de la población, agricultura, entre otros.

Se le recomienda a las Autoridades Ambientales, ser mucho más riguroso en los requerimientos y formas de evaluar las concesiones de agua; fijar objetivos de calidad a cumplir, los plazos y las inversiones; además que incluyan diferentes programas de educación ambiental, y nuevas formas de aprovechamiento.

Referencias

- Ávila, P. (2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México (pp. 46-57). Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, & Mesfin M. Mekonnen. (2021). Manual de Evaluación de La Huella Hídrica. Establecimiento Del Estándar Mundial. Bioscain San Juan; CORANTIOQUIA. (2020). (Issue Código 2619).
- Cámara de Comercio de Medellín. (2015). Perfil socioeconómico de la subregión del Suroeste. *Camara de Comercio de Medellín Para Antioquia*, 41. <https://cutt.ly/k22aLwM>
- Cosgrove, B., & Rijsberman, F. (2000). World water vision. In *Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques* (Vol. 38, Issue 4 SUPPL.). <https://doi.org/10.4324/9781315071763>
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1993). *Leyes 99 de 1993 (Diciembre 22), por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado del gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial N°41.146
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 865 de 2004 (Julio 22) *Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones*. .Diario Oficial.
- Colombia. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. 2017. “Resolución 0330 de 2017: ‘Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS- y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.’” *Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. República de Colombia*. 182.
- Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2016). Microdatos - Tercer Censo Nacional Agropecuario - 2014 -3er CNA. (pp. 1–254).
- CVC, & Consorcio POMCA Quindío. (2017). Capítulo 7 Morfometría. Caracterización De La Cuenca, 7, 32. <https://acortar.link/yVRJw>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas), (2011,). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo, Italia, Mundi-Prensa.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), (2013). Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria, (78), 38. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas), (2020). El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático. <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>.
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, vol. 11, núm. 3, pp. 147-170. Universidad de Buenos Aires, Argentina. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. *et al.* (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (1998). Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C., 253 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2004). Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Bogotá, D.C. <https://acortar.link/gHYAxx>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2008). Oferta y Demanda del Recurso Hídrico en Colombia, presentado en Foro Nacional VI Jornadas del CONAPIH Santiago: pp. 29.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2020). Hoja metodológica del indicador Oferta Hídrica Total Superficial (Versión 1,1). 28 p.
- UN-Consejo Económico y Social, (1997): Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo. Informe del Secretario General, Nueva York, 55 p.
- Organización de Naciones Unidas. (2014). La escasez de agua. <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012). Glosario Hidrológico Internacional. WMO No. 385. ISBN 978-92-63-03385-8. Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>.
- Orr, S., Cartwright, A., & Tickner, D. (2009). Understanding water risks. A Primer on the consequences of water scarcity for government and business. WWF Water Security Series 4, 40. <https://cutt.ly/C269T7q>
- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. In FAO Irrigation and Drainage Paper 46 (Issue 46).
- Van Vliet, M. T. H., Jones, E. R., Flörke, M., Franssen, W. H. P., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. R. (2021). Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 16(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>
- Verma, M., & Haritash, A. (2020). Photocatalytic degradation of Amoxicillin in pharmaceutical. *Environmental Technology & Innovation*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101072>
- Villegas, J. & Torres B. (1977). “Evapotranspiración.” Serie Didáctica, Facultad de Agronomía y Zootécnica, Universidad Nacional de Tucumán 45.
- Zetland, D. (2014). Living with water scarcity, Amsterdam, Aguanomics Press. <http://www.riversimulator.org/Resources/Books/LivingWithWaterScarcityZetland2014.pdf>

Anexos

Anexo 1. Cálculos de las tres microcuencas hidrográficas.

Anexo 2. Mapas microcuencas