

**Evaluación de sostenibilidad de la microcuenca de Tona mediante la cuantificación de
su huella hídrica**

Massiel Hernández Tarazona

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Magíster en Ingeniería Civil

Codirector

Yurley Paola Villabona

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Ingeniería Civil

2023

Contenido

Introducción	9
1. Evaluación de la sostenibilidad de la microcuenca de Tona mediante la cuantificación de su Huella Hídrica.....	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
2. Marco referencial.....	15
2.1 Revisión bibliográfica	15
2.2 Marco conceptual	19
2.2.1 Agua virtual	19
2.2.2 Huella Hídrica.....	20
2.2.3 Caudal ecológico	21
2.2.4 Número de Curva	21
3. Método	22
3.1 Diseño de investigación	22
3.2 Fase 1. Estimación de la oferta hídrica de la cuenca.....	23
3.2.1 Delimitación de microcuenca de Tona	24
3.2.2 Estimación de la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.....	25
3.3 Fase 2. Determinación de la Huella Hídrica de las actividades económicas de la cuenca..	34

3.3.1 Consumo hídrico	34
3.3.2 Huella Hídrica.....	38
3.4 Fase 3. Identificación de los Hotspots ambientales.....	40
3.4.1 Análisis de sostenibilidad para Huella Hídrica	40
3.4.2 Identificación de Puntos Críticos o Hotspots Ambientales	42
4. Resultados	43
4.1 Resultados Fase 1	43
4.1.1 Delimitación de zona de estudio.....	43
4.1.2 Estimación de la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-escurrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.....	45
4.2 Resultados Fase 2	50
4.2.1 Consumo hídrico	50
4.2.2 Huella Hídrica.....	50
4.3 Resultados Fase 3	55
4.3.1 Identificación de Puntos Críticos o Hotspots Ambientales	55
4.3.3 Análisis de sostenibilidad de HH	56
6. Conclusiones	57
Referencias.....	58

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Resumen Revisión Bibliográfica</i>	19
Tabla 2. <i>Desarrollo metodológico Fase 1</i>	23
Tabla 3. <i>Estaciones escogidas para datos de temperatura</i>	24
Tabla 4. <i>Estaciones escogidas para datos de precipitación</i>	24
Tabla 5. <i>Datos para el modelo hidrológico</i>	26
Tabla 6. <i>Clasificación de tipos de suelos</i>	27
Tabla 7. <i>Clasificación de objetivos ambientales</i>	30
Tabla 8. <i>Importancia ecológica</i>	31
Tabla 9. <i>Presión de uso del agua</i>	32
Tabla 10. <i>Caudal ecológico según objetivos ambientales</i>	33
Tabla 11. <i>Desarrollo metodológico Fase 2</i>	34
Tabla 12. <i>Desarrollo metodológico Fase 3</i>	40
Tabla 13. <i>Población de estudio seleccionada</i>	44
Tabla 14. <i>Resultados de precipitación en los años de estudio</i>	45
Tabla 15. <i>Resultados de temperatura media en los años de estudio</i>	46
Tabla 16. <i>Huella hídrica agrícola 2017</i>	53
Tabla 17. <i>Huella hídrica agrícola 2020</i>	53

Lista de figuras

Figura 1. <i>Producción teórica por años en torno al tema de Huella Hídrica</i>	16
Figura 2. <i>Producción teórica por país en torno al tema de Huella Hídrica</i>	16
Figura 3. <i>Producción teórica por área en torno al tema de Huella Hídrica</i>	17
Figura 4. <i>Proceso Modelo Hidrológico</i>	25
Figura 5. <i>Reclasificación de suelo según su uso</i>	27
Figura 6. <i>Atributos de polígono generado</i>	28
Figura 7. <i>Atributos de tabla para el número de curva</i>	28
Figura 8. <i>Matriz de objetivos ambientales</i>	33
Figura 9. <i>Información climática para cálculo de ET</i>	35
Figura 10. <i>Precipitación mensual para cálculo de ET</i>	36
Figura 11. <i>Datos de cultivo para cálculo de ET</i>	36
Figura 12. <i>Tipo de suelo para cálculo de ET</i>	37
Figura 13. <i>Criterios de sostenibilidad e indicadores de HH</i>	41
Figura 14. <i>Ubicación geográfica microcuenca de Tona</i>	44
Figura 15. <i>Isoyetas microcuenca de Tona</i>	46
Figura 16. <i>Isotermas de la microcuenca de Tona</i>	47
Figura 17. <i>Balance Hídrico del año 2017</i>	47
Figura 18. <i>Balance Hídrico del año 2020</i>	47
Figura 19. <i>Modelo hidrológico de precipitación 2017</i>	48
Figura 20. <i>Modelo hidrológico de precipitación 2020</i>	48
Figura 21. <i>HH de cultivos para el año 2017</i>	50
Figura 22. <i>HH de cultivos para el año 2020</i>	50

Figura 23. <i>Huella Hídrica de café 2017</i>	51
Figura 24. <i>Huella Hídrica de café 2020</i>	51
Figura 25. <i>Huella Hídrica cebolla 2017</i>	52
Figura 26. <i>Huella Hídrica cebolla 2020</i>	52
Figura 27. <i>Huella Hídrica Agrícola Total 2017</i>	53
Figura 28. <i>Huella Hídrica Agrícola Total 2020</i>	54
Figura 29. <i>Comparación HH Virtual Agrícola 2017</i>	54
Figura 30. <i>Comparación HH Virtual Agrícola 2017</i>	55
Figura 31. <i>Zonas sobreexplotadas de la microcuenca</i>	55

Resumen

La sostenibilidad en el uso del agua se ha convertido en uno de los temas de mayor prioridad para mejorar la gestión hídrica por parte de las entidades territoriales. Es por esto por lo que, Arjen Hoekstra [1] definió la metodología de la huella hídrica para calcular la cantidad de agua consumida en un área determinada, así como la sostenibilidad de dicho consumo. A su vez, la microcuenca del río Tona es una de las principales fuentes hídricas que abastece la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, así como las zonas de producción agropecuaria. Por lo anterior, la presente investigación evaluó la sostenibilidad de la microcuenca de Tona a partir de la medición de los indicadores de Huella Hídrica sobre el sector agropecuario. Según este propósito, se establecieron dos años de estudio, siendo 2017 y 2020 clasificado como seco y húmedo respectivamente para analizar la variación de consumo hídrico en distintas condiciones climáticas. A partir de estos años, primero se determinó el indicador de balance hídrico mensual estableciendo que la zona presente estabilidad y exceso durante la mayor parte del año. Posteriormente se construyó un modelo lluvia escurrimiento para estimar la oferta hídrica de los años de estudio. Después, mediante la metodología de Hoekstra se calculó la huella hídrica azul, verde y gris y el consumo por tonelada y a nivel mensual de las actividades agrícolas encontrando que los productos con mayor consumo fueron aguacate, cebolla junca, papa y café a nivel agrícola. Con los datos de huella hídrica se comparó el consumo con la oferta para encontrar los hotspots a nivel temporal definiendo que las épocas de verano o de menor precipitación son las que presentaron un menor grado de sostenibilidad. Finalmente, con el análisis de los resultados de oferta y consumo hídrico, así como la identificación de hotspots ambientales, fue posible determinar la sostenibilidad del área estudiada.

Palabras clave: Huella hídrica, sostenibilidad, producción agropecuaria

Abstract

Sustainability in water use has become in one of the main priorities in water management for the territorial entities. This is why Arjen Hoekstra [1] defined the water footprint methodology to calculate the amount of water consumed in a given area, as well as the sustainability of said consumption. In turn, the Tona River micro-basin is one of the main water sources that supplies the city of Bucaramanga and its metropolitan area, as well as agricultural production areas. Due to the above, the present investigation evaluated the sustainability of the Tona micro-basin from the measurement of the Water Footprint indicators on the agricultural sector. According to this purpose, two years of study were established, being 2017 and 2020 classified as dry and humid respectively to analyze the variation of water consumption in different climatic conditions. From these years, the monthly water balance indicator was first determined, establishing that the area presents stability and excess during most of the year. Subsequently, a rainfall runoff model was built to estimate the water supply of the study years. Then, using the Hoekstra methodology, the blue, green and gray water footprint and the consumption per ton and at the monthly level of agricultural activities were calculated, finding that the products with the highest consumption were avocado, onion, potato and coffee at the agricultural level. With the water footprint data, consumption was compared with supply to find the hotspots at a temporal level, defining that the summer seasons or those with less rainfall are those that presented a lower degree of sustainability. Finally, with the analysis of the results of water supply and consumption, as well as the identification of environmental hotspots, it was possible to determine the sustainability of the studied area.

Keywords: Water Footprint, sustainability, agricultural production.

Introducción

La evaluación de la sostenibilidad en cuencas y microcuencas permite analizar la gestión de los cuerpos hídricos en áreas específicas, permitiendo determinar si el uso del agua es sostenible. Esta evaluación es importante ya que estos son sistemas hídricos complejos en los que se producen cambios tanto bióticos como abióticos y representan el sustento de agua necesario para el desarrollo de la vida humana [2]–[4]

En Colombia, el departamento de Santander presenta un déficit de oferta hídrica, ya que, de los 87 municipios del departamento, el 57,5% presentan alto riesgo de desabastecimiento hídrico en épocas de sequía frente a posibles déficits de precipitación. Así mismo, considerando que más del 50% de la población santandereana vive en el Área Metropolitana de Bucaramanga se hace imprescindible asegurar el abastecimiento de la población en esta zona de gran concentración. Por otra parte, según datos del AMB (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga) la cuenca del río Tona brinda el mayor aporte de caudal, siendo este de 52.4%. Sin embargo, debido que la demanda supera el 40% del agua disponible, se ocasiona que esta microcuenca sea más vulnerable en comparación a las otras cuencas. A partir de esta problemática surge la necesidad de determinar qué tan sostenible es el consumo hídrico en la microcuenca de Tona [2], [5].

Por otro lado, en la actualidad se ha descubierto que las labores agrícolas y ganaderas utilizan cerca del 85% del suministro mundial de agua dulce. Por lo tanto, resulta crucial examinar la cantidad de agua que se requiere para llevar a cabo estas actividades y producir los bienes asociados, con el fin de garantizar un uso eficiente y sostenible de este recurso vital. En Colombia, se han realizado diversos estudios sobre la Huella Hídrica (HH). Uno de ellos fue el proyecto Suiza Agua, iniciado por la Agencia para el Desarrollo y la Cooperación Suiza (Cosude) en 2009, que se enfocó en estimar los consumos de agua en las actividades agrícolas a nivel nacional. Estudios

más recientes, como el realizado por el IDEAM (2015) en Colombia, analizaron la HH azul y verde, así como su impacto económico, evaluando el comportamiento de 12 cultivos en 2012, entre ellos arroz, banano, cacao, caña, café, frijol, maíz, plátano, palma de aceite, soya y yuca utilizando la metodología propuesta por Hoekstra [6], [7].

Por lo cual en el presente proyecto se propone evaluar la sostenibilidad de la microcuenca de Tona, lo que implica el cálculo de la HH (Huella Hídrica) de las actividades agrícolas asociadas a la cuenca, realización del modelo hidrológico para definir el comportamiento de la cuenca, y elaboración de mapas en la zona de limitada para mostrar gráficamente las variaciones climáticas y zonas de riesgo o sobreexplotación dentro de la cuenca.

1. Evaluación de la sostenibilidad de la microcuenca de Tona mediante la cuantificación de su Huella Hídrica

1.1 Planteamiento del problema

Las dinámicas centradas en el ser humano y en el consumismo, que definen el estilo de vida de una gran parte de la humanidad, son responsables de numerosos problemas que afectan al mundo y ponen en peligro la supervivencia de todas las formas de vida en él, incluyendo la nuestra como especie humana. Uno de los efectos adversos de estas dinámicas es la escasez de agua, una situación que también afecta a Colombia a pesar de contar con una abundante oferta natural. Esta problemática se puede comprobar a través de los datos proporcionados por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua (ENA). En el caso del departamento de Santander, las entidades coinciden en que enfrenta una vulnerabilidad significativa debido al déficit de suministro de agua. De los 87 municipios en el departamento, un 57,5% muestra un alto riesgo de escasez de agua durante épocas de sequía, debido a posibles deficiencias en la cantidad de lluvia y, por consiguiente, en la oferta natural de agua disponible [5].

Dado que más del 50% de la población de Santander vive en el Área Metropolitana de Bucaramanga, es fundamental garantizar el suministro de agua en esta zona. Según los datos de la CDMB en el año 2018, de una población de 2.080.775 habitantes, 1.322.945 viven en esta área [8]. Según el informe de sustentabilidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), existen 4 plantas de tratamiento de agua potable que se abastecen de 3 fuentes principales: los ríos Suratá, Frío y Tona. Estos ríos pertenecen a la cuenca superior del Río Lebrija. El Río Tona es la fuente más importante, ya que aporta 1.224 L/s, lo que equivale al 52,4% del total de agua captada.

No obstante, en este mismo informe, la microcuenca en cuestión exhibió una insuficiencia hídrica, la cual, aunque fue compensada por el caudal del Río Suratá, presenta un alto nivel de vulnerabilidad debido al aumento en la demanda. Esta situación se sustenta en el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Subcuenca Río Suratá, elaborado por la CDMB. A diferencia de las demás microcuencas, la de Tona enfrenta una demanda significativamente elevada, superando el 40%. Esto, consecuentemente, la expone aún más a los riesgos previamente mencionados. A pesar de que se han llevado a cabo estudios sobre la cuenca de Suratá y Lebrija, se carece de información adecuada acerca de la microcuenca de Tona y del abastecimiento del recurso hídrico para esta población [2], [8].

Por otro lado, en Tona las actividades que generan un mayor consumo hídrico son agrícola, pecuaria y residencial, siendo el sector agrícola el que representa el mayor gasto, razón por la cual este estudio se enfoca en esta área productiva de la microcuenca. De esta actividad económica hay varios factores por considerar respecto al consumo hídrico. El primero es la expansión de áreas productivas, lo cual puede ser perjudicial para la cuenca debido a la deforestación no regulada. Los agricultores ocupan partes de bosques para pastos y cultivos sin tener en cuenta los límites permitidos. Además, en algunas zonas agrícolas se utiliza el sistema de riego por goteo en invernaderos, que permite controlar la cantidad de agua utilizada en los cultivos. Sin embargo, en los cultivos a cielo abierto se utiliza un sistema de riego manual sin control, lo que puede generar un consumo excesivo de agua y generar incertidumbre sobre el consumo real. Esto puede representar un problema para la estabilidad de la cuenca y su disponibilidad de agua, así como ocasionar mayores costos en la producción de alimentos por el posible exceso de consumo hídrico.

Lo anterior muestra la necesidad de evaluar de manera sostenible el consumo del recurso hídrico en la producción de los diferentes cultivos que se dan esta región, y es a partir de esta

problemática surge la pregunta “¿Qué tan sostenible es el consumo hídrico en la microcuenca de Tona?”

1.2 Justificación

La sostenibilidad implica una gestión responsable de los recursos naturales, así como la reducción de los impactos ambientales negativos. Los indicadores de Huella Hídrica proporcionan información precisa sobre el consumo de agua en todos los procesos de producción o generación de bienes y servicios. Estos dos conceptos están estrechamente relacionados, ya que los datos de uso del agua proporcionados por la Huella Hídrica permiten una gestión eficiente de las actividades que implican un uso ineficiente o excesivo del recurso, contribuyendo así al desarrollo sostenible [9].

Así mismo, la relevancia de la gestión del agua se refleja en diversos documentos oficiales a diferentes niveles, desde el ámbito local hasta el mundial. Esto se evidencia especialmente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por las Naciones Unidas, que incluyen los ODS 6 y 13. Estos dos objetivos establecen, de manera precisa, la necesidad de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y del saneamiento para todos, así como la adopción de medidas urgentes para abordar el cambio climático y sus respectivos impactos [10].

Sin embargo, esto no es posible a menos que haya esfuerzos propios de cada país por cumplirlos. Por ende, en Colombia existe el Plan Nacional de Desarrollo, en el cual se definen dos pactos, siendo estos "Pacto por el agua" y "Pacto por el turismo sostenible y la economía naranja" Con los que el gobierno busca garantizar el acceso al agua potable, promover la gestión sostenible de los recursos hídricos, prevenir y controlar la contaminación del agua e impulsar el turismo rural y en áreas protegidas. Para lograr esto es necesario que las entidades regionales, departamentales

y municipales tengan y cumplan con propósitos afines al cuidado y preservación tanto del medio ambiente como del agua, por esto existen entidades como el AMB cuyos fines se basan en garantizar el acceso al agua potable en Bucaramanga y su área metropolitana, promover la gestión sostenible de los recursos hídricos para la conservación del medio ambiente y desarrollo sostenible, así como mejorar la eficiencia en el uso del agua desde la captación hasta la disposición final. Por su parte, la CDMB con su plan de gestión ambiental busca promover el uso sostenible y conservación de los recursos hídricos, realizar su planificación y gestión a través de planes de ordenamiento y manejo de las cuencas hidrográficas, y promover la investigación y monitoreo de la calidad del agua con el fin de identificar los problemas y retos en dicha gestión y definir las medidas necesarias para la conservación y uso sostenible del agua de la región [2], [4], [8].

Con base en tales propósitos surge el proyecto "evaluación de sostenibilidad de Tona" cuyo fin propone evaluar la sostenibilidad del consumo hídrico en la microcuenca de Tona a partir de la huella hídrica de las actividades agrícolas desarrolladas en la zona. Además, se presenta como una alternativa frente a la gestión del recurso hídrico a nivel municipal, ya que busca identificar los puntos críticos de consumo que hacen vulnerable la mayor fuente hídrica para la mitad de la población santandereana, a fin de presentar una descripción específica de consumo así como lineamientos ambientales básicos para impulsar el consumo sostenible de la microcuenca y evitar que se presenten problemas por desabastecimiento en épocas de sequía o disminución de caudal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la sostenibilidad de la zona baja de la microcuenca del río Tona mediante la cuantificación de su Huella Hídrica determinando si se presenta déficit hídrico.

1.3.2 Objetivos específicos

Estimar la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-esorrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.

Determinar la Huella Hídrica de las actividades agropecuarias con mayor afectación en la subcuenca del río Tona mediante un modelo de cuantificación, estableciendo así el volumen de agua consumida.

Identificar los Hotspots ambientales mediante un análisis comparativo entre oferta y demanda en la zona de estudio, proponiendo así lineamientos de gestión sobre el recurso hídrico.

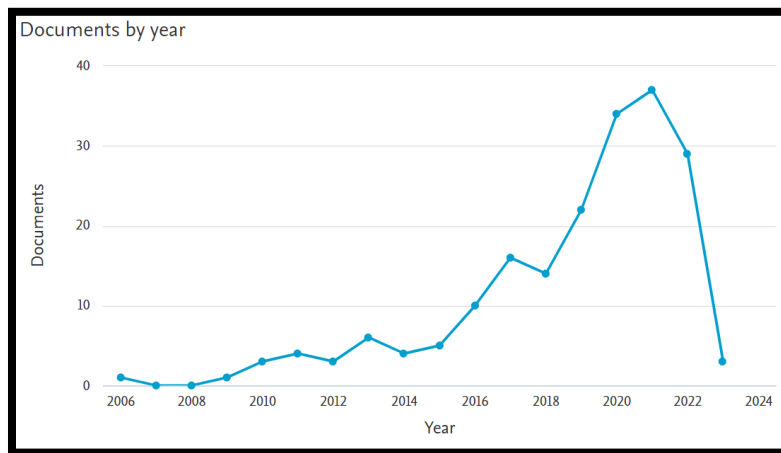
2. Marco referencial

2.1 Revisión bibliográfica

A partir de una búsqueda bibliográfica con el motor de búsqueda de SCOPUS, aplicando la ecuación “(Water Footprint) AND (Sustainable development) OR (Enviromental impacts) AND (Agricultural development) OR (Agriculture)” se obtuvo 192 artículos, y dado que lo más importante es seleccionar la información con mayor pertinencia al tema a partir del contenido disponible se hizo una selección de 4 artículos con mayor afinidad.

Antes de comenzar con la descripción del contenido teórico encontrado se hace necesario hacer un breve repaso por algunos aspectos relevantes por destacar en la búsqueda bibliográfica.

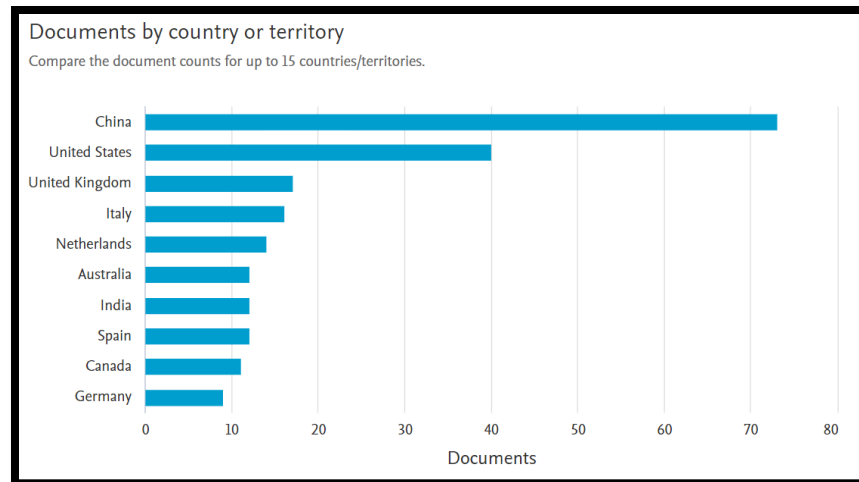
Inicialmente, cabe destacar que el avance teórico comenzó después del planteamiento del concepto de huella hídrica en 2002. A partir de tal año, es evidente el incremento de interés bajo tal área, especialmente en los últimos 7 años.

Figura 1. *Producción teórica por años en torno al tema de Huella Hídrica*

Tomado de [11].

Además, se encontró que de los países con mayor interés en producción teórica sobre HH se encuentran principalmente China y Estados Unidos. (al ser los países con poblaciones muy densas su necesidad de avanzar en este tema se debe al consumo excesivo y la búsqueda de soluciones para una producción alimentaria sostenible).

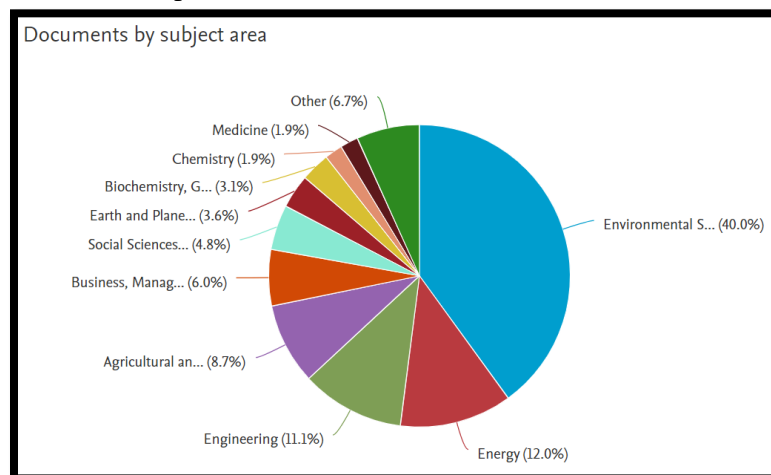
Figura 2. *Producción teórica por país en torno al tema de Huella Hídrica*



Tomado de [11].

Por último, en la siguiente figura se muestran las áreas de conocimiento con su respectivo aporte académico sobre la temática de Huella Hídrica a nivel mundial, en la que se representa ingeniería como el tercero con mayor aporte, con un 11.1%.

Figura 3. Producción teórica por área en torno al tema de Huella Hídrica.



Tomado de [11].

Teniendo en cuenta el anterior análisis general de revisión bibliográfica se exponen los siguientes textos académicos con sus respectivos propósitos y aportes.

A partir del artículo “La huella hídrica de la producción mundial de alimentos” de Mesfin M. Mekonnen y Winnie Gerbens-Leenes, investigadores de la Universidad de Alabama USA y la Universidad de Groningen Países Bajos respectivamente, es posible identificar que el sector agrícola es el principal consumidor de agua y mediante la revisión de HH es posible establecer medidas para aumentar la productividad del agua, mejorar su sostenibilidad y a su vez proteger los ecosistemas que dependen de ella [12].

En la revisión sobre el indicador de huella hídrica para la UE28 (Unión Europea) elaborado por Vanham Davy y Bidoglio Giovanni se utiliza este indicador para examinar su aplicabilidad a la política de la UE28 (UE27 y Croacia) enfocándose en la evaluación volumétrica de Water Footprint Network generando un resumen contable de la producción y consumo de WF por año con el fin de definir políticas de manejo en los sectores productivos susceptibles a optimizar [13].

Por su parte, en el estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola realizado por Arévalo Diego, Lozano Juan y Sabogal Javier en el año 2012, a partir de la conceptualización de los indicadores de Huella Hídrica basan análisis de sostenibilidad hídrica en los sectores productivos del país, así como los impactos sociales, económicos y ambientales de cada uno a lo largo del territorio nacional [14].

En el estudio realizado por Builes Cedula, Edwin David en el año 2013, basado en la Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del Río Porce se aplica la cuantificación de la Huella Hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas y pecuarias de los años 2005 – 2010, identificando a su vez los hotspots temporales y geográficos que afectan el cauce a partir de estos indicadores [15].

Tabla 1. *Resumen Revisión Bibliográfica*

Autor	Título	Lugar	Descripción
Mesfin M. Mekonnen Winnie Gerbens- Leenes	La Huella Hídrica de la producción mundial de alimentos	Universidad de Alabama USA y la Universidad de Groningen Países Bajos	Breve revisión de 94 estudios sobre Huella Hídrica de producción agrícola a nivel mundial para establecer medidas que aumenten la productividad del agua y mejoren su sostenibilidad.
Vanham Davy y Bidoglio Giovanni	Revisión sobre el indicador de huella hídrica para la UE28 (Unión Europea)	Unión Europea	Evaluación volumétrica de Water Footprint Network generando un resumen contable de la producción y consumo de WF por año con el fin de definir políticas de manejo en los sectores productivos susceptibles a optimizar.
Arévalo Diego, Lozano Juan y Sabogal Javier	Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia sector agrícola	Colombia	A partir de la conceptualización de los indicadores de Huella Hídrica basan análisis de sostenibilidad hídrica en los sectores productivos del país.
Builes Cedula Edwin David	Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del Río Porce	Universidad Nacional de Colombia	Cuantificación de la Huella Hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas y pecuarias de los años 2005 – 2010.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Agua virtual

Se expresa el AV como la cantidad de agua contenida en un producto, incluyendo tanto el agua contenida en el producto, como la necesaria para generar dicho producto, lo cual lo establece como un indicador físico en términos de producción de un bien o servicio. A su vez, define este concepto en términos agrícolas como el requerimiento hídrico de los cultivos que los agrónomos han aplicado siempre.

Por otra parte, añade que el AV implica dos factores.

- Proporciona información de los requerimientos de agua, permitiendo hablar de la cantidad de agua (metros cúbicos) necesaria para producir un kilo de cualquier alimento.
- EL AV alcanza todo su potencial cuando se relaciona con el comercio, facilitando información de flujo de AV entre países. Así, se puede hablar del agua virtual exportada e importada a través del agua contenida en los productos comercializados [16]

2.2.2 Huella Hídrica

Es una medida volumétrica del consumo y la contaminación del agua. No es una medida de la gravedad del impacto medioambiental local del consumo y la contaminación del agua. En términos generales, el objetivo de la evaluación de la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o productos específicos se relacionan con los problemas de escasez y contaminación del agua, y ver cómo las actividades y los productos pueden ser más sostenibles desde el punto de vista del agua.

La huella hídrica ofrece así una perspectiva mejor y más amplia de cómo un consumidor o productor se relaciona con el uso de los sistemas de agua dulce. Es una medida volumétrica del consumo y la contaminación del agua. No es una medida de la gravedad del impacto medioambiental local del consumo y la contaminación del agua.

El impacto ambiental local de una determinada cantidad de consumo de agua y contaminación depende de la vulnerabilidad del sistema hídrico local y del número de consumidores y contaminadores de agua que hacen uso del mismo sistema.

Las cuentas de la huella hídrica ofrecen información espaciotemporal explícita sobre cómo se apropia el agua para diversos fines humanos. Pueden alimentar el debate el uso y la asignación

sostenible y equitativa del agua y también constituyen una buena base para una evaluación local de los impactos ambientales, sociales y económicos.

- Cuantificar en el espacio y en el tiempo la huella hídrica en una zona geográfica determinada.
- Evaluar la sostenibilidad medioambiental, social y económica de esta huella hídrica.
- Formular una estrategia de respuesta.

En términos generales, el objetivo de la evaluación de la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o productos específicos se relacionan con los problemas de escasez y contaminación del agua, y ver cómo las actividades y los productos pueden ser más sostenibles desde el punto de vista del agua [16].

2.2.3 Caudal ecológico

El concepto de caudal ecológico se define como el caudal mínimo que es necesario dejar en un curso de agua para garantizar la conservación de los ecosistemas que alberga, mantener su geomorfología y comportamiento hidráulico y permitir que dicho caudal remanente siga cumpliendo sus funciones y servicios fluviales, como flujo de dilución, navegación y sus aportes hídricos en general [17].

Para determinar este caudal existen distintos métodos y enfoques en diferentes países, por lo que hay varias clasificaciones para dicho caudal, por lo que existen distintos resultados e interpretaciones. Y, dado que no existe una elección simplificada o más apropiada del método, en este caso se aplicará la metodología establecida en la “Guía para la determinación de caudal ecológico en México” de World Wide Fund for Nature (WWF) explicada en la sección 3.2.3 [17].

2.2.4 Número de Curva

El método hidrológico del Soil Conservation Service SCS de Estados Unidos define mediante el parámetro Número de Curva NC la capacidad de una cuenca vertiente para producir escorrentía durante una lluvia. El parámetro permite obtener la lluvia neta o precipitación efectiva, así como definir el Coeficiente de Escorrentía de cada cuenca.

Los números de curva NC alcanzan valores comprendidos entre 0 y 100. A mayor número se obtiene un umbral de escorrentía menor, lo que se traduce en un menor escurrimiento. Para NC = 100 correspondería a una cuenca completamente impermeable en la que toda la precipitación sobre la misma se transforma en escorrentía [18].

3. Método

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, y reiterando la importancia que tiene esta microcuenca para la vida en general, especialmente en el Área Metropolitana de Bucaramanga, en el presente proyecto se propone realizar un estudio sobre la evaluación de la sostenibilidad de la microcuenca de Tona, lo que incluye el cálculo de la HH (Huella Hídrica), la identificación de los Hotspots o puntos críticos que afectan el caudal ecológico del cauce y, la implementación de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) con el fin de realizar el modelado de la subcuenca y la delimitación del área de estudio y zonas afectadas dentro de ésta, de manera que se puedan presentar lineamientos de gestión del recurso hídrico en dicha zona de la microcuenca.

3.1 Diseño de investigación

El presente proyecto tiene un diseño es no experimental, ya que no busca brindar conocimiento extra sobre un área poco estudiada, sino evaluar un fenómeno real a partir del procesamiento de datos recolectados sin manipularlos deliberadamente. Por otra parte, debido a que el tiempo de estudio son dos años puntuales analizados de forma independiente cuyos datos fueron obtenidos (IDEAM). Finalmente, según el objetivo propuesto, este proyecto es de tipo evaluativo porque pretende evaluar el impacto que tienen las actividades agrícolas sobre la disponibilidad de agua en el río Tona midiendo la sostenibilidad del gasto hídrico que generan y así proporcionar información clara sobre el consumo de agua en dicha zona y el nivel de afectación que tiene tanto para la población del área metropolitana de Bucaramanga como sobre las áreas productivas de tal cuenca.

3.2 Fase 1. Estimación de la oferta hídrica de la cuenca

Tabla 2. Desarrollo metodológico Fase 1

Objetivos	Actividades	Descripción
Estimar la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.	Recolección de datos meteorológicos del IDEAM	Según los datos de las estaciones meteorológicas del IDEAM se hará la selección de los años de estudio (2017 seco y 2020 húmedo).
	Generación de mapa mediante un Sistema de Información Geográfico	A partir de una herramienta SIG se generará un mapa con capas definiendo las áreas productivas de estudio y los usos del suelo en la cuenca.
	Recolección de información sobre caudales de ingreso a plantas de tratamiento de Bucaramanga	Solicitud de datos de caudales de ingreso a la planta de La Flora registrados por la AMB.
	Elaboración de modelo lluvia-escorrentía en HEC-HMS	Procesamiento de mapas e información climatológica para el modelamiento de caudales medios mensuales del río Tona a partir de dos años elegidos (seco-húmedo) de la información previamente analizada
	Calibración y validación del modelo	Se realizará esta actividad a partir de datos históricos de caudales del río Tona
	Estimación de caudales ecológicos mensuales	Con la delimitación de la cuenca, datos climáticos y de caudales, se calcula el caudal ecológico
	Determinación de oferta hídrica	De acuerdo con el caudal total modelado y el caudal ecológico se

Objetivos	Actividades	Descripción
		define la cantidad de agua disponible en el río Tona

3.2.1 Delimitación de microcuenca de Tona

La información meteorológica se obtuvo a partir de las bases de datos del IDEAM y NASA, destacando que si bien en la cuenca se encuentran al menos 15 estaciones climáticas y pluviométricas se escogieron solamente 3 y 4 respectivamente, ya que eran las únicas que contaban con datos completos, por lo que se evitó realizar algún tipo de método para rellenar datos. A continuación, se muestran las tablas 3 y 4 con esta información clasificada.

Tabla 3. Estaciones escogidas para datos de temperatura

Estaciones Temperatura Promedio (°C)					
Municipio	Nombre	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Berlín	Berlín	Limnimétrica	3330	7,183	-72,92
Tona	Tona	Climática principal	1910	7,196	-72,97
Suratá	Vivero Suratá	Climática ordinaria	1725	7,366	-72,99

Tabla 4. Estaciones escogidas para datos de precipitación

Estaciones Precipitación Acumulada (mm)					
Municipio	Nombre	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Bucaramanga	Neomundo	Climática principal	970	7,099	-73,11
Bucaramanga	El Picacho	Pluviométrica	3310	7,11	-72,96
Tona	Tona	Climática principal	1910	7,196	-72,97
Berlín	Berlín	Limnimétrica	3330	7,183	-72,92

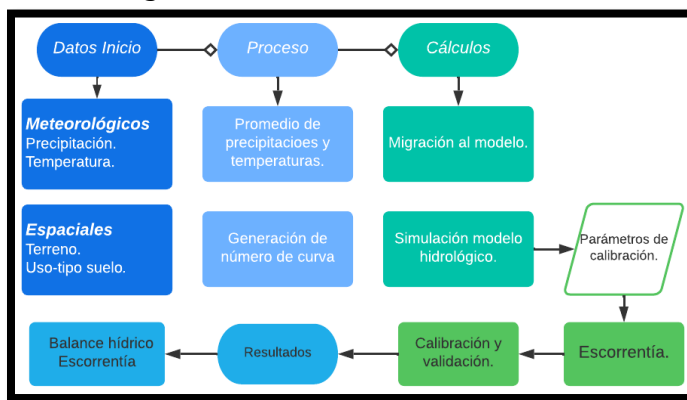
Además de esta información, fue necesario obtener de otras fuentes datos como horas de sol, velocidad de viento y humedad, requeridos para la generación del modelo de escorrentía y los balances hídricos de la cuenca, destacando que ninguno de estos requirió tratamiento de relleno de datos en ninguno de los años analizados.

3.2.2 Estimación de la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.

A partir de la información de las estaciones meteorológica, junto con datos de caudales obtenidos gracias al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y la caracterización morfométrica establecida por el POMCA se realiza el modelo hidrológico de la cuenca para estimar la oferta hídrica y realizar la evaluación de sostenibilidad del río Tona.

Respecto a la modelación se empleó el software libre de HEC-HMS 4.10, y se requirió la utilización de varios mapas con información de curvas de elevación, dirección y acumulación de flujo, tipos y coberturas del suelo. Según estos datos de entrada y el cálculo de número de curva de la cuenca, se realizó la respectiva calibración del modelo hidrológico. Este procedimiento se muestra gráficamente en la siguiente ilustración.

Figura 4. Proceso Modelo Hidrológico



Tomado de [18].

Calibración. Para la elaboración del modelo y su respectiva calibración se deben poseer información sobre mapas y datos mínimos de la cuenca, los cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 5. Datos para el modelo hidrológico

Recurso	Formato	Fuente
Modelo digital de elevación	Geo TIFF	CDMB
Mapa de delimitación de microcuenca	Shapefile	CDMB
Mapa de red hídrica de la microcuenca	Shapefile	CDMB
Mapa de tipos de suelo en el área de estudio	Shapefile	CDMB
Mapa de coberturas y usos del suelo	Shapefile	CDMB
Dirección de flujo	Geo TIFF	Propia
Acumulación de flujo	Geo TIFF	Propia
Recurso	Formato	Fuente
Precipitación acumulada	csv, xlsx	NASA-IDEAM
Temperatura media	csv, xlsx	NASA-IDEAM
Caudales río Tona	csv, xlsx	AMB

A partir del procesamiento de los mapas tipo Shapefile se genera el número de curva para determinar el nivel de impermeabilidad de la cuenca necesario para el modelado de la microcuenca, dicho procedimiento se demuestra a continuación.

Primero se debe identificar el tipo de suelo existente en la zona de estudio teniendo en cuenta la clasificación según su textura.

Tabla 6. *Clasificación de tipos de suelos*

Grupo	Textura	Característica	Velocidad infiltración
A	Arenosa; Arenosa-limosa	Mayor permeabilidad y menor escorrentía	>76 mm/h
B	Franca; Franco-arcillosa-arenosa; Franco limosa	Permeabilidad moderada	38 - 76 mm/h
C	Franco-arcillosa; Franco-arcillo-limosa; Arcillo-arenosa	Poco permeable	13 - 38 mm/h
D	Arcillosa	Menor permeabilidad y mayor escorrentía	< 13 mm/h

Tomado de [18].

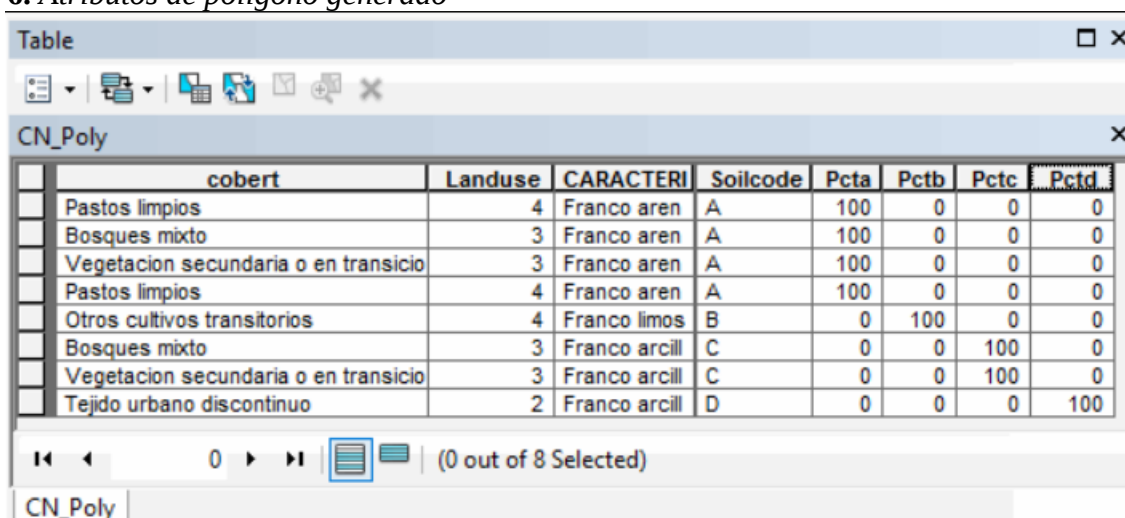
Seguido, se realiza la clasificación de acuerdo con los distintos usos del suelo a partir de la siguiente clasificación.

Figura 5. *Reclasificación de suelo según su uso*

Clasificación original		Reclasificación	
Numero	Descripción	Numero	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados en espacios abiertos	2	Residencial media
22	Poblados de baja intensidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		
43	Bosques mixtos		
31	Tierra fértil	4	Agricultura
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Tomado de [18].

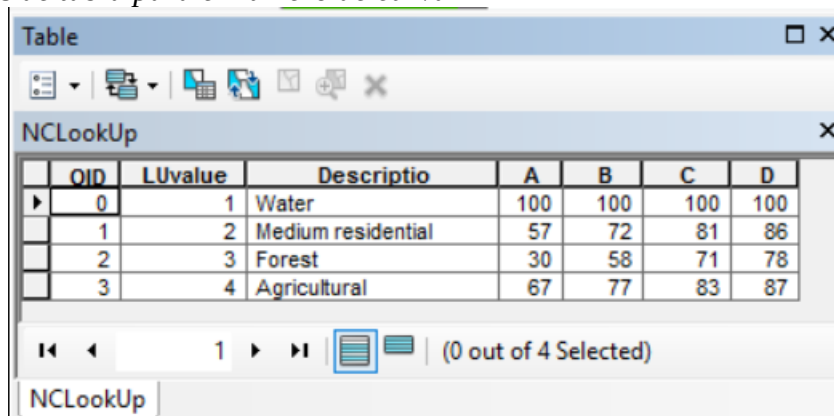
Después, se intersecan estos mapas en ArcGIS obteniendo así un Shapefile nuevo de polígonos con su respectiva combinación de tipo y uso del suelo. Con la tabla de atributos del mapa generado se crean y rellenan los atributos Soilcode, Pcta, Pctb Pctc, Pctd, viéndose de esta forma.

Figura 6. *Atributos de polígono generado*


	cobert	Landuse	CARACTERI	Soilcode	Pcta	Pctb	Pctc	Pctd
	Pastos limpios	4	Franco aren	A	100	0	0	0
	Bosques mixto	3	Franco aren	A	100	0	0	0
	Vegetacion secundaria o en transicio	3	Franco aren	A	100	0	0	0
	Pastos limpios	4	Franco aren	A	100	0	0	0
	Otros cultivos transitorios	4	Franco limos	B	0	100	0	0
	Bosques mixto	3	Franco arcill	C	0	0	100	0
	Vegetacion secundaria o en transicio	3	Franco arcill	C	0	0	100	0
	Tejido urbano discontinuo	2	Franco arcill	D	0	0	0	100

Tomado de [18].

Finalmente, se crea en ArcGIS la tabla NCLookUp como archivo “.dbf” para calcular el ráster de Número de curva con los mapas, la tabla y el software HEC-GeoHMS. Las especificaciones de la tabla se deben añadir de la siguiente manera.

Figura 7. *Atributos de tabla para el número de curva*


	OID	LUvalue	Descriptio	A	B	C	D
	0	1	Water	100	100	100	100
	1	2	Medium residential	57	72	81	86
	2	3	Forest	30	58	71	78
	3	4	Agricultural	67	77	83	87

Tomado de [18].

Para realizar el modelo de forma adecuada hay que considerar otros componentes físicos, hidrológicos y morfológicos de la cuenca, siendo estos abstracción inicial, porcentaje de impermeabilización, caudal observado, flujo base, precipitación, área y perímetro de la

microcuenca, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal, tiempo de concentración y tiempo de retardo, así como establecer especificaciones de control en el software HEC-HMS como fecha de inicio y finalización, tiempo de inicio y finalización y el intervalo de tiempo en que se hará la medición del modelo.

Caudal ecológico: En esta sección se hará la descripción de los cálculos aplicados para la determinación del caudal ecológico según la metodología propuesta por la WWF (World Wildlife Fund).

Definición de objetivos ambientales. Estos representan el estado ecológico deseado que se busca alcanzar o mantener, para lo cual se requiere determinar el caudal ecológico del cuerpo de agua a analizar, siendo una microcuenca en este caso. Estos objetivos establecen una relación entre el valor de conservación y la implicación de los usos productivos del agua para alcanzar dicho estado.

La determinación del objetivo depende de un análisis del estado de la funcionalidad ecológica y las posibilidades de conservarla, mejorarla o restaurarla, esto considerando la importancia ecológica y presión de uso del agua. Sin embargo, se puede realizar directamente si se conoce la normativa ambiental y si existe un acuerdo entre usuarios, comunidades y autoridades competentes.

La clasificación de los objetivos con sus respectivos indicadores ecológicos y de gestión del agua se muestran en la siguiente tabla [17].

Tabla 7. *Clasificación de objetivos ambientales*

Objetivo Ambiental	Estado ecológico deseado	Estrategia de conservación	Indicadores ecológicos	Indicadores de gestión hídrica
A	Muy bueno	Conservación o reserva	Río en condiciones naturales que conserva todos sus componentes. Con condiciones inalteradas, sin distorsión o de escasa importancia. Sin alteraciones geomorfológicas ni fisicoquímicas.	Zonas de conservación o reservas de agua, generalmente en cuencas altas, zonas de captación y alimentación a grandes usuarios. Máxima captación que mantiene el máximo nivel de conservación.
B	Bueno	Manejo o restauración	El régimen natural presenta leves alteraciones. Los indicadores de calidad y biológicos no exceden desviaciones leves de las condiciones inalteradas. Conserva la diversidad de especies con pérdidas mínimas o cambios en densidades.	Pequeños usuarios y grandes transferencias de volúmenes comprometidos aguas abajo. Abastecimiento de muy bajo impacto con aguas negras aisladas. Cauces libres sin actividad invasora y contaminación de muy bajo impacto. Uso controlado con restauración ecológica asequible.
C	Moderado	Conectividad o rehabilitación	Indicadores de calidad y biológicos desviados de las condiciones inalteradas. Permanecen especies sensibles, aunque dominan las tolerantes; se mantiene cierta funcionalidad alterada en el ecosistema. Las alteraciones significativas de las condiciones naturales explican estos cambios.	Extracción importante de aguas superficiales y subterráneas, sin sobreexplotación. Cauces con problemas de delimitación por actividades invasivas. Descargas de aguas residuales evidentes, mas no dominantes. Infraestructura presente para mejorar las condiciones de gestión.
D	Fuertemente modificado	Recuperación	Los indicadores de calidad y biológicos no reflejan las condiciones naturales. Se presentan severas alteraciones de la estructura y función del ecosistema. Hay presencia de especies invasoras (p.e. lirio.). Las condiciones hidrológicas, geomorfológicas o fisicoquímicas explican estos cambios.	Zona con sobreexplotación de fuentes superficiales y subterráneas, tramos secos, cauces invadidos, extracción de materiales con impactos severos en la geomorfología del cauce. Clara evidencia de aguas residuales y funcionamiento del cauce como drenaje. El río se considera insalubre.

Tomado de [17].

Importancia Ecológica. Consiste en la riqueza biológica, tanto de especies, hábitats y ecosistemas, su singularidad, rareza y grado de amenaza, que dependen del régimen hidrológico. Conocer la importancia ecológica del área de estudio mediante estas características, permite matizar el mérito ambiental que la cuenca posee para ser conservada. De manera conceptual, la importancia ecológica puede evaluarse conforme a los aspectos bióticos, abióticos y la presencia de alteración hidrológica en el régimen de caudales [17].

Tabla 8. *Importancia ecológica*

Importancia ecológica	Aspectos bióticos	Aspectos abióticos	Alteración hidrológica
Muy alta	Una o más especies endémicas en la región y el país que además tienen relevancia internacional.	Hábitats únicos por su diversidad y funcionamiento, que mantienen su estructura natural e integridad ecológica asociada a los servicios ecosistémicos aportados intactos. La zona de captación se conserva.	Nula o mínima. Se conserva el régimen natural.
Alta	Al menos una especie de relevancia regional o nacional bajo algún estado de protección	Hábitats únicos por su diversidad y funcionamiento en los que predomina su estructura natural, básicamente conservan su integridad ecológica y, en consecuencia, los servicios ecosistémicos que aportan. La zona de captación se conserva.	Presencia mínima de infraestructura antropogénica (camino, granjas, descargas domésticas de aguas residuales). Alteraciones moderadas al régimen natural.
Media	Presencia de poblaciones de diferentes especies, de relevancia regional por su aportación a servicios ecosistémicos o al desarrollo socioeconómico.	La zona de captación y los hábitats se encuentran moderadamente alterados. Conservan en alguna medida su funcionamiento, estructura y servicios básicos, a pesar de haber experimentado cambios físicos.	Presencia evidente de infraestructura antropogénica. Alteraciones evidentes y significativas, pero se mantienen ciertos componentes del régimen hidrológico.

Importancia ecológica	Aspectos bióticos	Aspectos abióticos	Alteración hidrológica
Baja	Nula o muy baja presencia de especies (peces o macroinvertebrados) y vegetación totalmente perturbada.	Zona de captación sometida a fuerte presión por el agua y el cambio de uso del suelo. Cauces invadidos, obstruidos, abandonados, modificados, canalizados o destruidos por actividades de extracción, cuyos cambios en casos extremos son irreversibles. Integridad ecológica completamente perdida y en ocasiones solo se conservan los servicios más básicos.	Alta presencia de infraestructura antropogénica. Régimen completamente alterado.

Tomado de [17].

Presión de uso del agua. Se determina a partir de la relación en porcentaje del volumen asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca, conforme a la información publicada por la Comisión Nacional del Agua [17].

Tabla 9. *Presión de uso del agua*

Presión de uso	
Muy alta	$\geq 80 \%$
Alta	$\geq 40 \%$
Media	$\geq 11 \%$
Baja	$\leq 10 \%$

Tomado de [17].

Asignación de objetivos ambientales. La importancia ecológica y la presión de uso sobre el recurso permiten reconocer las necesidades ambientales del agua conforme a la vocación específica de cada cuenca o tramo en particular, de acuerdo con las reglas de decisión o criterios mostrados en la siguiente figura.

Figura 8. *Matriz de objetivos ambientales*

Importancia ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	B	C
	Media	A	B	C	C
	Baja	A	B	C	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
		Presión de uso			

Tomado de [17].

Esta definición del estado ecológico deseado mediante el uso de objetivos ambientales permite distinguir diferentes estrategias de cara a la conservación de la cuenca de forma congruente, transparente y asequible, conforme a la importancia ecológica y a la presión de uso existente [17].

Finalmente se asigna el volumen de caudal según el objetivo ambiental determinado.

Tabla 10. *Caudal ecológico según objetivos ambientales*

Objetivo ambiental	Estado de conservación	Caudal ecológico %	
		Perenne	Temporal
A	Muy bueno	≥ 40	≥ 20
B	Bueno	25 - 39	15 - 19
C	Moderado	15 - 24	10 - 14
D	Deficiente	5 - 14	5 - 9

Tomado de [17].

3.3 Fase 2. Determinación de la Huella Hídrica de las actividades económicas de la cuenca.

Tabla 11. Desarrollo metodológico Fase 2

Objetivos	Actividades	Descripción
Determinar la Huella Hídrica de las actividades agropecuarias con mayor afectación en la subcuenca del río Tona mediante un modelo de cuantificación, estableciendo así el volumen de agua consumida.	Trabajo de campo para identificar las actividades agropecuarias en la zona de estudio	Salida de campo a la alcaldía y veredas de Tona para identificar y/o actualizar las actividades agropecuarias que se desarrollan en el área de estudio
	Recolección de información sobre consumo hídrico	Se recolectará por medio de fuentes como la alcaldía de Tona para realizar la descripción de las actividades agropecuarias que se llevan a cabo en la zona de estudio
	Cálculo de Huella Hídrica (verde, azul y gris) de la zona de estudio.	Según la metodología propuesta por Hoekstra (ver ítem 3.3.2)
	Análisis de mapas de coberturas según el uso de suelo y delimitación de áreas actividades agropecuarias.	A partir de las capas de uso y tipos de suelos obtenidas se crea un mapa diferenciando las zonas naturales de las explotadas

3.3.1 Consumo hídrico

Para poder establecer la demanda hídrica de los cultivos es necesario considerar los aspectos y cálculos que se especifican en esta sección.

Requerimiento de agua azul y verde para los cultivos. Para realizar el cálculo de requerimiento hídrico de los cultivos es necesario utilizar el software CROPWAT 8.0 que aplica el método FAO Penman-Monteith. Con este se determina la evapotranspiración (ET) de los cultivos de acuerdo con los datos ingresados, los cuales se pueden definir en tres variables: climáticas, de cultivo y de suelo y manejo ambiental.

Las climáticas comprenden valores de precipitación acumulada mensual, temperatura media mensual, humedad relativa, velocidad del viento (km/día) y radiación solar efectiva.

Los datos de cultivo hacen referencia al tipo de cultivo, variedad y etapas de desarrollo que se deben considerar al evaluar la evapotranspiración, Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las

características radicales del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

Los factores como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Sin embargo, los que se consideran al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo [19].

Los datos solicitados por el software se muestran en las siguientes figuras según cada tipo de variable.

Figura 9. Información climática para cálculo de ET

Month	Min Temp	Max Temp	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/day	hours	MJ/m ² /day	mm/day
January							
February							
March							
April							
May							
June							
July							
August							
September							
October							
November							
December							
Average							

Tomado de [20].

Figura 10. *Precipitación mensual para cálculo de ET*

	Rain	Eff rain
	mm	mm
January		
February		
March		
April		
May		
June		
July		
August		
September		
October		
November		
December		
Total		

Tomado de [20].

Para las variables de cultivo es necesario definir el valor del factor de cultivo K_c el cual varía según la etapa de crecimiento y tipo de cultivo, cuyas especificaciones se muestran en la “Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” [19].

Los datos requeridos por el software se muestran en la siguiente imagen.

Figura 11. *Datos de cultivo para cálculo de ET*

Crop Name Planting date 13/06 Harvest

Kc Values

initial development mid-season late season total

Rooting depth (m)

Critical depletion (fraction)

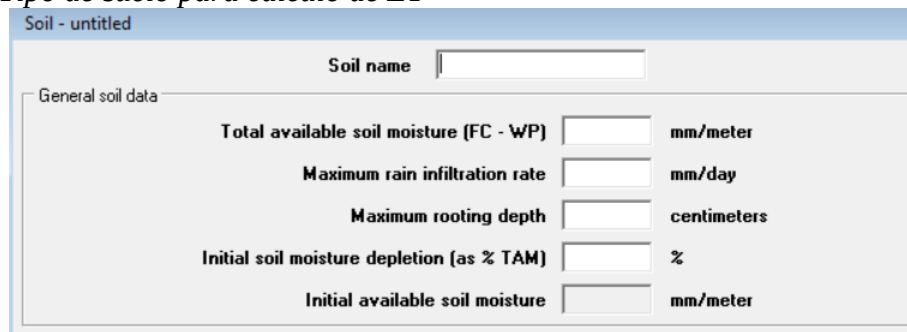
Yield response f.

Crop height (m) (optional)

Tomado de [20].

Finalmente, en la siguiente imagen se muestran las características del suelo a considerar solicitadas por el software.

Figura 12. Tipo de suelo para cálculo de ET



Soil - untitled

Soil name

General soil data

Total available soil moisture (FC - WP) mm/meter

Maximum rain infiltration rate mm/day

Maximum rooting depth centimeters

Initial soil moisture depletion (as % TAM) %

Initial available soil moisture mm/meter

Tomado de [20].

Con esta información el software genera los resultados de evapotranspiración de cada cultivo a partir de las especificaciones dadas en cada tipo de variable. A su vez, se requieren los datos de altitud, longitud y altura para generar resultados más precisos de evapotranspiración “ET”, el cual representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar [19].

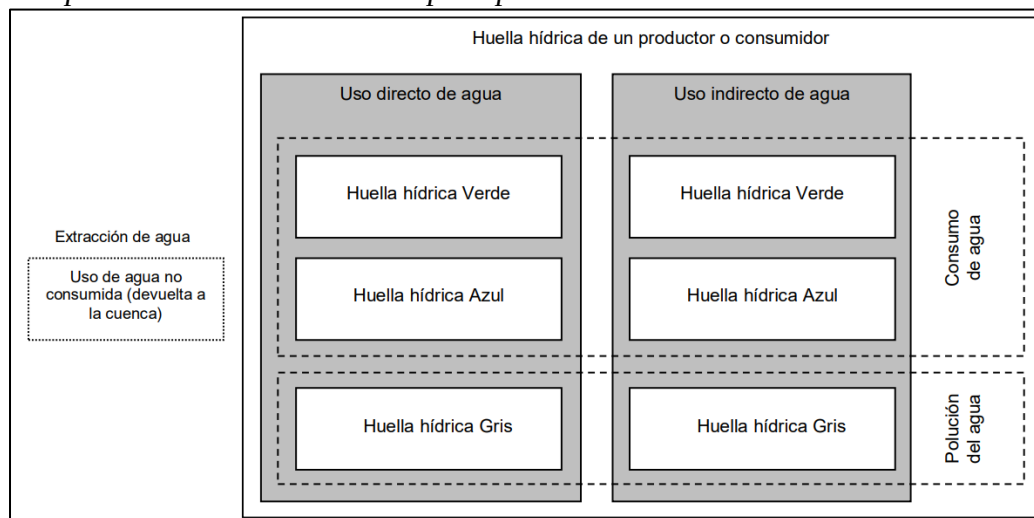
Agua virtual de HH azul y verde. Habiendo definido el término de Agua Virtual, y entendiendo este valor como la cantidad de agua que ha sido necesario utilizar para la producción de un cultivo. Se calcula a partir de la división del requerimiento hídrico verde y azul (m³/ha) sobre el rendimiento de producción del cultivo (ton/ha), obteniendo así valores de AV verde y azul en m³/ton.

Agua virtual de HH gris. Este valor sólo se consideró como la carga contaminante a partir del porcentaje de lixiviación del nitrógeno en la cantidad de fertilizante aplicado en el cálculo de la HH gris expuesto en el siguiente apartado.

3.3.2 Huella Hídrica

Aquí se expondrán los cálculos aplicados para definir los indicadores de Huella Hídrica (verde azul y gris) de los cultivos analizados, todo según la metodología estipulada por Hoekstra.

Figura 13. Componentes de Huella Hídrica para productos.



Tomado de [21].

HH Verde. La huella hídrica verde es un indicador del uso humano de la llamada agua verde. El agua verde se refiere a las precipitaciones en tierra que no se escurren ni recargan las aguas subterráneas, sino que se almacenan en el suelo o permanecen temporalmente sobre el suelo o la vegetación. Finalmente, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas [21].

$$HH_{verde} = \text{Agua evapotranspirada} + \text{agua incorporada} \quad (1)$$

HH Azul. La huella hídrica azul es un indicador del uso consuntivo de las denominadas aguas azules, es decir, agua dulce superficial o subterránea. El término "uso consuntivo de agua" se refiere a uno de los cuatro casos siguientes:

El agua se evapora; se incorpora al producto; no vuelve a la cuenca y agua no retorna en el mismo período, por ejemplo, se extrae en un período de escasez y se devuelve en un período húmedo [21].

$$HH_{Azul} = \text{Agua evaporada} + \text{agua incorporada} + \text{agua que no retorna} \quad (2)$$

HH Gris. Se define como el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes en función de las concentraciones naturales de fondo y de las normas de calidad del agua existentes.

En este caso sólo se tuvo en cuenta la contaminación por nitrógeno lixiviado resultante de la aplicación de fertilizante a los cultivos, teniendo en cuenta los siguientes datos

Tasa de lixiviación del nitrógeno. 10% del total aplicado (kg/ha).

Concentración máxima permitida. 30 mg/litro (kg/m³).

Concentración natural. 0.01 mg/litro (kg/m³).

El valor de HH gris se calculó dividiendo la cantidad de fertilizante aplicado (L) sobre la diferencia entre concentración máxima y natural [21].

$$HH_{gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad (3)$$

HH Total. La huella hídrica total del proceso de cultivo de plantas o árboles (WF proc) es básicamente la suma de los componentes verde, azul y gris:

$$HHTotal = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} \quad (4)$$

3.4 Fase 3. Identificación de los Hotspots ambientales

Tabla 12. *Desarrollo metodológico Fase 3*

Objetivos	Actividades	Descripción
Identificar los Hotspots ambientales mediante un análisis comparativo entre oferta y demanda en la zona de estudio, proponiendo así lineamientos de gestión sobre el recurso hídrico.	Identificación de puntos críticos espaciales y/o temporales de consumo hídrico	Identificar actividades o períodos de tiempo que superen la oferta hídrica de la cuenca
	Evaluación de sostenibilidad de Huella Hídrica en la microcuenca	Considerando afectaciones en aspectos económicos, sociales y ambientales para tener una evaluación sostenible más acertada.
	Comparación entre oferta y demanda hídrica calculadas. Análisis comparativo de la huella virtual por cultivo respecto los resultados publicados por Hoekstra y otros autores	A partir de los resultados calculados sobre el balance hídrico, caudal ecológico calculado y huella hídrica de los productos.

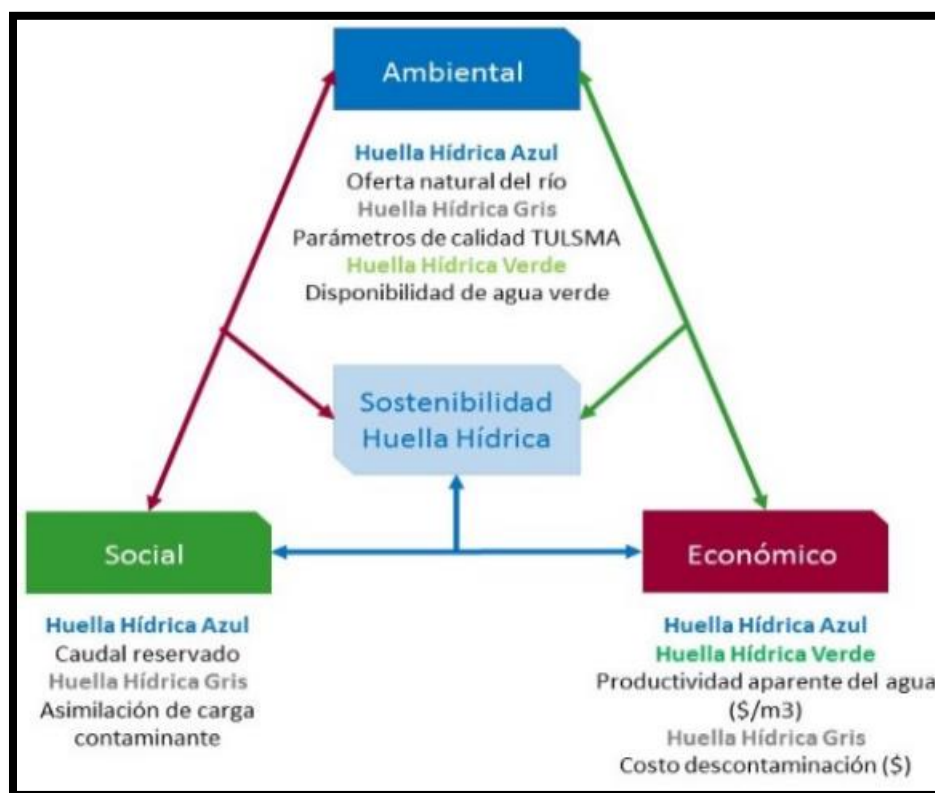
3.4.1 Análisis de sostenibilidad para Huella Hídrica

Para evaluar la sostenibilidad de la Huella Hídrica total de una cuenca se puede comparar la huella hídrica verde y azul con la disponibilidad de agua verde y azul, así como comparando la huella hídrica gris con la capacidad de asimilación de residuos presentes en la cuenca.

La sostenibilidad de la HH de una cuenca se puede analizar desde 3 perspectivas: ambiental, social y económica. Cada una debe cumplir con unos criterios sostenibles mediante los que se considera si la cuenca se considera sostenible o no [21], [22].

Criterios de sostenibilidad para la microcuenca. El manejo de cuencas ha pasado de un enfoque físico de conservación y utilización del agua y suelo a la integración del desarrollo social, económico y ambiental. De modo que, el desarrollo sustentable implica integrar de una forma equilibrada las metas y objetivos ambientales con el ámbito social y económico [22], [23].

Un análisis de sostenibilidad a partir de los indicadores de Huella Hídrica implica entender la relación que hay entre cada criterio (social, económico, ambiental) e indicador de Huella Hídrica (verde, azul, gris). Para esto se muestra la siguiente ilustración.

Figura 13. Criterios de sostenibilidad e indicadores de HH

Tomado de [23].

Análisis de sostenibilidad HH Verde. La sostenibilidad de la HH Verde se puede considerar como la capacidad de una cuenca o espacio geográfico para satisfacer la necesidad de agua verde de las actividades que la requieren [21], [23].

Este se determina teniendo en cuenta el índice de escasez de agua verde, determinado con la siguiente ecuación.

$$Everde\ mensual = \frac{\sum HHVerde\ mensual}{Disp. Averde}$$

La disponibilidad de agua verde en este caso fue considerada como el valor de evapotranspiración de todos los cultivos a nivel mensual, este valor fue determinado mediante el software CROPWAT 8.0.

Análisis de sostenibilidad HH Azul. Este análisis fue definido a partir del índice de escasez comparando la HH Azul que se obtuvo del requerimiento hídrico azul de todos los cultivos a nivel mensual, con la oferta natural disponible determinada según la modelación hidrológica de la cuenca, y teniendo en cuenta el caudal ecológico calculado [23].

Adelante se muestran las ecuaciones con las que se determinó la oferta de agua natural azul mensual y el índice de escasez de agua azul mensual respectivamente.

$$O. Anatural regulada azul = O. natural mensual - caudal ecológico.$$

$$E_{azul\ mensual} = \frac{\sum HH_{Azul\ mensual}}{O. Anatural\ regulada}$$

Análisis de sostenibilidad HH Gris. Este se define como índice de contaminación del agua o NCA, y se determinó a partir de la diferencia de HH Gris mensual total calculada mensualmente con la oferta natural de agua azul regulada determinada en el análisis de sostenibilidad de la HH Azul [23].

El cálculo se muestra en la siguiente ecuación.

$$NCA\ mensual = \frac{\sum HH_{Gris\ mensual}}{O. Anatural\ regulada}$$

3.4.2 Identificación de Puntos Críticos o Hotspots Ambientales

De acuerdo con el manual de Análisis de Huella Hídrica propuesto por Arjen Hoekstra, la huella hídrica en una cuenca es insostenible desde el punto de vista medioambiental y cuando se vulneran las necesidades hídricas ambientales o cuando la contaminación supera la capacidad de asimilación de residuos.

Esta superación de los límites de tolerancia naturales de la cuenca puede ser si bien considerados bajo los criterios ambientales, sociales y económicos, también se pueden determinar de forma espacial y temporal. Es por esto por lo que en el presente proyecto de investigación se hace la identificación de hotspots de forma temporal, identificando los meses en que el requerimiento hídrico supere la oferta natural hídrica, y de forma espacial identificando los espacios en que esta oferta es superada por la demanda, lo que se puede definir como zonas vulnerables o de sobreexplotación [21].

Este análisis se realiza de forma comparativa, por lo que no hay un cálculo o ecuación específica.

4. Resultados

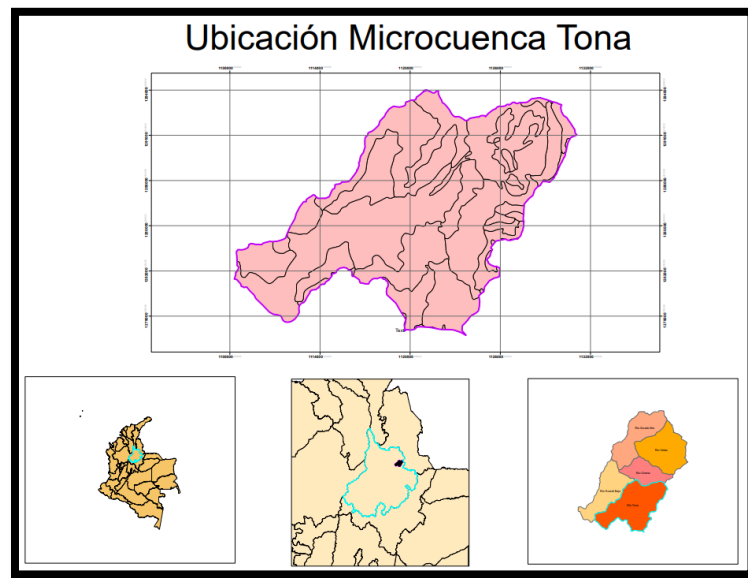
4.1 Resultados Fase 1

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la estimación de la oferta hídrica de la microcuenca de Tona.

4.1.1 Delimitación de zona de estudio

Se escogió la microcuenca de Tona ya que es el río que mayor caudal aporta al abastecimiento de la población de la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana.

Después de esta selección fue necesario hacer una caracterización de los aspectos más importantes de la zona de estudio para la elaboración del proyecto.

Figura 14. *Ubicación geográfica microcuenca de Tona*

Identificación de población de estudio. La población de estudio fue seleccionada según las actividades económicas más desarrolladas en la zona, y debido a que sólo se encontró producción agrícola la población a estudiar se definió como los cultivos con mayor rendimiento. La obtención de estos cultivos se hizo mediante una consulta a la dependencia de agricultura de la alcaldía de Tona, y tras establecer los cultivos, se clasificaron en dos grupos, siendo permanentes y transitorios.

Tabla 13. *Población de estudio seleccionada*

Cultivos	
Permanentes	Transitorios
Café	Papa
Aguacate	Cebolla
Mora	Tomate
Plátano	Maíz
	Yuca
	Habichuela

4.1.2 Estimación de la oferta hídrica de la cuenca mediante un modelo lluvia-escorrentía definiendo de esta forma el volumen de agua disponible.

Se tuvo en cuenta diversas variables climáticas, como la temperatura, la humedad, la radiación solar y la velocidad del viento, al calcular la oferta hídrica durante los años de estudio.

Los aspectos de temperatura y precipitación fueron procesados para generar las isoyetas, que son representaciones gráficas de los cambios en la precipitación en la cuenca a lo largo de los años de estudio, y las isotermas, que muestran los cambios en la temperatura en la cuenca durante el mismo período [24].

A continuación, se presentan los resultados mensuales de precipitación y temperatura para cada año de estudio en las siguientes tablas.

Tabla 14. Resultados de precipitación en los años de estudio

Precipitación Ac (mm)		
Mes	2017	2020
Enero	33,6	41,2
Febrero	23,2	40,3
Marzo	145,6	40,8
Abril	128,5	47,2
Mayo	158,7	29,1
Junio	113,5	52,1
Julio	100,6	56,1
Agosto	66,2	85,9
Septiembre	100,9	129,5
Octubre	98,8	131,9
Noviembre	105,7	137,5
Diciembre	25,4	29,475

Es necesario tener en cuenta que estos valores son el producto de la pre mediación de las precipitaciones acumuladas de las estaciones climáticas escogidas para la extracción de los datos de precipitación.

Tabla 15. Resultados de temperatura media en los años de estudio

Temperatura Media (C)		
Mes	2017	2020
Enero	15,58	15,96
Febrero	16,04	17,10
Marzo	16,70	17,06
Abril	19,72	20,04
Mayo	16,84	18,32
Junio	16,71	16,43
Julio	16,61	17,11
Agosto	16,82	17,39
Septiembre	16,68	16,93
Octubre	16,46	17,01
Noviembre	15,42	16,29
Diciembre	15,40	15,95

Estos valores son el producto de la premediación de las mediciones de temperatura media de las estaciones climáticas escogidas para la extracción de los datos de precipitación.

Variación climática. Las siguientes figuras representan las variaciones de precipitación o isotermas y las variaciones de temperatura o isotermas en el área de la microcuenca de estudio para los años analizados.

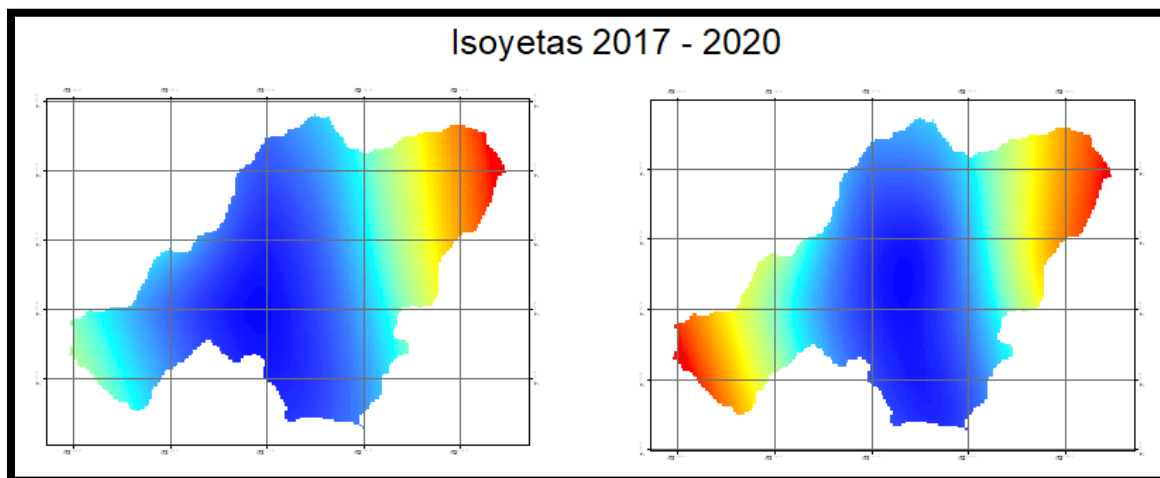
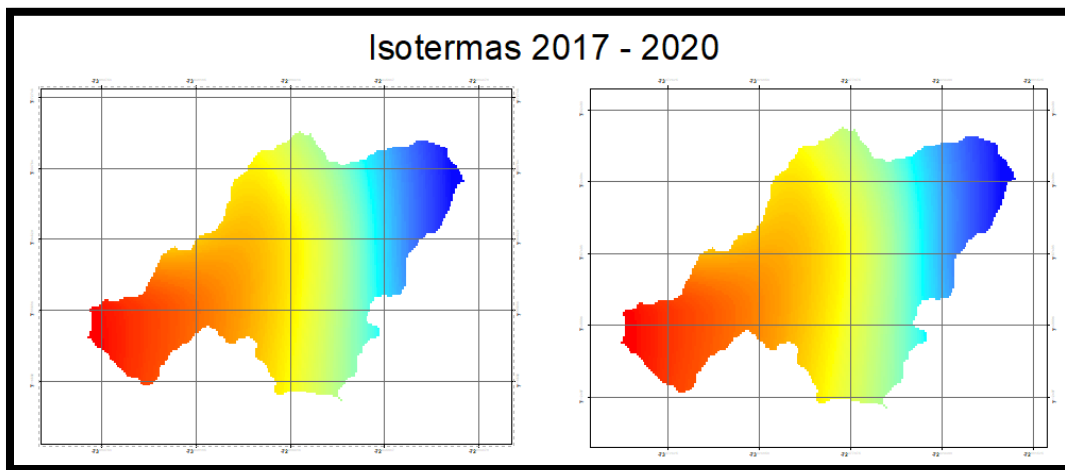
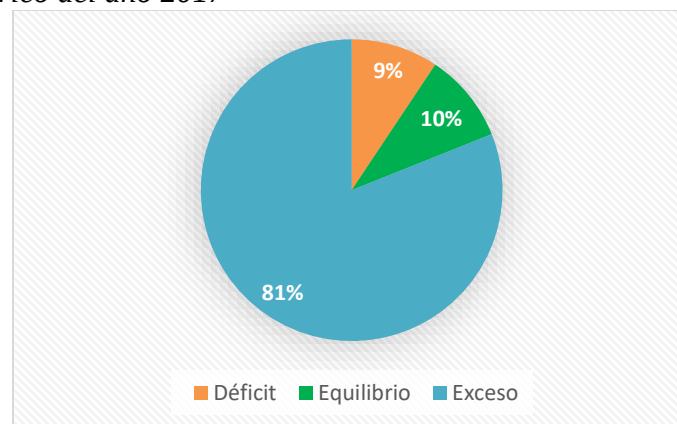
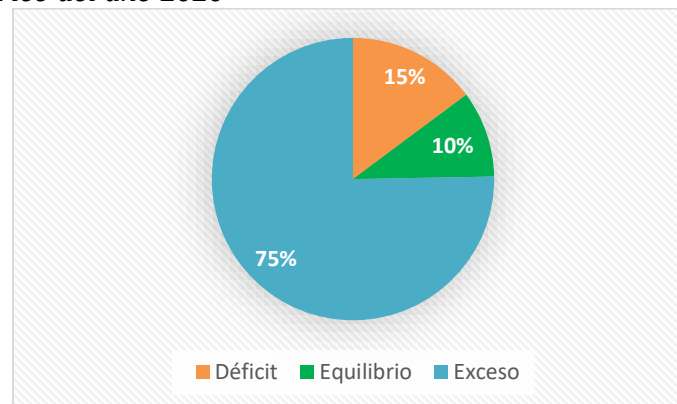
Figura 15. Isoyetas microcuenca de Tona

Figura 16. *Isotermas de la microcuenca de Tona*

Balance Hídrico:

Figura 17. *Balance Hídrico del año 2017***Figura 18.** *Balance Hídrico del año 2020*

De estas gráficas lo que se puede evidenciar es la diferencia entre exceso y déficit. Ya que se presentó una disminución del exceso para el 2020 de 6% y aumento en el déficit de 6% también,

lo cual se debe a las variaciones en las temperaturas y precipitaciones ya que el año húmedo fue el 2017 y el seco el 2020, aunque la variación no fue drástica porque la cuenca se encuentra en una zona templada, relativamente alta (1.893 msnm) y cercana al páramo de santurban, de ahí a que el exceso sea mayor al 70% en ambos años.

Modelo Hidrológico. Las figuras 19 y 20 representan el modelo hidrológico obtenido a partir del procesamiento de datos de caudales, precipitaciones y variaciones de temperatura durante los dos años de estudio en la microcuenca de Tona.

Figura 19. *Modelo hidrológico de precipitación 2017*

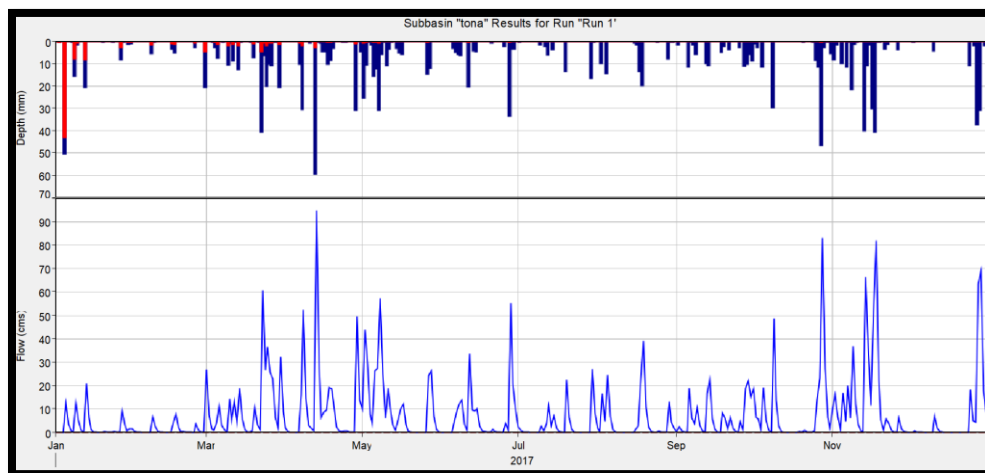
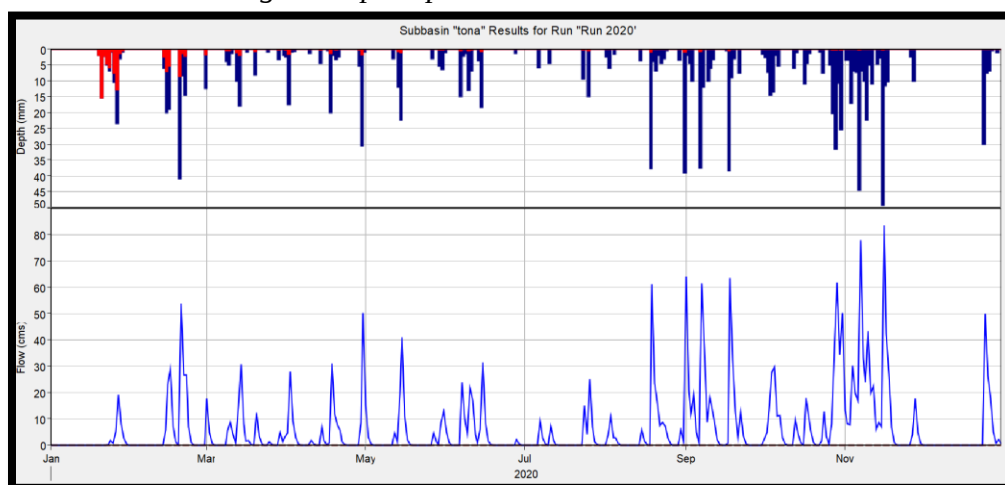


Figura 20. *Modelo hidrológico de precipitación 2020*



Caudales ecológicos y asignación de objetivo ambiental. Hay varias especies que habitan en los distintos biomas presentes en la microcuenca, loros churricos (*Hapalopsitacca amazonina* y *Pyrrhura caliptera*) en peligro por comercio ilegal y pérdida de hábitat en otros páramos, así como los loros (*Pyrrura calliptera*) ya que los bosques andinos y altoandinos son de sus últimos hábitats. Águilas andinas (*Geranoaetus melanoleucus*) también en peligro por la pérdida de sus nichos trófico y espacial. Por esto, se considera una importancia muy alta, tipo A [3].

Por otra parte, también es necesario considerar la presión de uso del agua que hay sobre la microcuenca, para esto se tienen en cuenta las actividades que se realizan en la zona, y se encontró que el suelo se clasifica en tierras de producción (53.3%) y de protección (46.7%), considerando dentro del primer grupo actividades agropecuarias, agroforestales, forestales y mineras [3].

A partir de esta información, según el “Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la microcuenca de Tona” la CDMB define esta microcuenca como una de las fuentes abastecedoras para la población del área metropolitana de Bucaramanga, ya que tiene buena capacidad de recuperación y un porcentaje bajo de uso muy inadecuado del suelo [3].

Por lo anterior se considera que tiene una presión de uso alta, tipo B.

De acuerdo con la matriz de asignación de objetivos ambientales, y teniendo en cuenta que la importancia ecológica es muy alta y la presión de uso es alta, se encontró que el objetivo ambiental para esta microcuenca es B.

Con esta información se definió que el caudal ecológico se encuentra en un rango de 25 – 39%, tomando un 33% para los cálculos que implican este valor.

A partir de los resultados de la modelación hidrológica se encontró que, para el 2017 el caudal fue de 1215 L/s, y para el 2020 fue de 1086 L/s. Sin embargo, considerando la ausencia de caudal base este se consideró como 2500 L/s.

2.5m³/s

216.000 m³/día; 6696; 6480; 6048; 78.840

4.2 Resultados Fase 2

4.2.1 Consumo hídrico

Por otra parte, de los cultivos analizados se identificó que el de mayor consumo entre los permanentes fue el café y la cebolla en el caso de los transitorios para ambos años. Por esto, se hace un mayor énfasis en estos dos productos.

Figura 21. HH de cultivos para el año 2017

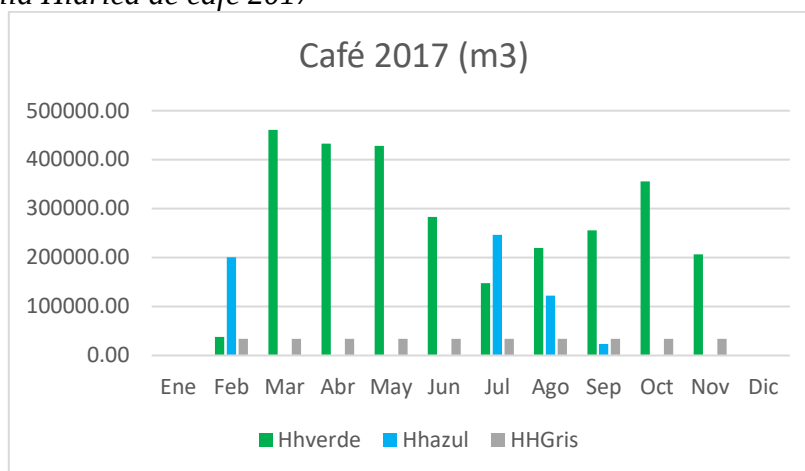
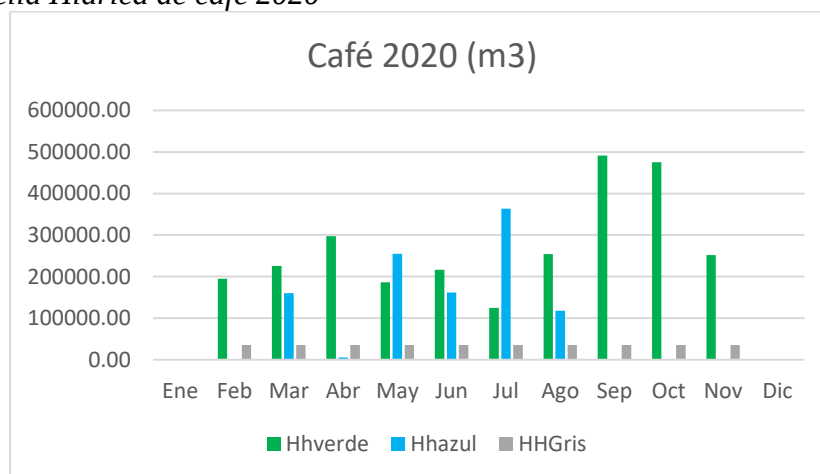
2017					
Cultivo	HH Verde (m3)	HH Azul (m3)	HH Gris (m3)	TOTAL	%
Aguacate	706077	43416	62308,5	811801,5	5%
Café	2827930	593205	338528,2	3759663,2	24%
Plátano	1294540	253240	149336,6	1697116,6	11%
Mora	74295	330	2223,4	76848,4	0,5%
Cebolla	3783720	824111	2532430,5	7140261,5	46%
Papa	1142155	169520	2223,4	1313898,4	8%
Yuca	206815	38500	135619,3	380934,3	2%
Tomate	152702	24914	29934,9	207550,9	1%
Habichuela	36492	790	2276,8	39558,8	0,3%
Maíz	178486	34364	38001,9	250851,9	2%
TOTAL	10403212,00	1982390,00	3292883,52	15678485,52	100%

Figura 22. HH de cultivos para el año 2020

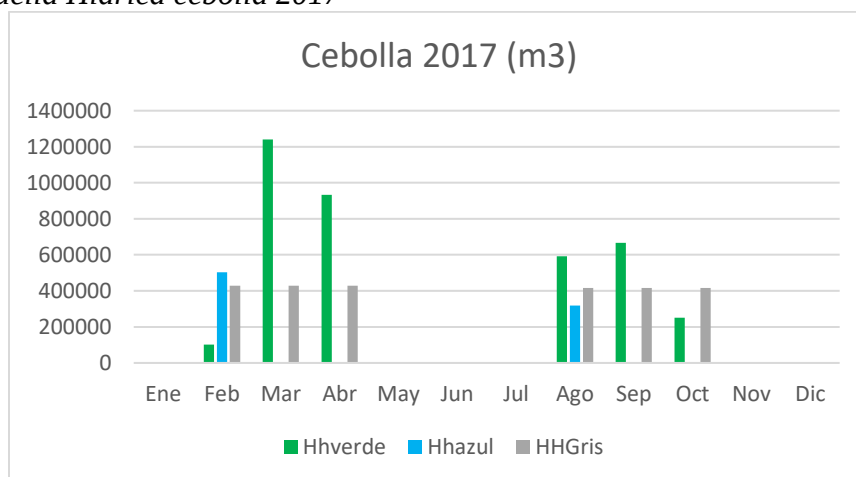
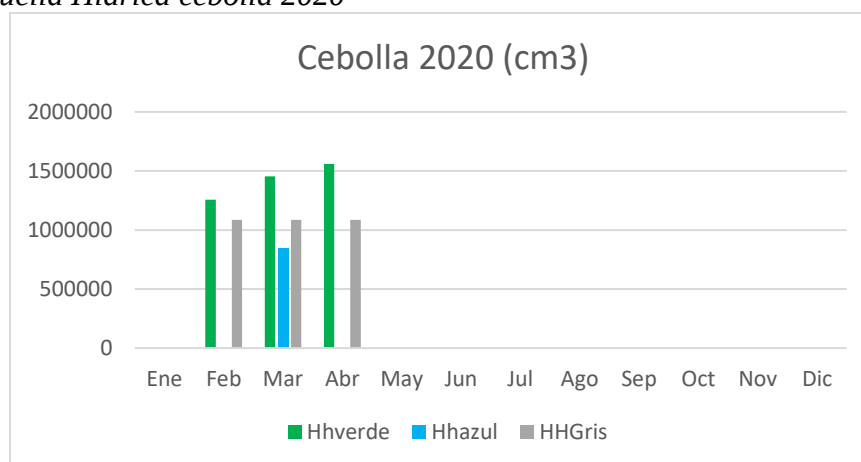
2020					
Cultivo	HH Verde (m3)	HH Azul (m3)	HH Gris (m3)	TOTAL	%
Aguacate	1187480	91840	85614,7	1364934,7	8%
Café	2717760	1063240	351333,1	4132333,1	24%
Plátano	36540	32670	2223,4	71433,4	0%
Mora	47940	9180	2223,4	59343,4	0,4%
Cebolla	4270350	845250	3260080,4	8375680,4	49%
Papa	1059700	641900	869354,8	2570954,8	15%
Yuca	49170	31215	39121,0	119506,0	1%
Tomate	79144	0	20801,1	99945,1	1%
Habichuela	21310	1850	1319,9	24479,9	0%
Maíz	104468	12660	14667,4	131795,4	1%
TOTAL	9573862,00	2729805,00	4646739,15	16950406,15	100%

Sólo estos dos productos representan un consumo de agua de más del 60% siendo en cada año respectivamente 70% y 73%, habiendo un aumento del 3% para el gasto hídrico de la cebolla en el 2020.

4.2.2 Huella Hídrica

Figura 23. *Huella Hídrica de café 2017***Figura 24.** *Huella Hídrica de café 2020*

Comparando el comportamiento de disponibilidad y consumo hídrico para el café, se puede decir que para el 2017 los meses en que la disponibilidad de agua en el suelo fue superada por el consumo en los meses de febrero y julio, a diferencia del 2020 que fue en mayo y julio. Además, se evidencia que en el segundo año hay mayor consumo de agua azul, siendo 1'057.920 m³ a diferencia del 2017 que fue 593.205 m³. Sin embargo, la producción sólo aumentó sólo un 8% en el 2020, pasando de 419 Ton a 456 Ton respectivamente.

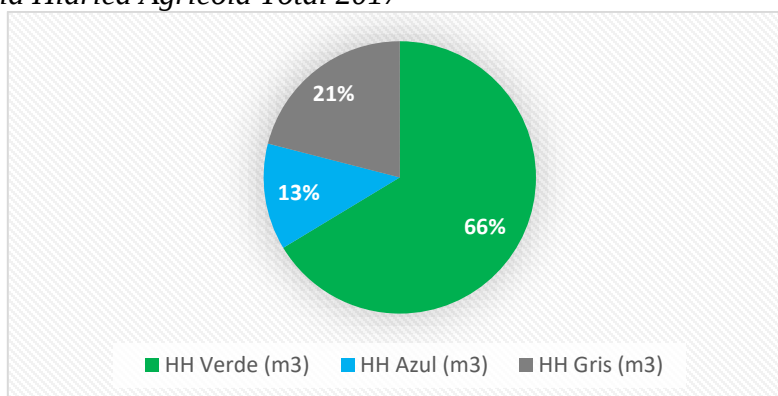
Figura 25. *Huella Hídrica cebolla 2017***Figura 26.** *Huella Hídrica cebolla 2020*

Para la cebolla se encontró que en el 2020 no hubo producción en el segundo semestre. Y sólo el mes de febrero para el 2017 presenta mayor consumo de agua frente a la disponible en el suelo. A su vez, aunque sólo haya gasto de agua en mayo, este fue más alto que la requerida en todo el 2017 con un valor de 845.250 m3 para el 2020 frente a 822.255 m3 en el 2017. Por su parte, la producción del 2020 superó la del 2017 en 58% siendo 54.230 Ton y 85.750 Ton respectivamente.

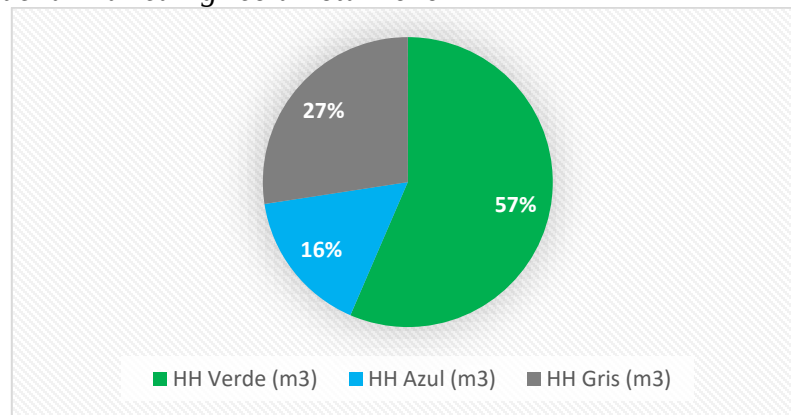
Huella Hídrica Total Anual:

Tabla 16. *Huella hídrica agrícola 2017*

AGRÍCOLA AÑO 2017		
HH	Cantidad (m3)	Porcentaje (%)
Verde	10188234,00	63,54%
Azul	1947236,00	12,14%
Gris	3898050,67	24,31%
Total	16033520,67	100,00%

Figura 27. *Huella Hídrica Agrícola Total 2017***Tabla 17.** *Huella hídrica agrícola 2020*

AGRÍCOLA AÑO 2020		
HH	Cantidad (m3)	Porcentaje (%)
Verde	9473408,00	56,30%
Azul	2727955,00	16,21%
Gris	4624618,19	27,48%
Total	16825981,19	100,00%

Figura 28. *Huella Hídrica Agrícola Total 2020*

Comparación HH Virtual según autores. En las figuras 29 y 30 se muestra la correlación entre los resultados obtenidos de huella hídrica virtual con los resultados obtenidos por autores como Mekonnen y Bohórquez [12], [25].

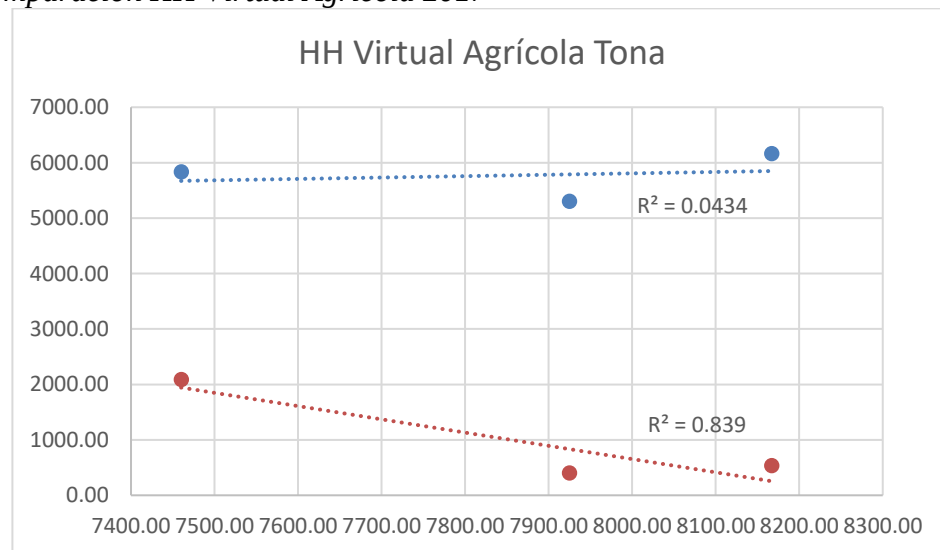
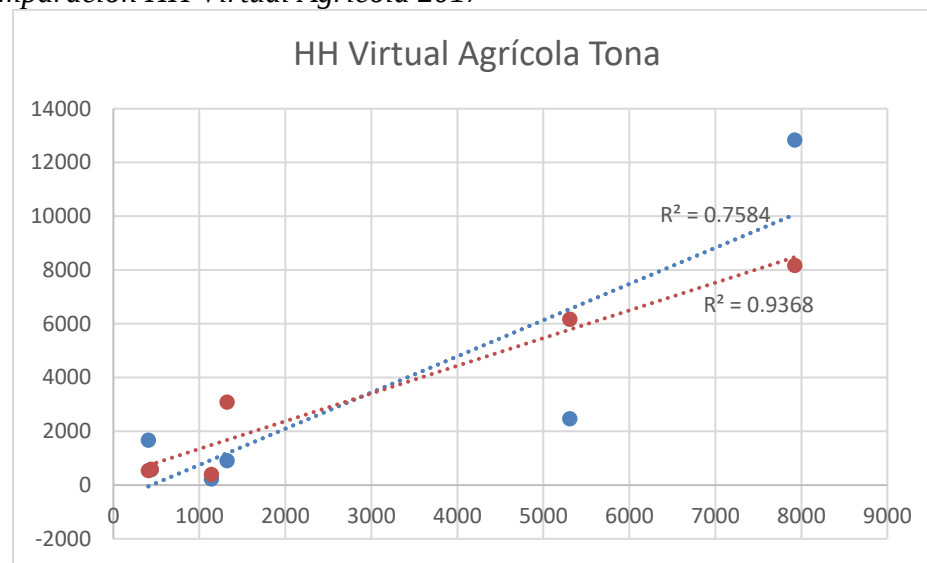
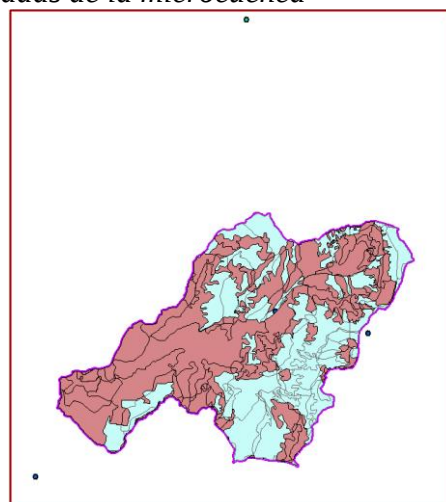
Figura 29. *Comparación HH Virtual Agrícola 2017*

Figura 30. Comparación HH Virtual Agrícola 2017

4.3 Resultados Fase 3

4.3.1 Identificación de Puntos Críticos o Hotspots Ambientales

Puntos críticos espaciales. Primero, se realizó la denotación de los puntos críticos, si bien se contaba con la presencia de estos por la superación de demanda de los cultivos especialmente en la época seca de 2020, no se esperaba que de la totalidad de la cuenca el 58.9% fuese sobre utilizada.

Figura 31. Zonas sobreexplotadas de la microcuenca

Puntos Críticos temporales. Durante el análisis, se establecieron dos puntos críticos temporales: febrero y julio del año 2017, y mayo y julio del año 2020. Estos meses fueron seleccionados debido a su importancia en el contexto estudiado. Se considera que en estos períodos ocurrieron eventos significativos o se registraron cambios relevantes que requieren una atención especial.

Estos puntos críticos temporales proporcionan una base para examinar con mayor detalle los acontecimientos y las tendencias que ocurrieron en esos momentos específicos. Se puede llevar a cabo un análisis más profundo para comprender las causas y consecuencias de los sucesos que tuvieron lugar en febrero y julio de 2017, así como en mayo y julio de 2020. Esto permitirá obtener una visión más completa y precisa de la situación estudiada.

4.3.3 Análisis de sostenibilidad de HH

La sostenibilidad de un sistema hídrico se ve afectada por diferentes factores, entre ellos, la huella hídrica verde, azul y gris. Con los datos proporcionados, podemos analizar su impacto en la sostenibilidad. La huella hídrica verde de 10,188,234 indica el consumo directo de agua de fuentes renovables, lo cual es positivo para la sostenibilidad. Sin embargo, la huella hídrica azul de 1,947,236 señala el consumo de agua superficial y subterránea, lo cual puede tener un impacto negativo en los recursos hídricos. Por último, la huella hídrica gris de 3,898,050 representa la contaminación generada en el proceso de producción y consumo de bienes y servicios, lo que también afecta negativamente la sostenibilidad. En general, se requiere un enfoque integral que promueva un menor consumo de agua azul y una reducción de la huella hídrica gris para lograr una mayor sostenibilidad en el uso de los recursos hídricos.

6. Conclusiones

Se puede afirmar que en el año 2017 hubo una mayor disponibilidad de agua en comparación con el año 2020, con un exceso de agua que superó al del 2020 en un 6 por ciento.

En el año 2020, la reducción del 9 por ciento en la presencia de agua en el suelo tuvo un impacto negativo en la producción de cultivos en la microcuenca de Tona. Este hallazgo subraya la estrecha relación entre la disponibilidad de agua en el suelo y la productividad agrícola en la región.

La microcuenca se encuentra en una situación preocupante, ya que está siendo explotada en más del 50 por ciento de su área, lo que la vuelve altamente vulnerable a experimentar una disminución drástica en su caudal, especialmente en respuesta a cambios significativos en las condiciones climáticas, como se evidencia en los resultados de BH y HH. Esta vulnerabilidad representa una amenaza seria tanto para el abastecimiento de agua en la microcuenca como para el Área Metropolitana circundante (AMB).

Referencias

- [1] A. Y. Hoekstra, “The Water FootPrint assessment manual.” 2011. [Online]. Available: www.earthscan.co.uk
- [2] Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, “Informe de sustentabilidad,” 2014. Disponible: https://concejobga.cloud/descargas/CONTROL_POLITICO_1_ACUEDUCTO_2015.pdf
- [3] Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, “Plan de Gestión Ambiental Regional,” 2014. Disponible en: http://www.cdmb.gov.co/images/documentos/gestion/planes-programas/plan-gestion-ambiental-pgar/pgar_2015-2031_cdmb.pdf
- [4] Departamento Nacional de Planeación, “Plan Nacional de Desarrollo,” 2018, Ingresado: Mayo 11, 2023. [En línea]. Disponible: www.dnp.gov.co
- [5] IDEAM. (2018). “Estudio Nacional del Agua 2018”. 2018. [En línea]. Disponible: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- [6] C. Fernando Arenas-Jiménez, S. N. Correa-Torres, and S. M. Pineda-Vargas, “Estimation of water footprints in agricultural production from Tahiti lime in La Angula Basin, Santander, Colombia”, Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <http://orcid.org/0000-0002->
- [7] A. Julián, P. Gómez, U. De Bogotá, and J. T. Lozano, “Análisis de Huella Hídrica de los sistemas productivos de tomate a campo abierto y bajo invernadero en Colombia”. 2015. [En línea]. Disponible en:

- <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1767/T065%20%281%29.pdf?s>
- [8] Corporación autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, “PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA SUBCUENCA RÍO SURATÁ,” 2006. [En línea]. Disponible en: <https://economia.uniandes.edu.co/sites/default/files/webproyectos/santurban/POMCA-DOCUMENTO-UNIFICADO-SUBCUENCA-SURATA.pdf>
- [9] R. J. Hogeboom, “The Water Footprint Concept and Water’s Grand Environmental Challenges,” *One Earth*, vol. 2, no. 3. Cell Press, pp. 218–222, Mar. 20, 2020. doi: 10.1016/j.oneear.2020.02.010.
- [10] Organización de las Naciones Unidas, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible,” 2015. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accessed May 11, 2023).
- [11] Elsevier, “Scopus - Document search,” <https://www-scopus-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/search/form.uri?display=basic#basic>.
- [12] M. M. Mekonnen and W. Gerbens-Leenes, “The water footprint of global food production,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 10. MDPI AG, Oct. 01, 2020. doi: 10.3390/w12102696.
- [13] D. Vanham and G. Bidoglio, “A review on the indicator water footprint for the EU28,” *Ecol Indic*, vol. 26, pp. 61–75, 2013, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.10.021.
- [14] D. Arévalo, J. Lozano, and J. Sabogal, “Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola - National Study of Water Footprint Agricultural Sector in Colombia,” 2011.

- [15] Cedula Builes David Edwin, “Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce,” 2013. [En línea] Disponible: https://redcol.minciencias.gov.co/vufind/Record/UNACIONAL_de2498b5ea1ac5f205045851f8716467
- [16] E. Velázquez, “AGUA VIRTUAL, HUELLA HÍDRICA Y EL BINOMIO AGUA-ENERGÍA: REPENSANDO LOS CONCEPTOS.” [Online]. Available: www.euroecolecon.org,
- [17] P. A. por Sergio Salinas Rodríguez ssalinas and wwfmexorg Alianza WWF- Fundación Gonzalo Río Arronte, “Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos Aproximaciones hidrológicas,” 2011. [En línea] Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Juan-Reyes-Gonzalez/publication/264457391_Guia_para_la_determinacion_de_caudal_ecologico_en_Mexico/links/53dfebc90cf2aede4b4a91d1/Guia-para-la-determinacion-de-caudal-ecologico-en-Mexico.pdf
- [18] P. Villegas, “Calcular número de curva con ArcGIS,” 2017. Disponible: <https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arccgis/>
- [19] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO, “Evapotranspiración del cultivo.” Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO, “Cropwat 8.0.” Disponible: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

- [21] A. Y. Hoekstra, “The Water FootPrint assessment manual,” 2011. [Online]. Available: www.earthscan.co.uk
- [22] M. G. Hinojosa-Pérez, M. Hernández-Juárez, E. M. Otazo-Sánchez, and O. A. Acevedo-Sandoval, “Indicadores de sustentabilidad a nivel cuenca,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. 19, pp. 1–10, Jul. 2022, doi: 10.29057/icbi.v10i19.8204.
- [23] H. D. Lala-Ayo and M. del Carmen Fernández-Quintana, “Analysis of the sustainability through water footprint in the Pita River microbasin, Ecuador,” *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 11, no. 1, pp. 169–234, 2020, doi: 10.24850/j-tyca-2020-01-05.
- [24] Meteoclim, “Términos peculiares en meteorología,” <https://blog.meteoclim.com/terminos-peculiares-meteorologia-iv#:~:text=Isoyeta,lluvia%2C%20nieve%20o%20granizo%20coinciden.>, May 10, 2017.
- [25] S. A. Bohorquez., A. F. Vanegas. “Evaluación de la huella hídrica agropecuaria de la microcuenca del río Suratá Bajo en el municipio de Bucaraanga. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/50794>