

Estimación de la Huella Hídrica Azul y Huella Hídrica Verde de los cultivos de papa y  
cebolla en una unidad hidrológica ubicada en la cuenca del Río Jordán  
(Páramo de Berlín, Santander, Colombia)

Tatiana Melissa Nieves Barrera, Javier Mauricio Torres Peña

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

Ingeniera Sanitaria, MSc. PhD

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1.Objetivos .....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2.Marco de referencia .....	17
3. Metodología .....	19
3.1. Caracterización del área de estudio.....	20
3.1.1. Caracterización física.....	20
3.1.2. Identificación y delimitación .....	21
3.2 Definición del alcance del proyecto y recolección de información.....	21
3.2.1. Oferta Hídrica Superficial.....	22
3.3. Análisis de información y confiabilidad .....	22
3.3.1. Análisis de la información requerida para el manejo del software CROPWAT 8.0.	23
3.3.1.1. Información de coeficientes de los cultivos.....	26
3.3.1.2. Etapas de crecimiento del cultivo.....	29
3.3.1.3. Información del tipo de suelo.....	29
3.3.1.4. Demanda de agua requerida para el riego, control y productividad.....	29

3.4. Estimación de la HH y Evaluación de la sostenibilidad .....	30
3.4.1. Estimación de la Huella Hídrica Agrícola (HHA y HHV) .....	30
3.4.1.1. Estimación de HHA.....	31
3.4.1.2. Estimación de HHV.....	32
3.4.2. Evaluación de la sostenibilidad de la HHA .....	33
3.4.3. Evaluación de la sostenibilidad de la HHV .....	34
4. Resultados y discusión.....	36
4.1. Identificación y caracterización del área de estudio .....	36
4.1.1. Caracterización Física .....	36
4.1.2. Identificación y delimitación .....	37
4.2. Recolección de información .....	38
4.2.1. Calendario de cultivo y aspectos del riego en una finca típica del páramo de Berlín.....	38
4.2.2. Oferta Hídrica Superficial.....	41
4.3. Análisis y confiabilidad de los datos.....	41
4.3.1. Análisis del clima y precipitación requerido para el manejo del software CROPWAT 8.0 .....	42
4.3.2. Análisis del cultivo requerido para el manejo del software 8.0.....	42
4.3.2.1. Coeficiente único de los cultivos .....	42
4.3.2.2. Etapas de crecimiento de los cultivos .....	43
4.3.2.3. Profundidad radicular.....	43
4.3.2.4. Factor de agotamiento crítico.....	44

4.3.2.5. Factor de respuesta de la productividad Ky .....	44
4.3.3. Análisis del suelo requerido para el manejo del software CROPWAT 8.0 .....	44
4.3.4. Demanda de agua requerida para el riego, control y productividad de cultivos .....	45
4.4. Estimación de la Huella Hídrica y Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos en el área de estudio.....	46
4.4.1. Estimación de la radiación y evapotranspiración de referencias .....	46
4.4.2. Requerimiento de agua del cultivo .....	47
4.4.3. Estimación de la Huella Hídrica azul y Huella Hídrica verde de los cultivos .....	47
5. Conclusiones .....	51
Referencias Bibliográficas .....	55
Apéndices.....	61

### Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores Aproximados de Kc Inicial a eventos moderados de humedecimiento (10-40 mm) y texturas medias del suelo.....	27
Tabla 2. Rangos para estimar el Indicador (IARC).....	34
Tabla 3. Rangos para estimar el Estado del indicador (IPHE) .....	36
Tabla 4. Áreas de los cortes de cultivos para el año 2019.....	38
Tabla 5. Calendario del cultivo de Cebolla junca por corte, desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.....	39
Tabla 6. Calendario del cultivo de papa negra por corte, desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.....	39
Tabla 7. Calendario del cultivo de papa amarilla por corte, desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.....	40
Tabla 8. Calendario del cultivo de avena por corte, desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.....	40
Tabla 9. Volumen en unidad Intervenida (meses completos) ...	41
Tabla 10. Valores del coeficiente único de los cultivos.....	42
Tabla 11. Valores corregidos del Coeficiente único de los cultivos de la zona de estudio.	43
Tabla 12. Etapas de crecimiento del cultivo .....	43
Tabla 13. Profundidad radicular .....	43
Tabla 14. Factor de agotamiento crítico.....	44
Tabla 15. Factor de respuesta de la productividad (Ky) .....	44

Tabla 16. Suelo .....	45
Tabla 17. Requerimiento de riego de los cultivos (mm/mes) .....	45
Tabla 18. Datos de entrada y salida del software CROPWAT 8.0 correspondiente al clima.....	46
Tabla 19. Requerimiento de agua .....	47
Tabla 20. Estimación Huellas Hídricas respectivas a cada corte de los cultivos presentes en la zona de estudio.....	48
Tabla 21. Resultados Huellas Hídricas de los cultivos presentes en la zona de estudio.....	48
Tabla 22. Resultados Huellas Hídricas e índices de sostenibilidad .....	49
Tabla C1. Valores totales de $ET_c$ Azul y $ET_c$ verde para el mes de septiembre del cultivo de cebolla junca .....	65
Tabla C2. Valores totales de $ET_c$ Azul y $ET_c$ verde para el mes de septiembre del cultivo de papa negra.....	65
Tabla C3. Valores totales de $ET_c$ Azul y $ET_c$ verde para el mes de septiembre del cultivo de papa amarilla.....	66
Tabla D1. Temperatura del aire a 2 metros mínima diaria desde enero a diciembre del 2019.....	68
Tabla D2. Temperatura del aire a 2 metros máxima diaria desde enero a diciembre del 2019.....	68
Tabla D3. Humedad relativa del aire a 2 metros media diaria desde enero a diciembre de 2019.....	69
Tabla D4. Velocidad del viento media diaria desde enero a diciembre de 2019.....	69
Tabla D5. Precipitación total mensual desde enero a diciembre de 2019.....	70

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso Metodológico .....	20
Figura 2. Valor promedio de $K_c$ Inicial relacionado con el nivel de $ET_o$ y el intervalo entre riegos durante la etapa inicial para suelos de textura finas y medias.....	27
Figura 3. Ajuste (Aditivo) al valor de $K_c$ Medio para diferentes alturas del cultivo en diferentes condiciones de humedad .....	28
Figura 4. Índice de agua que no retorna a la cuenca (IARC).....	50
Figura 5. Índice de presión hídrica al ecosistema (IPHE).....	51
Figura 6. Ingreso de los datos meteorológicos suministrados por el IDEAM y la ubicación geográfica de la estación Hidrometereológica de Berlín .....	61
Figura 7. Estimación de la Insolación, Radiación Neta y $ET_o$ por el programa CROPWAT 8.0.....	62
Figura B1. Coeficientes Únicos de cultivo y altura máxima .....	63

**Lista de apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Estimación de Insolación [horas], Radiación [MJ/m <sup>2</sup> /día] y ETo [mm/día]....	61
Apéndice B. Coeficientes y altura máxima de cultivos .....	63
Apéndice C. Cálculo tipo para hallar la HH Verde y Azul; y evaluación de sostenibilidad.	64
Apéndice D. Datos climatológicos estación hidrometeorológica automática de Berlín 37015030.....	67

## Resumen

**TÍTULO:** ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL Y HUELLA HÍDRICA VERDE DE LOS CULTIVOS DE PAPA Y CEBOLLA EN UNA UNIDAD HIDROLÓGICA UBICADA EN LA CUENCA DEL RÍO JORDÁN (PÁRAMO DE BERLÍN, SANTANDER, COLOMBIA). \*

**AUTORES:** TATIANA MELISSA NIEVES BARRERA  
JAVIER MAURICIO TORRES PEÑA \*\*

**PALABRAS CLAVE:** PÁRAMO, HUELLA HÍDRICA VERDE, HUELLA HÍDRICA AZUL, CULTIVOS DE PAPA Y CEBOLLA, EVALUACION DE SOSTENIBILIDAD.

### DESCRIPCIÓN:

Los páramos se consideran unidades ecológicas proveedoras de aproximadamente el 85% del agua potable en Colombia. Actividades humanas en el páramo como la agricultura afectan esta función abastecedora de agua y la biodiversidad. En este proyecto se estimó la Huella Hídrica Azul y la Huella Hídrica Verde de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum*) y cebolla junca (*Allium fistulosum*) presentes en una unidad hidrológica, ubicada en el Páramo de Berlín, de conformidad con la norma internacional ISO 14046 (2014). Así mismo, se usó el software CROPWAT 8.0, propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el cual generó un modelo de simulación agronómico para estimar variables como el requerimiento actual de riego y precipitación efectiva. La evaluación de la Huella Hídrica es parte importante del proceso para comprender cómo las actividades humanas influyen en los ciclos naturales de agua, funcionando como base para la gestión integrada de los recursos hídricos y los usos sostenibles de agua. Se encontró que en el páramo de Berlín el uso del recurso hídrico para el período desde septiembre de 2019 hasta febrero de 2020 de los cultivos de cebolla junca, papa negra y papa amarilla (*Solanum phureja*) la huella hídrica verde y azul del cultivo de papa negra fue mayor a las otras huellas hídricas debido a que aumenta la evapotranspiración y así mismo, su necesidad de riego es mayor que los otros cultivos, por lo tanto, genera presiones en el uso de agua verde y azul, a pesar de las prácticas sostenibles como la planificación de cultivos acorde a la disponibilidad de agua por parte de los agricultores. Esta situación requiere reforzar el acompañamiento a los agricultores para armonizar los medios de sustento con el servicio de abastecimiento de agua ofertado por el ecosistema de páramo.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera, Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD.

### Abstract

**TITLE:** ESTIMATION OF THE BLUE WATER FOOTPRINT AND GREEN WATER FOOTPRINT OF POTATO AND ONION CROPS IN A HYDROLOGICAL UNIT LOCATED IN THE JORDAN RIVER BASIN (PARAMO OF BERLÍN, SANTANDER, COLOMBIA). \*

**AUTHOR:** TATIANA MELISSA NIEVES BARRERA  
JAVIER MAURICIO TORRES PEÑA

**KEYWORDS:** PARAMO, GREEN WATER FOOTPRINT, BLUE WATER FOOTPRINT, POTATO AND ONION CROPS, SUSTAINABILITY ASSESSMENT.

**DESCRIPTION:**

The páramos are considered ecological units supplying approximately 85% of drinking water in Colombia. Human activities in the paramo such as agriculture affect this water supply function and biodiversity. In this project, the Blue Water Footprint and the Green Water Footprint of the potato (*Solanum tuberosum*) and junca onion (*Allium fistulosum*) crops present in a hydrological unit, located in the Berlin Páramo, were estimated, in accordance with the international ISO standard 14046 (2014). Likewise, the CROPWAT 8.0 software, proposed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), was used, which generated an agronomic simulation model to estimate variables such as the current requirement for irrigation and effective precipitation. The evaluation of the Water Footprint is an important part of the process to understand how human activities influence natural water cycles, functioning as a basis for the integrated management of water resources and the sustainable uses of water. It was found that in the Berlin wasteland the use of water resources for the period from September 2019 to February 2020 of the crops of onion, black potato and yellow potato (*Solanum phureja*) the green and blue water footprint of potato cultivation Black was greater than the other water footprints because it increases evapotranspiration and likewise, its need for irrigation is greater than other crops, therefore, it generates pressures in the use of green and blue water, despite sustainable practices such as crop planning according to the availability of water by farmers. This situation requires reinforcing support to farmers to harmonize livelihoods with the water supply service offered by the paramo ecosystem.

---

\*Bachelor Thesis.

\*\*Faculty of Physic-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Dominguez Rivera, Sanitary Engineer, MSc, PhD.

## Introducción

Los páramos se consideran unidades ecológicas e hidrológicas de altitud próxima a los 3400 m.s.n.m., sobrepasando el límite de altitud para el desarrollo de bosques cuyas cúspides se encuentran revestidas de diversos ecosistemas (Hofstede, Segarra y Mena, 2003). Estos ecosistemas funcionan como corredores biológicos para gran parte de la fauna (Hofstede *et al.*, 2003). Debido a sus características no boscosas, los páramos están controlados por pajonales y presentan variedad de humedales y turberas (Hofstede *et al.*, 2003). Así mismo, son de gran importancia para el Desarrollo Sostenible. Los páramos son el principal regulador del sistema hídrico del país (incluyendo agua potable, agua para riego y agua para generación de electricidad), gracias a su balance hídrico positivo que se obtiene mediante la regulación Hídrica (Hofstede *et al.*, 2003).

La existencia de actividades humanas en el páramo dificulta su preservación, pues actividades como la adecuación de terrenos para la siembra y recolección de cultivos, afectan la hidrología y la biodiversidad de los páramos (Rodríguez, Garrido y Llamas, 2015). De esta manera, se producen degradaciones y transformaciones de las condiciones naturales de estos ecosistemas, lo que genera un impacto ambiental adverso que se evidencia en las transformaciones morfológicas a lo largo del tiempo (Rodríguez, *et al.*, 2015).

La extracción excesiva de recurso hídrico en ecosistemas de páramo ha generado reducción de las fuentes Hídricas a tal punto de ocasionar irregularidades que afectan a los suelos y a los seres vivos (Silva, 2007). En algunos casos, las actividades humanas son intensivas, lo que ha ocasionado la tala de los arbustales, el drenaje de las lagunas y la transformación de los páramos en potreros degradados y cultivos de bajo rendimiento, afectando la hidrología y diversidad de estos ecosistemas (Hofstede *et al.*, 2003).

Este tipo de impactos pueden cuantificarse por medio de conceptos como el de Huella Hídrica Verde (HHV) y Huella Hídrica Azul (HHA), propuestos por Arjen Hoekstra (Egan, 2011). La HHV cuantifica los procesos antrópicos que afectan el equilibrio de la evapotranspiración del suelo. La HHA cuantifica el uso frecuente de aguas subterráneas o superficiales que generan un impacto ambiental negativo asociado a la escasez de agua generada por las extracciones (Rodríguez, *et al.*, 2015). La evaluación de la Huella Hídrica a nivel de cuencas hidrográficas es parte importante del proceso para comprender cómo las actividades humanas influyen en los ciclos naturales de agua, funcionando como base para la gestión integrada de los recursos hídricos y los usos sostenibles de agua (Zeng, Liu, Koeneman, Zarate & Hoekstra, 2012).

En países como China (Zeng, *et al.*, 2012), Brasil (Lathuillière, Coe, Castanho, Graesser & Johnson, 2018), Egipto (Elbeltagi, Deng, Wang & Hong, 2020), EEUU (Tom, Fischbeck & Hendrickson, 2016) y Colombia (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA], 2013) se ha realizado el cálculo de Huella Hídrica a nivel de: gobierno municipal, ciudades y cuencas hidrográficas. La mayor parte de estos estudios buscan calcular la Huella de: cultivos y productos derivados de cultivos, actividad pecuaria, consumo humano, agricultura de secano y de riego. La metodología usada en esos estudios sigue el marco de cálculo de Mekonnen y Hoekstra (2011). Los cálculos de evapotranspiración de cultivos y rendimiento, requeridos para la estimación de la HHV y la HHA en la producción de cultivos, se han realizado siguiendo el método y los supuestos proporcionados por Allen, Pereira y Smith (1998), para el caso de crecimiento de cultivos en condiciones no óptimas.

Algunos estudios realizados a nivel de cuencas se han situado en cuencas de alta montaña como es el caso de la cuenca de río Heine en el noroeste de China (Zeng, *et al.*, 2012) y de la cuenca hidrográfica de Tietê Jacaré (Brasil) (Scarpore, *et al.*, 2016). Estas investigaciones están

centradas en el cálculo de Huella Hídrica (HH), asociadas a una evaluación de sostenibilidad, que define el estado de oferta y demanda de agua superficial o subterránea.

En este proyecto se busca estimar la HHV y la HHA de los cultivos de cebolla junca (*Allium fistulosum*) y papa (*Solanum tuberosum*) presentes en una unidad hidrológica perteneciente a la cuenca del río Jordán, ubicada en el Páramo de Berlín. Este estudio es importante culturalmente debido a que se muestra el impacto de la forma de siembra tradicional, y ambiental porque es un entorno adaptable para la realización de actividades antrópicas que pueden ser intensivas, por ello se busca estimar el grado de sostenibilidad ambiental de las HHV y las HHA de los cultivos presentes en una finca típica del Páramo de Berlín donde se siembra cultivos de riego de cebolla y papa.

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto de investigación “Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander-Colombia)”, desarrollado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Estimar la Huella Hídrica Azul y Verde de los cultivos de cebolla y papa presentes en una unidad hidrológica ubicada en la cuenca del río Jordán en el Páramo de Berlín.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Analizar información en el área de estudio sobre los factores que inciden en el cálculo de las Huellas Hídricas (condiciones físicas, hidrológicas, antrópicas y climatológicas) para establecer una relación directa entre el consumo agrícola con los sistemas hídricos.
- Cuantificar el impacto generado por el cultivo de cebolla y papa en la zona de estudio, expresándolo en el grado de sostenibilidad de la Huella Hídrica.

## 2. Marco de referencia

A nivel global el crecimiento de la demanda de agua, el incremento de la escasez de agua y la degradación de su calidad, han convertido a este recurso en un punto esencial en el debate sobre el Desarrollo Sostenible, haciendo necesario un mejor entendimiento de los impactos relacionados con el agua como base para mejorar su gestión a nivel local, regional, nacional y global (Egan, 2011). Por lo tanto, es deseable tener técnicas de evaluación apropiadas que puedan utilizarse internacionalmente de manera coherente. Una de las técnicas que se han desarrollado para este propósito es la evaluación de la HH (Organización Internacional de Normalización-ISO-por sus siglas en inglés, 14046, 2014). Esto es especialmente importante, en el caso de la agricultura, que es en el ámbito global uno de los principales consumidores de agua y una de las principales fuentes de contaminación difusa que afecta a los cuerpos de agua en el planeta (Hofstede *et al.*, 2003). En este contexto, la HH es un concepto que puede aplicarse en este sector para mejorar la gestión del agua (Egan, 2011).

En países como China, India, Pakistán, y Colombia se han realizado estudios de Huella Hídrica a nivel de cuenca como lo son el caso de la cuenca del río Heihe en China (Zeng, *et al.*, 2012) y las cuencas de los ríos Indo y Ganges en India (Sapkota, *et al.*, 2017), China (Zeng, *et al.*, 2012) y Pakistán (Chapagain & Hoekstra, 2011). Por otra parte, en países como China, India, Estados Unidos, Brasil, Egipto, Italia y Colombia se ha estimado la HHV, HHA y Huella Hídrica Gris a nivel del sector agrícola de cultivos como el maíz (Novoa, Rojas & Arumí, 2014), trigo (Mekonnen & Hoekstra, 2010), cebada (Zubieta, 2019), papa (Mallma & Mejía, 2015), arroz (Chapagain & Hoekstra, 2011), caña de azúcar (Renderos, 2014), remolacha azucarera (Zubieta, 2019), soya (Rodríguez, 2013), coco (Evaluación Nacional del Agua [ENA], 2014), fibras de algodón (ENA, 2014), café (Camacho & Uribe, 2018), té (ENA, 2014),

cacao (ENA, 2014), tabaco (Brito, Iribarnegaray, Salas & Seghezzeo, 2015), especias (Vásquez, 2011), nueces (Ríos & Navarrete, 2019), caucho (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015) y productos derivados de los cultivos nombrados anteriormente.

En Colombia se evaluó “Guía metodológica de aplicación de HH en cuenca”, centrando su investigación en la cuenca del río Porce, produciendo un instrumento extenso en aplicación geográfica y sectorial, el cual fue realizado por el CTA (2013). En la cuenca Xingú de Mato Grosso, Brasil, se llevó a cabo la investigación de “Evaluación del uso del agua para la intensificación agrícola en la Amazonía meridional utilizando la Evaluación de sostenibilidad de la Huella Hídrica” dirigida Lathuillière, *et al.* (2018), esta investigación se enfocó en el rastreo del consumo de agua azul y verde entre los años 2000 a 2014, y la estimación de las diferentes opciones de intensificación agrícola en los años 2030 y 2050.

En Beijing, (China) por otro lado se estableció el estudio de investigación dirigida por Zeng *et al*, con el título de “El impacto del consumo de cultivos locales en los recursos hídricos en Beijing”, asimismo a nivel de granja se buscaba determinar, mediante el indicador de Huella Hídrica de los productos de cultivos que generan mayor presión sobre los recursos hídricos locales (2012).

Dichos estudios tuvieron como objetivo evaluar la HH a nivel de cuenca y del sector agrícola y evaluar la sostenibilidad de la HH, considerando la agricultura, la producción de cultivos y la producción ganadera, industrial y doméstica, basándose principalmente en los métodos estándares propuestos en el manual de evaluación de la Huella de agua (Egan, 2011).

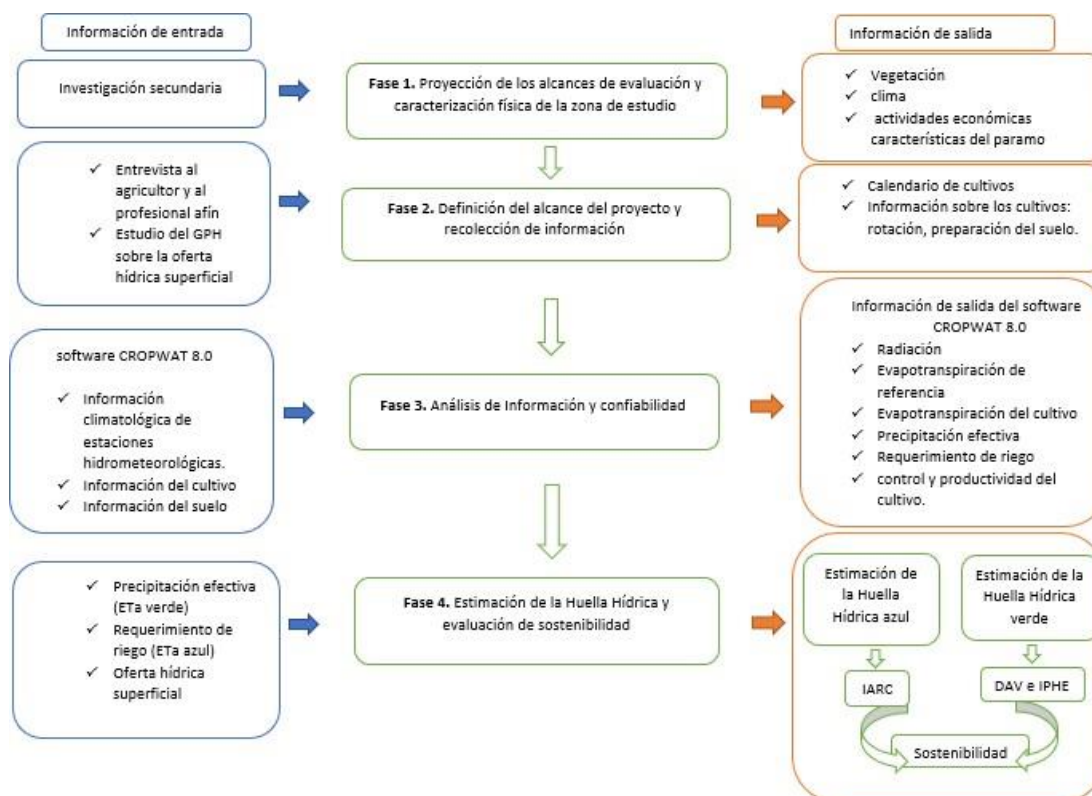
En la actualidad en el páramo de Berlín Santander mediante el Distrito de Manejo Integral (DMI páramo Berlín) (Restrepo, Suárez & Álvarez, 2008), se busca crear un desarrollo sostenible con cultivos que generen bajo impacto en la regulación hídrica que este maneja, implementando una evaluación de sostenibilidad para mitigar este impacto negativo, de los

artículos empleados se resalta la necesidad de estos para establecer una metodología ejecutando la huella hídrica en cuencas y en cultivos de paramos.

### **3. Metodología**

La metodología aplicada para el desarrollo de este proyecto se basa en la metodología propuesta en la evaluación multisectorial de la Huella Hídrica (HH) en Colombia (ENA, 2014), y en la guía metodológica de aplicación de Huella Hídrica en cuenca (CTA, 2013). Orientada al ámbito agrícola del sector de estudio, dicha metodología se enfoca en el indicador de Huella Hídrica desarrollado por los investigadores Chapagain & Hoekstra (2003). La evaluación de HH consta de 4 fases (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015): la fase 1 es la proyección de los alcances de evaluación y caracterización física de la zona de estudio; la fase 2 comprende la definición del alcance de proyecto y recolección de información, en esta fase se presentan las herramientas que se usan para la recolección de información requerida para el desarrollo del proyecto; la fase 3 es el análisis de información y confiabilidad, donde se estudian las variables requeridas para crear el modelo de simulación agronómico en el Software CROPWAT 8.0; finalmente la fase 4 es la estimación de la HHA y HHV y la evaluación de sostenibilidad de estas.

La Figura 1 sintetiza las fases de la metodología que se adaptó en este caso, con las entradas de información requeridas en cada frase. A continuación, se describe la metodología de cada fase.



**Figura 1.** Proceso metodológico Nota: IARC hace referencia al índice de agua que no retorna a la cuenca, DAV hace referencia a la disponibilidad de agua verde y IPHE es el índice de presión hídrica al ecosistema.

### 3.1. Caracterización del área de estudio

**3.1.1. Caracterización física.** A partir de la consulta de información secundaria “Estado actual del páramo región nororiental unidad biogeográfica Santurbán” (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental [CORPONOR], 2009) y “Las dinámicas de las actividades de producción y consumo en el sector rural: reflexiones a partir del caso del centro poblado del corregimiento de Berlín, Santander” (Vásquez, 2014), se caracterizó la zona de estudio en términos de vegetación, clima, actividades económicas y los problemas que se generan como resultado de las actividades antrópicas como la siembra y recolección de cultivos en este ecosistema.

**3.1.2. Identificación y delimitación.** Con el interés de conocer el impacto de los cultivos de cebolla y papa se seleccionó una finca localizada en la microcuenca del río Jordán en el páramo de Berlín, en la vereda Parra-Juan Rodríguez. La finca se seleccionó porque allí el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) desarrolla un proyecto de investigación (GPH, 2020). Por tal razón, se cuenta con información relacionada con: variables hidroclimatológicas, división y área del terreno para cultivo, cortes y fechas de inicio fin de cosecha, necesarias para determinar la HHA y HHV bajo la metodología propuesta en la evaluación multisectorial de la HH en Colombia (ENA, 2014), y en la guía metodológica de aplicación de HH en cuenca (CTA; GSI- LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

### **3.2. Definición del alcance del proyecto y recolección de información**

Este proyecto tiene como alcance estimar la HHA y HHV de los cultivos de papa y cebolla en una unidad hidrológica ubicada en la cuenca del Rio Jordán, a su vez hacer una evaluación de sostenibilidad ambiental de estas dos Huellas Hídricas. Mediante una encuesta al agricultor realizada por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH, 2020), se recopiló información sobre el cultivo de papa y cebolla para cuantificar la demanda de agua asociada a estas actividades. Estos datos están asociados a las temporadas de lluvia y época seca, a los métodos de control de plagas, métodos de riego utilizados y a las diferentes etapas del proceso de desarrollo de los cultivos.

Con la información obtenida se realizó un calendario de cultivos con las variables relevantes para el cálculo en el software CROPWAT 8.0 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2009).

Para este estudio se estableció un periodo de seis meses desde septiembre del año 2019 hasta febrero del año 2020, dado que la información requerida para la estimación de la HHA y HHV corresponde a este periodo. No obstante, en el uso del programa CROPWAT 8.0 se requieren el suministro de datos mensuales de precipitación total mensual (mm), humedad relativa del aire a 2 metros media diaria (%), velocidad del viento media diaria (km/h), temperatura máxima y mínima del aire a 2 metros diaria (° C). Por tal razón, esta información climatológica contó con registros de periodo de 1 año desde el mes de marzo del 2019 hasta el mes de febrero del 2020, fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2019), de la estación hidrometeorológica automática de Berlín código 37015030 con coordenadas geográficas: latitud 7.18, longitud -72.8685 y altitud 3316 m s n m.

**3.2.1. Oferta Hídrica Superficial.** La oferta de agua superficial fue medida previamente por los proyectos de investigación Prieto y Reyes (2020), y Celis (2019), mediante unos canales equipados con medidores de nivel (divers), instalados previamente por el grupo de investigación GPH.

### **3.3. Análisis de información y confiabilidad**

Se realizó un análisis con la información recopilada en la fase 2 correspondiente a la entrevista realizada al agricultor, la oferta hídrica superficial, información requerida para el cálculo en el software CROPWAT 8.0. Este análisis se describe a continuación.

**3.3.1. Análisis de la información requerida para el manejo del software CROPWAT 8.0.** Todos los procedimientos de cálculo, estipulados en CROPWAT 8.0 se basan en las directrices de la FAO, como se establece en la publicación No 56 de la serie de riego y drenaje de la FAO “Evapotranspiración del cultivo-guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2014). El programa utiliza la ecuación FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia, y los requerimientos de agua de los cultivos a partir de la ecuación original de Penman-Monteith y de las ecuaciones de resistencia aerodinámica y del cultivo (FAO, 2014) (ver Ecuación 1).

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

Donde:

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

$R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m<sup>2</sup>día]

$G$ : Flujo de calor del suelo [MJ/m<sup>2</sup>día]

$\gamma$ : Constante psicométrica [kPa/°C]

$T$ : Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

$u_2$ : Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]

$e_s$ : Presión de vapor de saturación [kPa]

$e_a$ : Presión real de vapor [kPa]

La información requerida para la aplicación de la Ecuación 1, en relación con temperatura del aire a 2 metros mínima diaria (° C), temperatura del aire a 2 metros máxima diaria (° C), temperatura del aire (° C), humedad relativa del aire a 2 metros media diaria (%), velocidad del viento medio diario (km/h), precipitación total mensual (mm), fue obtenida de los registros de 1 año suministrados por el IDEAM (2019),

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ): Pendiente de la relación entre presión de saturación de vapor y la temperatura (ver Ecuación 2).

$$\Delta = \frac{4098 * [0.6108 * \text{Exp} (\frac{17.27 * T_{min}}{T_{min} + 237.3})]}{(T_{min} + 237.3)^2} \quad (2)$$

Donde:

T: Temperatura del aire [ $^{\circ}$  C]

Radiación neta en la superficie del cultivo ( $R_n$ ): Estimada por el programa CROPWAT 8.0. ingresando los siguientes datos: Estación hidrometeorológica automática de Berlín código 37015030 con coordenadas geográficas: latitud 7.18, longitud -72.8685 y altitud 3316 m s n m, temperatura del aire a 2 metros mínima diaria ( $^{\circ}$  C), temperatura del aire a 2 metros máxima diaria ( $^{\circ}$  C), humedad relativa del aire a 2 metros media diaria (%), velocidad del viento media diaria (km/h), los datos de insolación son estimados por el programa CROPWAT 8.0 basándose en las coordenadas geográficas de la estación automática de Berlín, para ilustrar la estimación de los datos de insolación estimados por el programa (ver Apéndice A).

Flujo de calor del suelo ( $G$ ): Es la cantidad necesaria de energía usada para calentar el suelo, determinada de la siguiente manera (ver Ecuación 3):

$$G_{mes,i} = 0.14(T_{mes,i} - T_{mes,i-1}) \quad (3)$$

Donde:

$T_{mes,i}$ : Temperatura media del aire en el mes i [ $^{\circ}$  C].

$T_{mes,i-1}$ : Temperatura media del aire en el mes i-1 [ $^{\circ}$  C].

Constante psicométrica ( $\gamma$ ): Equivale a 0.000665.

Presión media de vapor de la saturación ( $e(T)$ ): se puede calcular en función de la temperatura del aire (ver Ecuación 4).

$$e(T) = 0.6108 * \text{Exp} \frac{(17.27 * T_{min})}{T_{min} + 237.3} \quad (4)$$

Presión de saturación de vapor ( $e_s$ ): Gas con presión que contribuye a la presión atmosférica total (ver Ecuación 5).

$$e_s = \frac{[e(T_{max}) + e(T_{min})]}{2} \quad (5)$$

Donde:

$e(T_{max})$ : Presión de vapor a temperatura máxima del aire [° C].

$e(T_{min})$ : Presión de vapor a temperatura mínima del aire [° C].

Presión real de vapor ( $e_a$ ): Es la presión real de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire (ver Ecuación 6).

$$e = \frac{HR_{máx.} * (T_{max})}{100} \quad (6)$$

Donde:

$HR_{max}$ : Humedad relativa.

$e(T_{max})$ : Presión de vapor a Temperatura máxima [° C].

Se procede a estimar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ), se refiere a la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla libre de enfermedades, con buena fertilización, que crece en un campo extenso bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y el cual alcanza su producción total bajo ciertas condiciones climáticas (FAO, 2014).

Los efectos de las distintas condiciones del tiempo atmosférico fueron incluidos en la ( $ET_o$ ). Los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). Para determinar  $ET_c$  se multiplica  $ET_o$  por el coeficiente del cultivo (ver Ecuación 7) (FAO, 2014).

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (7)$$

Donde:

$ET_c$ : Evapotranspiración del cultivo [ $mm/día$ ].

$K_c$ : Coeficiente del cultivo [ $adimensional$ ].

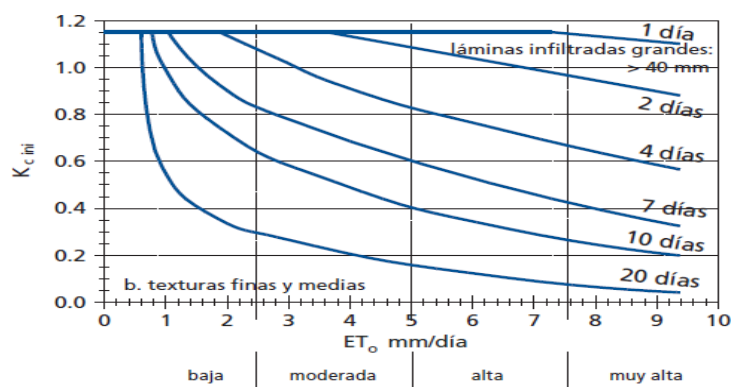
$ET_o$ : Evapotranspiración del cultivo de referencia [ $mm/día$ ].

**3.3.1.1. Información de coeficientes de los cultivos.** Para este estudio se utilizó el procedimiento del coeficiente único del cultivo el cual es enfocado a las aplicaciones relacionadas con la planificación del riego, diseño y manejo. Se obtuvieron los valores correspondientes a los coeficientes del cultivo  $k_c$  del “Apéndice B”, de la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos Evapotranspiración del cultivo (FAO, 2014).

Se realizaron las respectivas correcciones para el  $K_c$ , para ello se tuvieron en cuenta los factores de humedad relativa, velocidad del viento y características del suelo, de acuerdo con las características de la zona de estudio.

Para la corrección del  $K_{c\ ini}$  se utiliza la Figura 2 la cual corresponde a suelos de textura fina y media, debido a que el tipo de suelo de la zona de estudio es franco arcilloso. La Figura 2 presenta una estimación del valor  $K_{c\ ini}$  en función del intervalo promedio entre los eventos de humedecimiento, poder evaporante y la magnitud del evento de humedecimiento. El intervalo entre riegos para los cultivos se obtiene de la entrevista aplicada al agricultor, para definir el rango del poder evaporante se realizó primero el cálculo de la  $ET_o$  en el software CROPWAT 8.0, dicho resultado se ubicó entre los rangos de la Tabla 1 la cual arroja un  $K_{c\ ini}$  aproximado dependiendo del poder evaporante y del intervalo de eventos de humedecimiento, una vez estimado el rango del poder evaporante en que se encuentra se procede a realizar el análisis en la Figura 2 para obtener el valor de  $K_{c\ ini}$  corregido, ubicando la curva según el intervalo de

días que dura cada evento de humedecimiento, el rango en el que se encuentra y el valor de la  $ET_o$ .



**Figura 2.** Valor promedio de  $K_{c\ ini}$  relacionado con el nivel de  $ET_o$  y el intervalo entre riegos durante la etapa inicial para suelos de textura fina y medias. Nota: Adaptado de Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos Evapotranspiración del cultivo (FAO, 2014).

**Tabla 1.**

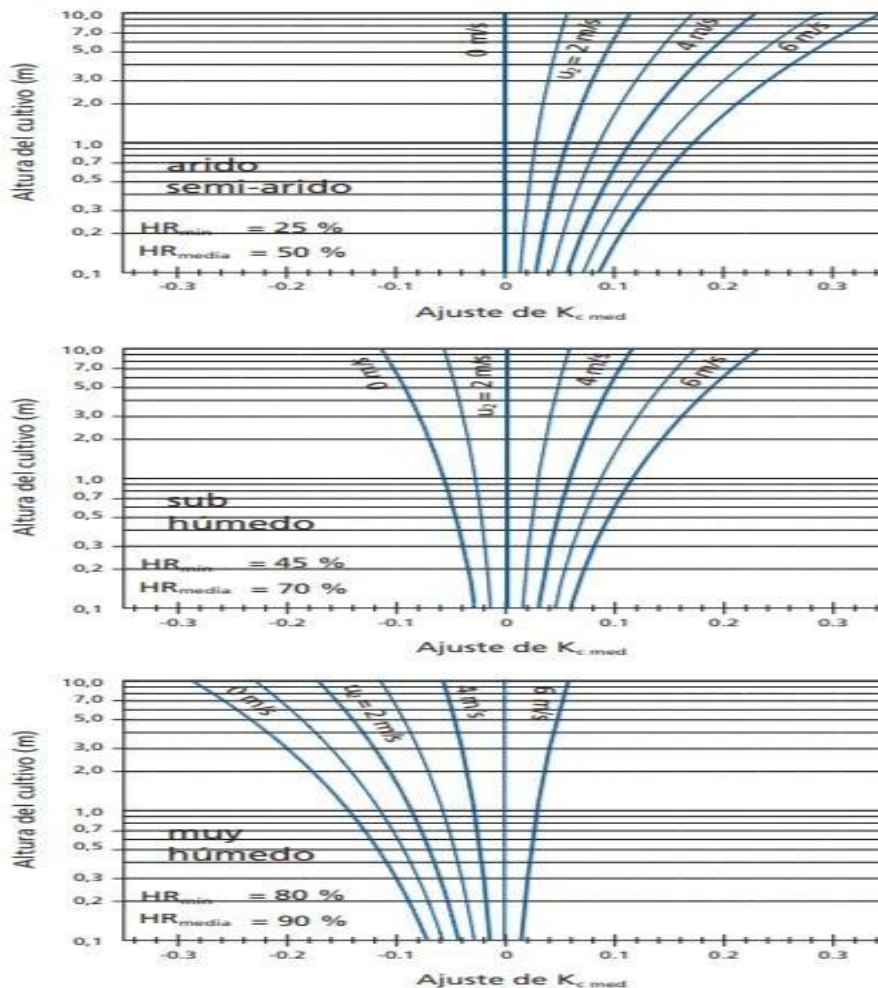
Valores Aproximados de  $K_{c\ ini}$  a eventos moderados de humedecimiento (10-40 mm) y texturas medias del suelo.

Intervalo de Eventos de humedecimiento	Poder Evaporante de la atmosfera ( $ET_o$ )			
	Bajo 1-3 mm día <sup>-1</sup>	Moderado 3-5 mm día <sup>-1</sup>	Alto 5-7 mm día <sup>-1</sup>	Muy Alto >7mm día <sup>-1</sup>
Menor que semanal	1.2-0.8	1.1-0.6	1.0-0.4	0.9-0.3
Semanal	0.8	0.6	0.4	0.3
Mayor que una vez por semana	0.7-0.4	0.4-0.2	0.3-0.2	0.2-0.1

Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

Para la corrección del  $K_{c\ med}$  se utilizó la “Figura 3” la cual presenta un ajuste (aditivo) al valor de  $K_{c\ med}$  (Apéndice B) para diferentes alturas del cultivo, valor promedio diario de la velocidad del viento, diferentes condiciones de humedad. El clima de la zona de estudio según los valores de humedad relativa  $HR$  obtenidos del IDEAM está en el rango de  $HR_{MIN} = 74\%$  y  $HR_{Med} = 90\%$ , por tal razón se realizó el análisis basado en la tercer grafica de arriba hacia

abajo de la Figura 3, la velocidad promedio diaria del viento suministrada por el IDEAM equivale a  $u_2 = 1.3 \text{ m/s}$  hace referencia a un viento ligero a moderado, la altura máxima correspondiente a cada cultivo se obtuvo del (Apéndice B), se procede a hacer la respectiva ubicación de las variables en la gráfica y se obtiene un valor de ajuste del  $K_{c \text{ med}}$ .



**Figura 3.** Ajuste (aditivo) al valor  $K_{c \text{ med}}$  para diferentes alturas del cultivo en diferentes condiciones de humedad. Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

Para la corrección del  $K_{c \text{ fin}}$  se deben realizar los ajustes pertinentes para climas donde la humedad relativa mínima sea diferente de 45% y donde  $u_2$  sea mayor o menor que 2.0 [m/s]. Para esto, se utiliza la Ecuación (8) solamente en los casos donde los valores tabulados de  $K_{c \text{ fin}}$  sean mayores a 0.45 (ver Apéndice B):

$$K_{c \text{ fin}} = K_{c \text{ fin}(cua)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (8)$$

Donde:

$K_{Cfin(cua)}$ : Valor de  $K_{Cfin}$  obtenido de “Apéndice B”.

$U_2$ : Valor promedio de la velocidad diaria del viento a 2m de altura [m/s] durante la etapa final.

$HR_{min}$ : Valor promedio de humedad relativa mínima diaria durante la etapa final.

$h$ : Altura promedio de la planta durante la etapa final [m], para  $0.1m < h < 10 m$  obtenido de “Apéndice B”.

La  $u_2$  fue obtenida de la información suministrada por el IDEAM, mientras que  $HR_{min}$  se obtuvo al promediar los datos diarios suministrados por el IDEAM.

**3.3.1.2. Etapas de crecimiento del cultivo.** Cada cultivo se caracteriza por tener 4 etapas de crecimiento; etapa inicial, etapa de desarrollo, etapa media y etapa final (FAO, 2014). Para determinar la duración en días de las etapas de crecimiento para los cultivos, se realizó una entrevista a un experto con conocimiento sobre cultivos de papa y cebolla en páramos.

**3.3.1.3. Información del tipo del suelo.** La información del tipo de suelo fue suministrada por el Grupo (GPH) a partir de datos del trabajo de investigación de maestría en Ingeniería Civil que viene siendo adelantado por Patiño (2020).

**3.3.1.4. Demanda de agua requerida para el riego, control y productividad de cultivos.** La demanda de agua requerida para los procesos agrícolas se estimó con la información recopilada en la entrevista al agricultor en relación con el agua utilizada en control y productividad del cultivo. El agua utilizada en el riego fue estimada con el programa CROPWAT 8.0.

### 3.4. Estimación de la HH y Evaluación de la sostenibilidad

Una vez hallados los factores que inciden en el cálculo de la HHA y HHV de los cultivos presentes en la zona, se aplicó la metodología propuesta en la evaluación multisectorial de la HH en Colombia Estudio Nacional del Agua, ENA 2014 (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015) y la metodología de aplicación de HH en cuenca (CTA, 2013), como se describe a continuación.

**3.4.1. Estimación de la Huella Hídrica Agrícola (HHA y HHV).** Para la cuantificación de la HH, se partió de la identificación y caracterización de los procesos antrópicos que afectan la cantidad de agua verde o de agua azul, lo que da origen a la HHA y la HHV (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

La Huella Hídrica fue expresada en unidades de volumen de agua por unidad de tiempo. Para el cálculo de los requerimientos de agua verde y azul del sector agrícola ( $ET_c$  verde) y ( $ET_c$  azul), se parte del entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en el comportamiento vital de una especie vegetal: nacimiento, crecimiento, desarrollo, producción y muerte, asociadas a una planta (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

Para el proceso de cálculo y estimación, es necesario también conocer las variables que determinan el comportamiento del entorno: clima, precipitación, suelo. La principal utilidad del software CROPWAT 8.0 (FAO, 2009), es que permite cuantificar el requerimiento de agua de los cultivos que puede ser suplido por la precipitación o por algún sistema de riego, a través del análisis de variables climáticas del propio cultivo de un balance hídrica a nivel del suelo. Mediante la simulación de la relación efectiva entre los grupos de variables citados anteriormente, la variable Precipitación Efectiva del módulo programación del CROPWAT 8.0

representa el agua requerida por el cultivo y que puede ser suplida por la precipitación ( $ET_c$  verde) y la variable Requerimiento Actual de Riego, representa el agua que debe ser suplida a través del riego ( $ET_c$  azul). Estos valores se transforman de unidades mediante la multiplicación por 10 para calcular el requerimiento de agua del cultivo en [ $m^3$ /ha] (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

**3.4.1.1. Estimación de HHA.** La HHA está asociada a la parte de la extracción de agua que se destina a satisfacer el requerimiento de agua de los cultivos y que no retorna a la cuenca porque es evapotranspirada por el cultivo. La Huella Hídrica Azul fue calculada según la (Ecuación 9) y con base en la evapotranspiración azul, la cual se estimó utilizando el modelo de simulación agronómico CROPWAT 8.0 (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

$$HH\ Azul = 10 * ET_c\ Azul * As \quad (9)$$

Donde:

HH Azul: Huella Hídrica Azul [ $m^3$ /mes]

ETc azul: Corresponde a la evapotranspiración mensual azul ajustada [mm] estimada por el software CROPWAT 8.0. basada en la información de clima, precipitación, cultivo y suelo.

As: Área sembrada [ha]. El “10” representa el factor de conversión que permite incorporar la evapotranspiración en mm y el área sembrada en ha para obtener la HHA en [ $m^3$ ].

ETc azul o requerimiento de riego de cultivo se determina mediante los resultados obtenidos del programa CROPWAT 8.0 al introducir datos del suelo de la zona de estudio, datos de la estación hidrometeorológica automática de Berlín e información del cultivo. El área sembrada se obtuvo de la encuesta realizada al agricultor por el grupo GPH. Se expone un cálculo tipo de estos procedimientos (ver Apéndice C).

**3.4.1.2. Estimación de HHV.** La HHV es cuantificada mediante la estimación o medición del consumo de agua almacenada en el suelo proveniente de la precipitación, que no se convierte en escorrentía. Satisface una demanda sin requerir para ello de intervención humana. La HHV solo está presente en el sector agrícola y pecuario. Hace referencia a una reducción en la disponibilidad de agua verde por disminución en la cantidad a causa de la apropiación humana (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015). Se calculó según la Ecuación 10 y con base en la evapotranspiración verde la cual se estimó utilizando el modelo de simulación agronómico CROPWAT 8.0 (FAO, 2009).

$$HH\ Verde = 10 * ETc\ Verde * As \quad (10)$$

Donde:

HH Verde: Huella Hídrica Verde [ $m^3$ /mes]

ETc Verde: Corresponde a la evapotranspiración mensual verde ajustada [mm] estimada por el software CROPWAT 8.0. basada en la información de clima, precipitación, cultivo y suelo.

As: Área sembrada [ha]. El “10” representa el factor de conversión que permite incorporar la evapotranspiración en mm y el área sembrada en ha para obtener la HHV en  $m^3$ .

ETc verde o precipitación pluvial efectiva de cultivo se determina mediante los resultados obtenidos del programa CROPWAT 8.0 al introducir datos del suelo de la zona de estudio, datos de la estación hidrometeorológica automática de Berlín e información del cultivo. El área sembrada se obtuvo de la encuesta realizada al agricultor por el grupo de investigación GPH. Se expone un cálculo tipo de estos procedimientos (ver Apéndice C).

**3.4.2. Evaluación de la sostenibilidad de la HHA.** La evaluación ambiental de la sostenibilidad de la HHA se basa en la comparación entre la HHA multisectorial que refleja el agua demandada (extraída del sistema) y no retornada- y la disponibilidad de agua superficial a nivel de cuenca. En las unidades de análisis donde la HH multisectorial es mayor que la disponibilidad de agua superficial (oferta) se presenta insostenibilidad para la HHA, esto quiere decir que la oferta de agua superficial no satisface los consumos de agua de los sectores para esa unidad de análisis (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

Los datos de la HHA fueron usados para la estimación del índice de agua no retornada a la cuenca (IARC) (ver Ecuación 1).

$$IARC = \frac{\sum HH \text{ Azul de los cultivos Area Est.}}{OHD_{AÑO \text{ MEDIO}}} \quad (11)$$

Donde:

IARC: Índice de agua no retornada.

$\sum HH \text{ Azul}$ : Huella Hídrica Azul Multisectorial en un periodo de tiempo.

$OHD_{AÑO \text{ MEDIO}}$ : Oferta Hídrica Disponible en año medio, que determina la disponibilidad de agua azul para el periodo de tiempo.

Los datos correspondientes a los parámetros se obtienen de los cálculos de la HHA de los cultivos que estén en alguna etapa de desarrollo en el mes correspondiente. Los datos de la oferta hídrica disponible fueron suministrados por el grupo de investigación GPH. Se expone un cálculo tipo de estos procedimientos (ver Apéndice C).

Este índice se calcula para estimar la relación entre la HHA y la oferta, las categorías de valores para establecer el nivel de resultado aparecen en la Tabla 2:

**Tabla 2.***Rangos para estimar el Indicador (IARC)*

<b>Rango</b>	<b>Estado</b>
>1	Critico
0.5-1-0	Muy Alto
0.2-0.5	Alto
0.1-0.2	Moderado
<0.1	Bajo Muy Bajo

Nota: Adaptado de (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

**3.4.3. Evaluación de la sostenibilidad de la HHV.** Los datos de HHV se usaron para estimar la disponibilidad de agua verde (DAV) y el Índice de Presión Hídrica a los ecosistemas (IPHE) el cual denota la fracción de apropiación de los recursos de agua verdes disponibles (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

#### **Disponibilidad de agua verde**

La disponibilidad de agua verde mensual (DAV) está dada por la evapotranspiración total verde, menos la evapotranspiración reservada a la vegetación natural y menos la evapotranspiración de las zonas no productivas (ver Ecuación 12).

$$DAV_{mensual} = ET_{x,t(Verde)} - ET_{x,t(nat)} - ET_{x,t(no\ prod)} \quad (12)$$

Donde:

$DAV_{mensual}$ : Disponibilidad de agua verde.

$ET_{x,t(Verde)}$ : Evapotranspiración total verde, hace referencia a la precipitación total que cae en el área de estudio.

$ET_{x,t(nat)}$ : Evapotranspiración reservada para el medio ambiente, equivalente al requerimiento medio ambiental de agua verde.

$ET_{x,t (no prod)}$ : Evapotranspiración del suelo que no es posible hacer productivo. Las zonas no productivas se refieren a aquellas áreas que no tienen como uso del suelo un uso productivo agrícola.

La disponibilidad de agua verde mensual (DAV) se determinó de los datos de precipitación (mm) o evapotranspiración verde proporcionados por el (IDEAM, 2019) de la estación hidrometeorológica automática de Berlín, debido a que la evapotranspiración natural es despreciable porque no hay áreas protegidas para la vegetación natural puesto que en la zona de estudio se reemplazó la vegetación natural por los cultivos y la evapotranspiración no productiva se desprecia, debido a que en la zona de estudio en cualquier área se puede sostener una producción agrícola.

### **Índice de presión Hídrica al ecosistema**

Para hallar el índice de escasez de agua verde se divide la sumatoria de la HHV mensual multisectorial entre la disponibilidad de agua verde mensual (DAV) (ver Ecuación 13).

$$IPHE = \frac{\sum HH Verde}{DA_{Verde}} \quad (13)$$

Donde:

$\sum HH Verde$ : La suma de todas las Huellas Hídricas Verdes que se hallen del estudio en un periodo de tiempo.

IPHE: Índice de Presión Hídrica a los ecosistemas

$DA_{Verde}$ : Disponibilidad de agua verde para un periodo de tiempo.

Los datos correspondientes a los parámetros se obtienen de los cálculos de la HHV de los cultivos que estén en alguna etapa de desarrollo en el mes correspondiente. La disponibilidad de agua verde mensual (DAV) se determinó de los datos de precipitación (mm) proporcionados por el (IDEAM, 2019) de la estación hidrometeorológica automática de Berlín.

Se expone un cálculo tipo de estos procedimientos (ver Apéndice C).

Este índice se calcula para estimar la relación entre la HHV y la disponibilidad de agua verde (DAV), las categorías de valores para establecer el nivel de resultado aparecen en la Tabla 3:

**Tabla 3.**

*Rangos para estimar el Estado del indicador (IPHE)*

<b>Rango</b>	<b>Estado</b>
>1	Critico
0.8-1.0	Muy Alto
0.5-0.8	Alto
0.3-0.5	Moderado
0.1-0.3	Bajo
<0.1	Bajo Muy Bajo

Nota: Adaptado de (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015).

## 4. Resultados y discusión

Los resultados de la aplicación de la metodología para la estimación de HHA y HHV se presentan a continuación, a su vez se procede a analizar la sostenibilidad ambiental que presenta cada HH de los cultivos para el caso de estudio.

### 4.1. Identificación y caracterización del área de estudio

**4.1.1. Caracterización Física.** El área de estudio se caracteriza por ser un ecosistema de páramo seco donde ocurre una alta compactación del suelo y bajas precipitaciones; esta zona se localiza en el altiplano denominado “Páramo de Berlín” del sistema montañoso de la Cordillera Oriental, sus límites se encuentran entre Santander y norte de Santander, en los municipios de Toná y Silos del departamento de Santander (CORPONOR, 2009).

El páramo seco de la zona de estudio abarca comprende terrenos abiertos, de flora, los cuales están dotados por pajonales de gramíneas macallosas (*Calamagrostis* sp), generando haces de hojas enrolladas, que proporciona la mayor cobertura vegetal presentes en este tipo de suelo asimismo plantas cespitosas, almohadillas y arrosietadas, resaltan su paisaje característico (CORPONOR, 2009).

Mediante zonas colindantes del corregimiento de Berlín se visualiza un panorama agrícola que verifica las actividades antrópicas realizadas en la actualidad por seres humanos basándose en los cultivos de fácil adaptación a las condiciones climáticas del páramo siendo estos en mayor proporción los cultivos de papa y cebolla. No obstante, esta implementación de cultivos genera la pérdida del colchón vegetal natural del páramo ocasionando desecación de fuentes hídricas (Vásquez, 2014).

**4.1.2. Identificación y delimitación.** El estudio se realizó en una finca ubicada en una microcuenca del río Jordán, localizada en la vereda Parra-Juan Rodríguez del municipio de Toná Santander, en la cual nace una quebrada que constituye la fuente principal de abastecimiento de agua para varias fincas de la vereda. La principal actividad económica es la agricultura cuyos principales cultivos son la cebolla, papa y avena. En la finca en estudio, los agricultores dividen las zonas de cultivo en áreas denominadas cortes donde para el período de estudio se sembraron los cultivos como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.***Áreas de los cortes de cultivos para el año 2019*

<b>Tipo y Corte Cultivo</b>	<b>Área (Ha)</b>
Cultivo Cebolla C1	0.25
Cultivo Cebolla C2	0.25
Cultivo Cebolla C3	0.25
Cultivo Papa Negra C1	0.50
Cultivo Papa Negra C2	1.00
Cultivo Papa Amarilla C1	1.00
Cultivo Papa Amarilla C2	1.00

**Nota:** Adaptada de (GPH, 2020). Áreas reportadas por el agricultor que deben ser corroboradas cuando estén disponibles imágenes tomadas con vehículo aéreo no tripulado.

El cultivo de avena es sembrado después de que el cultivo de papa amarilla ha sido recolectado, por tanto, no se tiene en cuenta el área del cultivo de avena ya que está por su respectiva rotación fue sembrada sobre el área superficial que ya se tuvo en cuenta en el cultivo de papa amarilla, el área total cultivada en el año 2019 fue 4.25 ha.

## **4.2. Recolección de información**

**4.2.1. Calendario de cultivo y aspectos del riego en una finca típica del páramo de Berlín.** Con la implementación de la entrevista al agricultor (GPH, 2020) se realizó un calendario de cultivos con las variables relevantes para el cálculo en el software CROPWAT 8.0 para cada uno de los cultivos presentes en la zona de estudio.

### **Cultivo de Cebolla Junca**

El cultivo de cebolla junca tarda 3 meses en desarrollarse. La Tabla 5 muestra la forma en que se manejaron los cortes bajo cebolla Junca en la finca, desde septiembre de 2019 a febrero de

2020. El número que acompaña a la inicial del cultivo indica el mes de desarrollo en el que se encuentra.

En el cultivo de cebolla junca se emplea el riego por aspersión cada 8 días durante 2 horas consecutivas, en los meses de poca precipitación como lo son agosto y diciembre (GPH, 2020).

**Tabla 5.**

*Calendario del cultivo de Cebolla junca por corte, desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.*

<b>Corte</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>
1	0.25	C2	C3	C1	C2	C3	
2	0.25	C1	C2	C3	C1	C2	C3
3	0.25	C3	C1	C2	C3	C1	C2

Nota: Adaptado de (GPH, 2020).

### **Cultivo de papa negra**

El cultivo de papa negra tarda 8 meses en desarrollarse. La Tabla 6 muestra la forma en que se manejaron los cortes bajo papa negra en la finca desde septiembre de 2019 a diciembre de 2019.

El número que acompaña a la inicial del cultivo indica el mes de desarrollo en el que se encuentra. En el cultivo de papa negra se emplea el riego por aspersión cada 10 días durante 24 horas del día en el corte 1 por el mes de junio (GPH, 2020).

**Tabla 6.**

*Calendario del cultivo de papa negra por corte, desde septiembre de 2019 a diciembre de 2020.*

<b>Corte</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1	0.50	PN7	PN8		
2	1.00	PN5	PN6	PN7	PN8

Nota: Adaptado de (GPH, 2020)

### Cultivo de papa amarilla

El cultivo de papa amarilla tarda 6 meses en desarrollarse. La Tabla 7 muestra la forma en que se manejaron los cortes bajo papa amarilla en la finca desde septiembre de 2019 a enero de 2020. El número que acompaña a la inicial del cultivo indica el mes de desarrollo en el que se encuentra.

El cultivo de papa amarilla se siembra en épocas de tal manera que no requiera riego (GPH, 2020).

**Tabla 7.**

*Calendario del cultivo de papa amarilla por corte, desde septiembre de 2019 a enero de 2020.*

Corte	Área (Ha)	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene
1	1.0					
2	1.0	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6

Nota: Adaptado de (GPH, 2020).

### Cultivo de avena

El cultivo de avena tarda 6 meses en desarrollarse. La Tabla 8 muestra la forma en que se manejaron los cortes bajo avena en la finca desde septiembre de 2019 a enero de 2020. el número que acompaña a la inicial del cultivo indica el mes de desarrollo en el que se encuentra.

El cultivo de avena se siembra en épocas de tal manera que no requiera riego (GPH, 2020).

**Tabla 8.**

*Calendario del cultivo de avena por corte, desde septiembre de 2019 a enero de 2020.*

Corte	Área (Ha)	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene
1	1.0	AV2	AV3	AV4	AV5	AV6

Nota: Adaptado de (GPH, 2020).

En cuanto a la rotación de cultivos, el cultivo de cebolla no tiene rotación con otros cultivos; el cultivo de papa negra rota con el cultivo de papa amarilla y este a su vez rota con el cultivo de avena el cual es sembrado con el objetivo de alimentar el ganado. Una vez se es cosechada

la avena, el agricultor permite que el ganado pastoree en este terreno. Después, el área se deja en descanso varios años (GPH, 2020).

Antes de sembrar el cultivo de papa, el suelo se acondiciona con arado mecánico, usando un tractor que alcanza profundidades de aproximadamente 20 cm (GPH, 2020).

**4.2.2. Oferta Hídrica Superficial.** La oferta hídrica superficial de la cuenca está dada en unidades de volumen por mes, recolectada en las estaciones de monitoreo instaladas por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) (Celis, 2019).

**Tabla 9.**

*Volumen en unidad Intervenida (meses completos)*

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Volumen (<math>m^3</math>)</b>
2019	Sep	5689
2019	Oct	8811
2019	Nov	6117
2019	Dic	5226
2020	Ene	5529
2020	Feb	4338

Nota: Adaptado de GPH (Celis, 2019).

### **4.3. Análisis y confiabilidad de los datos.**

**4.3.1. Análisis del clima y precipitación requerido para el manejo del software CROPWAT 8.0.** Los datos hidrometeorológicos suministrados por el IDEAM de la estación automática de Berlín 37015030 para el año 2019 se presentan en (Apéndice D). La información suministrada y disponible en el banco de datos del IDEAM constituye datos preliminares, al encontrarse la misma en elaboración, significa que no se ha surtido el proceso de validación técnica necesaria, que garantiza la calidad del dato que determina la oficialidad de la información.

De los datos climatológicos del año 2019 (ver Apéndice D) se encontró que la humedad relativa promedio mensual equivale a 85%, la temperatura máxima promedio mensual fue de 16.1 ° C y la temperatura mínima promedio mensual es de 5.5 ° C. Se presenta durante el año una velocidad del viento promedio mensual de 1.3 m/s y se evidencia una precipitación promedio mensual de 83.82 mm presentando periodos lluviosos entre abril y octubre y periodos secos de noviembre a marzo, siendo enero el mes más seco. De estos datos mensuales fueron usados como datos de entrada para el análisis de los diferentes coeficientes que afectan al cultivo como el coeficiente único de cultivo ( $K_c$ ).

#### 4.3.2. Análisis del cultivo requerido para el manejo del software 8.0

**4.3.2.1. Coeficiente único de los cultivos.** Los valores correspondientes a los coeficientes de los cultivos se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Valores del Coeficiente único de los cultivos.*

<b>Kc Inicial</b>	<b>Kc Medio</b>	<b>Kc Final</b>	<b>Altura Max. (m)</b>
0.70	Cultivo de Cebolla verde 1.00	1.00	0.30 m
0.50	Cultivo de papa negra 1.15	0.32	0.60 m
0.50	Cultivo de papa amarilla 1.15	0.32	0.60 m

Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

Los valores de la Tabla 10 son válidos para condiciones de cultivo para climas subhúmedos en donde la  $HR_{min} \approx 45\%$  y la velocidad del viento suave o moderada  $u_2 = 2$  m/s, en este caso la zona de estudio presenta  $HR_{min} = 75\%$  y una velocidad del viento  $u_2 = 1.3$  m/s, debido a que los cultivos de estudio no cumplen con las condiciones de cultivo para climas sub-húmedos y es regado por aspersión, se corrigieron los coeficientes de cultivo  $K_{c\ ini}$ ,  $K_{c\ med}$ ,  $K_{c\ fin}$ . (ver Tabla 11).

**Tabla 11.***Valores corregidos del Coeficiente único de los cultivos de la zona de estudio*

<b>Kc Inicial</b>	<b>Kc Medio</b>	<b>Kc Final</b>	<b>Altura Max.</b>
	Cultivo de Cebolla verde		
0.78	0.94	0.92	0.30 m
	Cultivo de papa negra		
0.58	1.07	0.32	0.60 m
	Cultivo de papa amarilla		
0.5	1.07	0.32	0.60

**4.3.2.2. Etapas de crecimiento de los cultivos.** La Tabla 12 presenta la duración estimada de las etapas de crecimiento de los cultivos en la zona de estudio.

**Tabla 12.***Etapas de crecimiento del cultivo*

<b>Cultivo</b>	<b>Inicial (días)</b>	<b>Desarrollo (días)</b>	<b>Media (días)</b>	<b>Final (días)</b>
Cebolla	20	30	26	14
Papa negra	60	40	120	20
Papa amarilla	45	30	90	15

Nota: Adaptado de la entrevista a experto en cultivo de papa y cebolla en páramos.

**4.3.2.3. Profundidad radicular.** La Tabla 13 presenta los valores estimados de la profundidad radicular.

**Tabla 13.***Profundidad radicular*

<b>Cultivo</b>	<b>Inicial (m)</b>	<b>Final (m)</b>
Cebolla	0.30	0.50
Papa negra	0.40	0.50
Papa amarilla	0.40	0.45

Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

**4.3.2.4. Factor de agotamiento crítico.** La Tabla 14 presenta los valores estimados del agotamiento crítico.

**Tabla 14.**

*Factor de agotamiento crítico*

<b>Cultivo</b>	<b>inicial</b>	<b>medio</b>	<b>Final</b>
Cebolla	0.10	0.15	0.20
Papa negra	0.20	0.25	0.30
Papa amarilla	0.20	0.25	0.30

Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

**4.3.2.5. Factor de respuesta de la productividad Ky.** La Tabla 15 presenta los valores estimados del factor de respuesta de la productividad Ky. El cual detalla la reducción relativa de la productividad en función a la reducción de la  $ET_c$  ocasionada por la falta de agua.

**Tabla 15.**

*Factor de respuesta de la productividad (Ky)*

<b>Cultivo</b>	<b>inicial</b>	<b>medio</b>	<b>Final</b>
Cebolla	1.10	1.10	1.10
Papa negra	1.10	1.10	1.10
Papa amarilla	1.10	1.10	1.10

Nota: Adaptado de (FAO, 2014).

**4.3.3. Análisis del suelo requerido para el manejo del software CROPWAT 8.0.** El suelo de la zona de estudio es tipo Inceptisol y la textura del suelo es franco arcilloso (Patiño, 2020). Este suelo es originario de almacenamientos fluviónicos residuales, por tanto, está constituido por material mineral de naturaleza volcánica y sedimentaria (Unidad Técnica del Proyecto Panamá, 1975).

La Tabla 16 presenta la información otorgada por el grupo (GPH), sobre los datos de entrada del suelo en el Software CROPWAT 8.0.

**Tabla 16.***Suelo*

<u>Parámetro</u>	<u>Cebolla</u>	<u>Papa</u>
Humedad del suelo disponible total (CC-PMP) (mm/m)	140	150
Tasa máxima de infiltración de la precipitación (mm/día)	27	22
Profundidad radicular máxima (cm)	30	60
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	0	0
Humedad de suelo inicialmente disponible (mm/m)	140	150

Nota: Adaptado de Patiño (2020).

**4.3.4. Demanda de agua requerida para el riego, control y productividad de cultivos.** La demanda de agua requerida para los procesos agrícolas se estimó con los datos recolectados y se estimó el agua utilizada en riego con el programa CROPWAT 8.0. Los resultados arrojados se analizaron desde el mes de septiembre del año 2019 a febrero del año 2020, se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17.***Requerimiento de riego de los cultivos (mm/mes)*

<b>Cultivo</b>	<b>Mes</b>					
	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>
cebolla corte 1	32.10	31.50	7.10			
			6.50	55.90	82.40	5.90
cebolla corte 2	17.00	26.30	86.20	4.70		
				41.10	79.10	84.50
cebolla corte 3	37.40	7.30				
		15.70	81.30	59.80	5.10	
papa negra corte 1	54.90	16.90				
papa negra corte 2	54.90	47.20	101.20	47.50		
papa amarilla corte 1						
papa amarilla corte 2	0	35.80	101.20	71.20	76.50	
<b>TOTAL</b>	<b>196.3</b>	<b>180.7</b>	<b>383.5</b>	<b>280.2</b>	<b>243.1</b>	<b>90.4</b>

Según la estimación de requerimiento de riego de los cultivos obtenida del software CROPWAT 8.0. Los meses con mayor requerimiento de riego durante el periodo analizado son noviembre diciembre, y enero con 383.5 mm/mes, 280.2 mm/mes 243.1 mm/mes respectivamente, esto se debe que en los meses de noviembre y diciembre existe la mayor cantidad de cultivos y estos tres meses pertenecen a un periodo seco del clima los cuales están comprendidos entre noviembre y marzo.

De acuerdo con los resultados de CROPWAT 8.0. El cultivo que más demanda de agua requiere para riego es la cebolla con 766.90 mm/mes, y el cultivo que menos agua requiere para riego es la papa amarilla, con un requerimiento de riego de 284.70 mm/mes.

#### 4.4. Estimación de la Huella Hídrica y Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos en el área de estudio

**4.4.1. Estimación de la radiación y evapotranspiración de referencias.** La tabla 18 presenta los datos de entrada para calcular la radiación y la evapotranspiración de referencia.

**Tabla 18.**

*Datos de entrada y salida del software CROPWAT 8.0 correspondientes al clima*

Mes	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Máxima [°C]	Humedad relativa [%]	Velocidad del viento [m/s]	Insolación [h]	Radiación solar [MJ/ m <sup>2</sup> / día]	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) [mm/ día]
ene	3.2	14.4	82	1.2	7.4	18.9	2.8
feb	3.1	15.9	74	1.2	8.4	21.4	3.3
mar	6.5	14.3	87	1.3	5.3	17.6	2.8
abr	6.7	14.3	88	1.3	5.3	17.6	2.8
may	6.9	13.7	88	1.3	4.7	16.3	2.6
jun	7.0	12.0	91	1.2	3.2	13.7	2.2
jul	5.7	13.6	88	1.3	5.7	17.4	2.6
ago.	5.9	16.6	87	1.4	7.5	20.7	3.2
sept	5.8	22.6	84	1.4	10.8	26.0	4.4
oct	5.5	19.4	85	1.3	9.2	22.7	3.7
nov	5.2	21.4	87	1.2	10.2	23.1	3.8
dic	4.7	14.7	84	1.6	6.7	17.5	2.7
Prom	5.5	16.1	85	1.3	7.0	19.4	3.1

**4.4.2. Requerimiento de agua del cultivo.** La Tabla 19 presenta un cálculo tipo de la estimación en el software CROPWAT 8.0 de la precipitación efectiva y el requerimiento de riego del cultivo de cebolla.

**Tabla 19.**

*Requerimiento de agua*

Mes	kc	Etc. [mm/día]	Etc. [mm/dec]	Prec. Efec [mm/dec]	Req. riego [mm/dec]
Ago.	0.78	2.34	14.00	7.00	8.20
Ago.	0.78	2.48	24.80	12.70	12.20
Ago.	0.79	2.85	31.40	17.90	13.50
Sept.	0.85	3.51	35.10	25.20	9.90
Sept.	0.90	4.16	41.60	30.7	10.90
Sept.	0.94	4.05	40.50	29.20	11.30
Oct.	0.94	3.71	37.10	28.60	8.40
Oct.	0.94	3.49	34.90	28.80	6.10
Oct.	0.93	3.48	38.30	21.30	17.0
Nov.	0.92	3.54	7.10	2.20	7.10
<b>Prom</b>			304.7	203.6	104.5

**4.4.3. Estimación de la Huella Hídrica azul y Huella Hídrica verde de los cultivos.**

La Tabla 20 presenta los resultados de los cálculos de Huellas Hídricas de los cultivos de estudio, para cada cultivo presente en los cortes, durante los 6 meses de estudio desde septiembre de 2019 a febrero de 2020.

**Tabla 20.**

*Estimación Huellas Hídricas respectivas a cada corte de los cultivos presentes en la zona de estudio*

<b>Cultivo</b>	<b>Fecha de siembra</b>	<b>Fecha de cosecha</b>	<b>HHV [m<sup>3</sup>]</b>	<b>HHH [m<sup>3</sup>]</b>
Cebolla corte 1	5/08/2019	2/11/2019	415	177
	5/11/2019	2/02/2020	88	517
Cebolla corte 2	5/09/2019	3/12/2019	438	336
	5/12/2019	4/03/2020	63	519
Cebolla corte 3	5/07/2019	2/10/2019	227	112
	5/10/2019	2/01/2020	267	405
Papa negra corte 1	5/03/2019	30/10/2019	816	359
Papa negra corte 2	5/05/2019	30/12/2019	2026	2508
Papa Amarilla corte 1	5/03/2019	31/08/2019	0	0
Papa Amarilla corte 1	5/08/2019	31/01/2020	2031	2082

La Tabla 21 presenta los resultados de la estimación de las Huellas Hídricas para cada cultivo presente en la zona de estudio.

**Tabla 21.**

*Resultados Huellas Hídricas de los cultivos presentes en la zona de estudio.*

<b>Cultivo</b>	<b>HHV [m<sup>3</sup>]</b>	<b>HHH [m<sup>3</sup>]</b>
Cebolla junca	1497	2064
Papa negra	2842	2867
Papa amarilla	2031	2082

En el (Apéndice C) se expone un cálculo tipo del cálculo de Huella Hídrica, e índices de sostenibilidad. La Tabla 22 presenta una tabla con los resultados de los cálculos de Huellas

Hídricas e índices de sostenibilidad para cada mes de estudio, a su vez se presentan las ofertas de agua estipuladas para cada mes.

**Tabla 22.**

*Resultados Huellas Hídricas e índices Sostenibilidad.*

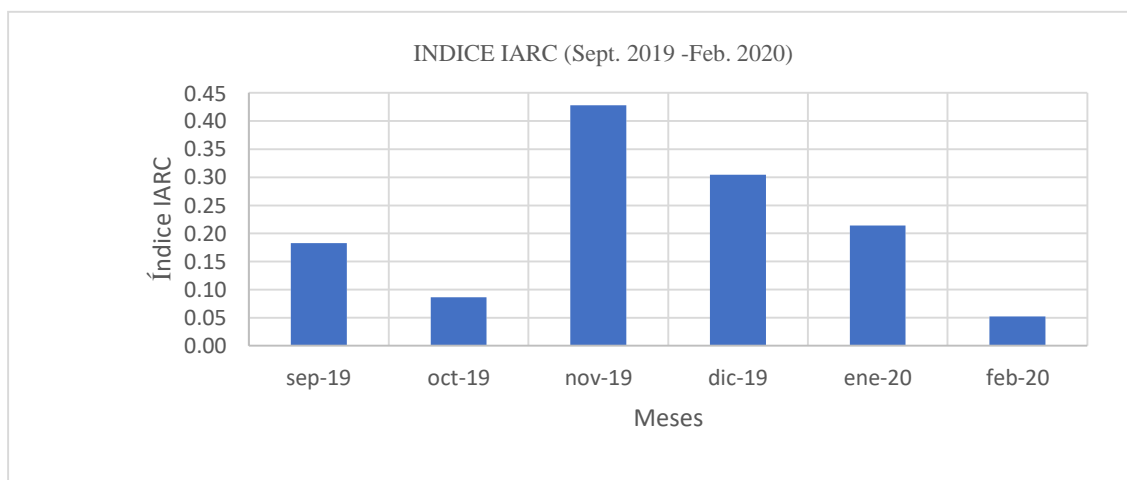
<b>Mes- Año</b>	<b>HHA (m3/mes)</b>	<b>OFERTA (m3/mes)</b>	<b>IARC</b>	<b>HHV (m3/mes)</b>	<b>DAV (m3/mes)</b>	<b>IPHE</b>
Sep.-19	1040	5689	0.18	2747	4436	0.62
Oct.-19	759	8811	0.09	2534	4498	0.56
Nov.-19	2617	6117	0.43	525	1461	0.36
Dic.-19	1591	5226	0.30	543	1506	0.36
Ene. -20	1182	5529	0.21	2	81	0.02
Feb.-20	226	4338	0.05	4	47	0.07

Nota: IARC hace referencia al Índice de Agua que no Retorna a la cuenca, DAV es la Disponibilidad de Agua Verde, IPHE hace referencia al Índice de Presión Hídrica al Ecosistema.

Según los resultados obtenidos de la estimación de Huellas Hídricas y cálculo de los índices de sostenibilidad se realizó un análisis mensual del impacto que genera la agricultura en la zona de estudio, basado en las categorías propuestas en la evaluación multisectorial de la HH en Colombia (ENA, 2014).

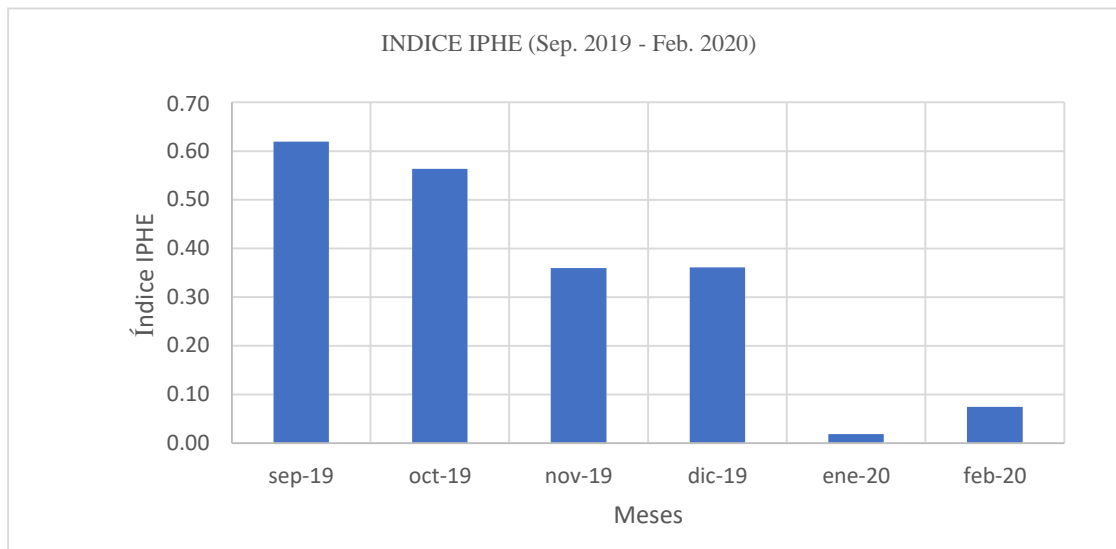
En el mes de septiembre el indicador IARC es moderado, existe una evidencia de una situación de uso y no retorno de agua azul que supera el 10% del agua azul mensual total disponible ; en los meses de octubre de 2019 y febrero de 2020 el IARC se encuentra en una categoría baja, se considera que existe una situación favorable en términos de oferta y demanda de agua azul; en los meses de noviembre, diciembre de 2019 y enero de 2020 el IARC es alto lo que indica que existe una alerta ya que la demanda de agua azul multisectorial supera el 20% del agua azul mensual total disponible.

En los meses de septiembre y octubre de 2019 se evidencia que el IPHE se encuentra en una categoría alta, existe una situación de competencia por agua verde; en los meses de noviembre y diciembre de 2019 el IPHE es moderado, existe una alerta de demanda de agua verde por parte del sector agrícola que supera el 30% del agua verde mensual total disponible y en los meses de enero y febrero de 2020 el IPHE es bajo, se considera que en estos meses existe una situación favorable para los ecosistemas.



**Figura 4.** Índice de agua que no retorna a la cuenca (IARC)

De la Figura 4 sobre el Índice de agua que no retorna a la cuenca se establece un pico del (IARC) de 0.43. Por tanto, según la Tabla 1 establece un estado alto de demanda de agua azul en el mes de noviembre del 2019 del 20%, y tiene un descenso en los meses de diciembre 2019 a febrero del 2020 bajando su demanda de agua azul a menos del 10%.



**Figura 5.** Índice de presión hídrica al ecosistema (IPHE).

De la Figura 5 sobre el Índice de Presión Hídrica al ecosistema se establece un pico donde la competencia por el agua verde en el mes de septiembre del 2019 supera el 60 %, y tiene un descenso en los meses de octubre del 2019 a diciembre del 2019 al 40%, en los siguientes meses de enero del 2020 a febrero del 2020 su competencia de agua verde no supera el 10%.

## 5. Conclusiones

Se realizó la estimación de Huella Hídrica azul y Huella Hídrica verde para cada cultivo durante los 6 meses de estudio desde septiembre de 2019 a febrero de 2020, la cual nos arrojó los siguientes resultados para cada tipo de cultivo: cebolla Junca un valor de Huella Hídrica verde de 1497 ( $m^3$ ) y un valor de Huella Hídrica azul de 2064 ( $m^3$ ); papa negra un valor de Huella Hídrica verde de 2842 ( $m^3$ ) y un valor de Huella Hídrica azul de 2867 ( $m^3$ ); papa amarilla un valor de Huella Hídrica verde de 2031 ( $m^3$ ) y un valor de Huella Hídrica azul de 2082 ( $m^3$ ).

En el desarrollo de este proyecto investigativo se realizó un análisis a nivel de clima, precipitación, cultivo y suelo del área de estudio, para establecer el consumo de agua azul y agua verde de los cultivos, esta relación directa entre el consumo agrícola es cuantificada con los indicadores de Huella Hídrica en la agricultura los cuales pueden permitir establecer políticas y acciones concretas para ahorrar agua en el sector que mayor requerimiento del recurso tiene.

La fuente principal de abastecimiento de agua para la población de las zonas aledañas al páramo de Berlín Santander son las quebradas que se generan a partir del balance hídrico positivo que este presenta. no obstante, en la actualidad el reemplazo de zonas de vegetación natural por cultivos afecta directamente el equilibrio ambiental, ocasionando que la evapotranspiración aumente y disminuya el rendimiento hídrico de estos ecosistemas.

Con el objetivo de ilustrar la importancia de la sostenibilidad en los páramos y la regulación hídrica que estos ejercen en temporadas secas de caudales bajos, se planteó en esta investigación la evaluación de los índices de sostenibilidad sobre la unidad hidrológica donde se abastece la finca de la zona de estudio.

En consecuencia, en la zona de estudio se enfatiza en el ámbito de presión hídrica una situación de alarma debido a que los cultivos ejercen sobre el ecosistema una competencia por el agua verde mayor al 50% en los meses de septiembre y octubre, generando que la evapotranspiración aumente. Asimismo, a causa del clima seco que se presenta en la transición de temporada húmeda a seca del mes de noviembre y diciembre del año 2019, aumenta el requerimiento de agua azul a un pico de 18% en la zona de estudio correspondiente a lo necesario para la efectividad de los cultivos en desarrollo.

Se cuantificó el impacto generado por los cultivos de papa negra, papa amarilla, y cebolla Junca expresándolo en el grado de sostenibilidad, este análisis se realizó en una escala de tiempo mensual debido a que se contaba con datos de la oferta en esta escala de tiempo, desde

septiembre de 2019 a febrero de 2020, por tal motivo se analizó que tan sostenibles son todos los cultivos que se encontraban en desarrollo en cada mes siendo estos unos resultados teóricos, con base en algunos supuestos y estimaciones que deben ser refinados.

En el mes de septiembre existe una situación de uso y no retorno de agua azul que supera el 10% del agua azul mensual total disponible, a pesar de que en este mes se presenta una gran cantidad de cultivos en la zona y todos en su etapa inicial, estos cultivos fueron sembrados dentro de época de lluvia lo cual es favorable y disminuye el requerimiento de riego de los cultivos.

En los meses de octubre de 2019 y febrero de 2020, se considera que existe una situación favorable en términos de oferta y demanda de agua azul, este buen impacto se debe a que en el mes de octubre a pesar de presentar gran cantidad de cultivos es un mes de época lluvia y los cultivos se encuentran en una etapa en donde no requieren gran cantidad de riego, lo cual es favorable y febrero a pesar de pertenecer a una época seca los cultivos presentes en ese mes son pocos y se encuentran en su etapa media y final en la cual no requieren gran cantidad de agua para riego.

en los meses de noviembre, diciembre de 2019 y enero de 2020 existe una alerta ya que la demanda de agua azul multisectorial supera el 20% del agua azul mensual total disponible, esto se debe a que los 3 meses pertenecen a una época seca, en los meses de noviembre y diciembre existe una gran cantidad de cultivos lo cual no es favorable y causa un impacto negativo debido a la época en la que están sembrados. es de resaltar, que los agricultores de la zona implementan estrategias para minimizar esta situación como los calendarios de cultivo que permiten distribuir sus cultivos según el requerimiento de agua, como sucedió en el caso del cultivo de papa amarilla el cual sin duda contribuyó a no estar en un estado crítico ambiental.

En los meses de septiembre y octubre de 2019 se evidencia una situación de competencia por agua verde. Esto se puede deber a que en esos meses existen precipitaciones altas, en los

meses de noviembre y diciembre el cultivo presenta un uso moderado del recurso de agua verde disponible, sin embargo, existe una alerta de demanda de agua verde por parte del sector agrícola y en los meses de enero y febrero la situación es favorable. Cabe resaltar que en estos dos meses la cantidad de cultivos en la zona es mínima en comparación de los otros meses y los cultivos se encuentran en la etapa final en la que no requieren tanta agua.

### Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, 297-*).  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.042>
- Brito, L. A., Iribarnegaray, M., Salas, A., & Seghezzo, L. (2015). Huella del agua del cultivo de tabaco en el área metropolitana del valle de Lerma, provincia de Salta, 19(octubre), 1–11. Recuperado de [http://www.asades.org.ar/Averma/Huella del agua del cultivo de tabaco en el area Metropolitana del Valle de Lerma, provincia de salta. L.A. Brito, M.A. Iribarnegaray, A.G.J. Salas Barboza, L. Seghezzo %5B2015 - Tema 1%5D.pdf](http://www.asades.org.ar/Averma/Huella%20del%20agua%20del%20cultivo%20de%20tabaco%20en%20el%20area%20Metropolitana%20del%20Valle%20de%20Lerma%20provincia%20de%20salta.pdf)
- Camacho, W. A., & Uribe, D. A. (2018). Estimación De La Huella Hídrica Azul Y Verde De La Producción Cafetera En Ocho Cuencas En El Sur Del Departamento Del Huila - Estimation of the Blue and Green Water Footprint of Coffee Production in Eight Basins in the South of the Department of Huila. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*.
- Celis, A. (2019). “Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo.” Propuesta de trabajo de grado, Maestría en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA). (2013). Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca Porce. 121. <https://doi.org/10.1126/science.1191181>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products. *Virtual Water Trade Proceedings of International Expert Meeting on Virtual Water Trade - Value of Water*, (Research report series No.12), 49–76.

- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4), 749-758. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.11.012
- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental [CORPONOR], (2009). Estado actual del páramo región nororiental unidad biogeográfica Santurbán, Evaluación y zonificación. Capítulo V. Recuperado de [https://santurban.minambiente.gov.co/images/Pdf\\_santurban/antecedentes/Estado-Actual-Paramo-Santurban\\_Capitulo5.pdf](https://santurban.minambiente.gov.co/images/Pdf_santurban/antecedentes/Estado-Actual-Paramo-Santurban_Capitulo5.pdf)
- CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2015. Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia. Resultados por subzona hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Medellín, Colombia.
- Egan, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Social and Environmental Accountability Journal* (Vol. 31). <https://doi.org/10.1080/0969160x.2011.593864>
- Elbeltagi, A., Deng, J., Wang, K., & Hong, Y. (2020). Crop water footprint estimation and modelling using an artificial neural network approach in the Nile delta, Egypt. *Agricultural Water Management*, 235 doi: 10.1016/j.agwat.2020.106080
- ENA. (2014). Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia Resultados por subzona hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Dirección Componente Huella Hídrica En ENA, 1–160. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- GPH, (2020). “Caracterización de prácticas agrícolas en una microcuenca de páramo” Proyecto: Análisis participativo de la influencia del uso del suelo en los servicios hidrológicos de suministro y regulación ofertados por el ecosistema de páramo seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander-Colombia), Información no publicada, Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).

Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). *Los Páramos del Mundo*. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], (2019). SISTEMA DE INFORMACIÓN ESTACIÓN BERLÍN AUTOMÁTICA (*otros datos climatológicos*) Código 37015030. Municipio de Toná, Santander.

ISO 14046:2014, Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices. (n.d). Retrieved May 25, 2019, from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>

Lathuillière, M. J., Coe, M. T., Castanho, A., Graesser, J., & Johnson, M. S. (2018). Evaluating water use for agricultural intensification in southern Amazonia using the water footprint sustainability assessment. *Water (Switzerland)*, 10(4) doi:10.3390/w10040349

Mallma, T., & Mejía, J. (2015). Huella Hídrica de productos agrícolas producidos en la sierra central y comercializados en Lima. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1259-1276. doi:10.5194/hess-14-1259-2010

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>

Novoa, V., Rojas, O., & Arumí, J. (2014). Huella Hídrica del cultivo de maíz en una cuenca agrícola de Chile central. Universidad de Concepción, Chile, Facultad de Ciencias Ambientales.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2009). Programa CROPWT Versión 8.0. Descargado de <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], (2014). Evapotranspiración del cultivo-guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Publicación de la serie de riego y drenaje, N 56.
- Patiño, S. E. (2020). “Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrográficas en ecosistema de páramo asociados a los servicios de regulación y suministro de agua,” Avances de trabajo de grado, Maestría en Ingeniería Civil, Información no publicada.
- Prieto, D. y Reyes, F. (2020). “Análisis del Efecto del Uso del Suelo sobre la Capacidad de Retención y Regulación Hídrica en Microcuencas de Páramo. Caso de Estudio: Berlín (Santander)”, Trabajo de grado de pregrado, Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.
- Renderos, R. (2016). Huella Hídrica el cultivo de caña de azúcar. Universidad “José Simeón Cañas” Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales.
- Restrepo, J., Suárez, C. A., & Álvarez, M. Y. (2008). Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín.” Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga., 103.
- Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2019). Huella hídrica y productividad económica del agua en Nogal Pecanero (*Carya illinoensis*) al sur oeste de Coahuila, México. *Estudios de Economía Aplicada*, 35(3), 697. <https://doi.org/10.25115/eea.v35i3.2503>
- Rodríguez, O. (2013). Estimación de la huella hídrica del cultivo de soja de secano en el partido de Tandil mediante la utilización de información de satélite.
- Rodríguez, R., Garrido, A., & Llamas, M. R. (2015). La huella hidrológica de la agricultura española. *Ingeniería Del Agua*, 16 (1). Recuperado de <https://doi.org/10.4995/ia.2009.2943>

- Sapkota, T. B., Shankar, V., Rai, M., Jat, M. L., Stirling, C. M., Singh, L. K., Grewal, M. S. (2017). Reducing global warming potential through sustainable intensification of basmati rice-wheat systems in India. *Sustainability (Switzerland)*, 9(6) doi:10.3390/su9061044
- Scarpore, F. V., Hernandez, T. A., Ruiz-Corrêa, S. T., Kolln, O. T., Gava, G. J. D. C., Dos Santos, L. N., & Victoria, R. L. (2016). Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4576–4584.
- Silva, L. (2007). Diagnóstico de bienes y servicios ambientales del páramo de Belmira. *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*, 28–36. Recuperado de <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31332>
- Tom, M. S., Fischbeck, P. S., & Hendrickson, C. T. (2016). Energy use, blue water footprint, and greenhouse gas emissions for current food consumption patterns and dietary recommendations in the US. *Environment Systems and Decisions*, 36(1), 92-103. doi:10.1007/s10669-015-9577-
- Unidad Técnica del Proyecto Panamá. (1975). Proyecto de Desarrollo Integrado de la Región Oriental de Panamá – Darién. Recuperado de <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea30s/begin.htm#Contents>
- Vásquez, G. (2011). Los Bosques Plantados y la Huella Hídrica, la Respuesta Hidrológica y la Hidrosolidaridad. *Seventh Inter-American Dialogue on Water Management*, (November 2011).
- Vázquez, K. (2014). Las Dinámicas de las actividades de producción y consumo en el sector rural: Reflexiones a partir del caso del centro poblado (CP) del corregimiento de Berlín, Santander. *Revista M*. 11. 46. 10. 15332/rev.m. v11i2.1724.

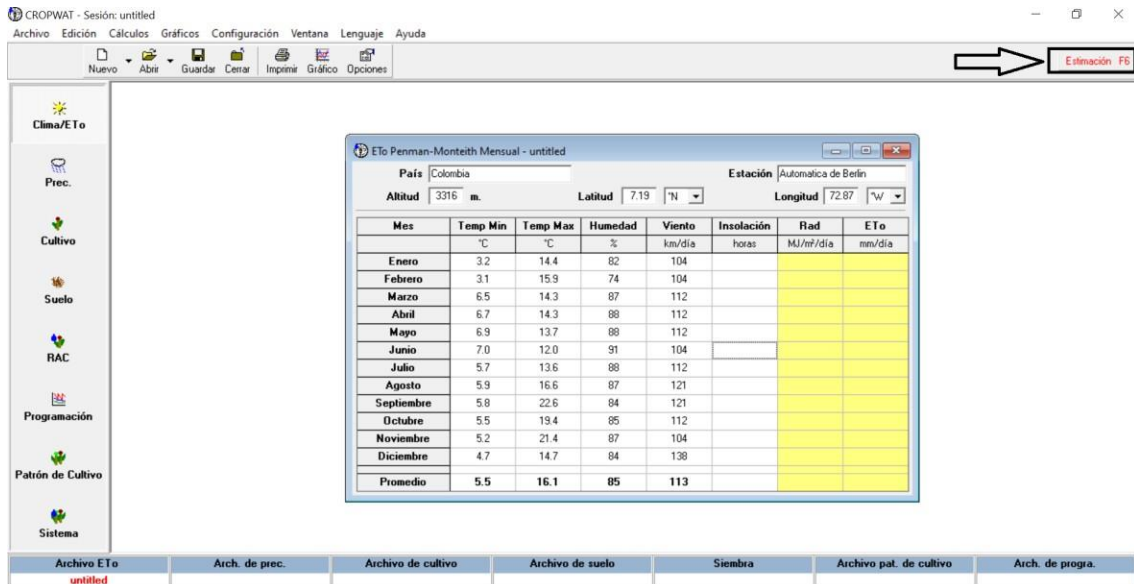
Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2771-2012>

Zubieta, O. (2019). Huella hídrica de los principales cultivos en Navarra (Tesis de grado). Universidad Pública de Navarra. Recuperado de [https://academic.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/34632/TFG\\_ZubietaOlcoz%2CLEire.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academic.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/34632/TFG_ZubietaOlcoz%2CLEire.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## Apéndices

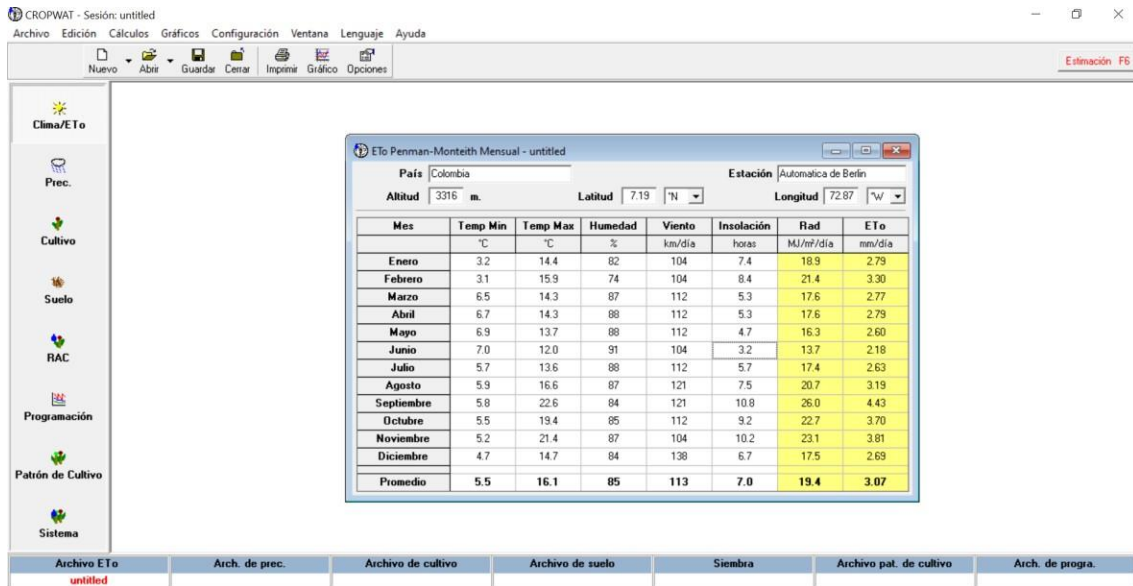
### Apéndice A. Estimación de Insolación [horas], Radiación [MJ/m<sup>2</sup>/día] y ETo [mm/día]

Datos de entrada al programa CROPWAT 8.0 (Figura 4).



**Figura 6.** Ingreso de los datos de los meteorológicos suministrados por el IDEAM y la ubicación geográfica de la estación Hidrometeorológica de Berlín. Nota: Adaptado de Programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2009).

De los datos de la ubicación geográfica de la estación Automática de Berlín como altitud, latitud, longitud, datos de temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento se estima con el programa CROPWAT 8.0 la insolación para cada mes del año en horas, la radiación neta y la ETo. (Figura 5).



**Figura 7.** Estimación de la Insolación, Radiación Neta, y ETo por el programa CROPWAT

8.0 (FAO, 2009).

**Apéndice B. Coeficientes y altura máxima de cultivos****Figura B1.** Coeficientes Únicos de cultivo y altura máxima.

Cultivo	$K_{c, in}^1$	$K_{c, med}$	$K_{c, fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>	<b>0,7</b>	<b>1,05</b>	<b>0,95</b>	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
<b>b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas</b>	<b>0,6</b>	<b>1,15</b>	<b>0,80</b>	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05 <sup>2</sup>	0,90	0,7
Tomate		1,15 <sup>2</sup>	0,70–0,90	0,6
<b>c. Hortalizas– Familia de las Cucurbitáceas</b>	<b>0,5</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00 <sup>2</sup>	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>	<b>0,5</b>	<b>1,10</b>	<b>0,95</b>	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80 <sup>3</sup>	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75 <sup>4</sup>	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70 <sup>5</sup>	0,5

**Nota:** Adaptado de (FAO, 2014)

**Apéndice C. Cálculo tipo para hallar la HH Verde y Azul; y evaluación de sostenibilidad.**

Aclaración: el cálculo tipo se hizo de acuerdo con los datos obtenidos del mes de septiembre y se halló tanto la HH Verde y Azul como también la evaluación de sostenibilidad.

$ET_C$  Azul Y  $ET_C$  Verde para los cultivos de cebolla verde, papa negra y papa amarilla mostrados en la Tabla C1.

**Tabla C1.**

*Valores Totales de  $ET_{cAzul}$  y  $ET_c$  Verde para el mes de septiembre del cultivo de cebolla verde.*

<b>Corte</b>	<b>Corte 1</b>		<b>Corte 2</b>		<b>Corte 3</b>	
Mes	Prec. Efec	Req. Riego	Prec. Efec	Req. Riego	Prec. Efec	Req. Riego
Septiembre	25.20	9.90	15.10	6.80	25.20	13.80
Septiembre	30.70	10.90	30.70	5.30	30.70	12.70
Septiembre	29.20	11.30	29.20	4.90	29.20	10.90
$\Sigma$	85.10	32.10	75.00	17.00	85.10	37.40

**Nota:**  $ET_C$  azul = requerimiento de riego y Precipitación efectiva =  $ET_C$  verde. Adaptado de Programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2009).

$$ET_{C\ AZUL}Cebolla = 86.50\ mm/mes$$

$$HHA\ Cebolla = 216.25\ \frac{m^3}{mes}$$

$$ET_{C\ VERDE}\ Cebolla = 245.20\ \frac{mm}{mes}$$

$$HHV\ Cebolla = 613.00\ \frac{m^3}{mes}$$

**Tabla C2.**

*Valores Totales de Eta Azul y Eta Verde para el mes de septiembre del cultivo de papa negra.*

<b>Corte</b>	<b>Corte 1</b>		<b>Corte 2</b>	
Mes	Prec. Efec	Req. Riego	Prec. Efec	Req. Riego
Septiembre	25.20	19.20	25.20	19.20
Septiembre	30.70	18.70	30.70	18.70
Septiembre	30.50	17.00	29.20	17.00
$\Sigma$	86.40	54.90	85.10	54.90

**Nota:**  $ET_C$  azul = requerimiento de riego y  $ET_C$  Verde = precipitación efectiva. Adaptado de Programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2009).

$$ET_{C \text{ AZUL}} \text{ papa c1} = 54.90 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHa C1 = 274.50 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$ET_{C \text{ AZUL}} \text{ papa c2} = 54.90 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHa C2 = 549.00 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$ET_{C \text{ VERDE}} \text{ papa c1} = 86.40 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHV C1 = 432.00 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$ET_{C \text{ VERDE}} \text{ papa c2} = 85.10 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHV C2 = 851.00 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

### Tabla C3.

Valores Totales de  $ET_c$  Azul y  $ET_c$  Verde para el mes de septiembre del cultivo de papa amarilla.

<u>Corte</u>	<u>Corte 1</u>		<u>Corte 2</u>	
Mes	Prec. Efec	Req. Riego	Prec. Efec	Req. Riego
Septiembre	0.00	0.00	25.20	0.00
Septiembre	0.00	0.00	30.70	0.00
Septiembre	0.00	0.00	29.20	0.00
$\Sigma$	0.00	0.00	85.10	0.00

**Nota:**  $ET_c$  Azul = requerimiento de riego y  $ET_c$  Verde = precipitación efectiva. Adaptado de Programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2009).

$$ET_{C \text{ AZUL}} \text{ papa amarilla c2} = 0.00 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHA c2 = 0.00 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

$$ET_{C \text{ VERDE}} \text{ papa amarilla c2} = 85.10 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}$$

$$HHV c2 = 851.00 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

La suma de todas las huellas hídricas azules de los cultivos del mes de septiembre del año 2019 para la zona de estudio es de:

$$\sum HHA \text{ Septiembre} = 1039.75 \frac{m^3}{mes}$$

La suma de todas las huellas hídricas verdes de los cultivos del mes de septiembre del año 2019 para la zona de estudio es de:

$$\sum HHV \text{ Septiembre} = 2747.00 \frac{m^3}{mes}$$

### **Evaluación de sostenibilidad de la Huella Hídrica Azul.**

Gracias al cálculo realizado de la huella hídrica azul y la oferta de la unidad hidrológica suministrada por el grupo de investigación GPH se procede a calcular el índice de agua no retornada a la cuenca (IARC).

$$\sum HHA \text{ Sept.} = 1039.75 \frac{m^3}{mes}$$

$$OHD = \text{Oferta Sept.} = 5689.00 \frac{m^3}{mes}$$

$$IARC \text{ Sept.} = 0.18$$

### **Evaluación de sostenibilidad de la Huella Hídrica Verde.**

Debido a los cálculos realizados de la huella hídrica verde y la disponibilidad de agua verde mensual. (DAV) hallado de los datos generados por el programa CROPWAT 8.0 se procede a calcular el índice de presión hídrica al ecosistema (IPHE).

$$\sum HHV \text{ Sept.} = 2747.00 \frac{m^3}{mes}$$

$$DAV \text{ Sept.} = 4436.25 \frac{m^3}{mes}$$

$$IPHE \text{ Sept.} = 0.62$$

**Apéndice D. Datos climatológicos estación hidrometeorológica automática de Berlín 37015030.**

Toda la información aquí consignada fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

**Tabla D1.**

*Temperatura del Aire a 2 metros mínima diaria desde enero a diciembre de 2019*

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Suma de Valor</b>	<b>promedio mensual (° C)</b>
Enero de 2019	98,7	3,2
febrero de 2019	88,1	3,1
marzo de 2019	201,3	6,5
abril de 2019	202,0	6,7
mayo de 2019	215,1	6,9
junio de 2019	209,8	7,0
Julio de 2019	178,0	5,7
Agosto de 2019	183,8	5,9
Septiembre de 2019	173,3	5,8
Octubre de 2019	170,8	5,5
Noviembre de 2019	155,0	5,2
Diciembre de 2019	144,7	4,7

**Nota:** Adaptado de (IDEAM, 2019)

**Tabla D2.**

*Temperatura del Aire a 2 metros máxima diaria desde enero a diciembre de 2019*

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Suma de Valor</b>	<b>Promedio mensual (° C)</b>
Enero de 2019	447,7	14,4
febrero de 2019	444,4	15,9
marzo de 2019	442,9	14,3
abril de 2019	429,2	14,3
mayo de 2019	424,7	13,7
junio de 2019	359,3	12,0
Julio de 2019	420,3	13,6
Agosto de 2019	514,4	16,6
Septiembre de 2019	677,8	22,6
Octubre de 2019	600,6	19,4
Noviembre de 2019	642,9	21,4
Diciembre de 2019	456,5	14,7

**Nota:** Adaptado de (IDEAM, 2019)

**Tabla D3.**

*Humedad relativa del aire a 2 metros media diaria desde enero de 2019 a diciembre de 2020*

<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Suma de Valor</b>	<b>promedio mensual (%)</b>
Enero de 2019	2531,8	82
febrero de 2019	2064,9	74
marzo de 2019	2700,8	87
abril de 2019	2634,8	88
mayo de 2019	2715,2	88
junio de 2019	2717,0	91
Julio de 2019	2714,3	88
Agosto de 2019	2699,4	87
Septiembre de 2019	2520,4	84
Octubre de 2019	2625,2	85
Noviembre de 2019	2432,4	87
Diciembre de 2019	2616,8	84

**Nota:** Adaptado de (IDEAM, 2019)

**Tabla D4.**

*Velocidad del viento media diaria desde enero a diciembre de 2019*

<b>Mes</b>	<b>Promedio mensual (km/h)</b>	<b>Promedio mensual (m/s)</b>
Enero de 2019	4,30	1,2
febrero de 2019	4,40	1,2
marzo de 2019	4,50	1,3
abril de 2019	4,60	1,3
mayo de 2019	4,70	1,3
junio de 2019	4,40	1,2
julio de 2019	4,70	1,3
Agosto de 2019	5,00	1,4
Septiembre de 2019	4,91	1,4
Octubre de 2019	4,51	1,3
Noviembre de 2019	4,44	1,2
Diciembre de 2019	5,73	1,6

**Nota:** Adaptado de (IDEAM, 2019)

**Tabla D5.**

*Precipitación total mensual desde enero de 2019 a diciembre de 2020*

<b>Mes</b>	<b>Precipitación mensual (mm)</b>
Enero de 2019	5,40
febrero de 2019	18,81
marzo de 2019	108,27
abril de 2019	92,91
mayo de 2019	147,70
junio de 2019	120,50
agosto de 2019	65,60
Agosto de 2019	82,70
Septiembre de 2019	136,50
Octubre de 2019	128,50
Noviembre de 2019	48,70
Diciembre de 2019	50,20

**Nota:** Adaptado de (IDEAM, 2019)