

**EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL Y GRIS DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA MIEL I DE ISAGEN S.A E.S.P**

**MARCELA URIBE VANEGAS**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2014**

**EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL Y GRIS DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA MIEL I DE ISAGEN S.A E.S.P**

**MARCELA URIBE VANEGAS**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Procesos**

**Asesora**

**GLORIA VELÁSQUEZ GIRALDO**

**Ingeniera Química - Especialista en Gestión Ambiental**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**MEDELLÍN**

**2014**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

Medellín, Noviembre de 2014

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios por darme una familia maravillosa que siempre me ha apoyado y ha creído en mí: mis padres, mi hermano y mi tía, a quienes dedico este trabajo.*

*Agradezco especialmente a mis padres por ser mi apoyo en todos los momentos de la vida, por su paciencia, su comprensión, por todas las oportunidades que me han brindado y sobre todo por darme fuerzas durante la ejecución de este trabajo y por hacer posible la culminación de mi carrera profesional.*

*Gracias a Gloria Velásquez por toda la colaboración brindada, por su tiempo, disponibilidad, acompañamiento y sus valiosos aportes a este trabajo.*

*A la empresa ISAGEN por hacer posible la realización de este proyecto, especialmente a Edier Aristizábal por facilitarme el material de trabajo.*

*A los profesores del Departamento de Ingeniería de Procesos por ser parte fundamental en mi formación como persona y como profesional, en especial a Kevin Molina por su paciencia y todas sus enseñanzas.*

*A todos mis amigos por su apoyo y por darme ánimos, y a mis compañeros de carrera y de trabajo.*

*A quienes ya no están pero que fueron parte importante en este proceso, en especial a Yuan Kuan que fue quien me apoyó inicialmente en este proyecto.*

*A todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron en la exitosa realización de mi trabajo de grado.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xi
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 Objetivo general .....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
3. ANTECEDENTES .....	4
4. MARCO TEÓRICO.....	8
4.1 HUELLA HÍDRICA DE UN PROCESO.....	9
4.1.1 Huella hídrica azul .....	9
4.1.2 Huella hídrica verde .....	10
4.1.3 Huella hídrica gris .....	10
4.2 HUELLA HÍDRICA PARA UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	11
4.3 SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA.....	12
4.3.1 Sostenibilidad de la huella hídrica de una cuenca hidrográfica .....	13
4.3.2 Sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso .....	14
4.3.3 Sostenibilidad de la huella hídrica de un producto.....	14
5. METODOLOGÍA.....	15
5.1 Definición del alcance general .....	16
5.1.1 Alcance geográfico .....	16
5.1.1.1 Ubicación geográfica .....	16
5.1.1.2 Características generales.....	17
5.1.1.3 Definición de fronteras .....	17
5.1.2 Alcance de información base.....	18
5.1.3 Alcance temporal .....	19
5.1.4 Alcance metodológico.....	19
5.2 Recolección de datos .....	20
5.2.1 Datos hidrológicos, climatológicos, generación de energía y niveles del embalse.....	20
5.2.1.1 Datos hidrológicos.....	20
5.2.1.2 Datos climatológicos .....	21
5.2.1.3 Datos de nivel del embalse y generación de energía.....	23
5.2.2 Concentraciones de los parámetros DBO, DQO y SST .....	24

5.3	Cálculo de huella hídrica .....	27
5.3.1	Huella hídrica azul .....	27
5.3.1.1	Cálculo de evaporación .....	28
	Cenicafé .....	28
	García y López .....	30
	Thornthwaite .....	31
	Turc modificada .....	33
5.3.1.2	Cálculo de huella hídrica .....	34
5.3.2	Huella Hídrica gris .....	39
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	41
6.1	Resultados de evapotranspiración .....	41
6.1.1	Resultados con Cenicafé .....	41
6.1.2	Resultados con García y López .....	42
6.1.3	Resultados con Thornthwaite .....	43
6.1.4	Resultados con Turc modificada .....	43
6.2	Análisis de sostenibilidad .....	44
6.2.1	Resultados de huella hídrica azul .....	44
6.2.2	Resultados de huella hídrica gris .....	51
6.2.3	Comparación de resultados con otras huellas hídricas de centrales hidroeléctricas .....	52
7.	CONCLUSIONES .....	54
8.	RECOMENDACIONES .....	55
	BIBLIOGRAFIA .....	56
	ANEXOS .....	60

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Huella hídrica azul para una etapa de proceso .....	9
Ecuación 2. Huella hídrica azul para una central hidroeléctrica .....	11
Ecuación 3. Volumen total de agua evaporada anualmente en el embalse .....	11
Ecuación 4. Huella hídrica azul para proceso de generación de energía en central hidroeléctrica .....	27
Ecuación 5. Agua evaporada en el embalse .....	27
Ecuación 6. Área inundada.....	28
Ecuación 7. Evapotranspiración potencial por el método Cenicafé .....	29
Ecuación 8. Evapotranspiración potencial por el método de García y López.....	30
Ecuación 9. Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite .....	31
Ecuación 10. Evapotranspiración potencial por el método de Turc modificada .....	33
Ecuación 11. Huella hídrica gris para diferentes contaminantes .....	39

## Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Esquema metodológico para cálculo y análisis de huella hídrica de la Central Miel I .....	15
<i>Figura 2.</i> Definición de fronteras del sistema para la huella azul y gris .....	18
<i>Figura 3.</i> Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2011 .....	45
<i>Figura 4.</i> Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2012 .....	46
<i>Figura 5.</i> Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2013 .....	47
<i>Figura 6.</i> Generación vs. Huella hídrica azul – año 2011 .....	49
<i>Figura 7.</i> Generación vs. Huella hídrica – año 2012.....	49
<i>Figura 8.</i> Generación vs. Huella hídrica – año 2013.....	50

## Lista de tablas

Tabla 1. Caudales promedio de la Central Miel I para 2011, 2012 y 2013 .....	20
Tabla 2. Variables climatológicas medidas en la estación Berlín para 2011, 2012 y 2013 .....	22
Tabla 3. Nivel del embalse Amaní y generación de energía en la central Miel I para 2011, 2012 y 2013.....	23
Tabla 4. Caudal afluente y turbinado para la huella hídrica gris .....	25
Tabla 5. Concentraciones de entrada de DBO, DQO, OD y SST.....	25
Tabla 6. Concentraciones de salida de DBO, DQO, OD y SST.....	26
Tabla 7. Concentración máxima permitida de DBO, DQO, OD y SST .....	26
Tabla 8. Concentración natural de DBO, DQO, OD y SST.....	27
Tabla 9. Cálculo de evapotranspiración por el método Cenicafé.....	29
Tabla 10. Cálculo de evapotranspiración por el método de García y López .....	30
Tabla 11. Cálculo de evapotranspiración por el método de Thornthwaite .....	32
Tabla 12. Cálculo de evapotranspiración potencial por el método de Turc modificada .....	33
Tabla 13. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2011 por método Cenicafé .....	36
Tabla 14. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2012 por método Cenicafé.....	37
Tabla 15. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2013 por método Cenicafé .....	38
Tabla 16. Huella hídrica azul mensual para 2011, 2013 y 2014 .....	39
Tabla 17. Huella hídrica azul: Valores máximos, mínimo, medios y totales para años 2011, 2012 y 2013.....	39
Tabla 18. Huella hídrica gris para DBO, DQO y SST .....	40
Tabla 19. Desviación estándar de cada ecuación con respecto al valor de referencia .....	44
Tabla 20. Concentración de los parámetros SST, SDT, ST, Fósforo total y Nitrógeno total antes y después del embalse .....	51
Tabla 21. Comparación de huella hídrica azul de la central Miel I frente a otras centrales hidroeléctricas .....	53

## **Anexos**

Anexo A. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2011 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada .....	61
Anexo B. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2012 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada .....	62
Anexo C. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2013 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada .....	63
Anexo D. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Cenicafé	64
Anexo E. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método García y López.....	64
Anexo F. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Thornthwaite.....	65
Anexo G. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Turc modificada .....	65

## RESUMEN

El presente trabajo pretende cuantificar la huella hídrica azul y gris del proceso de generación de energía llevado a cabo en la central hidroeléctrica Miel I de ISAGEN, así como analizar la sostenibilidad ambiental de dicho proceso a partir de los resultados arrojados por la medición de huella hídrica. Se tomó como referencia la metodología de cálculo expuesta en el *Manual de Evaluación de Huella Hídrica* (Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica azul se calculó mensualmente para los años 2011, 2012 y 2013 y posteriormente se totalizó el valor para cada año obteniendo como resultado 1.188, 2.137 y 1.847 m<sup>3</sup>/GJ respectivamente. Para dicho cálculo, se emplearon los resultados de evaporación obtenidos mediante la ecuación de Cenicafé. Asimismo, se compararon dichos resultados con otros reportados en la literatura, de centrales hidroeléctricas con características similares, y se concluyó que la central Miel I es ambientalmente sostenible analizando los resultados de huella hídrica azul. Se determinó también que esta central no afecta la disponibilidad de agua, ni por cantidad ni por calidad, en la cuenca del río La Miel. La huella hídrica gris se calculó para DBO, DQO y SST con datos específicos de ciertos días del año 2014 y para los tres parámetros se obtuvieron resultados negativos, lo cual indica que la central tiene un impacto positivo sobre el tramo analizado de la cuenca del río La Miel.

**Palabras clave:** huella hídrica azul, huella hídrica gris, hidroeléctrica, generación de energía, sostenibilidad ambiental, Cenicafé, Central Miel.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la mayor parte de la energía generada proviene de las hidroeléctricas (UPME, 2012) y, dentro de ellas, ISAGEN es una de las más grandes empresas generadoras de energía a nivel nacional. Así como la mayoría de las industrias, las centrales hidroeléctricas tienen el agua como materia prima principal para la generación del producto o servicio y por tanto debe ser tema de interés para ISAGEN el cuidado y la gestión sostenible de este recurso.

En varias cumbres internacionales ya se ha debatido si las centrales hidroeléctricas simplemente usan el agua de una corriente (y posteriormente la devuelven) o si en realidad son consumidoras del recurso hídrico. Teniendo en cuenta la afirmación que indica que la energía hidráulica representa cerca del 16% del suministro total de energía a nivel mundial (Mekonnen & Hoekstra, 2011) este tema ha sido motivo de estudio en varias partes del mundo y para ello se ha utilizado el concepto de huella hídrica, específicamente la huella hídrica azul, para evaluar el consumo de agua superficial.

ISAGEN se ha vinculado a varias iniciativas ligadas a la reducción del cambio climático y a una huella de carbono cero (ISAGEN S.A E.S.P, 2011); sin embargo, no cuenta actualmente con una medida de huella hídrica en ninguna de sus centrales hidroeléctricas, lo cual resultaría importante conocer teniendo en cuenta que esta sería una herramienta de medición que podría contribuir a corregir los impactos y las tendencias negativas detectadas (relacionadas con la gestión sostenible del agua) así como a entender el agua como algo más allá de un simple recurso y a concientizarse de la importancia de recuperar y mantener el buen estado de las cuencas ante la evidente crisis de agua que está enfrentando el mundo actualmente.

La huella hídrica es un indicador de uso de agua dulce, que incluye tanto el uso de agua directo como indirecto; indica el volumen de agua utilizada para producir un producto, medido a lo largo de toda la cadena de suministro (Hoekstra et al., 2011). Se entiende por huella hídrica azul el consumo de agua dulce, bien sean aguas superficiales o subterráneas, que no regresan al lugar de donde fueron captadas sino que se retornan en otra parte del ciclo del agua; se puede, luego de calcularla, analizar su sostenibilidad ambiental teniendo en cuenta la disponibilidad de agua y analizando a partir de ello si la cuenca sufre o no estrés hídrico; además se podrá comparar cómo está la huella hídrica de esta central en relación con otras de características similares reportadas en la literatura. La huella hídrica gris se refiere al volumen de agua necesario para asimilar la carga de contaminantes sin que estos alteren la calidad del cuerpo de agua; conociendo este dato se podrá determinar

entonces si los niveles de contaminación medidos antes y después del embalse cumplen o no con lo establecido en la reglamentación ambiental correspondiente y saber si esta huella es sostenible o insostenible ambientalmente.

El presente trabajo pretende calcular la huella hídrica azul y gris para la central hidroeléctrica Miel I de ISAGEN y, a partir de esta herramienta, analizar la sostenibilidad ambiental del proceso.

ISAGEN es una empresa comprometida con la protección del medio ambiente y contribuye a un desarrollo sostenible especialmente en las áreas de influencia de sus centrales. Es por ello que cuenta con un Sistema de Gestión Ambiental certificado bajo la norma NTC ISO 14001:2004, además de tener estructurados los Planes de Manejo Ambiental que buscan crear y mantener condiciones de sostenibilidad ambiental y de trabajar de la mano con diferentes instituciones y gremios a nivel nacional e internacional con el fin de implementar las tendencias de gestión y sostenibilidad ambiental que van surgiendo en el mercado (ISAGEN S.A E.S.P, 2012) Teniendo en cuenta lo anterior, se espera que la huella hídrica de la central Miel I sea ambientalmente sostenible y que los parámetros de calidad de agua monitoreados en las fuentes receptoras sean afectados positivamente (se espera una huella hídrica gris negativa).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Realizar el análisis de la huella hídrica de la central hidroeléctrica Miel I de ISAGEN con el fin de evaluar la sostenibilidad ambiental de dicho proceso.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar los parámetros fisicoquímicos medidos aguas arriba y aguas abajo del embalse Amaní, así como caudales de entrada, remanente y turbinado con el fin de efectuar cálculos de huella hídrica.
- Calcular la huella hídrica azul y gris de la central hidroeléctrica Miel I de ISAGEN con el fin de evaluar la sostenibilidad ambiental de dichas huellas a partir de un análisis de datos como caudales disponibles en la cuenca en períodos mensuales y parámetros fisicoquímicos medidos aguas arriba y aguas abajo del embalse.
- Comparar la huella hídrica calculada para la central Miel I contra la huella hídrica de otras centrales hidroeléctricas a nivel mundial reportadas en la literatura.

### 3. ANTECEDENTES

La preocupación por el tema de los recursos hídricos en el mundo lleva varias décadas siendo objeto de estudios, acuerdos y reuniones internacionales. Con el pasar del tiempo, la humanidad se ha hecho más consciente de la importancia de conservar y cuidar el agua y, a raíz de la identificación de dicha necesidad, poco antes de comenzar la década de los noventa, Fishelson (1989) concluyó que no era viable exportar bienes que requirieran grandes cantidades de agua siendo producidos en países con problemas de escasez de agua. A partir de ello, el investigador británico, John Anthony Allan, definió el concepto de agua virtual a principios de los noventa (Allan, 1993), el cual sirvió de base para que varios investigadores empezaran a desarrollar un nuevo concepto llamado “huella hídrica”. Inicialmente el concepto fue aplicado a las naciones en un estudio realizado por Hoekstra & Hung (2002) y en otro posterior a éste realizado por Chapagain & Hoekstra (2003). Ambos estudios se refieren además a la huella hídrica como un término análogo a la “huella ecológica” y toman datos dentro del periodo comprendido entre los años 1995 a 1999.

Basado en los dos estudios mencionados, surge uno nuevo titulado “*Water Footprints of Nations, Main Report*” (Chapagain & Hoekstra, 2004) en el cual se evalúa y se mide la huella hídrica de varios países tomando datos del periodo comprendido entre los años 1997 y 2001. Los resultados que arrojó dicho estudio muestran una huella hídrica global de 7450 Gm<sup>3</sup>/año, lo que equivale a 1240 m<sup>3</sup>/cap/año. Se puede apreciar en dichos resultados la amplia diferencia que existe en el valor de la huella hídrica de grandes naciones como son Estados Unidos y China: para la primera, el valor de huella hídrica promedio fue de 2480 m<sup>3</sup>/cap/año mientras que China tiene una huella promedio de 700 m<sup>3</sup>/cap/año. La elevada huella hídrica de Estados Unidos, según análisis de los mismos autores, puede deberse a cuatro factores diferentes: al volumen total de agua que se consume, a la costumbre de los habitantes de mantener un consumo intensivo de agua, al clima y finalmente al mal manejo que se le da al agua en la agricultura.

Teniendo ya un primer acercamiento al concepto de “huella hídrica”, algunos estudios subsiguientes fueron dedicados a medir la huella hídrica de ciertos productos. Uno de ellos fue la evaluación de la huella hídrica del consumo de algodón a nivel mundial (Chapagain et al., 2006) cuyos resultados muestran que entre los años 1997 y 2001 el consumo mundial de productos de algodón requirió 256 Gm<sup>3</sup>/año y el mayor impacto de la huella se observa en países como India y Uzbekistán. Se indica además que el consumo de algodón es responsable del 2.6% del uso global de agua.

Siguiendo la línea de medición de huella hídrica de los productos, otros estudios contemplan, por ejemplo, la medición de la huella hídrica por el consumo de té y café en Holanda, teniendo en cuenta el agua utilizada por los países exportadores

en el cultivo de estos productos, así como la cantidad de agua requerida en el proceso posterior al cultivo. Cabe anotar aquí que Holanda importa el café principalmente de Brasil y Colombia y el té proviene de Indonesia, China y Sri Lanka; por tanto, el agua necesaria para beber café o té en un país como Holanda es “agua virtual” importada. Finalmente en el estudio se concluye que la huella hídrica total debido al consumo de café y té en Holanda es de 2.7 miles de millones de m<sup>3</sup> de agua por año (Chapagain & Hoekstra, 2007).

Con el pasar de los años, se fueron introduciendo nuevos términos y estudios de mayor alcance, como es el caso del estudio realizado por Mekonnen & Hoekstra (2010), en el cual se realizó la medición de huella hídrica de algunos cultivos y productos derivados de estos, discriminados en tres componentes: huella hídrica azul, verde y gris, además abarca un periodo de tiempo mayor a los estudios previos: de 1996 a 2005. Es importante anotar que, previo a éste, se habían realizado otros importantes estudios en los cuales se estimaba en consumo de agua total en ciertos cultivos; sin embargo, ninguno de ellos contaba con una medición de huella hídrica gris en el campo de la agricultura. Como resultado de este estudio, se obtuvo que la huella hídrica global en relación con la producción agrícola para el periodo mencionado fue de 7404 billones de m<sup>3</sup> por año, de los cuales, el 78% corresponde a huella verde, el 12% a huella azul y el 10% a huella gris. El trigo y el arroz presentaron la mayor huella hídrica azul; a nivel de países, aquellos que presentaron una mayor huella hídrica total fueron India, China y Estados Unidos.

Dada la importancia que empezó a tomar el tema de la huella hídrica y tras las inquietudes de investigadores y organizaciones que vieron necesario un manual en cuyo contenido se apreciara una descripción completa, consistente y actualizada sobre cómo llevar a cabo la medición de huellas hídricas, la “Red de Huella Hídrica” (WFN por sus siglas en inglés) lanza la “Metodología Estándar de Cálculo de Huella Hídrica”, como un primer acercamiento a lo que sería el manual definitivo. Dicha publicación contenía los métodos para la cuantificación de la huella hídrica e indicaba cómo podía ser medida la huella hídrica de un proceso, de un producto, de un consumidor, un productor, una empresa o una nación entera (Hoekstra et al., 2009). Desde que fue publicada, los autores advirtieron sobre una segunda y otras posteriores versiones que incluyeran recomendaciones, correcciones, mejoras y nuevos casos de estudio. Fue así como surgió entonces el “Manual de Evaluación de Huella Hídrica” que es una versión actualizada, mejorada y más amplia de la Metodología publicada en 2009, además de que cuenta con la opinión y realimentación de los expertos y aquellos que se han dedicado a estudiar el tema, lo que lo convierte en un documento base para cualquier estudio a realizar por parte de empresas o gobiernos que deseen cuantificar su huella hídrica con el fin de formular estrategias sostenibles con respecto a este recurso (Hoekstra et al., 2011).

En el ámbito nacional se han realizado pocos estudios al respecto pero han sido de un gran aporte para la política y el manejo ambiental que se debe empezar a implementar en el tema del agua. El primero de ellos es el proyecto “SuizAgua

Colombia” coordinada por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE – que se inició en 2009 y con el cual se buscaba medir la huella hídrica de ciertas empresas suizas que tienen operación en Colombia, entre las que se encontraban Clariant, Nestle, Sygenta y Holcim. Para el 2012 se avanzó a una nueva fase: se continuó con la medida de la huella en las empresas pero ahora se incluyeron otras siete empresas colombianas, además se abrió una nueva línea de investigación en el proyecto con la cual se pretendía aplicar el concepto de huella hídrica en una cuenca prioritaria en Colombia. De esta manera surge entonces otro proyecto importante para el país en cuanto al tema de huella hídrica que fue “Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del río Porce” para el cual se formó un equipo multidisciplinario dedicado a cuantificar la huella hídrica en diferentes sectores económicos (agrícola, pecuario, urbano, industrial, energía, minería), a analizar su sostenibilidad y finalmente a formular estrategias de respuesta según los resultados obtenidos (Diego Arévalo & Campuzano, 2013).

Otro antecedente en el tema es el estudio nacional de la huella hídrica de Colombia en el cual se realizó, entre otras, la cuantificación de la huella hídrica agrícola, cuyos resultados permitieron seleccionar un grupo de zonas hidrográficas en las que se detectó que era importante un estudio más detallado en el que se redujera la escala y se profundizara la metodología. A partir de esto, surge el caso de estudio en la cuenca del río Porce.

Para finalizar con los estudios en el ámbito nacional, se realizó un trabajo en el cual se interpretaron y analizaron ciertos indicadores relacionados con la producción, el consumo y la contaminación, haciendo referencia al tema del recurso hídrico; para ello se tomaron datos de varios estudios tanto internacionales como nacionales, entre los cuales se destaca el Estudio Nacional de Huella Hídrica en Colombia en el sector Agrícola (Rodríguez et al., 2012).

En el sector energético se han realizado algunos estudios a nivel mundial en los cuales se ha calculado huella hídrica de diferentes fuentes de energía. Uno de ellos fue planteado por Gerbens-Leenes et al., (2008, (Gerbens-Leenes, Hoekstra, & Van der Meer, 2009) en los cuales se midió la huella hídrica de diferentes fuentes de energía derivadas de la biomasa; esta huella fue definida en este caso como la cantidad de agua empleada para generar una unidad de energía ( $m^3/Gj$ ). Una importante conclusión de dicho estudio fue que la huella hídrica de la bio-energía (energía proveniente de combustibles como biodiesel, etanol, carbón y biogás) es mucho mayor que la huella hídrica que genera la energía a partir de combustibles fósiles. Indican también los autores que, teniendo en cuenta que las sociedades occidentales tienen un uso promedio *per cápita* de energía equivalente a  $100Gj/cápita/año$ , la huella hídrica que se generaría para satisfacer esta demanda sería de  $35 m^3/cápita/año$  si se utilizan combustibles fósiles en la generación de la energía, frente a una huella de  $2420 m^3$  en caso de generar dicha energía a partir de biomasa. Esto abre una discusión frente al uso de energía a partir de biomasa como una forma de mitigar el impacto que tiene el uso de combustibles fósiles sobre

cambio climático, pero que a su vez implica el uso de una mayor cantidad de agua para cumplir otras necesidades básicas de la humanidad.

Para el mismo sector energético, ya más específicamente en el campo de las hidroeléctricas, se realizó un estudio en Nueva Zelanda en el cual se midió la huella hídrica de algunas hidroeléctricas del país utilizando tres métodos diferentes: el primero considera la evaporación anual y la energía producida, el segundo tiene en cuenta, además de evaporación y energía generada, la evapotranspiración y el tercero realiza un balance hídrico neto, tomando como salida la evaporación y como entrada la precipitación. Independiente del método, se pudo concluir que la huella hídrica de las hidroeléctricas de Nueva Zelanda es mucho menor que la huella reportada en la literatura internacional ( $22 \text{ m}^3/\text{Gj}$ ). Además, se resalta el efecto que tienen las condiciones climáticas y el área superficial de las represas en la medida de la huella hídrica (Herath et al., 2011). Ambos componentes son mencionados también por Mekonnen & Hoekstra (2011, 2012) en su estudio de Huella hídrica azul de la energía a partir de las hidroeléctricas, en donde se dice que la evaporación anual de una represa depende de estos dos componentes. Dicho estudio cuantificó la huella hídrica azul de 35 hidroeléctricas a nivel mundial, entre las cuales se contemplan tres colombianas (Chivor La Esmeralda, Playas y San Carlos). El análisis permitió concluir que la huella hídrica azul acumulada de todas las hidroeléctricas seleccionadas fue de  $90 \text{ Gm}^3/\text{año}$ , lo que equivale a un 10% de la huella hídrica azul de la producción mundial de cultivos para el año 2000. El promedio en la huella hídrica de las centrales hidroeléctricas fue de  $68 \text{ m}^3/\text{Gj}$ .

#### 4. MARCO TEÓRICO

La huella hídrica es un indicador de uso de agua dulce que tiene en cuenta el consumo de agua, tanto directo como indirecto, de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, una comunidad o una empresa se define como el volumen total de agua dulce empleada para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o la comunidad, o bien, producidos por la empresa (Hoekstra et al., 2011). Es de aquí que se toma la huella hídrica de un bien o servicio como el volumen de agua utilizado directa e indirectamente para su producción, teniendo en cuenta el consumo del agua en cada una de las etapas productivas que se requirieron para la realización del bien o servicio (Arévalo, 2012).

La huella hídrica se puede calcular para un producto, para un grupo de consumidores (por ejemplo, un individuo, familia, pueblo, ciudad, provincia, estado o nación) o de productores (por ejemplo, una organización pública, la empresa privada o sector económico) (Hoekstra et al., 2011). La definición de estos tipos de huella hídrica utilizados para su contabilidad se explica claramente por Sotelo et al., (2011) de la siguiente manera:

- La huella hídrica de un proceso es el elemento básico para calcular la huella hídrica
- La huella hídrica de un producto equivale a sumar las etapas necesarias para producirlo, teniendo en cuenta toda la producción y toda la cadena de suministro.
- La huella hídrica de un consumidor es igual a la suma de la huella hídrica de todos los productos consumidos por él.
- La huella hídrica de un conjunto de consumidores o de una comunidad se halla sumando la huella hídrica de todos los miembros
- La huella hídrica de una empresa equivale a la suma de huella hídrica de los productos finales o transformados que produce la empresa.
- La huella hídrica de un área geográfica determinada (cuena hidrográfica, municipio, provincia o país) es igual a la suma de la huella hídrica de todos los procesos que tienen lugar en dicha área geográfica.
- La huella hídrica total de la humanidad es la suma de la huella hídrica de todos los habitantes del mundo (consumidores) o, lo que es igual, la suma de la huella hídrica de todos los bienes y servicios consumidos anualmente.

La huella hídrica es un indicador multidimensional puesto que muestra los volúmenes de agua consumidos en cada fuente, así como los volúmenes de agua contaminados según el tipo de contaminación, de lo que se infiere que los componentes de la huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente (en un tiempo y una localidad específica) (Hoekstra et al., 2011).

El presente proyecto de grado se basó en la metodología estándar de la huella hídrica propuesta por Water Footprint Network según los trabajos y las

investigaciones de Hoekstra et al., (2009, 2011) las cuales fueron finalmente plasmadas en el *Manual de Evaluación de Huella Hídrica* (Hoekstra et al., 2011) publicado en el año 2011. Asimismo, se tuvo en cuenta la *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca* (Arévalo & Campuzano, 2013), documento generado a partir de la experiencia de aplicación de los conceptos del Manual de Evaluación de Huella Hídrica, en la cuenca del río Porce.

## 4.1 HUELLA HÍDRICA DE UN PROCESO

Para calcular la huella hídrica de un proceso, se hace necesario contemplar los diferentes componentes de aporte (azul, verde y gris), para lo cual se toma como referencia los conceptos básicos explicados por Hoekstra et al., (2011) en el manual de evaluación de huella hídrica.

### 4.1.1 Huella hídrica azul

Es un indicador de uso consuntivo de agua dulce, bien sea superficial o subterránea. El término consuntivo hace referencia a cuatro casos:

- El agua se evapora.
- El agua se incorpora al producto.
- El agua no regresa al mismo lugar de donde fue tomada (por ejemplo, si se devuelve al mar o a otra zona de captación).
- El agua no regresa en el mismo período (por ejemplo, fue tomada en un período seco y se devuelve en un período de lluvias).

El “uso consuntivo de agua” no indica que el agua desaparece, pues ésta permanece en un ciclo y siempre retornará a algún lugar; la huella hídrica azul mide entonces la cantidad de agua disponible en un determinado periodo que se consume, es decir, que no regresa inmediatamente a la misma cuenca de donde fue tomada (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica azul para una etapa de proceso se calcula con la siguiente ecuación:

$$WF_{proc, blue} = BWE + BWI + LFR; \left[ \frac{vol}{tiempo} \right]$$

Ecuación 1. Huella hídrica azul para una etapa de proceso

Donde:

$WF_{proc, blue}$ : “blue water footprint” (huella hídrica azul para etapa de proceso)

*BWE*: "blue water evaporation" (*agua azul evaporada*)

*BWI*: "blue water incorporation" (*agua azul incorporada al proceso*)

*LFR*: "lost return flow"

(*agua devuelta a la cuenca pero que no está disponible para su reutilización dentro de la misma cuenca y en el mismo momento en que fue retirada*)

(Sotelo et al., 2011)

#### 4.1.2 Huella hídrica verde

El agua verde es la precipitación que cae al suelo y no se pierde por escorrentía ni se convierte en agua subterránea sino que se almacena temporalmente en la parte superior del suelo o en la vegetación. Este tipo de agua puede ser productiva en el crecimiento de cultivos, aunque no toda pueda ser absorbida por ellos puesto que siempre existirá la evaporación natural del suelo y además no todas las épocas del año ni todas las zonas son adecuadas para el crecimiento de un cultivo.

La huella hídrica verde es entonces el volumen de agua lluvia consumida durante el proceso productivo (Hoekstra et al., 2011). Este tipo de huella es especialmente relevante en los procesos agrícolas y forestales y es por esto que no se tomó en cuenta para el presente trabajo.

#### 4.1.3 Huella hídrica gris

La huella hídrica gris indica el grado de contaminación de agua dulce en un determinado proceso. Se define como el volumen de agua dulce que es necesario para diluir un contaminante específico de forma que éste no altere la calidad de agua y que no se sobrepasen las concentraciones máximas permisibles o aceptables según la norma vigente en determinada cuenca.

La huella hídrica gris se calcula con la siguiente ecuación:

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}; \left[ \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

Ecuación 2. Huella hídrica gris para una etapa de proceso

Donde:

$WF_{proc, grey}$ : "grey water footprint" (huella hídrica gris para etapa de proceso)

$L$ : carga del contaminante  $\left[\frac{masa}{tiempo}\right]$

$C_{max}$ : concentración máxima aceptable (según estándar de calidad de agua)  $\left[\frac{masa}{vol}\right]$

$C_{nat}$ : concentración natural en el cuerpo de agua receptor  $\left[\frac{masa}{vol}\right]$

(Sotelo et al., 2011)

## 4.2 HUELLA HÍDRICA PARA UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

La huella hídrica azul de la generación eléctrica a partir de energía hidráulica se calcula con base en la siguiente ecuación (Mekonnen & Hoekstra, 2011):

$$WF = \frac{WE}{EG}; \left[\frac{m^3}{GJ}\right]$$

Ecuación 2. Huella hídrica azul para una central hidroeléctrica

Donde:

$WF$ : "water footprint of electricity from hydropower"

(huella hídrica de electricidad a partir de energía hidráulica)  $\left[\frac{m^3}{GJ}\right]$

$WE$ : "water evaporated" (agua evaporada anualmente en el embalse)  $\left[\frac{m^3}{año}\right]$

$EG$ : (cantidad de energía generada anualmente)  $\frac{GJ}{año}$

El volumen total del agua evaporada ( $WE$ ) en el embalse durante el año se define como:

$$WE = \left(10 * \sum_{t=1}^{365} E\right) * A$$

Ecuación 3. Volumen total de agua evaporada anualmente en el embalse

Donde:

$E$ : evaporación diaria [ $\frac{mm}{día}$ ]

$A$ : área del embalse [ha]

Para estimar la evaporación se pueden utilizar diferentes ecuaciones o bien, pueden tenerse en cuenta datos obtenidos de fuentes secundarias (por ejemplo, datos de evaporación calculados con base en estaciones cercanas al embalse).

Entre las ecuaciones más significativas para calcular la evaporación se encuentran Penman-Monteith, Turc, Turc modificada, Thornthwaite, Cenicafé, Budyko, García y López, entre otras (García & Otero, 2005).

Este proyecto también pretende cuantificar la huella hídrica gris del embalse. Para ello se utilizarán las ecuaciones de huella hídrica gris mencionadas anteriormente (*Ecuación 2. Huella hídrica gris para una etapa de proceso*). En este caso, la huella hídrica verde no será tomada en cuenta debido a que en la producción de energía en una central hidroeléctrica no intervienen productos agrícolas ni cultivos que son los que podrían aportar valor significativo en la huella verde.

### **4.3 SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA**

El objetivo de la cuantificación y evaluación de huellas hídricas es analizar cómo las actividades humanas afectan la escasez de agua y su contaminación y analizar cómo dichas actividades pueden ser más sostenibles desde el punto de vista del agua. Es por ello que se busca comparar la huella hídrica humana con la disponibilidad de agua dulce a través de una evaluación de sostenibilidad que permita tomar acción y fijar políticas para el cuidado y uso adecuado del recurso hídrico.

Los estudios que se han realizado en el ámbito de huella hídrica por lo general se han centrado en la cuantificación de ésta pero no se ha ido más allá y no han tenido en cuenta un análisis de sostenibilidad. Con el fin de considerar este aspecto en los análisis subsiguientes, los autores del Manual de Evaluación de Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011) dedicaron un capítulo del mismo a la evaluación de sostenibilidad de la huella hídrica, en el cual se encuentran definiciones, conceptos y metodología empleada para realizar esta evaluación. Por lo anterior, se explica el hecho de que los numerales siguientes estén basados en dicho manual.

### 4.3.1 Sostenibilidad de la huella hídrica de una cuenca hidrográfica

Para evaluar la sostenibilidad en una cuenca hidrográfica, Hoekstra et al., (2011) proponen seguir cuatro pasos fundamentales: identificar los criterios de sostenibilidad, identificar los hotspots, identificar y cuantificar impactos primarios y finalmente identificar y cuantificar impactos secundarios.

#### a) Identificar los criterios de sostenibilidad

Se sabe que el concepto de sostenibilidad tiene tres dimensiones: ambiental, social y económica y para el caso de la sostenibilidad de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica se tienen los mismos tres ámbitos; en cada uno de ellos se identifican ciertos criterios de sostenibilidad que serían el primer paso de los ya mencionados:

- Sostenibilidad ambiental

La calidad del agua, así como los caudales de los ríos y las aguas subterráneas, deben permanecer dentro de ciertos límites y estándares ya establecidos por la autoridad que aplique, con el fin de mantener un equilibrio en los ecosistemas allí presentes.

- Sostenibilidad social

Las necesidades humanas básicas (beber, lavar, cocinar, producir alimentos) deben tener asignada una mínima cantidad de agua dulce necesaria para ser satisfechas. Sólo si las necesidades del medio ambiente y las necesidades humanas básicas están cubiertas, se podrá asignar a los bienes “de lujo” la fracción de agua que quedó disponible.

- Sostenibilidad económica

Los beneficios de la huella hídrica que resultan de destinar el agua para un determinado fin deben ser mucho mayores a los costos asociados a dicha huella, de lo contrario la huella hídrica será insostenible (económicamente).

#### b) Identificar los hotspots

Los hotspots son los lugares y los periodos del año en que una huella hídrica es insostenible y por tanto requiere evaluación para lograr disminuirla. Se dice que en un hotspot se producen problemas como escasez y contaminación de agua, entre otros.

#### c) Identificación de impactos primarios

Los impactos primarios describen los cambios en el flujo de agua, su calidad o cualquier cambio presentado en el cuerpo de agua que varíe de las condiciones naturales que tenía antes de la intervención humana.

#### d) Identificación de impactos secundarios

Los impactos secundarios indican los productos o servicios que han sido afectados debido a los impactos primarios, por ejemplo pérdida de biodiversidad, disminución de especies de animales o cualquier efecto nocivo para la salud.

### **4.3.2 Sostenibilidad de la huella hídrica de un proceso**

Para saber si la huella hídrica de un proceso es sostenible se deben tener en cuenta dos criterios fundamentalmente (Hoekstra et al., 2011):

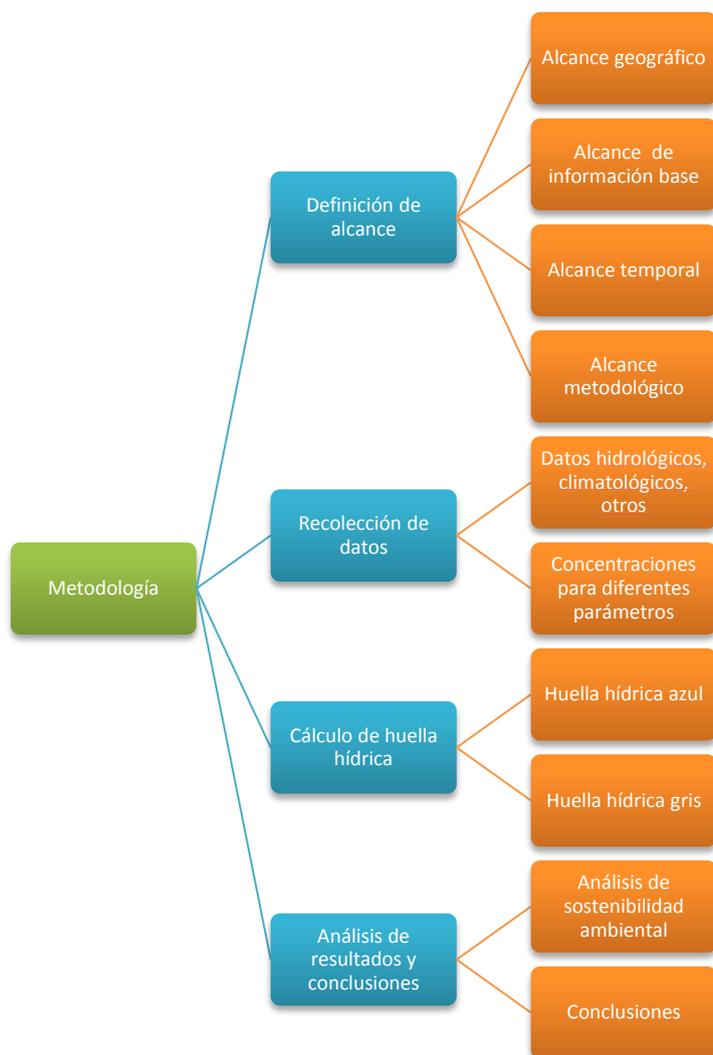
- Contexto geográfico: la huella hídrica de un proceso se considerará insostenible cuando éste se encuentre en un hotspot.
- Características del proceso: si una huella hídrica puede reducirse o eliminarse por completo, se considera entonces como insostenible mientras se encuentre en esa situación (antes de ser reducida o eliminada).

### **4.3.3 Sostenibilidad de la huella hídrica de un producto**

La huella hídrica de un producto se definió como la suma de huellas hídricas de las etapas necesarias para generar dicho producto. Es por esto que la sostenibilidad de la huella hídrica del producto depende de la sostenibilidad de las huellas hídricas de las etapas del proceso. Para cada uno de los componentes de esta huella hídrica se evalúan los criterios mencionados en el punto anterior (contexto geográfico y características del proceso) (Hoekstra et al., 2011).

## 5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del presente proyecto se basó en la planteada en el Manual de Evaluación de Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011) y en la adaptación de dicha metodología que se propone en la Guía metodológica de aplicación de huella hídrica (Diego; Arévalo & Campuzano, 2013). Por efectos de alcance, en este proyecto no se llevaron a cabo todas las fases ni tampoco se desarrollaron en su totalidad cada una las fases mencionadas en dichas guías sino que se realizó una adaptación de las mismas ajustada al alcance de este trabajo.



*Figura 1.* Esquema metodológico para cálculo y análisis de huella hídrica de la Central Miel I  
Fuente: Elaboración propia

Tal y como se muestra en la *Figura 1* la metodología consta de varias fases. Inicialmente, en la fase I, se definió el alcance del proyecto teniendo en cuenta los objetivos planteados y lo que se quería lograr con el ejercicio de investigación

propuesto. En esta fase se delimitaron las fronteras del sistema, se realizó la descripción geográfica de la zona, se especificaron las particularidades del área de estudio (entradas, salidas, trasvases, etc.) y se describieron las características principales de la central. También se identificaron las fuentes de información, tanto primaria como secundaria, y se definió la escala temporal con la cual se trabajó en el proyecto. Para efectos de organización del trabajo, esta fase se dividió en cuatro alcances específicos que, en conjunto, recopilaron toda la información necesaria para definir el alcance general del proyecto; estos son: alcance geográfico, alcance de información para línea de base, alcance temporal y alcance metodológico.

Una vez se definido el alcance, se inició la recolección de datos necesarios (fase II) para la realización de cálculos y análisis (fases siguientes). Aquí se identificaron dos tipos de datos que serían útiles para el desarrollo de las siguientes fases: información hidro-climatológica y concentraciones de parámetros fisicoquímicos. En la sección 3.2 se especifican dichos datos.

Posterior a esto, se realizó el cálculo de las huellas hídricas azul y gris para el proceso de generación de energía en la central Miel I, culminando así la fase III del proyecto.

A partir de los resultados obtenidos, se realizó un análisis de sostenibilidad ambiental y se sacaron las conclusiones para el trabajo, así como las recomendaciones para trabajos futuros.

## **5.1 Definición del alcance general**

### **5.1.1 Alcance geográfico**

#### **5.1.1.1 Ubicación geográfica**

La central hidroeléctrica Miel I se localiza en el municipio de Norcasia, al oriente del departamento de Caldas, centro occidente de la región andina colombiana. El territorio de este departamento está ubicado, en su mayoría, sobre la cordillera central colombiana, aunque también tiene parte de su territorio en la cordillera occidental. La presencia de esta cadena montañosa tiene una gran influencia en la red hidrológica de Caldas, la cual cuenta con dos vertientes principales (Cauca y Magdalena) y trece cuencas que vierten sus aguas en dichas vertientes. La cuenca del río Magdalena capta las aguas de los ríos Samaná, La Miel y Guarinó mientras que al río Cauca le pertenecen el resto de cuencas de esta región: Chinchiná, Pozo - Maiba, Risaralda, Arma, Tapias – Tareas, Supía, Pácora y Campoalegre – San Francisco (Contraloría General de Caldas, 2011).

### 5.1.1.2 Características generales

Miel I es una central de generación de energía eléctrica, ubicada al oriente del departamento de Caldas. La presa Patángoras, asociada a esta central, está ubicada sobre el río La Miel, aguas debajo de la desembocadura del río Moro, tiene una altura de 188 metros y una longitud de 340 m en la corona (correspondiendo esta altura con la cota de 454 m.s.n.m.) y un volumen de 1,73 millones de m<sup>3</sup>. Esta presa forma el embalse Amaní cuya área es de 1220 ha y del cual se toman las aguas para la generación de la energía. El embalse, cuyo nivel máximo normal corresponde a la cota de 445,5 m.s.n.m., tiene una capacidad de almacenamiento de 571 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales 444,98 millones de m<sup>3</sup> son de volumen útil (Contraloría General de la República, 2012).

La central tiene una capacidad instalada de 396 MW, con lo cual se puede generar, en promedio, 1135 GWh/año de energía, sin tener en cuenta los trasvases.

La central cuenta actualmente con dos trasvases. El trasvase Guarinó, que entró en operación en el año 2010, está ubicado en el municipio de Victoria, departamento de Caldas. Este trasvase capta parte de las aguas del río Guarinó y las vierte en el río La Miel (aguas arriba del embalse Amaní) (ISAGEN S.A E.S.P, 2009) aumentando el caudal que llega al embalse y de esta manera incrementa en un 17% la generación de energía en la central Miel I (aumenta en 308 GWh/año la generación) (ISAGEN S.A E.S.P, 2013b) .

El trasvase Manso está ubicado en el departamento de Caldas, en los límites de los municipios de Samaná y Norcasia el cual inició operaciones en el 2013. Con este trasvase se toma parte de las aguas del río Manso y se vierten a la quebrada Santa Bárbara para finalmente llevarlas hasta el embalse Amaní y lograr un aumento en su caudal afluente (ISAGEN S.A E.S.P, 2013b). Aumenta en 104 GWh/año la generación de energía media anual en la Central (ISAGEN S.A E.S.P, 2013a).

### 5.1.1.3 Definición de fronteras

En términos generales, las entradas y salidas del sistema contemplado para este trabajo se muestran en la *Figura 2*. En ésta puede observarse que el embalse Amaní está alimentado por los ríos Miel, Moro y la Quebrada Santa Bárbara y cuenta, adicionalmente, con dos trasvases: Guarinó, que vierte sus aguas al río Miel y el trasvase Manso, que las vierte a la Quebrada Santa Bárbara. De estos tres afluentes se toma el caudal de entrada o caudal afluente. Parte del caudal total afluente que llega al embalse pasa luego a casa de máquinas, sitio donde se genera la energía eléctrica, y de donde posteriormente pasa a la fuente receptora (río Miel) como caudal turbinado. En caso de presentarse rebosamiento de agua en la presa, hay una parte del caudal afluente que se pasa directamente a la fuente receptora (sin entrar a casa de máquinas); éste sería el caudal vertido.

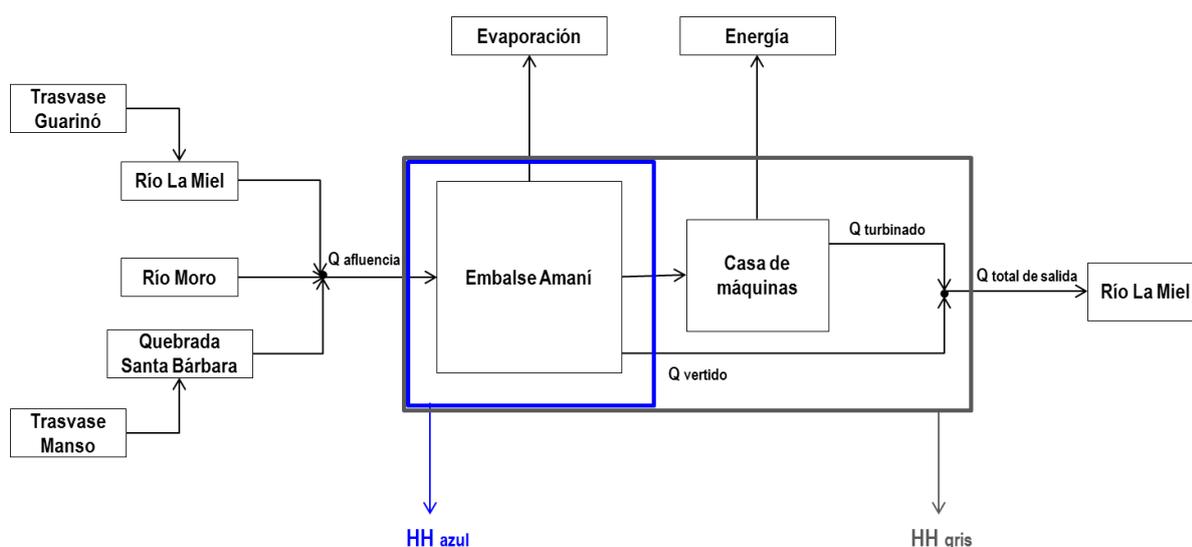


Figura 2. Definición de fronteras del sistema para la huella azul y gris

Fuente: Elaboración propia

También hay una cantidad de agua que se pierde por evaporación y la mayor parte de esta pérdida se da en el espejo de agua del embalse; en este trabajo se desprecia la evaporación durante el proceso de generación en casa de máquinas y es por esto que para la cuantificación de la huella hídrica azul se delimita la frontera únicamente al sitio del embalse.

Para la huella hídrica gris se tuvieron en cuenta datos tomados aguas arriba (o ya propiamente en el embalse) y aguas abajo del embalse y por esto la frontera de la huella hídrica gris contempla el embalse (caudal afluyente) y la casa de máquinas (caudal total de salida).

Para este trabajo sólo se tendrá en cuenta el agua utilizada durante el proceso de generación de energía, es decir, se excluye el uso de agua doméstico (por ejemplo el consumo de agua necesario para satisfacer las necesidades básicas del personal que labora en la central), el uso de agua para riego o la cantidad de agua utilizada necesaria para el funcionamiento de las instalaciones, que es otorgada mediante licencias ambientales diferentes y tomada de otras fuentes de la cuenca.

### 5.1.2 Alcance de información base

Para la realización de este trabajo se tuvieron en cuenta fuentes de información tanto primarias como secundarias. Entendiéndose la información primaria como aquella que proviene directamente de quien hizo el levantamiento de información en

el área de estudio, la empresa ISAGEN S.A E.S.P fue la principal fuente de este tipo que se tuvo durante la ejecución del trabajo y fue quien brindó la información más relevante para la realización de los cálculos y análisis. Otros datos que sirvieron para generar un estado del arte, contextualizar el estudio, analizar y hacer una línea de base del proyecto fueron tomados de fuentes secundarias como documentos, datos y cifras de estudios, informes, publicaciones y casos de estudio de entidades gubernamentales, grupos de estudio, investigadores, universidades, entre otros.

Entre los datos obtenidos de fuentes primarias se tienen:

- Información climatológica: precipitación, temperatura promedio, humedad máxima y mínima y radiación promedio.
- Información hidrológica: caudal afluente, caudal turbinado, caudal vertido.
- Otra información: nivel del embalse, generación de energía.

Todos los valores anteriores se tenían a escala diaria.

### **5.1.3 Alcance temporal**

Teniendo en cuenta los datos disponibles para la realización de cálculos y análisis, se determinó que para la huella hídrica azul se trabajaría con los datos de los años 2011, 2012 y 2013. Como se mencionó anteriormente, los datos originales están a escala diaria, sin embargo, para efectos de cálculos y aplicación de ecuaciones, se sacaron promedios para periodos mensuales y anuales de cada variable, de acuerdo con la necesidad generada. Para la huella hídrica gris se emplearon datos del año 2014; estos datos son puntuales de una sola campaña de medición.

### **5.1.4 Alcance metodológico**

Como se mencionó anteriormente, para la metodología de este trabajo se tomó como referente la metodología propuesta en el Manual de Evaluación de Huella Hídrica, que propone desarrollar cuatro fases, que son: definición de alcance, contabilización de huella hídrica, evaluación de sostenibilidad y formulación de respuestas.

Al inicio de este capítulo se mencionó también que para este trabajo se haría una modificación de dicha metodología, por efectos de alcance. Dentro de estas variaciones, se contempla por ejemplo que en la etapa de cuantificación de huellas hídricas sólo se realizará esta medición para dos de ellas: la huella azul y la huella gris; la huella verde no se tiene en cuenta porque el agua lluvia no queda embebida en cultivos o producción forestal. Otra de las modificaciones se hizo en la fase III (evaluación de sostenibilidad) puesto que el manual contempla análisis de

sostenibilidad económica, social y ambiental; aquí se evaluó únicamente sostenibilidad ambiental, identificándose los hotspots e impactos primarios; los impactos secundarios, que también se mencionan en el manual (y en el marco teórico de este trabajo), no fueron evaluados.

Finalmente se concluye y se realizan recomendaciones basadas en los resultados obtenidos, lo cual se convierte en un punto de partida para la formulación de estrategias por parte de la empresa y autoridades ambientales, en aras de avanzar hacia una minimización de los impactos de la central, sobre su entorno.

## 5.2 Recolección de datos

### 5.2.1 Datos hidrológicos, climatológicos, generación de energía y niveles del embalse

#### 5.2.1.1 Datos hidrológicos

Los datos hidrológicos corresponden a la información relacionada con caudales medidos. Se presentan datos de caudal afluente, caudal turbinado (de salida) y caudal vertido (caudal que se vierte desde el embalse directamente a la fuente receptora –rio La Miel- en caso de que se supere el nivel máximo del embalse).

La información hidrológica que se presenta a continuación corresponde al embalse Amaní de la central Miel I de la empresa ISAGEN.

En la Tabla 1 se presentan los promedios mensuales y anuales –en m<sup>3</sup>/s- de los caudales afluentes, turbinados y vertidos para los años 2011, 2012 y 2013, calculados a partir de los datos diarios de caudales entregados por ISAGEN.

**Tabla 1. Caudales promedio de la Central Miel I para 2011, 2012 y 2013**

Año	Mes	Caudal afluente promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal afluente promedio anual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal turbinado promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal turbinado promedio anual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal vertido promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)
2011	Enero	104,818	115,705	147,197	110,529	0,000
	Febrero	106,830		141,988		0,000
	Marzo	149,890		120,881		0,000
	Abril	144,843		134,291		0,000
	Mayo	109,576		105,611		0,000
	Junio	86,376		88,945		0,000
	Julio	67,912		100,425		0,000
	Agosto	66,367		87,056		0,000

	<b>Septiembre</b>	67,054		57,024		0,000
	<b>Octubre</b>	111,888		80,721		0,000
	<b>Noviembre</b>	148,336		87,330		0,000
	<b>Diciembre</b>	224,570		174,880		10,592
2012	<b>Enero</b>	211,688	87,891	135,618	84,206	51,242
	<b>Febrero</b>	98,209		172,678		2,621
	<b>Marzo</b>	78,547		97,622		0,000
	<b>Abril</b>	134,869		98,769		0,000
	<b>Mayo</b>	121,436		112,166		0,000
	<b>Junio</b>	46,768		43,731		0,000
	<b>Julio</b>	27,816		66,279		0,000
	<b>Agosto</b>	24,614		59,562		0,000
	<b>Septiembre</b>	20,804		22,145		0,000
	<b>Octubre</b>	52,977		26,539		0,000
	<b>Noviembre</b>	116,081		61,918		0,000
	<b>Diciembre</b>	120,882		113,441		0,000
2013	<b>Enero</b>	74,223	86,694	94,351	89,112	0,000
	<b>Febrero</b>	141,819		136,318		0,000
	<b>Marzo</b>	102,387		133,390		0,000
	<b>Abril</b>	73,103		106,368		0,000
	<b>Mayo</b>	141,055		118,838		0,000
	<b>Junio</b>	74,907		67,102		0,000
	<b>Julio</b>	40,883		62,258		0,000
	<b>Agosto</b>	37,666		24,884		0,000
	<b>Septiembre</b>	52,359		50,678		0,000
	<b>Octubre</b>	77,646		79,564		0,000
	<b>Noviembre</b>	98,201		54,313		0,000
	<b>Diciembre</b>	126,074		141,281		0,000

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.1.2 Datos climatológicos

La información climatológica incluye datos de precipitación, temperatura, humedad y radiación solar.

En la Tabla 2 se muestran los valores promedios mensuales y anuales para cada una de estas variables calculados a partir de los datos diarios obtenidos como información primaria. Los datos fueron tomados por ISAGEN en la estación climatológica Berlín, ubicada a 889 m.s.n.m., con las siguientes coordenadas: N: 05°35'47.83" / W: 74°56'52.25".

**Tabla 2. Variables climatológicas medidas en la estación Berlín para 2011, 2012 y 2013**

Año	Mes	Precipitación promedio mensual	Precipitación promedio anual	Temp. promedio mensual	Temp. promedio anual	Humedad promedio mensual	Humedad promedio anual	Radiación promedio mensual
		(mm/mes)	(mm/año)	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(cal/cm <sup>2</sup> .mes)
2011	Ene	11,315	8,007	22,328	22,291	78,008	78,240	313,827
	Feb	15,018		22,110		78,408		322,406
	Mar	-		-		-		-
	Abr	-		-		-		-
	May	-		-		-		-
	Jun	3,987		22,830		78,457		386,880
	Jul	3,568		23,137		74,845		344,299
	Ago	4,871		22,965		77,644		347,783
	Sep	3,473		23,042		73,863		450,144
	Oct	6,674		21,364		79,076		296,640
	Nov	10,103		21,459		80,520		282,192
	Dic	12,552		21,734		81,224		270,720
2012	Ene	7,671	5,130	22,105	22,689	78,760	75,669	267,236
	Feb	4,255		22,615		75,968		333,874
	Mar	5,555		22,689		77,249		-
	Abr	4,783		21,915		79,991		-
	May	7,419		22,622		78,348		-
	Jun	4,795		23,316		73,500		426,288
	Jul	4,885		23,575		69,935		439,572
	Ago	5,006		23,258		70,146		440,779
	Sep	5,029		23,556		68,020		456,720
	Oct	5,065		22,232		77,868		354,147
	Nov	4,871		22,381		79,414		310,704
	Dic	4,831		22,338		78,891		272,206
2013	Ene	1,761	5,053	23,521	23,886	75,177	74,836	302,679
	Feb	5,175		22,452		78,120		299,314
	Mar	6,577		22,844		78,232		-
	Abr	5,150		22,953		77,578		-
	May	7,884		22,306		79,195		-
	Jun	3,217		23,264		76,475		434,352
	Jul	1,674		23,457		69,937		453,228
	Ago	4,648		22,989		74,198		417,043
	Sep	6,620		22,880		74,706		412,464

Oct	7,413	22,404	77,071	51,515 *
Nov	5,440	21,814	79,694	-
Dic	5,090	20,557	76,685	-

Fuente: Elaboración propia

Nota: (-) sin registro de datos; (\*) datos atípicos

### 5.2.1.3 Datos de nivel del embalse y generación de energía

La información relacionada con las cotas (niveles) del embalse Amaní y la generación de energía en la central Miel I se muestran en la

Tabla 3 donde se encuentran los datos que fueron calculados a partir de los valores diarios, tanto de generación como de nivel, medidos por ISAGEN en la central y en el embalse para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2011 y 2013.

**Tabla 3.** Nivel del embalse Amaní y generación de energía en la central Miel I para 2011, 2012 y 2013

Año	Mes	Nivel promedio mensual	Nivel promedio anual	Generación mensual	Generación total anual
		(msnm)	(msnm)	(GWh)	(GWh)
2011	Enero	441,192	432,868	228,030	1972,388
	Febrero	434,538		194,771	
	Marzo	431,612		181,882	
	Abril	436,927		200,812	
	Mayo	439,021		164,586	
	Junio	439,077		133,340	
	Julio	434,167		153,420	
	Agosto	421,514		121,277	
	Septiembre	416,729		71,317	
	Octubre	421,358		112,311	
	Noviembre	433,206		125,687	
	Diciembre	445,075		284,954	
2012	Enero	445,945	429,326	223,630	1472,687
	Febrero	437,354		253,340	
	Marzo	423,450		140,732	
	Abril	425,587		137,141	
	Mayo	435,670		169,101	
	Junio	435,043		58,447	
	Julio	434,035		93,725	
	Agosto	419,743		78,505	
	Septiembre	410,569		27,079	

	Octubre	414,879		28,268	
	Noviembre	431,018		85,720	
	Diciembre	438,618		176,998	
2013	Enero	433,06	427,81	142,333	1509,728
	Febrero	432,99		188,042	
	Marzo	426,89		197,714	
	Abril	412,59		137,227	
	Mayo	416,53		161,312	
	Junio	422,36		87,577	
	Julio	425,31		82,843	
	Agosto	426,32		29,144	
	Septiembre	429,99		69,150	
	Octubre	429,62		118,025	
	Noviembre	434,33		74,488	
	Diciembre	443,72		221,873	

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Concentraciones de los parámetros DBO, DQO y SST

Entre las variables fisicoquímicas a las que se tuvo acceso, se identificaron cuatro de ellas a partir de las cuales se podría sacar información importante al analizar sus valores y calcular la huella hídrica. Estas fueron: DBO (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), SST (sólidos suspendidos totales) y OD (oxígeno disuelto).

Los datos que se tienen disponibles de las concentraciones de las diferentes variables fisicoquímicas a la entrada y a la salida del embalse se limitan a las mediciones realizadas el día 4 de abril de 2014, por lo cual se especifican también los datos de caudales para ese momento. En el caso del caudal afluente, como no se tenía el dato del año 2014, este dato se tomó como el promedio de los caudales afluentes en este día para los años 2010, 2011, 2012 y 2013. Teniendo en cuenta que se tienen las concentraciones de entrada en el río La Miel antes del embalse y también en el río Moro, antes del embalse, es necesario definir los caudales aproximados que lleva cada uno de estos ríos al embalse. Para ello se tuvieron en cuenta ciertos datos registrados en un informe realizado por CORNARE para el mes de febrero de 2014 (CORNARE, 2014) (estos datos fueron los registros hallados en la literatura más cercanos a la fecha de toma de muestras). En dicho informe se muestran los caudales de ingreso al embalse Amaní que, para el río La Miel, corresponde a 35,21 m<sup>3</sup>/s (46,5% del caudal total) y, para el río Moro, tiene un valor de 40,4 m<sup>3</sup>/s (53,5% del caudal total).

Conociendo el caudal turbinado y teniendo ya el caudal afluente total de entrada para el día de toma de muestras y un porcentaje aproximado del caudal de entrada correspondiente a cada uno de los ríos, se muestran estos valores en la Tabla 4 para aplicarlos luego en el cálculo de la huella hídrica gris.

**Tabla 4.** Caudal afluente y turbinado para la huella hídrica gris

Caudal afluente y turbinado		
Caudal afluente total	87,348	(m3/s)
Caudal afluente río Miel	40,620	(m3/s)
Caudal afluente río Moro	46,730	(m3/s)
Caudal turbinado	57,679	(m3/s)

Para las concentraciones de entrada (Tabla 5) de las diferentes variables fisicoquímicas se tuvieron en cuenta los datos existentes medidos en los ríos afluentes: La Miel y Moro, antes de llegar al embalse, mientras que como concentración de salida (

**Tabla 6)** se tomaron los datos de la estación Puente Hierro por ser el lugar donde se realiza la primera toma de datos luego de que las aguas salen de casa de máquinas.

**Tabla 5.** Concentraciones de entrada de DBO, DQO, OD y SST

Concentraciones de entrada								
Variable	DBO (mg/L)		DQO (mg/L)		Oxígeno disuelto (mg/L)		Sólidos suspendidos totales (mg/L)	
<b>Punto de registro</b>	Río La Miel antes del embalse	Río Moro antes del embalse	Río La Miel antes del embalse	Río Moro antes del embalse	Río La Miel antes del embalse	Río Moro antes del embalse	Río La Miel antes del embalse	Río Moro antes del embalse

<b>Valor</b>	<2.49	<2.49	16	<9.59	8,45	8,08	77	<0,6
--------------	-------	-------	----	-------	------	------	----	------

Fuente: (UCO & ISAGEN, 2014)

**Tabla 6.** Concentraciones de salida de DBO, DQO, OD y SST

Concentraciones de salida				
Variable	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Oxígeno disuelto ** (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Punto de registro	Estación Puente Hierro			
Valor	<2.49	19	7,47	25,6

Fuente: (UCO & ISAGEN, 2014)

Para las concentraciones máximas se tomaron como referentes los parámetros internacionales de calidad de agua determinados para la conservación de la vida acuática; estos valores se muestran en la

Tabla 7.

Es importante aclarar que para el caso del oxígeno disuelto la concentración límite no es la máxima permitida sino que es el valor mínimo con el que debe contar el agua para garantizar la vida acuática.

Las concentraciones naturales corresponden a aquellas mediciones realizadas antes de la intervención antropogénica a los cuerpos de agua, por ejemplo en el nacimiento de los ríos; sin embargo, al no contar con estos datos, se tomaron como concentraciones naturales los datos medidos en una de las quebradas que vierten sus aguas al río La Miel (Quebrada Los Sainos) en el año 2006. Estos datos se encuentran consignados en la

Tabla 8.

**Tabla 7. Concentración máxima permitida de DBO, DQO, OD y SST**

Concentración máxima				
Variable	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	Oxígeno disuelto (*) (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Fuente	Parámetros Internacionales			
Valor	6	10	4	25

Fuente: (EPA, 1986) y (WHO, 2006)

Nota: (\*) concentración mínima requerida

**Tabla 8. Concentración natural de DBO, DQO, OD y SST**

Concentración natural				
Variable	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Fuente	Quebrada Los Sainos			
Valor	<2,0	5,92	6,65	<13

Fuente: (Zambrano & Madroñero, 2006)

### 5.3 Cálculo de huella hídrica

#### 5.3.1 Huella hídrica azul

Para calcular la huella hídrica azul del proceso de producción de energía en la central hidroeléctrica Miel I se tomó como referencia la metodología aplicada por Arévalo & Campuzano (2013) en un caso de estudio en Colombia (en el que se incluía en sector hidroeléctrico) y que a su vez se basó en la metodología propuesta por Hoekstra et al. (2011) en el Manual de Huella Hídrica. A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo:

$$HH_{embalses} = \frac{AE [m^3]}{EG [GJ]}$$

Ecuación 4. Huella hídrica azul para proceso de generación de energía en central hidroeléctrica

Donde:

$HH_{embalses}$ : huella hídrica en embalse, [ $m^3/GJ$ ]

$AE$ : agua evaporada en el embalse, [ $m^3$ ]

$EG$ : cantidad de energía generada, [ $GJ$ ]

Los datos de cantidad de energía generada fueron obtenidos de fuente de información primaria y se encuentran depositados en la

Tabla 3.

La cantidad de agua evaporada en embalse está dada por:

$$AE = (E * A)$$

**Ecuación 5. Agua evaporada en el embalse**

Donde:

$AE$ : agua evaporada en embalse, [ $m^3$ ]

$E$ : evaporación mensual en el embalse, [ $m$ ]

$A$ : área inundada, [ $m^2$ ]

El área inundada se calcula de la siguiente manera:

$$A = \left( \frac{\text{Volumen útil}}{\text{Nivel promedio multianual}} \right)$$

**Ecuación 6. Área inundada**

Los datos de volumen útil se toman de tablas con las que cuenta ISAGEN en las cuales se consignan datos de volumen máximo y volumen útil para cada cota. El nivel promedio multianual se calculó a partir de los niveles promedios mensuales mostrados en la

Tabla 3.

### 5.3.1.1 Cálculo de evaporación

La evaporación en el embalse fue calculada mediante cuatro métodos diferentes: Cenicafé, García y López, Thornthwaite y Turc modificada. Cada una de estas ecuaciones utiliza variables diferentes y todas arrojan resultados de evapotranspiración potencial. La evapotranspiración equivale a evaporación más la transpiración, sin embargo en el embalse la transpiración es despreciable pues no existe allí una cantidad significativa de plantas que aporten a este valor y es por esto que los resultados arrojados en la ecuación son los que se toman posteriormente para el cálculo de huella hídrica.

Conociendo ya la evapotranspiración potencial se procede luego a calcular la evapotranspiración real bajo la relación  $ETR = 0,7ETP$  (Campuzano et al., 2011).

A continuación se muestran cada uno de los métodos utilizados y los resultados obtenidos con cada uno:

### Cenicafé

$$ETP = 4,658 e^{(-0,0002 \cdot h)}$$

(Arévalo & Campuzano, 2013)

#### Ecuación 7. Evapotranspiración potencial por el método Cenicafé

Donde:

$ETP$ : evapotranspiración potencial,  $\left[\frac{mm}{mes}\right]$

$h$ : altitud (cota del embalse),  $[m]$

**Tabla 9. Cálculo de evapotranspiración por el método Cenicafé**

Datos		Cálculos potencial			Cálculos real		
Año	Mes	N° días del mes	Altitud promedio mensual (msnm)	Evapotranspiración potencial (mm/mes) (1)	Evapotranspiración potencial (mm/año) (3)	Evapotranspiración real (mm/mes)	Evapotranspiración real (mm/año)
2011	Ene	31	441,192	132,203	1559,173	92,542	1091,421
	Feb	28	434,538	119,568		83,697	
	Mar	31	431,612	132,456		92,719	
	Abr	30	436,927	128,047		89,633	
	May	31	439,021	132,260		92,582	
	Jun	30	439,077	127,992		89,594	
	Jul	31	434,167	132,388		92,672	
	Ago	31	421,514	132,724		92,907	

	Sep	30	416,729	128,565		89,996	
	Oct	31	421,358	132,728		92,910	
	Nov	30	433,206	128,142		89,700	
	Dic	31	445,075	132,100		92,470	
2012	Ene	31	445,945	132,077		92,454	
	Feb	28	437,354	119,500		83,650	
	Mar	31	423,450	132,672		92,871	
	Abr	30	425,587	128,338		89,836	
	May	31	435,670	132,349		92,644	
	Jun	30	435,043	128,095		89,667	
	Jul	31	434,035	132,392	1560,287	92,674	1092,201
	Ago	31	419,743	132,771		92,940	
	Sep	30	410,569	128,724		90,107	
	Oct	31	414,879	132,900		93,030	
	Nov	30	431,018	128,199		89,739	
	Dic	31	438,618	132,271		92,589	
2013	Ene	31	433,059	132,418		92,692	
	Feb	28	432,993	119,605		83,723	
	Mar	31	426,890	132,581		92,807	
	Abr	30	412,594	128,672		90,070	
	May	31	416,535	132,856		92,999	
	Jun	30	422,363	128,421		89,894	
	Jul	31	425,312	132,623	1560,754	92,836	1092,528
	Ago	31	426,318	132,596		92,817	
	Sep	30	429,992	128,225		89,757	
	Oct	31	429,620	132,509		92,756	
	Nov	30	434,331	128,114		89,680	
	Dic	31	443,724	132,136		92,495	

Fuente: Elaboración propia

## García y López

$$ETP = 1,21 * 10^{F_T} * (1 - 0,01 * HR_D) + 0,21 * T - 2,3$$

(García, J; López, 1970)

### Ecuación 8. Evapotranspiración potencial por el método de García y López

Donde:

$ETP$ : evapotranspiración potencial,  $\left[\frac{mm}{mes}\right]$

$HR_D$ : humedad relativa media mensual, [%]

$T$ : Temperatura media mensual, [°C]

$$F_T: \text{factor de temperatura} \rightarrow F_T = \frac{7,45 \cdot T}{234,7 + T}$$

**Tabla 10.** Cálculo de evapotranspiración por el método de García y López

Año	Datos				Cálculos potencial		Cálculos real		
	Mes	N° días del mes	Temp. media mensual (°C)	Humedad relativa media mensual (%)	Factor de temp.	Evapotranspiración potencial (mm/mes)	Evapotranspiración potencial (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/mes)	Evapotranspiración real (mm/año)
2011	Ene	31	22,328	78,008	0,647	110,663	976,144	77,464	683,301
	Feb	28	22,110	78,408	0,641	97,641		68,349	
	Mar	31	-	-	-	-		-	
	Abr	30	-	-	-	-		-	
	May	31	-	-	-	-		-	
	Jun	30	22,830	78,457	0,660	110,611		77,428	
	Jul	31	23,137	74,845	0,669	123,307		86,315	
	Ago	31	22,965	77,644	0,664	116,883		81,818	
	Sep	30	23,042	73,863	0,666	120,137		84,096	
	Oct	31	21,364	79,076	0,622	100,619		70,433	
	Nov	30	21,459	80,520	0,624	95,953		67,167	
	Dic	31	21,734	81,224	0,631	100,330		70,231	
2012	Ene	31	22,105	78,760	0,641	107,480	1392,691	75,236	974,884
	Feb	28	22,615	75,968	0,655	105,348		73,744	
	Mar	31	22,689	77,249	0,657	115,118		80,582	
	Abr	30	21,915	79,991	0,636	100,493		70,345	
	May	31	22,622	78,348	0,655	112,661		78,862	
	Jun	30	23,316	73,500	0,673	123,217		86,252	
	Jul	31	23,575	69,935	0,680	136,159		95,311	
	Ago	31	23,258	70,146	0,672	132,695		92,886	
	Sep	30	23,556	68,020	0,680	134,905		94,434	
	Oct	31	22,232	77,868	0,645	110,061		77,043	
	Nov	30	22,381	79,414	0,649	105,271		73,690	
	Dic	31	22,338	78,891	0,647	109,285		76,499	
2013	Ene	31	23,521	75,177	0,679	126,247	1366,835	88,373	956,785
	Feb	28	22,452	78,120	0,650	100,763		70,534	
	Mar	31	22,844	78,232	0,661	114,802		80,361	
	Abr	30	22,953	77,578	0,664	113,127		79,189	
	May	31	22,306	79,195	0,647	108,502		75,952	
	Jun	30	23,264	76,475	0,672	117,677		82,374	
	Jul	31	23,457	69,937	0,677	134,995		94,497	
	Ago	31	22,989	74,198	0,665	123,072		86,151	

Sep	30	22,880	74,706	0,662	117,283	82,098
Oct	31	22,404	77,071	0,649	112,896	79,027
Nov	30	21,814	79,694	0,634	100,133	70,093
Dic	31	20,557	76,685	0,600	97,337	68,136

Fuente: Elaboración propia

Nota: (-) sin registro de datos

### Thornthwaite

$$ETP = 16 * \left(10 * \frac{T_m}{I}\right)^a$$

(Thornthwaite, et al., 1944)

#### Ecuación 9. Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite

Donde:

*ETP*: evapotranspiración potencial,  $\left[\frac{mm}{mes}\right]$

*T<sub>m</sub>*: Temperatura media mensual, [°C]

*I*: Índice de calor anual  $\rightarrow I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1,514}$

*a*: exponente *a*. Parámetro ajustado en función de *I*  $\rightarrow$

$$a = (675 * 10^{-9}) * I^3 - (771 * 10^{-7}) * I^2 + (179 * 10^{-4}) * I + 0,492$$

Tabla 11. Cálculo de evapotranspiración por el método de Thornthwaite

Datos		Cálculos potencial				Cálculos real				
Año	Mes	Temp. media anual (°C)	Temp. media mensual (°C)	Índice calórico mensual	Índice calórico anual	Exp. <sup>a</sup>	Evapotr. potencial (mm/mes)	Evapotr. potencial (mm/año)	Evapotr. real (mm/mes)	Evapotr. real (mm/año)
2011	Ene	22,291	22,328	9,636	86,769	1,906	96,906	872,968	67,834	611,078
	Feb		22,110	9,494			95,110		66,577	
	Mar		-	-			-		-	
	Abr		-	-			-		-	
	May		-	-			-		-	
	Jun		22,830	9,966			101,103		70,772	
	Jul		23,137	10,170			103,711		72,598	
	Ago		22,965	10,056			102,242		71,569	
	Sep		23,042	10,107			102,899		72,029	
	Oct		21,364	9,014			89,093		62,365	

	<b>Nov</b>	21,459	9,075			89,850		62,895
	<b>Dic</b>	21,734	9,251			92,054		64,438
<b>2012</b>	<b>Ene</b>	22,105	9,491			83,591		58,514
	<b>Feb</b>	22,615	9,825			88,827		62,179
	<b>Mar</b>	22,689	9,873			89,598		62,718
	<b>Abr</b>	21,915	9,368			81,695		57,186
	<b>May</b>	22,622	9,829			88,894		62,226
	<b>Jun</b>	22,689	10,289	118,727	2,660	96,335	1080,105	67,434
	<b>Jul</b>	23,575	10,463			99,217		69,452
	<b>Ago</b>	23,258	10,251			95,703		66,992
	<b>Sep</b>	23,556	10,450			98,999		69,299
	<b>Oct</b>	22,232	9,574			84,882		59,417
	<b>Nov</b>	22,381	9,671			86,401		60,481
	<b>Dic</b>	22,338	9,643			85,964		60,175
<b>2013</b>	<b>Ene</b>	23,521	10,427			98,840		69,188
	<b>Feb</b>	22,452	9,717			87,416		61,191
	<b>Mar</b>	22,844	9,975			91,499		64,050
	<b>Abr</b>	22,953	10,048			92,665		64,865
	<b>May</b>	22,306	9,622			85,930		60,151
	<b>Jun</b>	23,886	10,255	117,991	2,639	96,012	1072,621	67,208
	<b>Jul</b>	23,457	10,384			98,126		68,688
	<b>Ago</b>	22,989	10,072			93,046		65,132
	<b>Sep</b>	22,880	9,999			91,885		64,320
	<b>Oct</b>	22,404	9,686			86,924		60,847
	<b>Nov</b>	21,814	9,303			81,016		56,711
	<b>Dic</b>	20,557	8,503			69,262		48,483

Fuente: Elaboración propia

Nota: (-) sin registro de datos

### Turc modificada

$$ETP = K * \left( \frac{T}{T + 15} \right) * (Rg + 50)$$

(Arévalo & Campuzano, 2013)

#### Ecuación 10. Evapotranspiración potencial por el método de Turc modificada

Donde:

*ETP*: evapotranspiración potencial,  $\left[ \frac{mm}{mes} \right]$

*K*: factor de corrección ( $K = 0,4$  para meses de 30 y 31 días;  $K = 0,37$  para febrero)

*T*: Temperatura media mensual,  $[^{\circ}C]$

Rg: Radiación solar media,  $[\frac{cal}{cm^2 \cdot mes}]$

**Tabla 12. Cálculo de evapotranspiración potencial por el método de Turc modificada**

Datos		Cálculos potencial			Cálculos real			
Año	Mes	Temperatura media mensual (°C)	Radiación media mensual (cal/cm2.mes)	Cte. K	Evapotranspiración potencial (mm/mes)	Evapotranspiración potencial (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/mes)	Evapotranspiración real (mm/año)
2011	Ene	22,328	313,827	0,4	87,050	823,285	60,935	576,300
	Feb	22,110	322,406	0,37	82,094		57,466	
	Mar	-	-	0,4	-		-	
	Abr	-	-	0,4	-		-	
	May	-	-	0,4	-		-	
	Jun	22,830	386,880	0,4	105,461		73,823	
	Jul	23,137	344,299	0,4	95,686		66,980	
	Ago	22,965	347,783	0,4	96,247		67,373	
	Sep	23,042	450,144	0,4	121,175		84,822	
	Oct	21,364	296,640	0,4	81,461		57,023	
	Nov	21,459	282,192	0,4	78,209		54,746	
	Dic	21,734	270,720	0,4	75,903		53,132	
2012	Ene	22,105	267,236	0,4	75,596	899,800	52,917	629,860
	Feb	22,615	333,874	0,37	85,394		59,776	
	Mar	22,689	-	0,4	-		-	
	Abr	21,915	-	0,4	-		-	
	May	22,622	-	0,4	-		-	
	Jun	23,316	426,288	0,4	115,931		81,152	
	Jul	23,575	439,572	0,4	119,681		83,777	
	Ago	23,258	440,779	0,4	119,343		83,540	
	Sep	23,556	456,720	0,4	123,833		86,683	
	Oct	22,232	354,147	0,4	96,530		67,571	
	Nov	22,381	310,704	0,4	86,385		60,470	
	Dic	22,338	272,206	0,4	77,106		53,974	
2013	Ene	23,521	302,679	0,4	86,139	676,711	60,297	473,698
	Feb	22,452	299,314	0,37	77,481		54,237	
	Mar	22,844	-	0,4	-		-	
	Abr	22,953	-	0,4	-		-	
	May	22,306	-	0,4	-		-	
	Jun	23,264	434,352	0,4	117,792		82,454	
	Jul	23,457	453,228	0,4	122,778		85,945	
	Ago	22,989	417,043	0,4	113,052		79,137	

<b>Sep</b>	22,880	412,464	0,4	111,734	78,214
<b>Oct</b>	22,404	51,515*	0,4	24,322*	17,025*
<b>Nov</b>	21,814	-	0,4	-	-
<b>Dic</b>	20,557	-	0,4	-	-

*Fuente:* Elaboración propia

*Nota:* (-) sin registro de datos; (\*) datos atípicos

### 5.3.1.2 Cálculo de huella hídrica

Teniendo ya calculados los valores de evaporación por los diferentes métodos, se realizó el análisis de cada uno y se seleccionó, como el más conveniente para este trabajo, Cenicafé (Ver Análisis de resultados) pues fueron sus resultados los que más se aproximaron al valor de evapotranspiración de referencia para la zona de estudio. Estos resultados se utilizaron entonces para calcular la huella hídrica azul aplicando la Ecuación 4, la Ecuación 5 y la Ecuación 6.

A continuación se muestran los cálculos de huella azul para los años 2011, 2012 y 2013 utilizando la evaporación hallada con Cenicafé (Tablas 13, 14 y 15) así como una tabla que resume los valores mensuales para cada año (Tabla 16) y los valores máximos, mínimos, medios y totales (Tabla 17); en los Anexos A, B y C se encuentran los cálculos de Huella Hídrica utilizando los demás métodos mencionados.

**Tabla 13. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2011 por método Cenicafé**

2011													
Variable	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Nivel promedio multianual	msnm	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472
Volumen útil	m <sup>3</sup>	36002000 0	30864800 0	23548400 0	21564800 0	26292100 0	28050800 0	27055900 0	19372400 0	16415000 0	18876500 0	28744300 0	38894000 0
Área inundada	m <sup>2</sup>	818106,51 6	709598,43 8	551075,26 3	507364,08 2	610863,87 3	649082,17 1	627497,71 6	458491,38 9	391675,43 6	447361,03 8	664067,79 6	879015,98 8
Evaporación real mensual Cenicafé	mm/meses	92,542	83,697	92,719	89,633	92,582	89,594	92,672	92,907	89,996	92,910	89,700	92,470
Agua evaporada Cenicafé	m <sup>3</sup> /mes	75709,025	59391,559	51095,282	45476,549	56554,974	58154,154	58151,385	42596,920	35249,135	41564,131	59566,677	81282,543
Generación promedio mensual	GW	228,030	194,771	181,882	200,812	164,586	133,340	153,420	121,277	71,317	112,311	125,687	284,954
Huella Hídrica Cenicafé	m <sup>3</sup> /GJ	0,092	0,085	0,078	0,063	0,095	0,121	0,105	0,098	0,137	0,103	0,132	0,079

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14.** Cálculo de huella hídrica azul para el año 2012 por método Cenicafé

2012													
Variable	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Nivel promedio multianual	<b>msnm</b>	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472
Volumen útil	<b>m3</b>	36002000 0	30864800 0	23548400 0	21564800 0	26292100 0	28050800 0	27055900 0	19372400 0	16415000 0	18876500 0	28744300 0	38894000 0
Área inundada	<b>m2</b>	818106,51 6	709598,43 8	551075,26 3	507364,08 2	610863,87 3	649082,17 1	627497,71 6	458491,38 9	391675,43 6	447361,03 8	664067,79 6	879015,98 8
Evaporación real mensual Cenicafé	<b>mm/mes</b>	92,454	83,650	92,871	89,836	92,644	89,667	92,674	92,940	90,107	93,030	89,739	92,589
Agua evaporada Cenicafé	<b>m3/mes</b>	75637,092	59358,116	51178,754	45579,804	56592,883	58201,088	58152,931	42612,008	35292,589	41618,020	59592,753	81387,581
Generación promedio mensual	<b>GW</b>	223,630	253,340	140,732	137,141	169,101	58,447	93,725	78,505	27,079	28,268	85,720	176,998
Huella Hídrica Cenicafé	<b>m3/GJ</b>	0,094	0,065	0,101	0,092	0,093	0,277	0,172	0,151	0,362	0,409	0,193	0,128

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2013 por método Cenicafé**

2013													
Variable	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Nivel promedio multianual	<b>msnm</b>	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472
Volumen útil	<b>m3</b>	36002000 0	30864800 0	23548400 0	21564800 0	26292100 0	28050800 0	27055900 0	19372400 0	16415000 0	18876500 0	28744300 0	38894000 0
Área inundada	<b>m2</b>	818106,51 6	709598,43 8	551075,26 3	507364,08 2	610863,87 3	649082,17 1	627497,71 6	458491,38 9	391675,43 6	447361,03 8	664067,79 6	879015,98 8
Evaporación real mensual Cenicafé	<b>mm/mes</b>	92,692	83,723	92,807	90,070	92,999	89,894	92,836	92,817	89,757	92,756	89,680	92,495
Agua evaporada Cenicafé	<b>m3/mes</b>	75832,272	59409,918	51143,562	45698,408	56809,888	58348,869	58254,468	42556,008	35155,757	41495,508	59553,276	81304,513
Generación promedio mensual	<b>GW</b>	142,333	188,042	197,714	137,227	161,312	87,577	82,843	29,144	69,150	118,025	74,488	221,873
Huella Hídrica Cenicafé	<b>m3/GJ</b>	0,148	0,088	0,072	0,093	0,098	0,185	0,195	0,406	0,141	0,098	0,222	0,102

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16. Huella hídrica azul mensual para 2011, 2013 y 2014**

Año	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2011	m3/GJ	0,092	0,085	0,078	0,063	0,095	0,121	0,105	0,098	0,137	0,103	0,132	0,079
2012	m3/GJ	0,094	0,065	0,101	0,092	0,093	0,277	0,172	0,151	0,362	0,409	0,193	0,128
2013	m3/GJ	0,148	0,088	0,072	0,093	0,098	0,185	0,195	0,406	0,141	0,098	0,222	0,102

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 17. Huella hídrica azul: Valores máximos, mínimo, medios y totales para años 2011, 2012 y 2013**

	Máximo	Mínimo	Promedio	Suma
2011	0,137	0,063	0,099	1,188
2012	0,409	0,065	0,178083333	2,137
2013	0,406	0,072	0,154	1,848

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2 Huella Hídrica gris

Para calcular la huella hídrica gris de DBO, DQO y SST se utilizó la siguiente ecuación:

$$HH_{gris} = \frac{(Q_s * C_s) - (Q_e * C_e)}{C_{max} - C_{nat}}$$

**Ecuación 11. Huella hídrica gris para diferentes contaminantes**

Donde:

$HH_{gris}$ : huella hídrica gris para n contaminante, [m<sup>3</sup>/s]

$Q_s$ : caudal de salida, [l/s]

$C_s$ : concentración de salida, [mg/l]

$Q_e$ : caudal de entrada, [l/s]

$C_s$ : concentración de entrada, [mg/l]

$C_{max}$ : concentración máxima, [mg/l]

$C_{nat}$ : concentración natural en el cuerpo de agua, [mg/l]

A continuación se mencionan algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta para este trabajo al momento de realizar los cálculos de la huella gris:

- La carga de entrada ( $Q_e * C_e$ ) corresponde a la suma de la carga de entrada del río La Miel más la carga de entrada del río Moro.
- Las mediciones que se muestran como un valor inferior al parámetro (por ejemplo: <2,49) está indicando que la concentración de dicho contaminante era inferior al valor mínimo que registra el equipo de medición y, para efectos de cálculo en este trabajo, se tomó ese valor límite como concentración.
- Los datos de oxígeno disuelto no se utilizaron para calcular huella gris puesto que éste es un parámetro más no un contaminante.

Los resultados de los cálculos de huella hídrica gris para DBO, DQO y SST se muestran a continuación en la Tabla 18.

**Tabla 18. Huella hídrica gris para DBO, DQO y SST**

	Caudal turbinado (l/s)	Concentración de salida (mg/l)	Caudal afluente río Miel (l/s)	Concentración entrada río Miel (mg/l)	Caudal afluente río Moro (l/s)	Concentración entrada río Moro (mg/l)	Concentración máxima (mg/l)	Concentración natural (mg/l)	Huella hídrica gris (m <sup>3</sup> /s)
<b>DBO</b>	57679	2,49	40620	2,49	46730	2,49	6	2	-18,470
<b>DQO</b>	57679	19	40620	16	46730	9,59	10	5,92	-0,529
<b>SST</b>	57679	25	40620	77	46730	0,6	25	13	-142,817

Fuente: Elaboración propia

## **6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.1 Resultados de evapotranspiración**

Los resultados del cálculo de huella hídrica azul para los años 2011, 2012 y 2013 se presentan en las tablas 9, 10 y 11 respectivamente. En dichas tablas puede observarse que para cada mes del año existen cuatro resultados diferentes de huella hídrica azul debido a que la evaporación, una de las variables más influyentes en este concepto, fue determinada por cuatro métodos diferentes, elegidos luego de una exhaustiva revisión bibliográfica y de un análisis de datos disponibles para realizar dichos cálculos. Por esta razón, antes de entrar a analizar los valores de huella hídrica obtenidos, es necesario analizar y determinar cuál de los resultados de evaporación es más pertinente para el caso de estudio. Para esto, se analizaron las características de cada ecuación y se compararon los resultados con referencias de estudios previos de evaporación en la cuenca del río La Miel. Dicha referencia corresponde específicamente a un estudio en realizado en la cuenca del río La Miel (Campuzano et al., 2011) en el cual se muestran mapas de distribución espacial de evapotranspiración, tanto potencial como real, además de presentar un dato específico del promedio de evapotranspiración real en el área de la cuenca correspondiente a 2,3 mm/día.

La evapotranspiración potencial es aproximadamente 4,44 mm/día mientras que la evapotranspiración real aproximada de 3,11 mm/día para la zona del embalse. Teniendo entonces identificados estos valores de referencia, se analizan a continuación cada uno de los métodos empleados para hallar la evaporación.

#### **6.1.1 Resultados con Cenicafé**

La ecuación de Cenicafé es una expresión empírica determinada a partir de los cálculos de evapotranspiración de referencia mediante la fórmula de Penman-Monteith empleando datos climatológicos de varias estaciones de la zona Andina de Colombia. Los resultados obtenidos de evapotranspiración de referencia se relacionaron con datos de altitud mediante regresiones exponenciales y, a partir de ello, se propuso la ecuación de Cenicafé utilizada en este trabajo. Cabe anotar que dicha expresión es aplicable a las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena (región Andina de Colombia) para altitudes entre 170 y 3700 m. (Jaramillo R, 2006). Teniendo en cuenta lo anterior se deduce que los resultados arrojados por esta ecuación para el presente estudio pueden resultar muy válidos puesto que la zona de estudio analizada se enmarca dentro de estas características, además de ser una expresión determinada a partir de datos reales en Colombia, lo que le da un valor agregado a la hora de seleccionar un método u otro.

Analizando la aplicación de la ecuación en este trabajo se deduce que los resultados obtenidos a partir de esta son pertinentes puesto que los datos de altitud (que es la única variable requerida) son datos reales tomados por Isagen directamente en el embalse.

Con el fin de comparar los valores de referencia mencionados con los valores obtenidos mediante la ecuación de Cenicafé, se sacó, a partir de los valores de la Tabla 9, el valor promedio de evapotranspiración potencial para los días de cada mes del año, de los años 2011, 2012 y 2013 y, a partir de ellos, se calculó el valor de evapotranspiración real, utilizando la relación  $ETR = 0,7ETP$ . Estos valores se consignan en el Anexo D. Los valores de evapotranspiración potencial media diaria se encuentran en un rango comprendido entre 4,261 y 4,291 mm/día mientras que la evapotranspiración real media diaria está entre 2,982 y 3,004 mm/día.

Teniendo en cuenta que el valor de referencia para la evapotranspiración potencial es de 4,44 mm/día y para la real es de 3,11 mm/día, se observa que los valores obtenidos por el método de Cenicafé para dichos criterios se acercan bastante por lo cual se puede considerar acertado tomar en cuenta los valores de evapotranspiración obtenidos con la ecuación de Cenicafé para emplearlos en el cálculo de huella hídrica.

### **6.1.2 Resultados con García y López**

La ecuación de García y López es una fórmula que aplica para zonas ubicadas en el trópico en el rango latitudinal de 15°N y 15°S, desarrollada a partir de una correlación de datos de temperatura y humedad relativa con datos de evapotranspiración medidos en seis estaciones tropicales (García, J; López, 1970). Bajo estas condiciones, esta ecuación podría aplicarse perfectamente a la zona que se está analizando en este trabajo; sin embargo, se debe tener en cuenta que las variables requeridas para esta ecuación son temperatura media mensual y humedad relativa media mensual y estos datos fueron tomados en la estación Berlín, que se encuentra ubicada a una distancia considerable del embalse, lo cual puede implicar cierta variación en los valores de temperatura y humedad relativa.

Una de las variaciones más importantes es la diferencia de altitud entre la estación (889 m.s.n.m) y el embalse (aproximadamente 440 m.s.n.m.) lo que se traduce en una diferencia de temperatura considerable entre ambos sitios y que, a su vez, implica cambios en la humedad relativa.

Lo anterior puede explicar entonces porqué hay una lejanía mayor, con respecto a los datos de referencia, de los datos de evapotranspiración potencial y real media diaria en el mes, consignados en el Anexo E, frente a los mismos valores calculados por el método Cenicafé. En el caso de García y López, la evapotranspiración

potencial media diaria tiene un valor mínimo de 3,140 y un valor máximo de 4,497 mm/día, mientras que la evapotranspiración real un mínimo de 2,198 y un máximo de 3,148 mm/día.

### **6.1.3 Resultados con Thornthwaite**

La ecuación de Thornthwaite fue determinada a partir de numerosas mediciones llevadas a cabo con lisímetros en diferentes cuencas de Estados Unidos (Marín, 2010). En este trabajo, los resultados de evapotranspiración real y potencial media diaria en el mes calculados con esta ecuación, y mostrados en el Anexo F, se alejan aún más que estos mismos valores obtenidos con la ecuación de García y López con respecto a los valores de referencia, mostrando un valor mínimo de 2,234 y un máximo de 3,430 mm/día, para el caso de evapotranspiración potencial, y un valor mínimo de 1,564 y un máximo de 2,401 mm/día, para el caso de evapotranspiración real. Esto puede explicarse por el hecho de que esta ecuación también involucra variables como temperatura que, como ya se mencionó, sus datos fueron tomados en un sitio retirado al lugar al que corresponden los valores de referencia (embalse).

### **6.1.4 Resultados con Turc modificada**

Los resultados de evapotranspiración real y potencial obtenidos mediante la ecuación de Turc modificada son, definitivamente, los más alejados de los valores de referencia para la zona del embalse. Con esta ecuación se presenta el mismo inconveniente que con García y López y Thornthwaite, cuyas variables involucradas fueron tomadas lejos del lugar de referencia, teniendo Turc modificada una variable más, aparte de la temperatura, que es la radiación media y que posiblemente influya aún más para que los valores obtenidos estén más alejados de los valores de referencia. Dichos resultados se encuentran en el Anexo G. La evapotranspiración potencial media diaria calculada con este método está comprendida entre los valores 2,439 y 4,128 mm/día y la evapotranspiración real entre los valores 1,707 y 2,889 mm/día.

Para resumir lo anterior, se muestra en la Tabla 19, el valor promedio de referencia, el valor promedio obtenido con las ecuaciones utilizadas en este trabajo y la desviación estándar entre estos valores, donde se comprueba que, para este caso y teniendo en cuenta las limitaciones de datos en la zona de presa, la ecuación de Cenicafé es la que menos desviación presenta y por lo tanto es la más adecuada para realizar los demás cálculos que involucren evaporación.

**Tabla 19.** *Desviación estándar de cada ecuación con respecto al valor de referencia*

Ecuación	Criterio	Valor de referencia	Valor promedio	Desviación estándar
<b>Cenicafé</b>	Evapotranspiración potencial	4,44	4,27415969	0,117266808
	Evapotranspiración real	3,11	2,991911783	0,083500979
<b>García y López</b>	Evapotranspiración potencial	4,44	3,723860544	0,506387065
	Evapotranspiración real	3,11	2,606702381	0,355885159
<b>Thorntwaite</b>	Evapotranspiración potencial	4,44	3,019285748	1,004596682
	Evapotranspiración real	3,11	2,113500024	0,704631891
<b>Turc modificada</b>	Evapotranspiración potencial	4,44	2,265221998	1,537800273
	Evapotranspiración real	3,11	1,585655399	1,077874404

*Fuente:* Elaboración propia

## 6.2 Análisis de sostenibilidad

### 6.2.1 Resultados de huella hídrica azul

Para evaluar el resultado de huella hídrica azul se realizaron gráficos en los que se relacionan cada una de las variables utilizadas en el cálculo de huella hídrica azul (eje vertical de todos estos gráficos) y su comportamiento mensual para cada uno de los años analizados con el fin de observar el comportamiento o las tendencias de cada una y analizar la posible relación de éstas con el valor de la huella hídrica. A continuación se muestran entonces dichas gráficas (Figura 3, Figura 4, Figura 5) y posterior a ellas se realizó el análisis.

## Año 2011

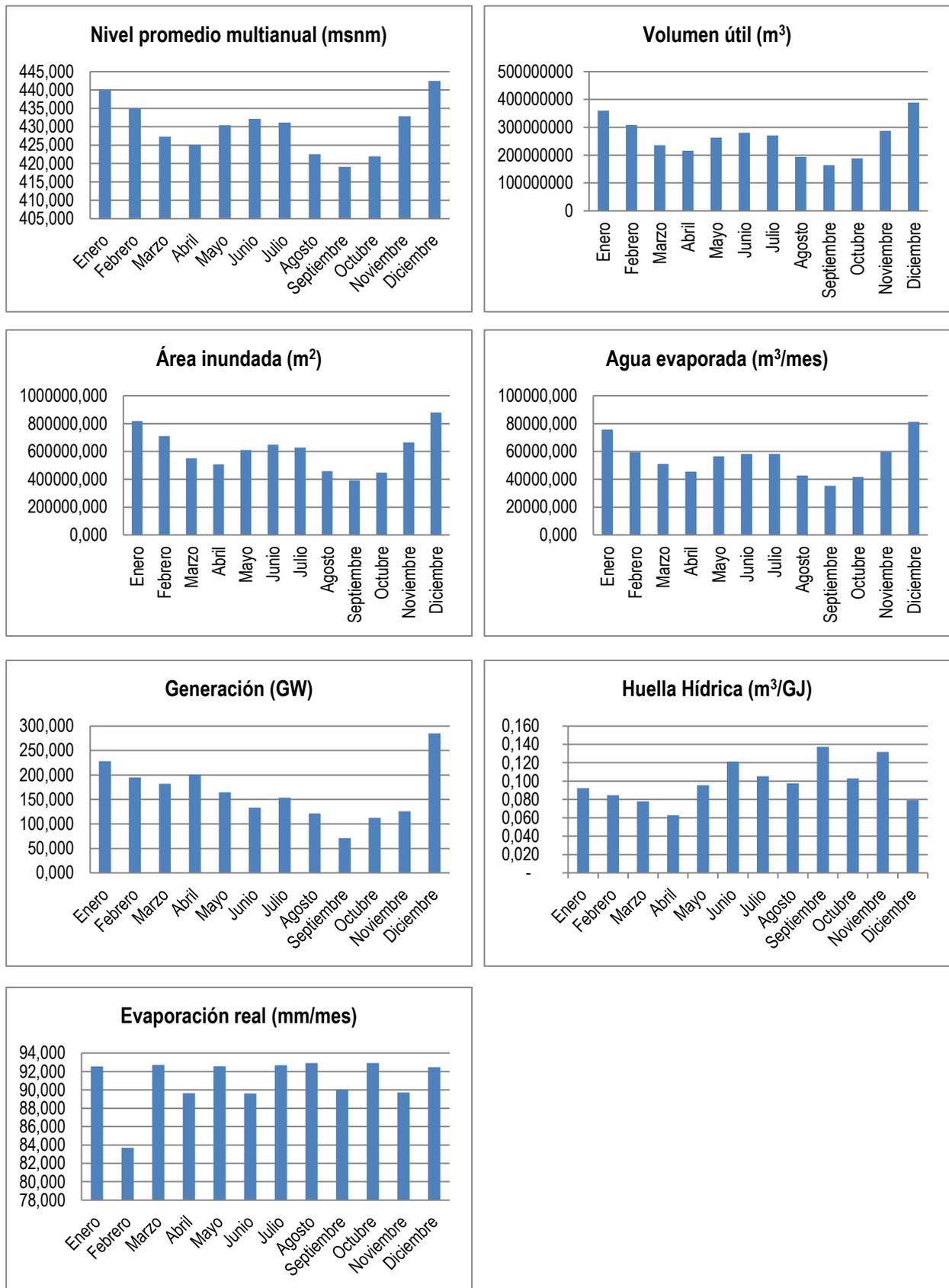


Figura 3. Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2011

## Año 2012

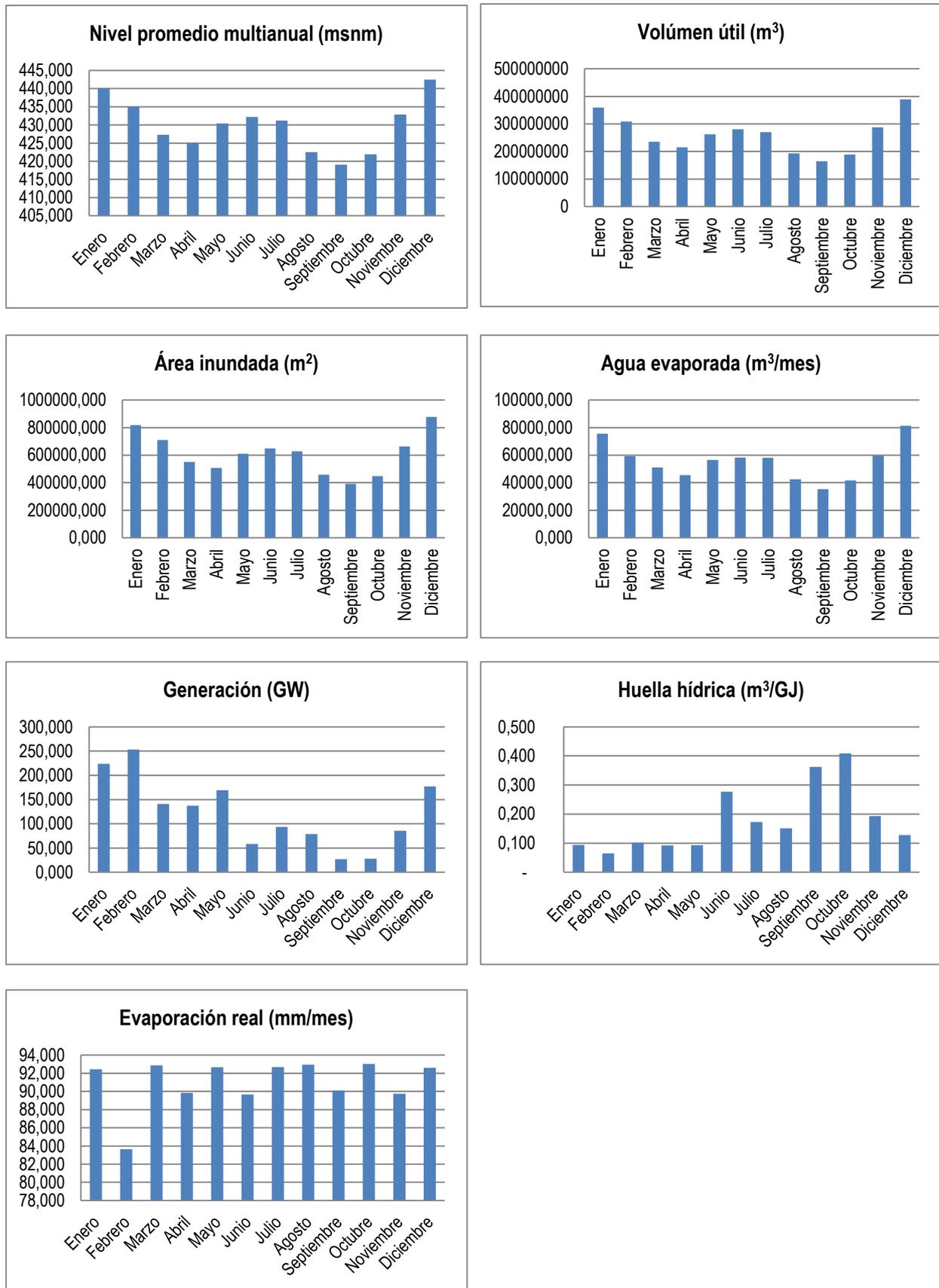


Figura 4. Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2012

## Año 2013

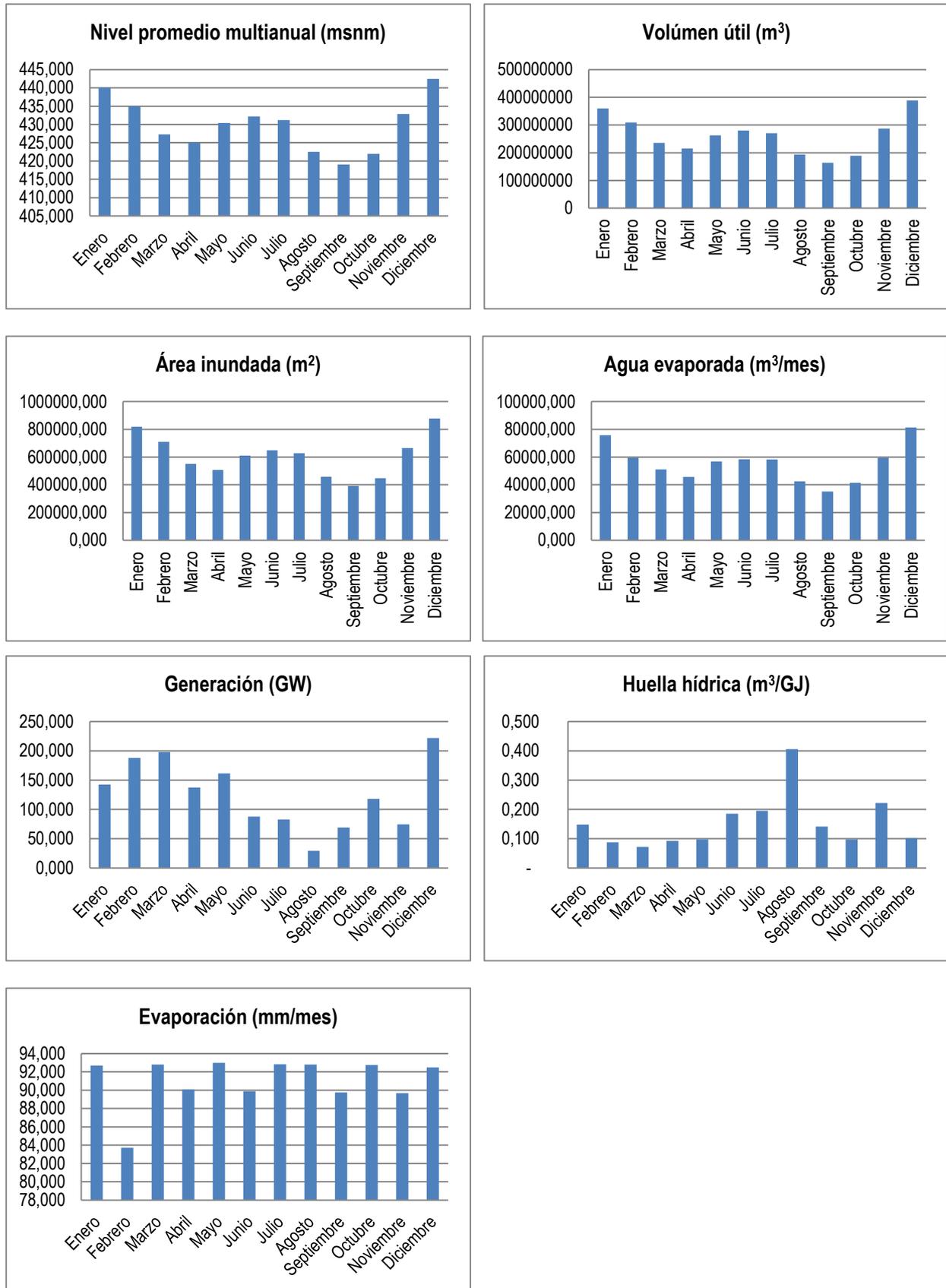


Figura 5. Comparación de variables que influyen en la huella hídrica azul – año 2013

Teniendo en cuenta las ecuaciones utilizadas para determinar cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la huella hídrica azul y analizando las Figuras 7, 8 y 9 se observa que nivel promedio multianual, volumen útil, área inundada y agua evaporada guardan una relación entre sí: cuando se da un aumento en el nivel promedio multianual se aumenta por ende el volumen útil lo que, a su vez, genera un aumento en el área inundada y finalmente aumenta también la cantidad de agua evaporada. Esto puede explicarse porque el volumen útil es función del nivel promedio multianual y el área inundada se calcula con estas dos variables, por lo tanto es apenas lógico que se dé este comportamiento; el aumento en el agua evaporada puede darse porque al aumentar el área inundada el espejo de agua es mayor y por tanto la superficie expuesta a sufrir la evaporación también es mayor (crece la superficie tendiente a evaporarse).

En cuanto a la generación no se observa una relación en orden creciente o decreciente con respecto al nivel promedio multianual, sin embargo se observa que en los meses en que se dan las mayores caídas de nivel se producen también las mayores caídas en la generación, valores que son probablemente regulados desde la central, de acuerdo con la demanda de energía.

La generación de energía es la variable que está más relacionada con el valor de huella hídrica azul, guardando una relación inversa entre sí, es decir, cuando la generación aumenta la huella hídrica disminuye y viceversa. Generalmente, en los meses de mayor generación se presentó la huella hídrica más baja. Este comportamiento puede observarse mejor en las Figuras 6, 7 y 8, en las cuales se observa también que esta secuencia se ve alterada, en los tres años, por los meses de Diciembre y Enero para los cuales no se guarda esta relación. En general, puede decirse entonces que en los meses en que la central está operando a mayor capacidad (en términos de generación de energía) es, a su vez, más sostenible ambientalmente, según las mediciones de huella hídrica azul. Cabe anotar que entre las mayores huellas hídricas azules de cada año siempre están incluidas las de los meses de junio y noviembre mientras que entre las menores están incluidas las de febrero y abril.

Según la Contraloría Delegada del Medio Ambiente, en cabeza de la Contraloría General de la República (2012), entre los años 2008 y 2011 la central generó solamente el 49.04% de la energía máxima capaz de generar, teniendo en cuenta que esta central tiene un potencial de 3421 GWh/año. Esto indica que la central estuvo sobredimensionada para esa época, generando con esto costos ambientales y económicos, entre ellos un aumento en la huella hídrica azul del proceso de generación en esta central. Si se tienen en cuenta los valores de generación promedio mensual y anual presentados en la Tabla 3 del presente trabajo, se observa que, para los años analizados, tampoco se generó la máxima cantidad de energía para la cual tiene capacidad la central, estando alejados del valor máximo, por lo tanto para estos años la central también estuvo sobredimensionada. El hecho de aumentar la generación de energía mensual traería como consecuencia natural

una disminución de la huella hídrica azul y por lo tanto una mejora en la sostenibilidad ambiental de la central; además, no se presentaría sobredimensionamiento lo cual reduce los costos y las implicaciones que este suceso genera.

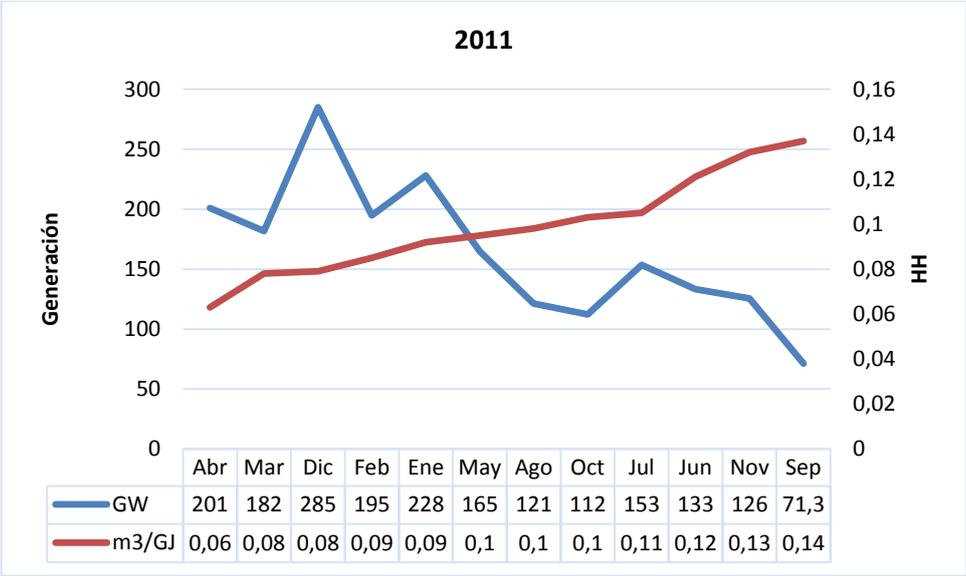


Figura 6. Generación vs. Huella hídrica azul – año 2011  
Fuente: Elaboración propia

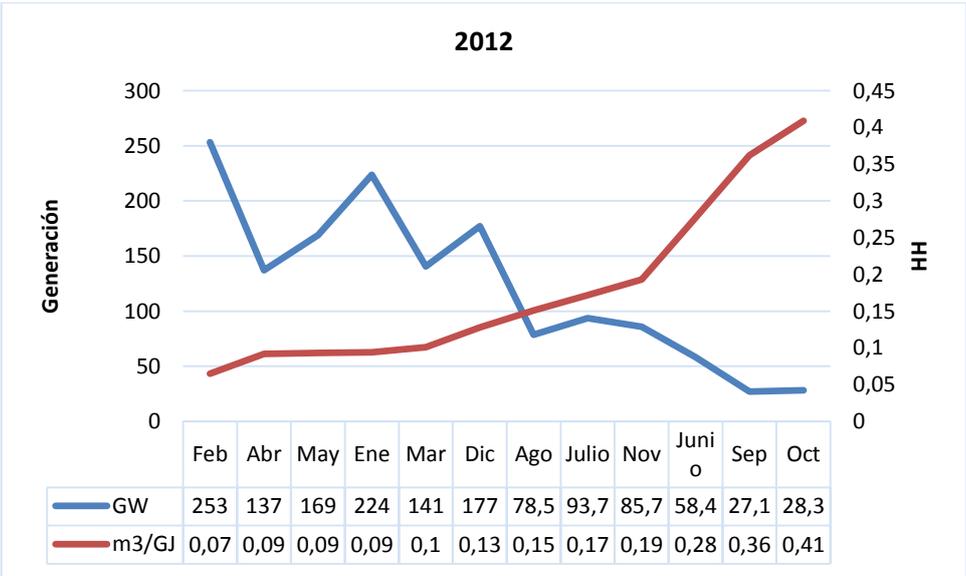


Figura 7. Generación vs. Huella hídrica – año 2012  
Fuente: Elaboración propia

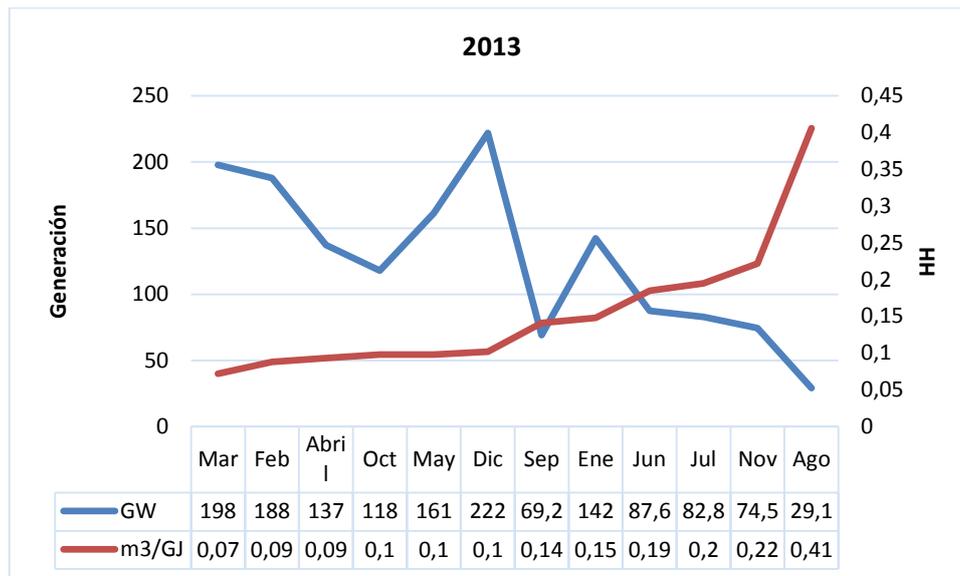


Figura 8. Generación vs. Huella hídrica – año 2013  
Fuente: Elaboración propia

Pasando ya a analizar los posibles efectos, en cuanto a disponibilidad de agua, que pudiera llegar a tener la central (y el embalse) en la cuenca del río La Miel, se tienen las siguientes consideraciones:

- El caudal ecológico establecido es de 48 m<sup>3</sup>/s (Viceministerio del Medio Ambiente, 2002)
- En términos de oferta, el caudal medio que mantiene la cuenca es de 276,204 m<sup>3</sup>/s (CORPOCALDAS, 2013).
- En términos de demanda, la cuenca tiene un caudal asignado de 0,08873 m<sup>3</sup>/s para todos los usos que se le dan al agua en esta cuenca (beneficio de café, ganadería, humano doméstico, industrial, piscicultura, porcicultura, recreación riego, otros) (CORPOCALDAS, 2013).

A partir de estos datos se puede calcular la oferta de agua mensual disponible, para lo cual se le resta el caudal ecológico al caudal natural (caudal medio) y esto daría como resultado 228,204 m<sup>3</sup>/s; este valor es muy superior al valor de caudal demandado para todos los usos del agua lo cual indica que esta cuenca no tiene problemas de disponibilidad de agua en cuanto a la cantidad.

De lo anterior se concluye entonces que la cuenca del río La Miel como tal, no presenta problemas de disponibilidad de agua; sin embargo, estos análisis no permiten ir más allá de esta cuenca y analizar otras fuentes de agua menores como por ejemplo quebradas o aguas que alimenten los trasvases que se construyeron para la central y que descargan aguas en el río La Miel, por lo tanto no se puede concluir acerca de la disponibilidad de agua en estas fuentes menores que alimentan a la cuenca.

## 6.2.2 Resultados de huella hídrica gris

Analizando la Tabla 18 de resultados de huella hídrica gris se observa que los valores obtenidos para los tres contaminantes evaluados son negativos, lo cual es un resultado bueno y favorecedor puesto que indica que las concentraciones de salida de cada uno de los contaminantes son inferiores a las concentraciones de entrada, esto permite deducir que el embalse está teniendo un impacto positivo sobre esa fuente de agua y no está afectando la disponibilidad de agua en términos de calidad.

En la Tabla 20 se muestran otros valores diferentes a los mencionados anteriormente, donde se puede observar la reducción en contaminantes que se está mencionando en este análisis.

**Tabla 20.** Concentración de los parámetros SST, SDT, ST, Fósforo total y Nitrógeno total antes y después del embalse

Parámetro	Río La Miel antes del embalse	Río Moro antes del embalse	Estación Puente hierro después del embalse
SST (mg/L)	77	<0,6	25,6
SDT (mg/L)	64	85	60,4
ST (mg/L)	141	85	86
Fósforo total (mg/L P)	0,089	0,014	0,057
Nitrógeno total (mg/L NTK)	0,364	0,168	0,3

Fuente: (UCO & ISAGEN, 2014)

Para el caso de los sólidos se observa una diferencia bastante grande entre la entrada y la salida: las concentraciones de sólidos (SST, SDT, ST) son menores a la salida que a la entrada, lo que indica que el embalse está reteniendo una gran cantidad de sólidos. Este hecho puede ser visto desde varios puntos: se puede ver como una ventaja que ofrecen los embalses al ambiente puesto que concentra los sólidos en un mismo punto en lugar de que estén fluyendo a través de ríos y quebradas y contaminando quizás más fuentes de agua (por ejemplo las grandes fuentes receptoras). Sin embargo, a pesar de ser positivo para el ambiente, los sólidos son, principalmente, el motivo de que los embalses tengan una vida útil determinada pues éstos se van acumulando y van restando capacidad al embalse. Por otro lado, la reducción de sólidos aguas abajo del embalse, puede generar erosión en las orillas de los cauces y traer consecuencias negativas en la cuenca (por ejemplo, inestabilidad en las obras civiles asociadas al río)

En el caso del fósforo total y el nitrógeno total se observa también una reducción considerable (en el caso específico del fósforo) entre los valores de entrada y salida lo cual, a simple vista, es bueno puesto que se está reduciendo la cantidad de estos elementos; sin embargo, esta diferencia indica que estos nutrientes se están reteniendo en el embalse lo cual puede generar eutrofización en dicho cuerpo de agua ya que se está produciendo una acumulación de nutrientes. La eutrofización trae consigo grandes impactos al ambiente al igual que consecuencias negativas para el mismo embalse. Al acumularse dichos nutrientes se puede generar un crecimiento acelerado de fitoplancton, puede disminuir la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la vida de los seres acuáticos y puede además generar el desprendimiento de gases (como metano y amoníaco) al ambiente lo cual tendría un impacto directo sobre la atmósfera. Si se realizara por ejemplo una medición de huella de carbono, ésta se vería notablemente afectada por este hecho.

### **6.2.3 Comparación de resultados con otras huellas hídricas de centrales hidroeléctricas**

En la revisión bibliográfica realizada se encontró un estudio de huella hídrica azul calculada específicamente en algunas centrales hidroeléctricas a nivel mundial (Mekonnen & Hoekstra, 2012) en el cual se muestran valores como área del embalse, capacidad instalada, evaporación y huella hídrica. El estudio mencionado contiene datos de centrales nacionales e internacionales

Para comparar la huella hídrica obtenida para la central Miel I con otras huellas hídricas de centrales hidroeléctricas, se toma como referencia el área del embalse y a partir de ahí se evalúan las demás variables y se analizan sus huellas hídricas. De esta manera se tienen entonces cuatro centrales con las cuales se puede hacer el análisis de comparación; los datos de éstas se muestran en la Tabla 21.

Es importante aclarar que para el siguiente análisis se tomó en cuenta la evaporación potencial y no la real para los valores mostrados de la central Miel I y, por lo tanto, la huella hídrica hallada con esta evaporación, puesto que los valores de referencia de las demás centrales contemplan la evaporación potencial y no la real y se hizo necesario tener los mismos parámetros de comparación para que fuera más efectivo (cabe aclarar que esta consideración se toma para efectos de comparación bajo los mismos parámetros; sin embargo, todos los demás resultados de huella hídrica azul expuestos en el trabajo corresponden a la calculada con evaporación real). Otra aclaración importante es que se tomaron los promedios de los años 2011, 2012 y 2013 para determinar el valor de evaporación y huella hídrica de la central Miel I.

Analizando entonces los resultados obtenidos en la Tabla 21 se observa que, de las cinco centrales analizadas, Miel I tiene la segunda huella hídrica más baja lo cual

indica que, en términos de huella hídrica, es más sostenible que Playas, Fortuna y Chixoy, teniendo incluso mayor área de embalse Miel I que Playas y Fortuna, sin embargo estas tienen mayor evaporación que Miel I con lo cual se deduce que las condiciones climáticas (que afectan directamente la evaporación) son determinantes al momento de evaluar la sostenibilidad de la central (en términos de huella hídrica).

Se hace fundamental también observar la diferencia en el valor de huella hídrica para la producción de energía teórica máxima y para la producción actual de energía: es claro que la huella es mucho menor si se generara la energía máxima teórica con lo cual se valida la afirmación hecha en este trabajo que dice que al generar más energía la huella hídrica disminuye; de ahí la importancia que la central trabaje tendiendo siempre hacia la mayor generación de energía posible.

**Tabla 21.** Comparación de huella hídrica azul de la central Miel I frente a otras centrales hidroeléctricas

Central hidroeléctrica	País	Área del embalse (ha)	Capacidad instalada (MW)	Evaporación (mm/año)	Huella hídrica (m <sup>3</sup> /GJ)	
					para producción de energía teórica máxima	para producción actual de energía
Chivor	Colombia	1200	1008	1607	0.6	1.7
Miel I	Colombia	1220	396	1560.07	-	2.5
Playas	Colombia	1100	204	1663	2.8	3.6
Fortuna	Panamá	1000	300	2251	2.4	4.3
Chixoy	Guatemala	1300	300	2393	3.3	6.4

Fuente: (Mekonnen & Hoekstra, 2012)

## 7. CONCLUSIONES

La huella hídrica azul, depende directamente de los valores de evaporación del embalse, por lo que era fundamental una ecuación que entregara valores pertinentes en este sentido. La ecuación de Cenicafé presentó un buen ajuste para el embalse Miel I, puesto que está en función sólo de su altitud, siendo este valor conocido para el caso de estudio y de gran exactitud. Por el contrario, para utilizar ecuaciones como García y López, Thornthwaite o Turc modificada en la determinación de valores de evapotranspiración se requiere que las variables utilizadas, sean medidas en la zona donde se encuentra el espejo de agua (al cual se le evaluará evapotranspiración) para obtener datos reales y precisos, con los cuales no se contaba.

La huella hídrica azul del proceso de generación de energía hidroeléctrica aumenta cuando se reduce la cantidad de energía generada, a su vez que, cuanta menor energía se genere, se está subutilizando el embalse. Esto indica que la huella hídrica azul del proceso de generación de energía hidroeléctrica se hace más sostenible a medida que se genera mayor cantidad de energía por lo cual se recomienda que la central opere en valores cercanos a su máxima capacidad de generación.

El área del embalse y las condiciones climáticas de la zona donde éste se localice, son variables determinantes al momento de evaluar la huella hídrica y sus sostenibilidad ambiental, encontrándose que el embalse Miel I, por su posición geográfica, presenta grandes ventajas en este sentido.

La central hidroeléctrica Miel I no afecta la disponibilidad de agua, en términos de cantidad, en la cuenca del río La Miel.

La huella hídrica gris negativa obtenida para los parámetros evaluados indica un impacto positivo sobre el cuerpo de agua analizado, además no se evidencia afectación por disponibilidad de agua en términos de calidad.

El embalse actúa como retenedor de sólidos lo cual es un beneficio para el río y las vertientes en las que éste desemboca, sin embargo esta retención de sólidos afectará la vida útil del embalse.

La central hidroeléctrica Miel I se considera ambientalmente sostenible en términos de hídrica en relación con otras centrales nacionales e internacionales con características similares, para las condiciones y dentro de las fronteras analizadas.

## **8. RECOMENDACIONES**

Para futuros estudios se recomienda ampliar un poco más el alcance y definir las fronteras de estudio desde la zona de trasvases con el fin de considerar los impactos que el proceso de generación de energía pueda tener en un contexto regional y nacional.

Asimismo, se recomienda realizar un análisis de sostenibilidad que incluya no sólo el ámbito ambiental sino que considere también el económico y el social para determinar realmente el impacto que tiene la central en la zona de operación y sus alrededores.

Para complementar los análisis de sostenibilidad ambiental, se recomienda realizar mediciones de huella de carbono con el fin de tener una visión más amplia y completa de los impactos ambientales que podría tener la central en la zona donde opera.

## BIBLIOGRAFIA

- Allan, J. A. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In *ODA, Priorities for water resources allocation and management* (pp. 13–26). London: ODA.
- Arévalo, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica*.
- Arévalo, D., & Campuzano, C. (2013). *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca*. Medellín, Colombia.
- Arévalo, D., & Campuzano, C. (2013). *Resumen de Resultados. Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del río Porce*. Medellín, Colombia.
- Campuzano, C., García, J., Arenas, J., Rodríguez, C., Arroyave, M. del P., Ruiz, C., ... Montoya, J. J. (2011). *Inferencias de respuestas hidrológicas de la cuenca hidrográfica del río la miel ante escenarios de cambio y variabilidad climática y cambios en la cobertura y uso del suelo*. Medellín, Colombia.
- 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. In *Virtual water trade Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12*. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). Water Footprints of Nations Volume 1 : Main Report, Value of Water Research Report Series No. 16. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 64(1), 109–118.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60(1), 186–203.
- Contraloría General de Caldas. (2011). *Diagnóstico a la implementación de la estrategia de Gobierno en línea*. Retrieved from <http://www.contraloriageneraldecaldas.gov.co/gobiernoenlinea/images/Pdf/Informe Final Gobernacion de caldas.pdf>
- Contraloría General de la República. (2012). *Auditoría a la Unidad Administrativa Especial del orden nacional, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA- con el propósito de realizar evaluación al trámite y estado de licencias ambientales del proyecto “Complejo Hidroeléctrico La Miel.”* Bogotá.

- CORNARE. (2014). Alerta por incendios forestales. Retrieved from <http://www.cornare.gov.co/Alerta-clima/Alerta-Clima-19-feb-2014.pdf>
- CORPOCALDAS, C. A. R. de C. (2013). *Diagnóstico ambiental de Caldas - Plan de acción 2013 - 2015*. Manizales, Colombia.
- EPA, E. P. A. (1986). Quality Criteria for Water. Retrieved October 24, 2014, from [http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/upload/2009\\_01\\_13\\_criteria\\_goldbook.pdf](http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/upload/2009_01_13_criteria_goldbook.pdf)
- Fishelson, G. (1989). *Economic Cooperation in the Middle East, Westview Special Studies on the Middle East*. Westview Press.
- García, S., & Otero, J. (2005). *Estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del río Lebrija*. Universidad Industrial de Santander.
- García, J; López, J. (1970). Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptado al trópico (15°N-15°S). *Agronomía Tropical*, 20(5), 335–345.
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Van der Meer, T. (2008). Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers, Value of Water Research Report Series No. 29. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Van der Meer, T. (2009). The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, 68(4), 1052–1060. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092180090800339X>
- Herath, I., Deurer, M., Horne, D., Singh, R., & Clothier, B. (2011). The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1582–1589. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652611001636>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water Footprint Manual. State of the Art 2009*. Enschede, The Netherlands: Water Footprint Network.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard* (1st ed.). London - Washington DC: Earthscan.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, Value of Water Research Report Series No. 11. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- ISAGEN S.A E.S.P. (2009). *Proyecto Guarinó*. Retrieved from [http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoln\\_proyectoTrasvaseGuarino](http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoln_proyectoTrasvaseGuarino)

- ISAGEN S.A E.S.P. (2011). Responsabilidad Empresarial. Retrieved March 15, 2013, from <http://www.isagen.com.co/ResponsabilidadEmpresarial/compromisoCambio.html?menu=0&submenu=1>
- ISAGEN S.A E.S.P. (2012). *Informe de Gestión 2012*. Medellín.
- ISAGEN S.A E.S.P. (2013a). Central hidroeléctrica Miel I. Retrieved June 15, 2014, from <http://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/produccion-de-energia/generacion-hidroelectrica/central-hidroelectrica-miel/>
- ISAGEN S.A E.S.P. (2013b). *Central hidroeléctrica Miel I*. Retrieved from [http://www.isagen.com.co/comunicados/central\\_miell\\_2013.pdf](http://www.isagen.com.co/comunicados/central_miell_2013.pdf)
- ISAGEN S.A E.S.P. (2014). Trasvases Central Miel I. Retrieved September 07, 2014, from [http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn\\_proyectoTrasvaseGuarino](http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn_proyectoTrasvaseGuarino)
- Jaramillo R, Á. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288–298.
- Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evapotranspiración registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The water footprint of electricity from hydropower, Value of Water Research Report Series No. 51. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 179–187. Retrieved from <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/179/2012/>
- Rodríguez, A., Herrera, A. C., Bustamante, A. M., Pareja, C. L., & Velásquez, G. (2012). *El cálculo de la huella hídrica en Colombia: una tendencia de futuro. Análisis de indicadores*. Medellín, Colombia.
- Sotelo, J., Olcina, J., Tolón, A., García, J. M., Bolívar, X., García, F., ... Sotelo, I. (2011). *Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España*. Madrid: Fundación MAPFRE.
- Thornthwaite, C.W; Wilm, H.G; Colman, E.A; Cummings, N.W. Croft, A. . (1944). Report of the Committee on Transpiration and Evaporation. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(5), 683–693.

UCO, U. C. de O., & ISAGEN. (2014). Monitoreo limnológico e hidrobiológico para la central hidroeléctrica Miel I y el trasvase del río Guarinó. Medellín, Colombia.

UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. (2012). Informe mensual de evolución de variables de generación.

Viceministerio del Medio Ambiente. (2002). Resolución 1043 del 15 de Noviembre de 2002. Bogotá.

WHO, W. H. O. (2006). Standards of potable water quality. Retrieved October 24, 2014, from [http://whqlibdoc.who.int/monograph/WHO\\_MONO\\_49\\_\(chp9-13\).pdf](http://whqlibdoc.who.int/monograph/WHO_MONO_49_(chp9-13).pdf)

Zambrano, S., & Madroñero, S. (2006). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las cuencas hidrográficas del departamento de Caldas*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Retrieved from [http://www.bdigital.unal.edu.co/1627/1/Caracterización\\_físico\\_química.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/1627/1/Caracterización_físico_química.pdf)

## **ANEXOS**

**Anexo A. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2011 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada**

2011														
Variable	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiemb.	Octubre	Noviembre	Diciembre	
<b>Nivel promedio multianual</b>	msnm	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472	
<b>Volumen útil</b>	m3	360020000	308648000	235484000	215648000	262921000	280508000	270559000	193724000	164150000	188765000	287443000	388940000	
<b>Área inundada</b>	m2	818106,51 6	709598,43 8	551075,26 3	507364,08 2	610863,87 3	649082,17 1	627497,71 6	458491,38 9	391675,43 6	447361,03 8	664067,79 6	879015,98 8	
<b>Evaporación real mensual</b>	<b>García y López</b>	mm/mes	77,464	68,349	-	-	-	77,428	86,315	81,818	84,096	70,433	67,167	70,231
	<b>Thornthwaite</b>	mm/mes	67,834	66,577	-	-	-	70,772	72,598	71,569	72,029	62,365	62,895	64,438
	<b>Turc modificada</b>	mm/mes	60,935	57,466	-	-	-	73,823	66,980	67,373	84,822	57,023	54,746	53,132
<b>Agua evaporada</b>	<b>García y López</b>	m3/mes	63373,957	48500,021	-	-	-	50256,931	54162,508	37512,977	32938,375	31509,035	44603,418	61734,205
	<b>Thornthwaite</b>	m3/mes	55495,723	47243,104	-	-	-	45936,714	45554,828	32813,912	28212,158	27899,667	41766,745	56641,631
	<b>Turc modificada</b>	m3/mes	49851,245	40777,792	-	-	-	47916,981	42029,889	30889,868	33222,802	25509,821	36355,249	46703,695
<b>Generación promedio mensual</b>	GW	228,030	194,771	181,882	200,812	164,586	133,340	153,420	121,277	71,317	112,311	125,687	284,954	
<b>Huella Hídrica</b>	<b>García y López</b>	m3/GJ	0,077	0,069	-	-	-	0,105	0,098	0,086	0,128	0,078	0,099	0,060
	<b>Thornthwaite</b>	m3/GJ	0,068	0,067	-	-	-	0,096	0,082	0,075	0,110	0,069	0,092	0,055
	<b>Turc modificada</b>	m3/GJ	0,061	0,058	-	-	-	0,100	0,076	0,071	0,129	0,063	0,080	0,046

Fuente: Elaboración propia

**Anexo B. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2012 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada**

2012														
Variable	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Nivel promedio multianual	msnm	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472	
Volumen útil	m3	360020000	308648000	235484000	215648000	262921000	280508000	270559000	193724000	164150000	188765000	287443000	388940000	
Área inundada	m2	818106,516	709598,438	551075,263	507364,082	610863,873	649082,171	627497,716	458491,389	391675,436	447361,038	664067,796	879015,988	
Evaporación real mensual	García y López	mm/mes	75,236	73,744	80,582	70,345	78,862	86,252	95,311	92,886	94,434	77,043	73,690	76,499
	Thornthwaite	mm/mes	58,514	62,179	62,718	57,186	62,226	67,434	69,452	66,992	69,299	59,417	60,481	60,175
	Turc modificada	mm/mes	52,917	59,776	-	-	-	81,152	83,777	83,540	86,683	67,571	60,470	53,974
Agua evaporada	García y López	m3/mes	61551,093	52328,278	44406,885	35690,742	48174,185	55984,532	59807,511	42587,616	36987,306	34465,817	48934,831	67244,267
	Thornthwaite	m3/mes	47870,334	44121,901	34562,540	29014,248	38011,496	43770,519	43580,930	30715,357	27142,855	26581,027	40163,297	52894,685
	Turc modificada	m3/mes	43291,712	42416,837	-	-	-	52674,304	52569,717	38302,408	33951,736	30228,726	40155,957	47444,437
Generación promedio mensual	GW	223,630	253,340	140,732	137,141	169,101	58,447	93,725	78,505	27,079	28,268	85,720	176,998	
Huella Hídrica	García y López	m3/GJ	0,076	0,057	0,088	0,072	0,079	0,266	0,177	0,151	0,379	0,339	0,159	0,106
	Thornthwaite	m3/GJ	0,059	0,048	0,068	0,059	0,062	0,208	0,129	0,109	0,278	0,261	0,130	0,083
	Turc modificada	m3/GJ	0,054	0,047	-	-	-	0,250	0,156	0,136	0,348	0,297	0,130	0,074

Fuente: Elaboración propia

**Anexo C. Cálculo de huella hídrica azul para el año 2013 por método García y López, Thornthwaite y Turc modificada**

2013														
Variable	Unidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Nivel promedio multianual	msnm	440,065	434,961	427,317	425,036	430,408	432,161	431,171	422,525	419,097	421,952	432,852	442,472	
Volumen útil	m3	360020000	308648000	235484000	215648000	262921000	280508000	270559000	193724000	164150000	188765000	287443000	388940000	
Área inundada	m2	818106,516	709598,438	551075,263	507364,082	610863,873	649082,171	627497,716	458491,389	391675,436	447361,038	664067,796	879015,988	
Evaporación real mensual	García y López	mm/mes	88,373	70,534	80,361	79,189	75,952	82,374	94,497	86,151	82,098	79,027	70,093	68,136
	Thornthwaite	mm/mes	69,188	61,191	64,050	64,865	60,151	67,208	68,688	65,132	64,320	60,847	56,711	48,483
	Turc modificada	mm/mes	60,297	54,237	-	-	-	82,454	85,945	79,137	78,214	17,025	8,296	8,094
Agua evaporada	García y López	m3/mes	72298,456	50051,078	44285,001	40177,644	46396,044	53467,584	59296,553	39499,265	32155,868	35353,638	46546,456	59892,615
	Thornthwaite	m3/mes	56603,186	43420,976	35296,142	32910,305	36744,052	43623,718	43101,729	29862,407	25192,447	27220,502	37660,192	42617,618
	Turc modificada	m3/mes	49329,583	38486,385	-	-	-	53519,596	53930,041	36283,415	30634,327	7616,444	5508,907	7114,677
Generación promedio mensual	GW	142,333	188,042	197,714	137,227	161,312	87,577	82,843	29,144	69,150	118,025	74,488	221,873	
Huella Hídrica	García y López	m3/GJ	0,141	0,074	0,062	0,081	0,080	0,170	0,199	0,376	0,129	0,083	0,174	0,075
	Thornthwaite	m3/GJ	0,110	0,064	0,050	0,067	0,063	0,138	0,145	0,285	0,101	0,064	0,140	0,053
	Turc modificada	m3/GJ	0,096	0,057	-	-	-	0,170	0,181	0,346	0,123	0,018	0,021	0,009

Fuente: Elaboración propia

**Anexo D. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Cenicafé**

Mes	2011		2012		2013	
	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)
Ene	4,265	2,985	4,261	2,982	4,272	2,990
Feb	4,270	2,989	4,268	2,988	4,272	2,990
Mar	4,273	2,991	4,280	2,996	4,277	2,994
Abr	4,268	2,988	4,278	2,995	4,289	3,002
May	4,266	2,987	4,269	2,989	4,286	3,000
Jun	4,266	2,986	4,270	2,989	4,281	2,996
Jul	4,271	2,989	4,271	2,989	4,278	2,995
Ago	4,281	2,997	4,283	2,998	4,277	2,994
Sept	4,286	3,000	4,291	3,004	4,274	2,992
Oct	4,282	2,997	4,287	3,001	4,274	2,992
Nov	4,271	2,990	4,273	2,991	4,270	2,989
Dic	4,261	2,983	4,267	2,987	4,262	2,984

Fuente: Elaboración propia

**Anexo E. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método García y López**

Mes	2011		2012		2013	
	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)
Ene	3,570	2,499	3,467	2,427	4,072	2,851
Feb	3,487	2,441	3,762	2,634	3,599	2,519
Mar	-	-	3,713	2,599	3,703	2,592
Abr	-	-	3,350	2,345	3,771	2,640
May	-	-	3,634	2,544	3,500	2,450
Jun	3,687	2,581	4,107	2,875	3,923	2,746
Jul	3,978	2,784	4,392	3,075	4,355	3,048
Ago	3,770	2,639	4,280	2,996	3,970	2,779
Sep	4,005	2,803	4,497	3,148	3,909	2,737
Oct	3,246	2,272	3,550	2,485	3,642	2,549
Nov	3,198	2,239	3,509	2,456	3,338	2,336
Dic	3,236	2,266	3,525	2,468	3,140	2,198

Fuente: Elaboración propia

**Anexo F. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Thornthwaite**

	2011		2012		2013	
Mes	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)
Ene	3,126	2,188	2,696	1,888	3,188	2,232
Feb	3,397	2,378	3,172	2,221	3,122	2,185
Mar	-	-	2,890	2,023	2,952	2,066
Abr	-	-	2,723	1,906	3,089	2,162
May	-	-	2,868	2,007	2,772	1,940
Jun	3,370	2,359	3,211	2,248	3,200	2,240
Jul	3,346	2,342	3,201	2,240	3,165	2,216
Ago	3,298	2,309	3,087	2,161	3,001	2,101
Sep	3,430	2,401	3,300	2,310	3,063	2,144
Oct	2,874	2,012	2,738	1,917	2,804	1,963
Nov	2,995	2,097	2,880	2,016	2,701	1,890
Dic	2,969	2,079	2,773	1,941	2,234	1,564

Fuente: Elaboración propia

**Anexo G. Evapotranspiración potencial y real media diaria por el método Turc modificada**

	2011		2012		2013	
Mes	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración potencial media diaria en el mes (mm/día)	Evapotranspiración real media diaria en el mes (mm/día)
Ene	2,808	1,966	2,439	1,707	2,779	1,945
Feb	2,932	2,052	3,050	2,135	2,767	1,937
Mar	-	-	-	-	-	-
Abr	-	-	-	-	-	-
May	-	-	-	-	-	-
Jun	3,515	2,461	3,864	2,705	3,926	2,748
Jul	3,087	2,161	3,861	2,702	3,961	2,772
Ago	3,105	2,173	3,850	2,695	3,647	2,553
Sep	4,039	2,827	4,128	2,889	3,724	2,607
Oct	2,628	1,839	3,114	2,180	-	-
Nov	2,607	1,825	2,880	2,016	-	-
Dic	2,448	1,714	2,487	1,741	-	-

Fuente: Elaboración propia