

**Universidad Nacional**  
**Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar**  
**Escuela de Ciencias Ambientales**  
**Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental**

**“Cálculo de la huella hídrica en la microcuenca del río Porrosatí como insumo para orientar el establecimiento de medidas de adaptación al cambio climático en materia de disponibilidad del recurso hídrico”**

**Modalidad: Proyecto de graduación.**

**Elaborado por:**  
**Bernardita Alfaro Boza.**  
**Giovanni Céspedes Vizcaíno.**

**Marzo, 2021.**

## **Resumen**

El presente proyecto utiliza el cálculo de huella hídrica verde, azul y gris en los sectores domiciliario, agrícola, pecuario e industrial de la microcuenca del río Porrosatí, Heredia, Costa Rica, como herramienta para cuantificar el consumo de agua dentro del territorio, así como la contaminación a los cuerpos de agua provocada por las aguas residuales provenientes de las diferentes actividades productivas, ambas variables para el año 2015.

Los resultados son evaluados con estudios previos de oferta y disponibilidad de agua, realizados por la Universidad Nacional entre el 2011 y el 2014, logrando así establecer criterios de sostenibilidad para el consumo y la vulnerabilidad del sistema hídrico.

El análisis cuantitativo identifica el sector agrícola como el más vulnerable, debido a dos factores: alta demanda del recurso en sus diferentes formas y los desequilibrios proyectados en los patrones de lluvia, lo que condiciona la disponibilidad de agua azul y verde. Al mismo tiempo, el sector se identifica como el que más presión ejerce sobre la calidad de los ríos de la unidad territorial, lo que potencia los riesgos de contaminar las fuentes de agua y pone en peligro las actividades de los demás sectores y la salud pública.

Por último, a partir del análisis de la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de cada una de las huellas, se establecen medidas de adaptación que buscan disminuir la vulnerabilidad del territorio y toman en cuenta los impactos del cambio climático respecto al recurso hídrico como eje transversal en la búsqueda de medidas eficaces, aplicadas a la realidad de la región.

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Gestión Ambiental.

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

---

**Grace Wong Reyes**

**Decana de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar.**

---

**Marielos Alfaro Murillo**

**Directora de Escuela de Ciencias Ambientales**

---

**Dr. Jorge Herrera Murillo**

**Tutor**

---

**Dra. Lindsay Ryan Valerio**

**Lectora**

---

**M.Sc. María Chaves Villalobos**

**Lectora**

---

**Bernardita Alfaro Boza**

**Estudiante**

---

**Giovanni Céspedes Vizcaíno**

**Estudiante**

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b> .....	9
<b>1.1 Planteamiento del problema</b> .....	9
<b>1.2 Justificación</b> .....	10
<b>2. Objetivos</b> .....	12
<b>2.1 Objetivo general</b> .....	12
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	12
<b>3. Marco teórico</b> .....	13
<b>3.1 La cuenca hidrográfica como unidad de manejo</b> .....	13
<b>3.1.1 Cogestión adaptativa de cuencas y Territorios Climáticamente Inteligentes</b> .....	14
<b>3.2 Huella hídrica</b> .....	15
<b>3.2.1 Huella hídrica verde</b> .....	15
<b>3.2.2 Huella hídrica azul</b> .....	16
<b>3.2.3 Huella hídrica gris</b> .....	17
<b>3.3 Método del cálculo de la huella hídrica</b> .....	18
<b>3.4 Cambio climático (CC) y variabilidad climática (VC)</b> .....	19
<b>3.4.1 Adaptación al cambio climático</b> .....	20
<b>4. Metodología</b> .....	22
<b>4.1 Enfoque de la investigación</b> .....	22
<b>4.2 Alcance</b> .....	22
<b>4.3 Sujeto de estudio</b> .....	22
<b>4.4 Instrumentos y técnicas</b> .....	23
<b>4.5 Descripción general de la microcuenca</b> .....	24
<b>4.6 Cálculo de huella verde, azul y gris por sectores</b> .....	27
<b>4.6.1 Cálculo de huella hídrica en sector domiciliar</b> .....	27
<b>4.6.1.1 Huella hídrica azul del sector domiciliar</b> .....	27
<b>4.6.1.2 Huella hídrica gris en el sector domiciliar</b> .....	30
<b>4.6.2 Cálculo de huella hídrica en el sector agrícola</b> .....	31
<b>4.6.2.1 Huella hídrica verde y azul en el sector agrícola</b> .....	32
<b>4.6.2.2 Huella hídrica gris en el sector agrícola</b> .....	36
<b>4.6.3 Cálculo de huella hídrica en el sector pecuario</b> .....	38

4.6.3.1 Huella hídrica verde en el sector pecuario.....	39
4.6.3.2 Huella hídrica azul en el sector pecuario.....	39
4.6.3.3 Huella hídrica gris en el sector pecuario .....	41
4.6.4 Cálculo de huella hídrica en el sector comercial.....	42
4.6.4.1 Huella hídrica azul en el sector comercial .....	43
4.6.4.2 Huella hídrica gris en el sector comercial.....	44
4.8 Evaluación de la sostenibilidad hídrica para la formulación de propuestas de adaptación al cambio climático.....	45
4.8.1 Determinación de la oferta natural.....	45
4.8.2 Evaluación de la sostenibilidad ambiental .....	46
4.8.3 Evaluación de la huella azul multisectorial .....	46
4.8.4 Evaluación de la huella verde multisectorial .....	47
4.8.5 Evaluación de la huella gris multisectorial.....	47
5. Resultados y discusión .....	49
5.1. Sector domiciliario .....	49
5.1.1. Huella azul del sector domiciliario .....	49
5.1.2 Huella gris del sector domiciliario.....	49
5.2. Sector agrícola .....	50
5.2.1. Huella azul y verde del sector agrícola.....	50
5.2.2. Huella gris en el sector agrícola.....	53
5.3. Sector pecuario .....	56
5.3.1 HH verde en el sector pecuario .....	56
5.3.2. HH azul en el sector pecuario.....	56
5.3.3. Huella Gris del sector pecuario. ....	57
5.4 Sector comercial.....	58
5.4.1. Huella azul en el sector comercial.....	59
5.4.2. Huella hídrica gris del sector comercial. ....	59
5.5 La huella hídrica a nivel de cuenca.....	60
5.6 Evaluación de la sostenibilidad ambiental .....	61
5.6.1 Evaluación de la huella azul multisectorial.....	61
5.6.2 Evaluación de la huella verde multisectorial .....	64
5.6.3 Evaluación de la huella gris multisectorial.....	65
5.6.4. Análisis socioeconómico .....	67
6. Medidas de adaptación al cambio climático para los sectores de la microcuenca del río Porrosatí.....	70

<b>6.1.</b>	<b>Medidas de adaptación para el sector domiciliario .....</b>	<b>70</b>
<b>6.2.</b>	<b>Medidas de adaptación para el sector agrícola.....</b>	<b>72</b>
<b>6.3.</b>	<b>Medidas de adaptación para el sector pecuario.....</b>	<b>75</b>
<b>6.4.</b>	<b>Medidas de adaptación para el sector comercial .....</b>	<b>76</b>
<b>6.5.</b>	<b>Medidas de adaptación generales para la microcuena .....</b>	<b>79</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>80</b>
<b>8.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>82</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>84</b>
<b>10.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>98</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Lógica metodológica del cálculo de huella hídrica. ....	24
<b>Figura 2.</b> Microcuenca del río Porrosatí. ....	25
<b>Figura 3.</b> Distritos que atraviesa la microcuenca. ....	26
<b>Figura 4.</b> HH verde por cultivo del sector agrícola. ....	52
<b>Figura 5.</b> HH Azul por cultivo del sector agrícola.....	52
<b>Figura 6.</b> HH gris por N en el sector agrícola.....	55
<b>Figura 7.</b> HH gris por P en el sector agrícola. ....	55

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Acueductos presentes en la microcuenca.....	28
<b>Cuadro 2.</b> Cantidad de agua consumida por tipo de animal.....	40
<b>Cuadro 3.</b> Cantidad de agua utilizada en aseo de establos.....	40
<b>Cuadro 4.</b> Resultados de la HH verde y azul para el sector agrícola.....	50
<b>Cuadro 5.</b> Resultados de huella gris por cultivos para N y P.....	54
<b>Cuadro 6.</b> Resultados de huella Azul por especie en la microcuenca.....	57
<b>Cuadro 7.</b> Huella gris por especie para el sector pecuario.....	58
<b>Cuadro 8.</b> Resultados de la huella azul en el sector comercial para los entes registrados en las patentes municipales y el sistema SIRROAR.....	59
<b>Cuadro 9.</b> Huella Hídrica Gris del sector comercial.....	60
<b>Cuadro 10.</b> Resumen de resultados de huella hídrica en la microcuenca del río Porrosatí.....	61
<b>Cuadro 11.</b> Resumen de datos de oferta y disponibilidad .....	62
<b>Cuadro 12.</b> Índice de estrés Hídrico azul para tres escenarios.....	62

## **1. Introducción**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La vulnerabilidad ante cambio climático y los aspectos sociales, políticos, económicos y ambientales deben ser medidos y delimitados en tiempo, magnitud y espacio en unidades territoriales lógicas, como la cuenca, subcuenca y microcuenca. Este fenómeno acentúa la necesidad de mejorar la gestión del recurso hídrico, generar información precisa y afrontar las deudas en materia de protección de fuentes, contaminación, aguas residuales y fragilidad (Programa Estado de la Nación, 2016). En el Valle Central de Costa Rica, el escenario de disminución de lluvia estacional para el año 2080 muestra variaciones en la magnitud de los cambios, con una disminución del 10% en la época seca y un 15% en la lluviosa (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y Ministerio de Ambiente y Energía, 2016).

La microcuenca del río Porrosatí, al poseer territorio en las partes altas del macizo de Barva, se encuentra entre las principales zonas de recarga hídrica para los acuíferos de Barva y Colima (Casante *et al.*, 2010; Ramírez, 2007), los cuales, abastecen de agua a cerca de 700 000 personas del Valle Central (Alfaro, J. Blanco, K. & Morera, C. 2015). A pesar de la importancia de esta zona, se han experimentado cambios bruscos en el uso del suelo en los últimos quince años, que han disminuido el porcentaje de uso agropecuario e incrementado el comercial y domiciliario. Esto provoca una demanda creciente del recurso hídrico, mediante sus diversas maneras de explotación, así como una disminución en los porcentajes de infiltración de los acuíferos. Este panorama, además de lo anteriormente descrito, muestra cómo la vulnerabilidad de los acuíferos de Barva y Colima se puede incrementar si no se toman medidas de adaptación al cambio climático que consideren el recurso hídrico como factor fundamental de desarrollo.

Como en el resto del país, la microcuenca presenta grandes deudas en materia de saneamiento; pues los entes rectores siguen sin registrar a detalle los volúmenes vertidos, esto dificulta conocer la magnitud de las afectaciones sobre el desarrollo del territorio; por

ejemplo, según AyA, MINAE y MINSA (2016), las enfermedades a tratar, producto de la propagación de vectores provocados por la contaminación de los cuerpos de agua durante el 2013, se cuantificaron en 334 177 episodios diarreicos y prevé gran cantidad de aumentos para los años posteriores. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que, como promedio mundial, por cada dólar invertido en saneamiento se ahorran hasta 5.50 dólares por la reducción en el tratamiento de enfermedades (Organización Mundial de la Salud, 2020).

Según lo anterior, existe una creciente presión sobre el agua disponible en la microcuenca, debido a su demanda y contaminación sin cuantificar, lo que genera un vacío de datos para la toma de decisiones orientadas a su resguardo, como lo son el consumo total de agua y los sectores que generan mayor demanda. A pesar de lo anterior, no se visualizan proyectos robustos para generar dicha cuantificación por parte de las instituciones administradoras dentro de la microcuenca, como lo son municipalidades, ASADAS, la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) o los entes rectores.

## **1.2 Justificación**

Para la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la microcuenca es el ámbito lógico para planificar el uso y manejo de los recursos naturales, en la búsqueda de la sostenibilidad de los sistemas de producción y los diferentes medios de vida; por lo tanto, la presente investigación utiliza esta unidad de territorio como la fundamental para garantizar la adopción de medidas exitosas que ayuden a afrontar la vulnerabilidad del recurso hídrico ante la explotación antrópica y fenómenos globales, como el cambio climático.

Los estudios realizados hasta el momento en el territorio por parte de la Universidad Nacional, muestran la calidad de los cuerpos superficiales, así como la disponibilidad y oferta del recurso mediante escenarios (Montero, E. 2016) (Sibaja, M. 2013) (Hernández, A; Ulate, M. 2016); sin embargo, no contemplan la demanda volumétrica por sectores ni

la afectación directa de los vertidos, lo que imposibilita conocer si los patrones de consumo actuales serán sostenibles a futuro, según los escenarios de disminución de precipitación del Instituto Meteorológico Nacional o si los cuerpos receptores son capaces de asimilar las cargas de contaminantes que se les vierte.

La metodología de huella hídrica en cuenca aporta un enfoque más inclusivo, que permite visualizar y tomar en cuenta el consumo de agua de los múltiples sectores productivos, por medio de datos teóricos y reales contabilizados en el sitio o categorías en estudio, provenientes de las diversas fuentes de información (estatales, privadas y académicas). Esta herramienta, presenta una solución integral que enlaza múltiples factores (naturales, económicos y geográficos) y sus resultados aportan datos valiosos para la toma de decisiones, tanto para entes encargados de brindar el servicio como gobiernos locales, que busquen el resguardo del recurso ante la amenaza de fenómenos como el cambio climático, y por consecuente en armonía de acciones, al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Dentro de los sectores que la *Estrategia Nacional de Cambio Climático* considera claves para la creación de medidas de mitigación y adaptación se encuentra el sector hídrico, debido a la necesidad de contar con información apropiada sobre su riesgo y vulnerabilidad.

Una vez calculada la huella hídrica, esta se evalúa según el estudio de María Sibaja Cascante, titulado “El crecimiento urbano y la producción hídrica en la cuenca del río Porrosatí, provincia de Heredia, Costa Rica: Valores totales del balance hídrico” del año 2013, y con el proyecto de graduación de Esteban Montero, titulado “Escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí, Heredia, Costa Rica”, del año 2016, ambas de la Facultad de Tierra y Mar de la Universidad Nacional, con lo que se formularán con bases sólidas las medidas de adaptación al cambio climático.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

- Proponer medidas de adaptación al cambio climático a partir del análisis de la sostenibilidad de huella hídrica, contribuyendo a la reducción de la vulnerabilidad ambiental que afecta la disponibilidad del recurso en la microcuenca del río Porrosatí.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar variables climáticas, geográficas, productivas y socioambientales de la microcuenca del río Porrosatí, como punto de partida para el reconocimiento de los patrones de uso y manejo del agua en el territorio a partir de fuentes primarias y secundarias.
- Desarrollar el cálculo de huella hídrica en la microcuenca del río Porrosatí con base en la guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca, del año 2013.
- Evaluar la sostenibilidad hídrica por medio de la cuantificación de la huella verde, azul y gris, para la formulación de medidas de adaptación al cambio climático en materia de disponibilidad del recurso hídrico, en la microcuenca del río Porrosatí.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 La cuenca hidrográfica como unidad de manejo**

La cuenca hidrográfica constituye un espacio de territorio en el cual el sistema hídrico conduce todas las aguas a un río principal, un lago o al mar. Este espacio se encuentra delimitado según el relieve propio de cada lugar y encierra en él todas las actividades antrópicas que ahí se desarrollan y que, por ende, tienen efectos favorables y no favorables para el bienestar humano, los recursos naturales y el entorno (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, s.f.). Esta puede ser dividida en subcuencas, formadas, a su vez, por microcuencas, donde es necesario un conocimiento básico como unidad mínima de gestión; para poder hacer una caracterización y diagnóstico del recurso hídrico, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a las personas usuarias del recurso y planificadoras, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros (Ordoñez, 2011).

Por su parte, la administración adecuada de estas estructuras territoriales, en términos de actividades desarrolladas por sector, garantiza el uso sostenible de los recursos naturales. De acuerdo con Pérez y Shinomi (s.f.), el manejo de la cuenca es el conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales que establecen una solución al problema causado por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como de las cuencas hidrográficas, para lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana y de la calidad de vida de la población.

Lo anterior, se logra a través de un manejo integral de los diferentes espacios a lo largo de la cuenca. Como expresan Moreno y Renner (2007), el manejo integral define las actividades que se deberían desarrollar en las partes alta, media y baja de esta; es decir, los usos del suelo permitidos según las capacidades de estos terrenos. Al respecto, Gómez, Robles y Sánchez (2012) indican que un cambio brusco en estos usos genera afectaciones sobre las dinámicas de recarga y disponibilidad hídrica, lo que afecta, a su vez, el ciclo

hidrológico y genera impactos negativos sobre la biodiversidad de la cuenca. Este manejo involucra aspectos socioproductivos y naturales, por lo que en relación con su aplicación, existen herramientas integrales que correlacionan de manera adecuada estos elementos a través de todos los niveles de gobernanza, entre las que destaca la cogestión adaptativa de cuencas y los Territorios Climáticamente Inteligentes.

### **3.1.1 Cogestión adaptativa de cuencas y Territorios Climáticamente Inteligentes.**

La Cogestión Adaptativa de cuencas se ha desarrollado como una estrategia de la gobernanza ambiental, que involucra aspectos sociales, políticos y naturales para cumplir con el fin último de manejar adecuadamente los recursos, fortalecer la protección hídrica, la estabilidad energética y la seguridad alimentaria (Valverde, 2016). Este debe ser aplicado a nivel supranacional o local, delimitado en cuencas y microcuencas, y su accionar depende del trabajo transversal de actores en torno a un tema o un recurso natural como el agua.

La importancia de que este modelo genere respuestas para la gobernanza, inclusive a nivel local, radica en que la población con conocimiento de la particularidad de la unidad territorial ejerza su punto de vista en la toma de decisiones. Para Castellón *et al.* 2010, este se define como “la participación conjunta, real y plena de los actores locales, con responsabilidad compartida, para lograr impactos significativos en el manejo y la gestión de los recursos naturales” (p. 1).

Para trabajar bajo este enfoque, se establecen los ejes de reacción a escala territorial; es decir, la delimitación del territorio para un enfoque real; la red de actores, como identificación indispensable para definir las capacidades y los esfuerzos de intervención integral para la resolución de problemas; y por último, el marco sectorial con la necesidad de que las instituciones del Estado ejerzan sus funciones de manera organizada e interdisciplinaria para la cogestión (Valverde, 2016).

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), desde el 2011 ha desarrollado también el concepto de territorios climáticamente inteligentes, para trabajar

el tema de cambio climático, seguridad alimentaria, pobreza y degradación ambiental. Este modelo se considera más amplio que el de cogestión adaptativa de cuencas pero, de igual forma, integra la escala territorial y nacional, con un enfoque sistémico y colaborativo. En él se impulsa de manera integrada el aprovechamiento de la tierra, reduciendo emisiones y logrando una adaptabilidad del entorno a los cambios en el clima. Además, es medular el desarrollo de tecnologías y políticas que inciten a las instituciones públicas y privadas a crear un ambiente favorable para la acción colectiva.

### **3.2 Huella hídrica**

El concepto de huella hídrica (en adelante, HH), desarrollado por Hoekstra (2002) y actualizado por Chapagain y Hoekstra (2010), se originó a partir de la búsqueda de un indicador real que determinara el impacto en los recursos globales de agua dulce, por las personas consumidoras en todo el mundo. Por tanto, la HH muestra el uso del recurso dulce en actividades de producción de un país, como un indicador de esta disposición. Sin embargo, no solo está determinada por el consumo de agua dulce, sino también por su contaminación, asociada al proceso de aprovechamiento o consumo del recurso.

Esta apropiación se puede entender como un uso consuntivo; es decir, extracción del líquido de la fuente natural y que no retorna a ella o no está disponible para las demás personas usuarias, sea porque se evaporó, se transfirió a otra cuenca, se utilizó para la creación de un producto o se ha contaminado (Arévalo *et al.* 2017). Algunos de los factores fundamentales de la HH son la clasificación de los colores del agua, conocidos como los cálculos de la huella hídrica verde, azul y gris como sus componentes.

#### **3.2.1 Huella hídrica verde**

La huella verde se refiere al volumen de agua precipitada y almacenada en el suelo, evaporada, transpirada e incorporada a las plantas para la producción de bienes y alimentos. Este almacenamiento en el suelo se da mediante humedad (Agroder y World

Wildlife Fund, 2012). Puede estar contenida en la tierra, suspendida en la capa superior del suelo o se puede encontrar en la zona de aireación cercana a la superficie (Álvarez *et al.* 2016). Una vez que esta se convierte en escorrentía, deja de ser contabilizada en la huella verde.

La precipitación, en términos agrícolas, es efectiva en cuanto satisface las necesidades de agua para preparar los terrenos, la de consumo necesario por los cultivos y para la percolación (Cleves *et al.* 2016). A través de la superficie del suelo, el agua se pierde por medio de la evapotranspiración, entendida como la combinación de los procesos de evaporación del agua por medio del suelo y la transpiración por medio del cultivo, los cuales ocurren de manera simultánea. Su unidad de medida es el milímetro (mm) por unidad de tiempo, que puede ser días, semanas o meses y expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua.

En la evaporación, el agua presente en el suelo se convierte en vapor, y este, por medio del contacto con el sol, se retira de la superficie. Este no es solo un proceso del suelo, sino también de la vegetación que se encuentre húmeda. Asimismo, la transpiración es el proceso que se da cuando la humedad contenida en los tejidos vegetales se convierte en vapor de agua, y este sube a la atmósfera desde las hojas de la planta, que absorbe prácticamente toda el agua mediante sus raíces y, a su vez, es perdida por transpiración (Agroder *et al.* 2012).

### **3.2.2 Huella hídrica azul**

El consumo y la extracción del agua, ya sea superficial o subterránea en una cuenca o microcuenca, y cuyo uso se evapora, se ingiere o se incorpora a un producto, se determinan por medio de la huella azul. Por tanto, esta es el agua que se encuentra en los cuerpos superficiales como ríos, lagos, esteros y el agua subterránea, que es aprovechada por las personas usuarias para diversos fines (Agroder y World Wildlife Fund, 2012).

La disponibilidad de agua azul para consumo humano es dependiente del ciclo hidrológico. Dentro de los aspectos relevantes se tiene que esta, como recurso, se condiciona al tiempo y el espacio en que persista, así como a la cantidad de precipitación que caiga en el territorio y, a su vez, se mantenga en el lugar como un recurso de calidad en el tiempo. Otra particularidad importante es que se encuentra continuamente cambiando, lo cual se refleja en los procesos relacionados con su ciclo, como los son la evaporación, transpiración, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, flujo subsuperficial, congelación y fusión (FAO, 2013), que determinan el momento y forma en que puede ser aprovechado el recurso desde el punto de vista antropogénico.

Este aprovechamiento es permitido una vez la tierra infiltra la precipitación y la almacena en acuíferos, depósitos subterráneos de roca y arena que contiene agua, la cual es la base principal del almacenamiento del recurso para la disponibilidad a futuro (Ordoñez, 2011), para luego ser extraída mediante pozos o canalizada en las nacientes y manantiales superficiales.

Ahora bien, el agua disponible para consumo se ve limitada por la generación de residuos y vertidos producto de las actividades humanas, las cuales generan contaminación de fuentes hídricas dulces. El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (citado en Connor *et al.*, 2015) señala que los volúmenes de agua disponibles sufren presiones como la contaminación, que determinan su deterioro y calidad, y se espera que la acumulación de materia orgánica en los cuerpos de agua y otras fuentes aumente considerablemente en casi todas las partes del mundo hasta el 2030. A raíz de lo anterior, se desprende el último volumen de control, denominado HH gris.

### **3.2.3 Huella hídrica gris**

Este se entiende como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes generados por las actividades diarias de las personas, hasta alcanzar concentraciones que se consideran ambientalmente tolerables; es decir, que estén por debajo de los límites máximos permisibles o que no los excedan (Garrido y Willaarts, 2011). Estos límites

varían según la regulación de cada país, donde la evaluación de la sostenibilidad bajo el cálculo de huella hídrica sea aplicada.

Sin embargo, los parámetros en los que se basa la calidad de las aguas vertidas en los cuerpos receptores no varían, estos son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), para los sectores agrícola y pecuario; y el DBO y sólidos suspendidos totales (SST) para el domiciliario y comercial. La HH gris envuelve el concepto del uso del agua y su impacto directo a la alteración en su calidad, como resultante de los procesos de aprovechamiento que se le den al recurso.

### **3.3 Método del cálculo de la huella hídrica**

Los autores Aldaya, Chapagain, Hoekstra, y Mekonnen (2011) definen, mediante un manual, la metodología estándar para el cálculo de HH. A partir de la aplicación de este en la cuenca del río Porce, en Colombia, se ha desprendido la *Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca* (2013), del Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), utilizada como guía para el desarrollo de este proyecto.

Esta metodología expone, en términos generales, las bases conceptuales de la temática y, posteriormente, explica la secuencia lógica que se debe seguir, la cual se divide en tres partes específicas. La primera parte en definirse es el alcance, tanto geográfico como temporal, para lo cual se brinda una serie de variables a tomar en cuenta, a modo de garantizar el éxito final del estudio. La segunda parte es la cuantificación de cada una de las huellas según el tipo de sector; en este apartado, se brinda la información a recolectar, las herramientas técnicas y tecnológicas que pueden facilitar su cálculo, así como las ecuaciones y secuencias matemáticas utilizadas en cada caso. La tercera parte consiste en detallar la forma de evaluar la sostenibilidad de los datos obtenidos bajo un punto de vista ambiental, social y económico, con el fin de que se tome en cuenta el cambio climático como eje transversal para alcanzar la sostenibilidad del recurso a futuro (CTA, 2013).

### **3.4 Cambio climático (CC) y variabilidad climática (VC)**

Se entiende como cambio climático una variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (IPCC, 2018). Este fenómeno ocurre debido a una alteración en el intercambio de materia y energía entre los cinco componentes que definen el clima terrestre: la atmósfera, los océanos, las superficies polares heladas, los suelos continentales y la vegetación (Castro, 2008; Antón y Salgado, s.f.). Además, se debe a fenómenos naturales internos como las erupciones volcánicas, los cambios en la órbita de traslación de la Tierra y las variaciones en la composición de la atmósfera (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2005).

Dentro del concepto anterior, la variabilidad climática (en adelante, VC) registra los cambios en los rangos de los diferentes elementos climáticos año a año, por lo que resulta de suma importancia para establecer escenarios de disponibilidad hídrica y medidas de adaptación coherentes al corto plazo (Centro Internacional para la Investigación del fenómeno del niño, 2017; Baethgen *et al.* 2004) que disminuyan la vulnerabilidad de los territorios ante estos fenómenos.

Íntimamente relacionado con los dos fenómenos descritos anteriormente, se encuentra el ciclo hidrológico, es por eso que los efectos sobre el recurso hídrico son numerosos. Los estudios realizados proyectan que, en muchas regiones, principalmente de latitudes medias, las prácticas actuales de gestión del agua no serán adecuadas o suficientes para enfrentar los retos asociados, entre los que destacan disminución en las precipitaciones y el escurrimiento, lluvias localizadas de mayor intensidad e inundaciones (Martínez y Patiño, 2012).

El Instituto Meteorológico Nacional (2017) menciona que la vulnerabilidad climática resulta de la incapacidad que tiene un sistema para solucionar problemas o dificultades climáticas como consecuencia de los impactos del CC y VC intensificados por actividades humanas, como la excesiva emisión de gases de efecto invernadero.

Además, Landa (2008) la define como una condición previa que se presenta y permanece durante un evento determinado, desencadenado por la falta de prevención; por tanto, se expone el entorno a cambios bruscos, tratados según la capacidad territorial y social de resiliencia, como habilidad para enfrentar la situación de riesgo, estrés y tensión por medio de estrategias y capacidades (FAO, 2007). Es decir, un territorio se considera poco vulnerable cuando su capacidad de adaptación ante el cambio climático y el estrés hídrico está sustentado en medidas que involucran datos reales y contextualizados, permitiendo así que todos los actores responsables tomen acciones coherentes para amortiguar los impactos antes de que estos sean percibidos.

### **3.4.1 Adaptación al cambio climático**

Esta se define como las iniciativas y medidas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos contra los efectos esperados del cambio climático, manteniendo su esencia e integridad y en casos críticos, cambiando sus atributos fundamentales (IPCC, 2018). La adaptación al cambio climático ha avanzado a modo de generar estrategias que disminuyen la vulnerabilidad de los países ante el fenómeno. El tema fue llevado a discusión internacional por primera vez en 1992, con la realización de la Cumbre de Río, y el último gran esfuerzo realizado lo constituye el Acuerdo de París en 2015 y su seguimiento en la COP24 2018.

Para alcanzar este objetivo, existen estrategias como las de mitigación, entre las que destaca la reducción en la emisión de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, teniendo en cuenta que ya hay gran presencia de estos gases en la atmósfera y que Costa Rica aporta solo una fracción muy baja, actualmente el establecimiento de medidas de adaptación se considera una medida más eficaz (FAO, 2007); con ella se pretende reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia de las poblaciones cuyos medios de vida están condicionados por recursos que dependen del clima (FAO, 2007). Por tanto, como resultado, el presente proyecto se enfoca en la formulación de este tipo de medidas.

A modo de contextualización, el país cuenta con la *Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2018-2030*, la cual busca una fuerte participación de los diferentes actores y sectores para contribuir a mejorar la capacidad de respuesta ante el fenómeno, con una transición resiliente de la sociedad costarricense. Entre sus principios están la territorialidad, la sostenibilidad económica, la intersectorialidad y las responsabilidades compartidas público-privadas (CNE *et al.*, 2018).

## **4. Metodología**

### **4.1 Enfoque de la investigación**

El enfoque utilizado para esta investigación es cuantitativo, llevado a cabo a través de la obtención de datos primarios y secundarios y el análisis de los mismos, lo que permite calcular el volumen de demanda hídrica de la microcuenca y establecer medidas de adaptación al cambio climático. El periodo de evaluación es el 2015, por ser el año más cercano a la culminación de las investigaciones que son base del proyecto; siendo clave la generación de medidas de adaptación al cambio climático, representativas a los resultados obtenidos en las tesis mencionadas. Los datos solicitados a las instituciones y entes rectores corresponden también al año base del estudio o los datos más cercanos disponibles a este.

### **4.2 Alcance**

El alcance del estudio es correlacional, en el cual se vinculan dos fenómenos entre sí, la demanda del recurso hídrico, por medio del cálculo de huella hídrica, y la disponibilidad, determinada por los impactos del cambio climático para brindar medidas de adaptación, que se propondrán en la tercera y última fase, así como la elaboración de las medidas según los resultados en materia de disponibilidad de agua.

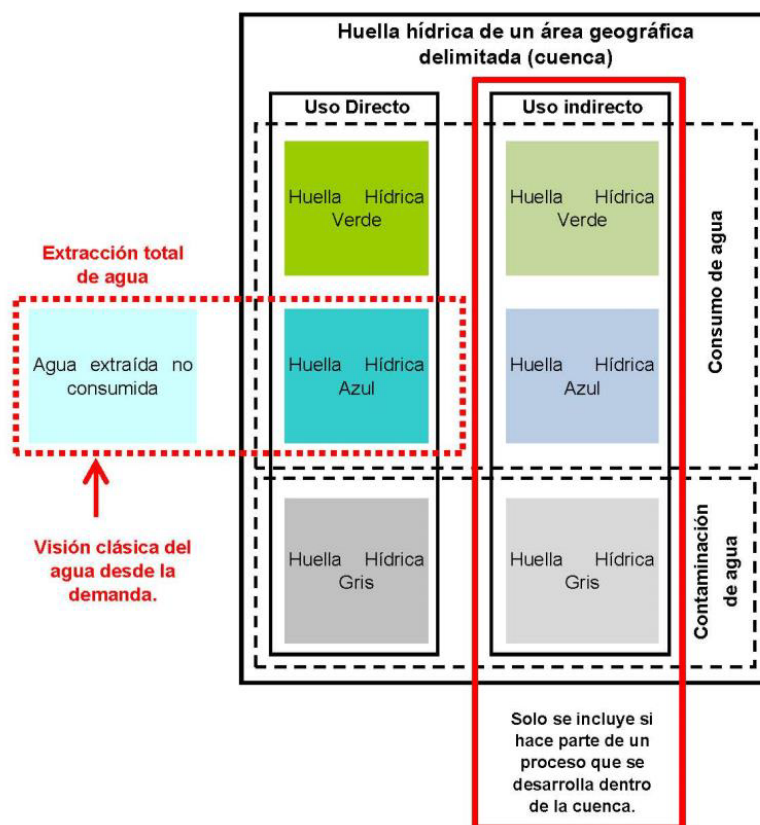
### **4.3 Sujeto de estudio**

La investigación se realizó en la microcuenca del río Porrosatí, conformada por parte de los cantones de Santa Bárbara y Barva de Heredia, Costa Rica. Pertenece a la subcuenca del río Virilla, la cual, a su vez, se integra en la cuenca del Tárcoles. Este territorio ha sido objeto de estudio en los temas de escenarios de disponibilidad del recurso hídrico, oferta y calidad de agua. En él se desarrollan actividades productivas de diversa índole, debido

a lo anterior, se toman los sectores agrícola, pecuario, domiciliario y comercial en la totalidad de la microcuenca para el cálculo de huella hídrica y el establecimiento de las medidas de adaptación al cambio climático respectivas.

#### **4.4 Instrumentos y técnicas**

Los instrumentos y técnicas que permitieron la realización de esta investigación son variados. Como parte fundamental para la estimación de HH, se toma como base la guía propuesta por Arévalo et al. (2013), la cual detalla los pasos a seguir, desde la definición de la información necesaria, pasando por las técnicas de cuantificación, hasta la evaluación de la sostenibilidad ambiental de los datos, con el fin de generar las propuestas. Para el presente proyecto, se hace necesaria la modificación de algunos aspectos planteados por la metodología debido a la forma y disponibilidad de los datos en las diversas instituciones del Estado y la academia, estas se especifican según la parte de la huella a desarrollar, en la sección de cálculos de la metodología. En la figura 1 se esquematizan las características más importantes del cálculo de huella hídrica en una cuenca.



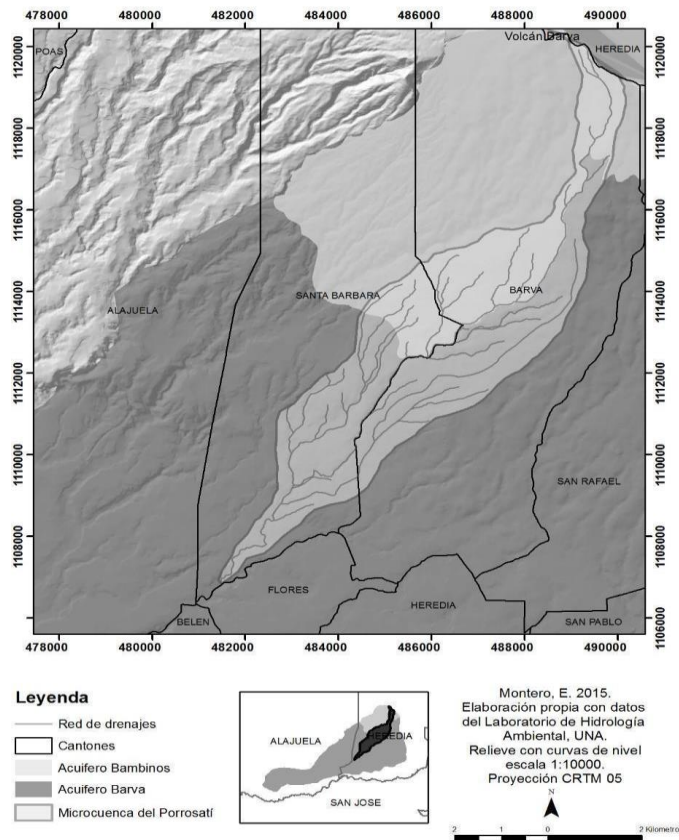
**Figura 1.** Lógica metodológica del cálculo de huella hídrica.

Tomado de Arévalo *et al.* (2013).

Además, se utilizó el *software* CROPWAT 8.0, desarrollado por la FAO, para el cálculo de las necesidades de riego y consumo de agua de los cultivos, a partir de características como la zona geográfica, el clima y los tipos de suelo. El programa cuenta también con diversidad de información en su base de datos, sobre aspectos como la evapotranspiración, lo cual permitió realizar gran variedad de cálculos como las necesidades de riego de los cultivos y las huellas azul y verde de los sectores agrícola y pecuario. Otra de las metodologías científicas utilizadas fue la formulada por Charles Thornthwaite, que toma en cuenta algunas variables climáticas para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el territorio (Arévalo, D et al. 2013).

#### 4.5 Descripción general de la microcuenca

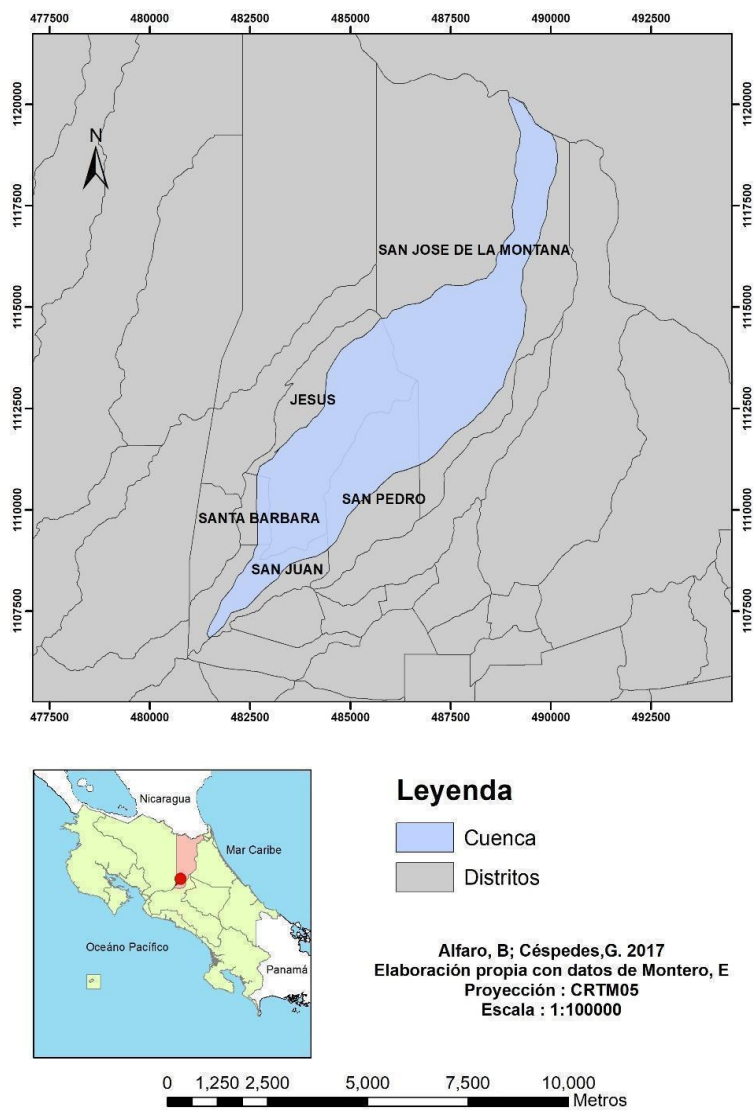
La microcuenca del río Porrosatí abarca territorio de los cantones de Santa Bárbara y Barva. La georreferenciación de la unidad lógica se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Microcuenca del río Porrosatí.

Tomado de Montero,E (2016).

Según lo observado, la microcuenca no pasa por la totalidad de los cantones mencionados, por lo que se realizó un mapa para determinar los distritos que abarca. En la figura 3, se observa que el territorio de estudio atraviesa el sector noreste del distrito de San José de la Montaña y abarca parte del territorio de los distritos de Jesús, San Pedro y Santa Bárbara. A partir de esta información, fueron recopilados los datos para los cálculos de cada sector; con esto, se disminuye el porcentaje de sesgo y error en los cálculos de cada huella. Por tanto, se muestra el mapa de la microcuenca y las zonas que abarca dentro de cada distrito:



**Figura 3.** Distritos que atraviesa la microcuenca.

Elaboración propia.

Un aspecto de suma importancia para la caracterización de la microcuenca es el uso del suelo que se da en el territorio (ver anexo 1). El área de cultivo es el uso de suelo predominante, el área urbana se atribuye a las zonas medias y bajas de la microcuenca, pues las zonas boscosas tienen mayor presencia en la parte alta, donde se encuentra el Parque Nacional Braulio Carrillo, que es parte del distrito de San José de la Montaña (Montero, E. 2016).

## **4.6 Cálculo de huella verde, azul y gris por sectores**

La metodología empleada guía para el cálculo de HH por sectores fue la Guía metodológica de aplicación de huella hídrica en cuenca (Arévalo, D. 2013) realizada por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. La guía se compone de dos secciones principales, una primera parte que detalla el paso a paso del cálculo de cada una de las huellas y su evaluación final, y una segunda que incluye un estudio detallado del desarrollo de esta en la Cuenca del Río Porce, Colombia.

### **4.6.1 Cálculo de huella hídrica en sector domiciliario**

Para el cálculo de la HH en el sector domiciliario y la obtención de la cantidad total de población, se utilizó la información generada a partir del análisis de ocupación de polígonos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2011 (en adelante, INEC). Se establece como la mejor opción para determinar el total de personas que habitan dentro de los límites de la microcuenca, ya que la unidad lógica divide distritos, con esto, se logró disminuir el sesgo de los volúmenes de agua, atribuyendo el consumo a una cantidad de población mejor delimitada.

Se desglosa en cada huella el detalle de la información requerida.

#### **4.6.1.1 Huella hídrica azul del sector domiciliario**

Conociendo la cantidad de población para el territorio abarcado por cada distrito dentro de la microcuenca (ver anexo 2), se consultó a los entes administradores el consumo de agua promedio per cápita, pudiéndose primeramente calcular, por zona, la demanda hídrica y luego establecer un total utilizado en la ecuación de huella azul. Para este caso, es importante mencionar que el porcentaje de agua que no retorna a la cuenca (que se evapora o consume, etc.), entendida como agua azul, se asume como el 10% del agua total

facturada como lo indica la guía metodología utilizada y el estudio realizado en la misma para la cuenca del Río Porce.

Dentro de lo concluido por Montero, E (2016), se tiene que en la microcuenca existen un total de tres ASADAS, tres acueductos municipales y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), como entes encargados de brindar el servicio de agua potable a la población. Sin embargo, ante la ausencia de registros y la poca disposición a brindar información, en su investigación (línea base de la presente), Montero no trabajó con la totalidad de los entes encargados de la administración del recurso. Con esta referencia, se decidió tomar en cuenta, para esta investigación, a los entes que colaboraron en el proyecto ya mencionado. Se explican en el cuadro 1 los criterios de elegibilidad para los acueductos y los datos de consumo utilizados en caso de que haya sido tomado en cuenta.

### **Cuadro 1.**

*Acueductos presentes en la microcuenca.*

<b>Acueducto</b>	<b>Utilizado (sí o no)</b>	<b>Dato de consumo utilizado</b>	<b>Justificación</b>
<b>Municipal de Santa Bárbara</b>	Sí	<b>0,2<sup>(2)</sup></b>	No cuenta con micromedición. Se utiliza dato de consumo promedio para el país, según AyA.
<b>Rural de San José de la Montaña</b>	Sí	<b>0,18<sup>(1)</sup></b>	Dato brindado por el acueducto.
<b>Puente Salas</b>	No	NA	No se obtiene respuesta.

<b>Acueducto</b>	<b>Utilizado (sí o no)</b>	<b>Dato de consumo utilizado</b>	<b>Justificación</b>
<b>San Pedro de Barva</b>	Sí	<b>0,15<sup>(1)</sup></b>	Dato brindado por el acueducto
<b>ESPH</b>	No	NA	No se obtiene respuesta

<sup>1</sup> Elaboración propia con datos de los entes administradores (2017), <sup>2</sup> Tomado de Hernández y Picón (2013).

Factores como las acometidas ilegales y las fugas fueron consultados a los entes administradores del recurso; sin embargo, ninguno de estos registra dichos datos. Por tanto, se asume un valor teórico del 10% sobre el valor total de consumo calculado previamente, según recomienda la metodología utilizada.

Los volúmenes de agua brindados a la población de cada distrito para el conteo de la huella azul residencial fueron calculados mediante la cantidad de población y los promedios de consumo per cápita (anexo 3). Los datos locales de consumo se otorgan únicamente para San Pedro y San José de la Montaña (distritos de Barva), ya que a los distritos de Santa Bárbara se le aplicó el promedio de consumo según el AyA, esto sumado a una mayor concentración de población magnifica el resultado para este cantón. Los consumos totales se aplican en la ecuación detallada a continuación (ecuación 1):

$$HH_{Azul} = Q_{EIA} * 10\% + Q_{CC} * 10\% \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

HH Azul = Huella hídrica azul, expresada en unidades de volumen/tiempo ( $\frac{m^3}{año}$ )

QEIA = Caudal de entrada de acometidas ilegales (L/s)

QCC = Caudal consumido por la población (L/s)

#### 4.6.1.2 Huella hídrica gris en el sector domiciliario

El último volumen de control se relaciona con los hábitos de consumo de la población, además de los sistemas de tratamientos de vertidos de aguas residuales existentes, que influyen directamente sobre la calidad de estos y en los que fue contabilizado el 90% del volumen restante consumido, según la metodología utilizada. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación 2:

$$\frac{Q_{VPTAP} C_{VPTAP} + Q_{VAI} C_{VAI} + Q_{VST} C_{VST} + Q_{VPTAR} C_{VPTAR} - Q_{CAPCUE} C_{CAPCUE}}{C_{MAX} - C_{NAT}} \quad \text{Ec.(2)}$$

**Donde:**

HH Gris = Huella hídrica gris, expresada en unidades de volumen/tiempo (L/s)

QCAP CUE = Caudal captado de la cuenca (L/s)

QVPTAP = Caudal vertido por la PTAP (L/s)

QVAI = Caudal vertido por las acometidas ilegales (L/s)

C = Concentración de DBO5, SST y NTK en cada una de los caudales utilizados (mg/L)

QVPTAR = Caudal vertido por los usuarios tratado por una PTAR (L/s)

QVST = Caudal vertido por los usuarios sin tratar (L/s)

Se identifica en las bases de datos del Ministerio de Salud que en la microcuenca no existen, para el año de estudio, sistemas de tratamiento para aguas residuales domiciliarios, por lo que en su totalidad se asume que estas aguas son vertidas de manera cruda al río Porrosatí y sus afluentes, con lo que la ecuación anterior se simplifica y se dejan de lado las variables relacionadas con estos sistemas.

$$\frac{Q_{VAI} C_{VAI} + Q_{VST} C_{VST} - Q_{CAPCUE} C_{CAPCUE}}{C_{MAX} - C_{NAT}} \quad \text{Ec.(3)}$$

La primera parte de la ecuación toma en cuenta el caudal de vertido y la concentración de contaminantes atribuida a las acometidas ilegales, el cual fue calculado como un 90% del valor utilizado en el agua azul de estas, debido a que así lo especifica la metodología utilizada. Seguidamente, se necesitó la carga de contaminantes de los efluentes, obtenidos de los máximos permisibles del Reglamento 33601, como peor escenario, a los cuales fue necesario restar el caudal captado de la cuenca y relacionarlo con la carga de contaminantes de estas aguas al ser aprovechadas; es decir, antes de ser contaminadas. Es importante resaltar que los contaminantes evaluados para este sector fueron la demanda biológica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales, eligiéndose el resultado con mayor volumen como la HH hídrica gris del sector según la guía metodológica.

Para este punto, se utilizó el proyecto de graduación denominado *Determinación del impacto en la calidad del agua en la parte alta de la microcuenca río Porrosatí, por vertido de aguas residuales, para la realización de planes y acciones de manejo de recursos hídricos* (Hernández y Ulate, 2016), en el cual se estudia y clasifica la calidad del río Porrosatí en diferentes partes de la microcuenca. En este caso, se tomó como referencia el punto ubicado en la parte alta de la unidad lógica, siendo la referencia del estado puro de las aguas captadas. Este dato también fue usado como la concentración natural del río, al no existir focos de población en la parte alta que pudiesen alterar la calidad natural del mismo (Hernández y Ulate, 2016).

#### **4.6.2 Cálculo de huella hídrica en el sector agrícola**

Este cálculo abarcó los cultivos transitorios, anuales y perennes contenidos en la información del *Censo Nacional Agropecuario (2014)* (ver anexo 10), para obtener el cálculo de la huella azul y verde. Mediante el modelado de los cultivos en el *software CROPWAT 8.0*, se obtuvo el requerimiento de agua verde y azul en m<sup>3</sup>/ha. Dentro de las determinaciones importantes en estos cálculos se encontró la comprensión de fenómenos físicos de la especie vegetal a estudiar, como el nacimiento, crecimiento, desarrollo,

producción y muerte, así como factores del entorno, entre ellos el clima, precipitación, temperatura, radiación solar y la velocidad del viento.

#### **4.6.2.1 Huella hídrica verde y azul en el sector agrícola.**

Los datos de precipitación utilizados (anexo 4), se obtuvieron del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para el año 2015, los mismos son registrados en la estación de Santa Bárbara N° 84 197. Toda la información utilizada proveniente de esta institución, fue solicitada directamente en el lugar, mediante oficios emitidos por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional; se realiza de esta forma ya que no se encuentran en la página de internet el nivel de detalle requerido para los cálculos. Estos datos son los mismos para cada modelaje por cultivo. Para calcular la precipitación efectiva, se optó por el método USDA S.C, debido a que el programa lo refería como la mejor opción. Este consiste en una ecuación empírica que toma en cuenta variables como la escorrentía, la velocidad y tiempo de infiltración, entre otras de interés, lo que lo convierte en uno de los más precisos.

Como precipitación efectiva, se entiende la fracción de la precipitación total que es usada exclusivamente por los cultivos; es decir, que al ser infiltrada en el suelo permanece disponible para sus raíces y no se pierde por escorrentía o infiltración profunda. El mayor volumen de precipitación se presentó en la época lluviosa, en los meses de mayo a noviembre, por lo que es de esperar un menor requerimiento de riego para dichos meses.

Para el cálculo de la huella verde, el *software* CROPWAT 8.0 requiere, además de la precipitación, una serie de datos meteorológicos para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos (en el anexo 5 se muestran los datos recolectados). Para obtener las variables de temperatura, velocidad del viento y humedad, se recurrió al IMN, solicitando la información referente a la estación de Santa Bárbara de Heredia, tal como se ha mencionado.

Los datos de insolación que no se registraron para el 2015 en este lugar, por lo que se tomaron de la estación de Santa Lucía, que administra el Instituto y además es la más cercana que mide los datos requeridos; esta acotación es recomendada por profesionales expertos del IMN. Por esta misma razón, fue utilizada para obtener la radiación la estación del Aeropuerto Juan Santamaría. La evapotranspiración el programa la calcula a partir del registro de los datos anteriores; por este motivo, no se usa la de ninguna de las estaciones solicitadas.

Ahora bien, para determinar los cultivos sembrados en la microcuenca y su extensión, y para obtener los datos locales más completos, se solicitó directamente, la información al INEC, del Censo Nacional Agropecuario del año 2014. En este caso, se mantuvieron dos reuniones con el personal estadístico del lugar, y por resguardo de confidencialidad de datos, se firman cartas de compromiso, y se obtiene lo solicitado de manera local, pero agrupado por distritos (de la unidad lógica en estudio), al ser esta la forma más pequeña en la que se puede mostrar la información en el proyecto. Cabe mencionar, que de esta forma no se encuentran los datos, en los archivos publicados del Censo Nacional Agropecuario del año 2014. Para los efectos de este proyecto, solo se registran cultivos en los siguientes distritos:

- Del cantón de Barva: San José de la Montaña.
- Del cantón de Santa Bárbara: Jesús, San Juan y Santa Bárbara.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que cuando son menos de tres fincas reportadas en el Censo Agropecuario, en este caso con siembra, la institución no brinda la información solicitada por el resguardo de la confidencialidad; por tanto, no quiere decir que en los otros distritos que forman el cantón mencionado, no se cultive. Los resultados filtrados para cada distrito son mostrados en los anexos 6, 7, 8 y 9.

Respecto a la información de los cultivos de flores, plantas vivas y follajes, el Censo Nacional Agropecuario los agrupa en la categoría de cultivos ornamentales. Para los efectos de este trabajo, en el modelado del programa CROPWAT 8.0, se utilizan las variables del cultivo de rosas, perteneciente a este grupo; además, es la única especie

disponible en la base de datos. En el anexo 10, se muestra la totalidad de los cultivos y la extensión de siembra en hectáreas para cada uno.

Para los cálculos de huella hídrica no se tomaron en cuenta los cultivos con menos de una hectárea sembrada, pues debido a su reducida extensión, no son representativos en la totalidad del resultado, por tanto, se excluyen de los cálculos la vainica, la papa, guayaba, limón y la yuca.

El único cultivo forestal que registra el censo es el ciprés; sin embargo, el mismo es utilizado como barrera rompevientos, no se riega y su aprovechamiento como madera se da a los 50 años de su etapa inicial (Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), comunicación personal 2018), por lo que no fue incluido, al usarse como periodo de estudio un año, no siendo representativo para los cálculos, pues no hay aprovechamiento de la especie a corto plazo.

Uno de los requerimientos de mayor importancia es el rendimiento del cultivo para realizar los cálculos de evapotranspiración. El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), por medio de su extensión llamada Agencia de Servicios Agropecuarios (en adelante, ASA) de la región Central Occidental (Santa Bárbara y Barva pertenecen a esta región), tiene en su base de datos los rangos de rendimiento de los cultivos de la región para el año 2012. Los datos del anexo 11 son representativos para los dos cantones. Este aspecto permite conocer la producción real de la especie, por la extensión en la que se siembra y varía según la región, el clima y las características del suelo.

Para las demás variables de interés (kc, etapas del cultivo, profundidad radicular, agotamiento crítico y altura del cultivo), el software CROPWAT 8.0 contiene la información de referencia de cada cultivo, no obstante, para el café y aguacate, no se registran los datos requeridos para su modelación. Por tanto, esta información se recopiló de bibliografía externa especializada y se registra en el anexo 12.

Para los dos cultivos detallados anteriormente, las fases de desarrollo vegetativo son complejas de establecer en un periodo, ya que son perennes y la formación de nudos, hojas

y la generación de nuevas raíces ocurre durante toda la vida de la planta. Debido a esto, para determinar su etapa inicial, media y final se toma en cuenta el periodo desde la floración, pasando por el desarrollo del fruto hasta la cosecha de este, de manera anual.

Para cada cultivo, se debe identificar el tipo de riego en caso de ser utilizado. Esta información también se extrajo del Censo Nacional Agropecuario (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, comunicación personal, 2017) y se registra en el anexo 13. Ahora bien, no se contiene la totalidad de los datos de riego, por dos motivos principales; el primero es la confidencialidad de los datos, siendo este un compromiso del INEC con cada persona productora a la hora de hacer el censo y la encuesta; y el segundo, es que existen distritos que poseen tan pocas fincas que el dato no se encuentra disponible por no ser determinante.

A pesar de que en el anexo 13 se especifica que la mayoría de fincas no utilizó un sistema de riego, el *software* parte del hecho de que todos los cultivos disponen de los requerimientos hídricos mínimos para lograr un óptimo desarrollo, por lo que los datos dados por el programa, como parte del modelo de riego recomendado, son los utilizados para el cálculo de la huella azul.

El modelado de los diferentes cultivos demostró la demanda hídrica de estos en dos unidades distintas,  $m^3/ha$  y en  $m^3/t$  (tomando en cuenta los rendimientos). Si bien el *software* brindó información bastante detallada acerca de factores clave como uso potencial del agua del cultivo, los requerimientos de riego, la precipitación efectiva y la deficiencia de humedad en cosecha, estos no son directamente aplicables en la ecuación, por lo que fue necesario realizar una etapa media de tratamiento de datos con la herramienta Excel, para depurarlos y llegar a los factores deseados (detallado en memoria de cálculo adjunta). Los datos obtenidos posteriores a esto se aplican por cultivo en las ecuaciones 4 y 5.

$$HH_{\text{cultivo, verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{Y} \quad \text{Ec. (4)}$$

- $HH_{\text{cultivo, verde}}$ ,  $m^3/t$ : huella hídrica verde
- $CWU_{\text{verde}}$ ,  $m^3/ha$ : agua verde utilizada (necesaria) por el cultivo

- Y, t/ha: rendimiento de los cultivos

$$HH_{\text{cultivo, azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{Y} \quad \text{Ec.(5)}$$

- $HH_{\text{cultivo, azul}}$ , m<sup>3</sup>/t: huella hídrica azul

-  $CWU_{\text{azul}}$ , m<sup>3</sup>/ha: agua azul utilizada (necesaria) por el cultivo

- Y, t/ha: rendimiento de los cultivos

#### 4.6.2.2 Huella hídrica gris en el sector agrícola

Para el cálculo de huella gris, en la parte agrícola es necesario conocer la cantidad de fertilizantes y herbicidas que se aplican al cultivo, y la frecuencia de uso que el MAG recomienda a las personas agricultoras por medio de sus manuales de siembra, así de como otras guías en bibliografía nacional y regional. Como método de sumatoria, se estandarizaron las cantidades de fertilizantes y herbicidas aplicados a su equivalente estequiométrico de nitrógeno y fósforo elemental, esto según su ingrediente activo y la cantidad de veces que el producto es empleado durante la cosecha (anexos 14 y 15). Los totales se muestran en el anexo 16.

Muchos de los cultivos estudiados no utilizan herbicidas, ya que el principal control de maleza se realiza de manera manual, según lo recomendado en la literatura que se consultó para cada caso (ver anexo 15). Para la obtención de los datos finales de utilización de nitrógeno mediante la aplicación de fertilizantes y herbicidas en los cultivos, se toman en cuenta la cantidad de aplicaciones por cosecha según el paquete recomendado en las guías, así como si se cultiva una o más veces al año.

Los cálculos requeridos, según la metodología utilizada, para los resultados de huella gris requieren la concentración máxima permisible de N y P en los vertidos en Costa Rica. En ausencia de estudios, datos y reglamentación que rijan estas concentraciones a nivel nacional, se toman como base de los cálculos, datos de España, los más recientes

encontrados y que responden a la estequiometría ecológica básica mediante la conocida relación de Redfield, la cual indica que tanto el fitoplancton como la mayoría de especies acuáticas experimentan un crecimiento óptimo en una relación N/P de 16:1, y que cambios en esta relación pueden generar deficiencia o excedente de alguno de los dos nutrientes y alterar el desarrollo natural de las especies (Moraña *et al.*, 2010).

Una vez obtenidos los máximos permisibles, a estos se les debe restar la concentración natural (Cnat) del río. Según la metodología de estudio, este valor se puede asumir mediante tres criterios:

- a. En ríos poco alterados, la Cnat se puede asumir como la concentración actual del contaminante a evaluar.
- b. Para ríos alterados, se deben usar datos de estudios locales o usar modelos que los faciliten.
- c. Cuando no se dispone de información, se supone la Cnat = 0.

Debido a la ausencia de estudios que demuestren científicamente las concentraciones de estos parámetros en la microcuenca, o a nivel nacional, se utilizó la opción C, en la que Cnat = 0. Esto sugiere, además, una mayor rigurosidad para determinar qué tanto se contamina el cuerpo receptor mediante la utilización de fertilizantes y herbicidas en el sector agrícola.

Como se mencionó, no existe regulación nacional específica para N y P en fuentes difusas, resultando lo mismo a nivel regional, lo anterior hizo necesaria la revisión de estudios científicos en los que se denota a partir de cuáles concentraciones estos elementos empiezan a producir efectos negativos en la dinámica natural de los ríos, como es el caso de la eutrofización. Los límites utilizados como permisibles son N=1 mg/l (Alonso *et al.* 2007) y P = 0,05 mg/l (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2019). Se muestra en la ecuación 6 las variables:

$$HH \text{ proc, gris: } \frac{L}{C_{max}-C_{nat}} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde:

- $HH_{\text{proc, gris}}$  : HH gris de un producto agrícola específico ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )
- $L$  : cantidad de fertilizante aplicado ( $\text{kg}/\text{ha}$ )
- $C_{\text{max}}$ : concentración máxima permisible del N y/o P en el agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $C_{\text{nat}}$ : concentración natural del N y/o P en el agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

#### 4.6.3 Cálculo de huella hídrica en el sector pecuario

Para el sector pecuario, su cálculo consta de la HH del alimento, HH de consumo y la HH de la servidumbre. En relación con la HH del alimento, se asocia el pasto de consumo de las especies presentes, por lo que se calcula la huella verde del mismo, con el modelo CROPWAT 8.0. Los concentrados no se tomaron en cuenta, ya que pertenecen a la industria de los alimentos, no presentes dentro de la microcuenca.

Para la huella de consumo, se contabilizó el agua ingerida por los animales, lo que representa la fracción azul del sector; para la de servidumbre se tomó como la cantidad de agua usada para asear las lecherías y porquerizas. Los datos se obtuvieron de estudios locales o regionales. El cálculo de huella gris, por su parte, divide el nitrógeno contenido en la orina y heces de cada especie estudiada y la ecuación es la misma utilizada en la HH gris del sector agrícola.

El cálculo del alimento consumido por bovinos, para los efectos de este trabajo únicamente el pasto, utilizó como insumo los datos recopilados en el 2014 por el INEC, mediante el Censo Nacional Agropecuario. En el intervalo de anexos del 16 al 20 se presenta la información por distrito, al ser esta la unidad territorial más pequeña registrada; para cada caso, se muestran las hectáreas y cantidad de fincas que poseen los animales según los tipos requeridos. Ahora bien, para la totalidad de la microcuenca del río Porrosatí se presenta la información resumida por tipo de animal, cantidad de fincas y número de hectáreas, en el anexo 21.

El ganado de leche en la microcuenca se encuentra en un 92% en el distrito de San José de la Montaña, cuyo principal sistema de alimentación es el pasto natural, para un total de 25 fincas, seguido por el pasto mejorado (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, comunicación personal, 2017). El distrito restante que maneja esta especie es Jesús, en el cantón de Santa Bárbara. En el caso de los caprinos, la actividad se desarrolla en los mismos distritos que la especie vacuna, y las chancheras se registran únicamente en San José de la Montaña. (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, comunicación personal, 2017).

#### **4.6.3.1 Huella hídrica verde en el sector pecuario**

Ahora bien, teniendo definida la cantidad total de animales de cada especie, se inician los cálculos de la huella verde. Para la atribución del sistema de alimentación del ganado de leche, solo se tomó en cuenta el pasto natural como fuente de alimentación, con un rendimiento de 3,7 t/ha (Arce, *et al.* 2013); así pues, se tiene que de las 65 fincas únicamente 31 utilizan este sistema, con 112,5 ha sembradas, seguido por el pasto mejorado con 19 fincas, y 7 se basan en forrajes. No se registran datos para las cabras y los cerdos, los cuales se crían con residuos agrícolas y orgánicos provenientes de los hogares (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, comunicación personal, 2017).

#### **4.6.3.2 Huella hídrica azul en el sector pecuario**

También conocida como el agua potable que consumen los animales para su funcionamiento fisiológico, no incluye las mezclas de agua con alimento, que en algunas dietas es recomendable, únicamente el agua como líquido dentro de sus necesidades. En el cuadro 2 se tabulan los datos de consumo de agua para cada especie.

## Cuadro 2.

*Cantidad de agua consumida por tipo de animal*

<b>Tipo de animal</b>	<b>Cantidad de animales en la microcuenca</b>	<b>Consumo de agua por tipo de animal (L/d)</b>	<b>Total de agua consumida por especie en la microcuenca m<sup>3</sup>/año</b>
Vacuno	2 908	100 <sup>(1)</sup>	106 142
Caprino	392	6 <sup>(2)</sup>	858,5
Porcinos	229	15 <sup>(3)</sup>	1 254
<b>Total</b>			<b>108 254,30</b>

1 Tomado de Campabadal, citado en Barrientos (2012), 2 Tomado de Cordero (2012), 3 Tomado de IDEAM (2015).

El consumo de agua en caprinos depende del esquema de alimentación utilizado en la finca, la temperatura media del territorio, así como de la ración de alimento dada a cada animal. En este caso, se utiliza el valor máximo del rango dado por Cordero (2012), ya que no está dentro de los alcances del proyecto de graduación conocer la dieta de esta especie en la microcuenca. Por su parte, el consumo de agua de los cerdos depende del sistema de producción empleado en la finca; en este caso específico, se utiliza el dato de los cerdos en desarrollo y engorde, determinado en el cuadro 3.

## Cuadro 3.

*Cantidad de agua utilizada en aseo de establos*

<b>Tipo de animal</b>	<b>Cantidad de animales en la microcuenca</b>	<b>Agua para lavado por cantidad de animales en m<sup>3</sup>/año</b>
Vacunos <sup>(2)</sup>	2 908	27 215,9
Caprinos	392	-

<b>Tipo de animal</b>	<b>Cantidad de animales en la microcuenca</b>	<b>Agua para lavado por cantidad de animales en m<sup>3</sup>/año</b>
Porcinos <sup>(1)</sup>	229	0,4
<b>Total</b>		<b>27 216,30</b>

1. Tomado de Di Rienzo *et al.* (2017). 2. Tomado de Fournier *et al.* (2006).

Para la utilización de agua en el aseo de los galrones para ganado vacuno, Fournier *et al.* (2006) indican que en una lechería donde se mantienen 78 vacas, se utilizan 2 000 L/d de agua para aseo del establecimiento. Por tanto, el cálculo se divide en los grupos propuestos por Fournier, con la cantidad de ganado vacuno de la microcuenca del Porrosatí obtenido del censo agropecuario para un total de 2 908 cabezas de ganado de leche; este, se agrupa en 37,3 lecherías con 78 vacas según lo indicado anteriormente, para poder asignarle el gasto de agua (2 000 L/d) según lo propuesto por el autor citado.

El caso de los caprinos es diferente, dentro de los principales métodos para el manejo de residuos utilizados en Costa Rica se encuentran: los procesos de producción de abono orgánico con lombrices, utilizando como base el estiércol, inyección directa en biodigestores, recolección para riego de cultivos mezclado con fertilizantes, y la utilización como base alimenticia de otras especies animales (Cordero, 2012). Por tanto, para este caso, no se contabiliza el agua de aseo, pues se emplean otras alternativas.

En cerdos, según Di Rienzo *et al.* (2017), en un corral se desarrollan 40 individuos para la actividad de engorde, y con micromedición de agua exacta en días, se utilizan 170 L/d para el aseo de cada corral. Por tanto, agrupando los animales de la microcuenca, que según el Censo Nacional Agropecuario son en total 229, como se efectuó con el vacuno, se obtienen 5,7 grupos de 40 animales, para asignar el consumo de agua de aseo propuesto por el autor mencionado.

#### **4.6.3.3 Huella hídrica gris en el sector pecuario**

Conocida como agua de servidumbre, contempla los contaminantes contenidos en la orina y heces de cada especie, específicamente la fertilización nitrogenada; es decir, la cantidad de N en las excretas del animal. La ecuación es la misma que el sector agrícola para la HH gris, requiriendo la cantidad de N producida en cada caso y la concentración permisible en agua, que de igual forma se utilizó  $N=1$  mg/l (Alonso *et al.* 2007) y la concentración natural  $C_{nat} = 0$ , debido a la ausencia de estudios. Lo anterior se detalla en la ecuación 7:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad Ec.(7)$$

Donde:

- $HH_{proc,gris}$  : HH gris pecuaria ( $m^3/año$ )
- L : cantidad de fertilización nitrogenada ( $kg/año$ )e
- $C_{max}$ : concentración máxima permisible de N en el agua ( $kg/m^3$ )
- $C_{nat}$ : concentración natural de N en el agua ( $kg/m^3$ )

La caracterización de las excretas de cada animal para la determinación de la cantidad de N depende de varios factores en cada especie. En el caso de las vacas de leche, como actividad de la microcuenca, se supone que con una dieta media en N (2,5%) suministrado al animal, además de una producción de leche con una media de 20 kg por día, se producen entre orina y heces 0,25 kg/d de nitrógeno, la mayor parte en la orina (Chacón, 2018). Según la Dirección General de Tecnología Agraria (2003), para las cabras es considerable en el total de las excretas, al menos el 2%, para un total de 0,02 kg/d de N. Los cerdos generan la mayor cantidad de N vía urinaria (alrededor del 85%), para un total de 0,03 kg/d como sumatoria de orina y heces (Vanderholm, citado en Mariscal, 2007).

#### 4.6.4 Cálculo de huella hídrica en el sector comercial

En este cálculo se toma en cuenta el componente directo como agua incorporada al producto, consumida o contaminada en el proceso de lavado y evaporada por el uso en cocinas, aseos, limpieza, jardinería o lavandería; es decir, el volumen de agua dulce total

consumida, que las empresas requieren para el desarrollo de sus actividades (no se incluye la huella hídrica generada por la cadena de suministros).

#### 4.6.4.1 Huella hídrica azul en el sector comercial

Es la diferencia entre el volumen de agua consumida para los procesos productivos del sector comercial y el de agua vertida al finalizar, lo que resulta en la cantidad de agua consumida, evaporada y/o incorporada en los productos elaborados o procesos. Las actividades se obtuvieron a partir de dos bases de datos, el sistema SIRROAR y las Patentes Municipales, ambas para el año 2015. En el caso de los entes registrados en el primero, estos se dividen por sectores, según el nivel de división código CIIU del *Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N°33601-MINAE-S*. Las actividades comerciales identificadas en la microcuenca, según el código CIIU son:

- ventas de combustibles y repuestos, cód. 4661
- Venta de alimentos, bebidas y artículos para el hogar, cód. 4711
- Actividad de alojamiento para estancias cortas, cód. 5510
- Elaboración y venta de comidas, cód. 1075

Por otro lado, las patentes comerciales solicitadas tanto a la municipalidad de Barva como a la de Santa Bárbara registran la totalidad de 656 comercios dentro del territorio para el año de estudio, estos divididos para el cálculo de la Huella Hídrica en cinco grandes grupos, citados a continuación (el anexo 11 muestra la totalidad de los comercios según la categoría para cada distrito):

- Preparación de alimentos
- Hospedaje
- Venta de abarrotos
- Talleres

- Fábricas
- Otros

Respecto al cálculo de la HH, se utilizó, según categoría, la cantidad de colaboradores y clientes promedio, lo cual, relacionado con el tiempo de estancia, permite estimar el agua consumida y los porcentajes equivalentes a agua azul (10%) o gris (90%). Para el caso de los establecimientos dedicados a la preparación de alimentos, se calculó, según fuera soda o restaurante, la cantidad de platos preparados por día y este valor se relacionó con el consumo teórico por cada comida lista. Según Álvarez *et al.* (2011), en un restaurante convencional, por cliente se gastan 13,6 L de agua, y su distribución es de 2 L en la preparación del alimento, el cual corresponde al 15% del total, y un restante de 11,6 L para las diversas actividades de limpieza debido a la preparación, así como la utilizada en servicios sanitarios, esta última con un 85% del consumo final. Estos datos son similares a los porcentajes de distribución de consumo planteados en las demás categorías del sector. Se muestran en la cuadro 8 los datos resultantes de los cálculos para huella azul del sector comercial (ver el desarrollo de las ecuaciones en la memoria de cálculo del sector).

#### **4.6.4.2 Huella hídrica gris en el sector comercial**

El Ministerio de Salud, mediante la plataforma virtual oficial llamada SIRROAR, almacena los datos de las empresas que presentan reportes operacionales, los cuales se muestran en el anexo 22. Esta información se encuentra actualizada al año 2016, y se obtuvo tras realizar la solicitud formal.

La frecuencia de los reportes operacionales registrados es semestral, según información del Ministerio de Salud. No se registran en el sistema SIRROAR actividades de producción y venta de servicios en Barva; para el caso de los entes registrados en las patentes comerciales, se utilizó el 90% del consumo como agua gris para el cálculo. La realización de los mismos se desarrolla en la ecuación 8:

$$HH_{gris} (m3) : : \frac{Q_{in} * C_{in} - Q_{out} * C_{out}}{C_{ref} - C_{nat}} \quad Ec.(8)$$

Donde:

- Q<sub>out</sub>: caudal vertido (m<sup>3</sup>/año)
- C<sub>out</sub>: concentración del contaminante (mg/L)
- Q<sub>in</sub>: caudal de entrada (m<sup>3</sup>/año)
- C<sub>in</sub>: concentración de entrada (mg/L)

Las concentraciones de referencia (C<sub>ref</sub>) se extrajeron del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S, las cuales son para DBO 50 mg/L, DQO 150 mg/L y SST 50 mg/L. Para la concentración natural de la fuente receptora (C<sub>nat</sub>) en mg/L, se tomó el dato de la misma forma que en el sector domiciliario, del proyecto de graduación denominado *Determinación del impacto en la calidad del agua en la parte alta de la microcuenca río Porrosatí, por vertido de aguas residuales, para la realización de planes y acciones de manejo de recursos hídricos* (Hernández y Ulate, 2016). Se utilizó el punto más alto de la microcuenca como referencia, ya que no existen actividades antrópicas que pudiesen alterar la calidad natural del mismo.

#### **4.8 Evaluación de la sostenibilidad hídrica para la formulación de propuestas de adaptación al cambio climático**

Esta fase evalúa la sostenibilidad de la HH a partir de la determinación de la oferta natural, la disponibilidad del recurso hídrico y las variables ambientales y socioeconómicas, las cuales se ven condicionadas por el fenómeno de cambio climático, que limita el desarrollo de los diferentes sectores del país a causa de amenazas a la seguridad alimentaria, disponibilidad del agua para las diversas actividades humanas que se desarrollan en la microcuenca y el bienestar social.

##### **4.8.1 Determinación de la oferta natural**

Se conoce la recarga hidrológica con la que cuenta la microcuenca por medio de los escenarios propuestos por Montero (2016). Esta información, junto con la mostrada por Sibaja (2013), para conocer la disponibilidad real, permite evaluar los resultados obtenidos en el cálculo de huella hídrica. Ambos datos son mostrados en el anexo 24.

#### 4.8.2 Evaluación de la sostenibilidad ambiental

La HH se considera ambientalmente insostenible cuando el agua para las actividades socio-productivas compite de manera directa con las necesidades ambientales e incluso las excede, o bien, cuando la contaminación sobrepasa los niveles de asimilación del cuerpo de agua al que es vertido. Para determinar el grado de afectación se calcula primeramente la escasez agua azul y verde, así como el nivel de contaminación.

#### 4.8.3 Evaluación de la huella azul multisectorial

La comparación de la demanda multisectorial anual en la microcuenca, con la oferta de agua azul, se calcula mediante la ecuación 9:

$$OA_{\text{azul anual}} = \text{Disponibilidad}_{\text{anual}} - \text{Caudal Ambiental}_{\text{anual}} \quad \text{Ec.(9)}$$

Por último, asumiendo el caudal ecológico como 10% (Arévalo, D. 2013), se obtiene la oferta de agua, primer paso para la determinación de la capacidad de abastecimiento del acuífero a las actividades que la población desarrolla en la unidad lógica y para determinar si esta demanda sobrepasa la oferta (Arévalo, D. 2013).

Si durante el año base, el volumen de la HH azul multisectorial (sumados los 4 sectores para el mismo periodo de tiempo y unidad geográfica) supera el volumen de la oferta natural o regulada, significa que se identifica un punto clave en la cuenca de insostenibilidad ambiental (Arévalo, D. 2013), donde el planteamiento de medidas de adaptación al CC son capaces de orientar la regulación de los volúmenes de agua explotados, que contemplen las variaciones climáticas futuras y permitan garantizar la

disponibilidad del recurso tanto para las actividades naturales como para el desarrollo del país. La escasez anual de agua azul se calcula mediante la ecuación 10:

$$E_{\text{azul anual}} = \frac{\sum HH_{\text{azul anual}}}{OA_{\text{azul anual}}} \quad \text{Ec.(10)}$$

#### 4.8.4 Evaluación de la huella verde multisectorial

Para evaluar la huella verde se calculó la evapotranspiración real (ETr) mensual a partir de datos climáticos y la metodología de Thornthwaite, el cual fue corregido mediante factores por tipo de cultivo y zona vegetativa, luego los valores se interpolan y se calcula un promedio mensual para la totalidad del área. La disponibilidad de agua verde se calcula como la ETr del área cubierta únicamente por cultivos y pastizales, y se excluyen las zonas naturales y las áreas abiertas con poca o nula vegetación, lo que para efectos de este proyecto se define como sector comercial y domiciliario. Para su evaluación, se analiza la huella verde con los datos de disponibilidad de agua verde mensual, y para el índice de escasez del agua verde, se utiliza la ecuación 11:

$$E_{\text{verde anual}} = \frac{\sum HH_{\text{verde anual}}}{OA_{\text{verde anual}}} \quad \text{Ec.(11)}$$

Un valor cercano o mayor a 1 significa que en el año de estudio hay insostenibilidad hídrica, por lo que se deberá actuar en la búsqueda de medidas específicas.

#### 4.8.5 Evaluación de la huella gris multisectorial

Para analizar la sostenibilidad, se determina en la huella gris multisectorial el mayor contaminante por sector, siendo para cada caso:

- Domiciliario, sólidos suspendidos totales.
- Agrícola, el fósforo.
- Pecuaria, el nitrógeno.

- Para el comercial, el mayor impacto se deriva de la DBO.

La suma de estos valores se analiza con la oferta total mensual, calculada como la oferta natural menos el volumen de la huella azul, asumiendo que este es el caudal que queda disponible para asimilar los contaminantes producidos (Arévalo, D). Para calcular el nivel de contaminación del agua (NCA), se utilizó la expresión definida en la ecuación 12:

$$NCA_{gris\ mensual} = \frac{\Sigma HH_{gris\ mensual}}{R_{total\ mensual}} \quad Ec.(12)$$

Un nivel de contaminación del agua igual o superior a 1 significa que la capacidad de asimilación del contaminante con mayor HH gris ha sido alcanzada o excedida, por el contrario, un valor menor a este número expresa que el cuerpo receptor todavía cuenta con cierta capacidad de depuración.

## **5. Resultados y discusión**

En este capítulo, se muestra los resultados de las ecuaciones para cada sector en estudio, así como los cálculos y datos que evalúan la sostenibilidad de estos en la microcuenca del río Porrosatí para el año 2015.

### **5.1. Sector domiciliar**

En este sector, únicamente se calcula la huella azul y gris, determinadas por el consumo por persona y la contaminación individual de las aguas por uso domiciliar.

#### **5.1.1. Huella azul del sector domiciliar**

Mediante el desarrollo de la ecuación 1, se logra estimar que la HH azul del sector es de 148 456,45 m<sup>3</sup>, siendo la segunda en importancia para el año 2015, además, las proyecciones propuestas por INEC (2011) prevén un aumento al año 2025 del 12,18% y 12,32% para los cantones de Barva y Santa Bárbara respectivamente por lo que es de esperarse que esta huella aumente y con ello se ejerza mayor presión sobre la oferta de agua en la microcuenca desde este sector.

#### **5.1.2 Huella gris del sector domiciliar.**

Con base en los porcentajes y datos de la metodología, se desarrollan en la ecuación 3, los cálculos para la contaminación del agua producto de las actividades del sector. Se determinan los SST como el contaminante de mayor impacto, con una HH gris de 1 335 945 m<sup>3</sup> para el año en estudio (los resultados para los demás contaminantes evaluados se pueden observar en la hoja de Excel del sector domiciliar, en la memoria de cálculo adjunta)

## 5.2. Sector agrícola

Para este sector, se determina la huella verde como el agua requerida por los cultivos. Se determina el requerimiento hídrico, tanto de lluvia como de riego, contabilizado como consumo azul (ver memoria de cálculo HH sector agrícola verde y azul). En la huella gris, se aplica una ecuación directa desarrollada en esta sección.

### 5.2.1. Huella azul y verde del sector agrícola.

En la memoria de cálculo anexa a este estudio, se especifica la resolución de las ecuaciones 4 y 5 para cada uno de los cultivos detallados. En caso de que los cultivos fuesen sembrados en las dos épocas del año (seca y/o lluviosa), se procedió a modelar para ambas; se consultaron, en el año 2017, los manuales de cultivo desarrollados por el MAG.

#### Cuadro 4.

*Resultados de la HH verde y azul para el sector agrícola.*

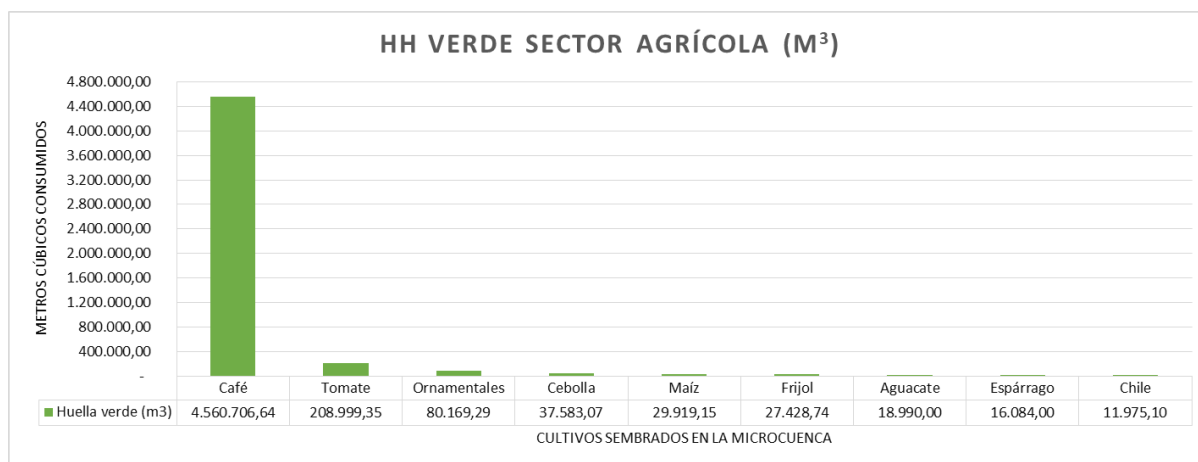
Cultivo	Huella verde	Huella azul	Huella verde	Huella azul
	Por área (m <sup>3</sup> /ha)	Por área (m <sup>3</sup> /ha)	Por producto (m <sup>3</sup> /t)	Por producto (m <sup>3</sup> /t)
<b>Aguacate</b>	7 596	3 629	365,2	174,4
<b>Café</b>	8 498	4 040	2 266,13	1 077,6
<b>Cebolla</b>	2 811	423	124,9	18,8
<b>Chile</b>	5 370	3 969	202,6	149,7
<b>Espárrago</b>	4 021	4 756	406,1	480,4
<b>Frijol</b>	7 577	1 433	5 051,2	955,3
<b>Maíz</b>	3 911	0	977,7	0
<b>Ornamentales</b>	1 979	3 018	2 473,7	3 772,5

<b>Cultivo</b>	<b>Huella verde</b>	<b>Huella azul</b>	<b>Huella verde</b>	<b>Huella azul</b>
	<b>Por área</b>	<b>Por área</b>	<b>Por producto</b>	<b>Por producto</b>
	<b>(m<sup>3</sup>/ha)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/ha)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/t)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/t)</b>
<b>Tomate</b>	7 715	3 489	154,3	69,8

Elaboración propia.

Analizando lo expuesto en el cuadro, el maíz presenta el comportamiento atípico a los demás cultivos, ya que, según el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, el cultivo no requiere riego en ninguna época del año, como recomendación para el manejo de su producción (Bonilla, N. 2009). Además, influye directamente en los resultados, la poca extensión de siembra que representa el cultivo dentro de la microcuenca, en comparación, por ejemplo, con las hectáreas de siembra del café o del tomate.

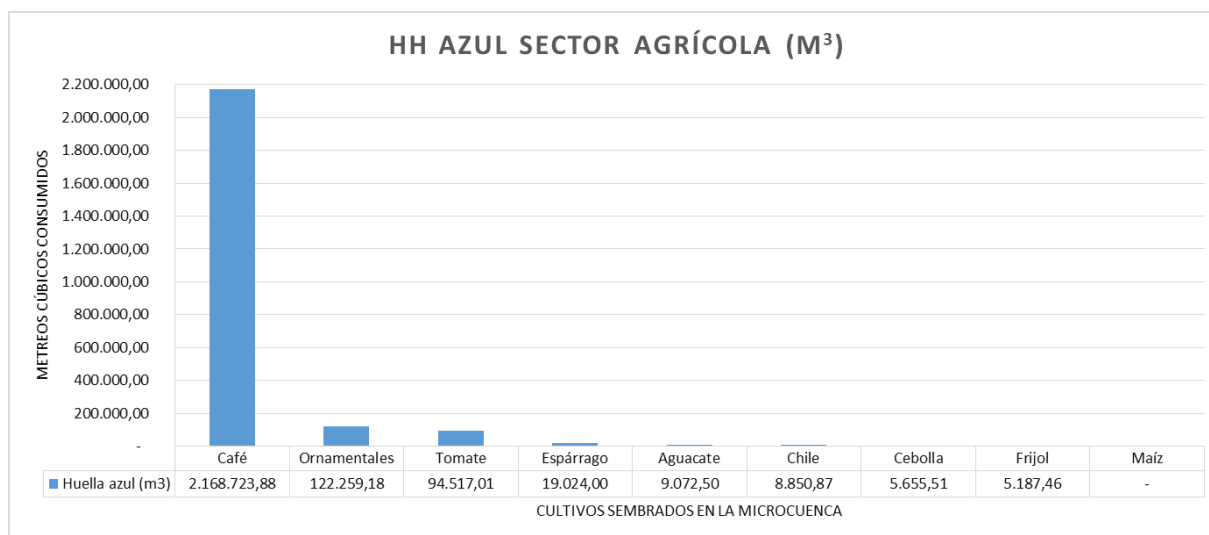
El cuadro 4 contiene los resultados de las huellas hídricas verde y azul para cada uno de los cultivos en las unidades normalmente usadas para el sector agrícola, por área (m<sup>3</sup>/ha) y por tonelada producida (m<sup>3</sup>/t); sin embargo, para efectos de este trabajo, se hace necesario unificar los diferentes sectores, por lo que los requerimientos hídricos se expresan en forma de caudal, haciéndolos comparables entre sí. Para lograr lo anterior, es necesario multiplicar los m<sup>3</sup>/ha de cada cultivo por el área sembrada de mismos, y se obtiene así el dato en m<sup>3</sup>/año, que es el periodo de tiempo con el que se modela en el *software* Cropwat 8.0. En las figuras 4 y 5 se observan de manera proporcional estos requerimientos.



**Figura 4.** HH verde por cultivo del sector agrícola.

Elaboración propia.

El tomate muestra uno de los tres requerimientos de agua verde más altos, debido a que se siembra dos veces por año, este factor se toma en cuenta como parte de su rendimiento. El resultado del café se debe a la cantidad de hectáreas sembradas en la microcuenca, lo cual es muy representativo para el cálculo. Por tanto, la huella verde del sector agrícola, contabilizando todos los cultivos, es de 4 991 855 m<sup>3</sup> al año.



**Figura 5.** HH Azul por cultivo del sector agrícola.

Elaboración propia.

La huella azul del maíz se establece en cero, debido a que, como demuestra el *software* CROPWAT 8.0 y como se indica en la guía de cultivo propuesta por Bonilla, N (2009), este no requiere riego, por ser cultivado en época lluviosa, por lo que con el requerimiento de agua de lluvia se abastece de manera correcta y se evita el consumo de otras fuentes de agua; esto es lo ideal, debido a la precipitación que existe en la zona; sumado a esto, en el Censo Nacional Agropecuario no se registran datos de riego para el maíz en el territorio en estudio. Particularmente, los ornamentales, en el caso de las flores (subgrupo específico de los ornamentales), requieren grandes cantidades de agua para que las células de la planta se hidraten e hinchen y se incentive el crecimiento vegetal, por lo que se reconoce en los cálculos, y debido a su rendimiento y cantidad de hectáreas sembradas, que es el segundo con mayor consumo de agua inducida o de riego. El resultado final para el sector agrícola en el requerimiento de agua de riego o huella azul es de 2 433 290 m<sup>3</sup> en el año 2015.

### **5.2.2. Huella gris en el sector agrícola**

Para esta huella, se trabaja con los datos mostrados detallados en la metodología para la ecuación 6, los cuales incluyen el N y P de los fertilizantes y herbicidas usados en los cultivos. A pesar de que los productos aplicados son un compuesto elaborado a partir de varios elementos, se toma en cuenta únicamente el nitrógeno y fósforo, debido a las consecuencias ambientales y sanitarias de su presencia en el recurso hídrico, como lo son aumento de la acidez y la eutrofización que trae consigo la pérdida de oxígeno en los ecosistemas acuáticos por el crecimiento excesivo de algas y, con esto, la afectación de especies vegetales y animales. Ciertas formas de nitrógeno en el agua establecen también riesgos para las personas por su ingesta o por contacto directo con compuestos como toxinas, liberadas por floraciones de cianobacterias en ambientes eutrofizados (Cárdenas, *et al.* 2013).

Los resultados de la huella gris, al aplicar la ecuación antes descrita y tomando en cuenta la cantidad de hectáreas sembradas para cada cultivo, se muestran en el cuadro 5.

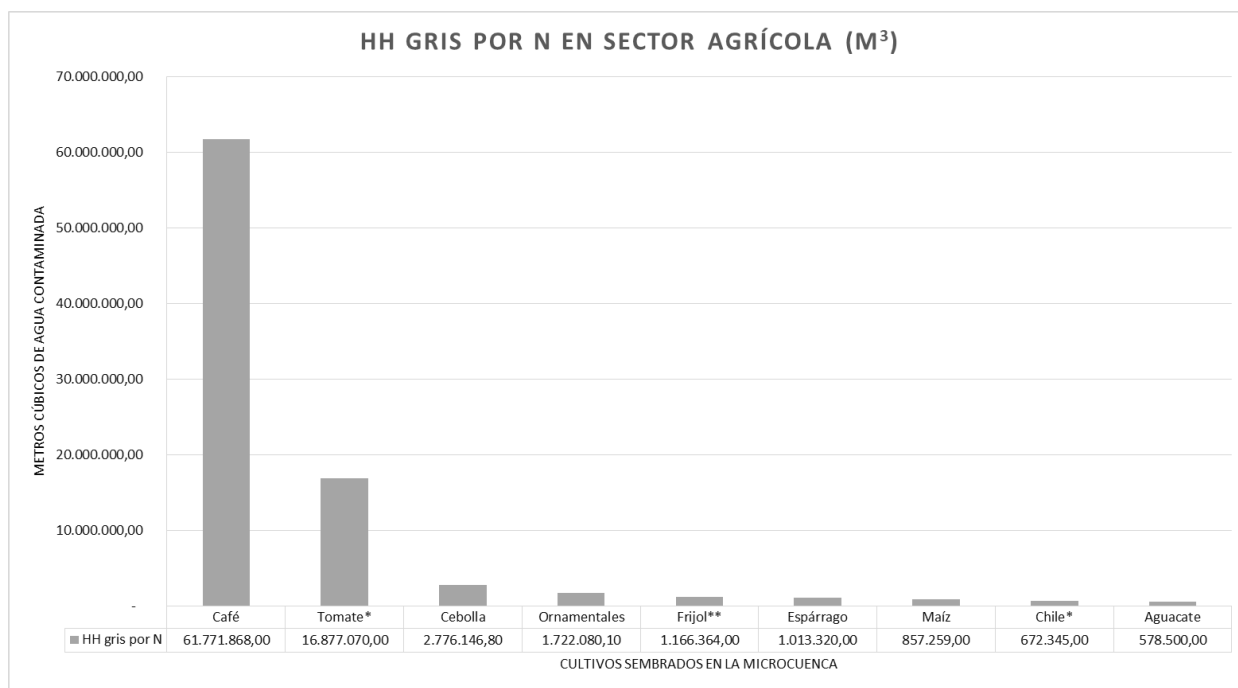
### Cuadro 5.

*Resultados de huella gris por cultivos para N y P.*

<b>Cultivo</b>	<b>HH gris por N (m<sup>3</sup>)</b>	<b>HH gris por P (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Tomate</b>	16 877 070	242 379 648
<b>Café</b>	61 771 868	37 438 796
<b>Cebolla</b>	2 776 146,80	40 110 000
<b>Ornamentales</b>	1 722 080	17 176 240
<b>Chile</b>	672 345	17 840 000
<b>Frijol</b>	1 166 364	13 970 304
<b>Maíz</b>	857 259	8 239 968
<b>Aguacate</b>	578 500	3 560 000
<b>Espárrago</b>	101 320	3 443 200
<b>Total</b>	<b>86 522 952</b>	<b>384 158 156</b>

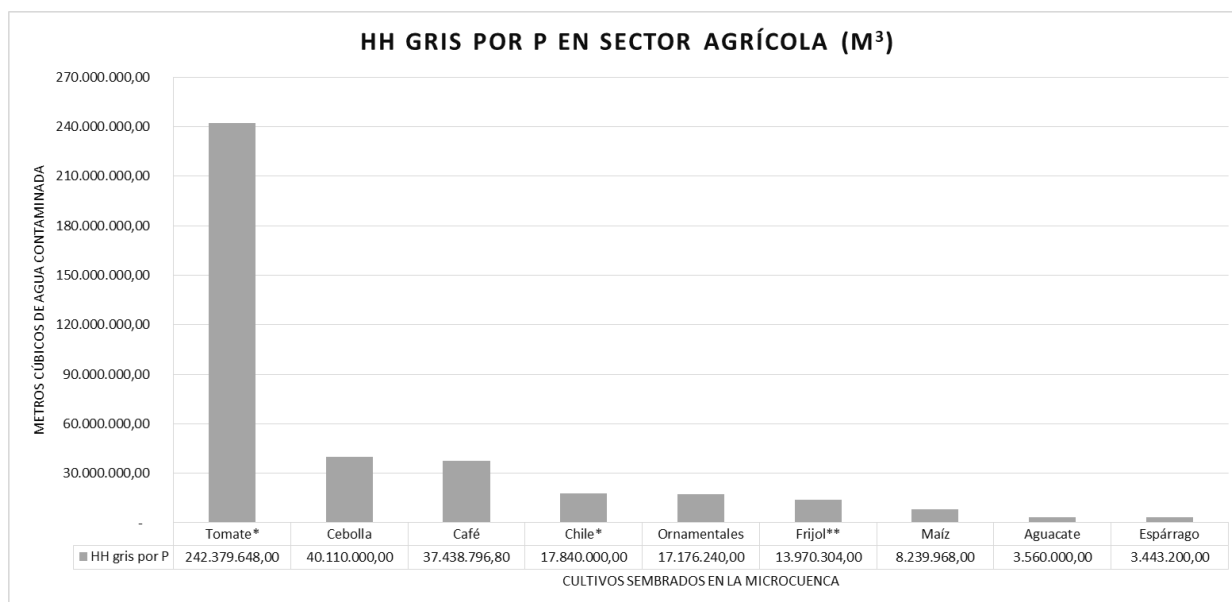
Elaboración propia.

Unas huellas presentan mayor proporcionalidad que otras, debido a las particularidades de los sistemas de siembra; por ejemplo, algunos cultivos se cosechan dos o tres veces al año, según se comprobó mediante la Agencia de Servicios Agropecuarios del MAG, lo cual ocasiona que la aplicación de fertilizantes y herbicidas se acreciente, en comparación a otros cultivos. Además, el valor se incrementa si las hectáreas de siembra son considerables, este es el caso del café, cuya aplicación se basa únicamente en fertilización y es muy baja, pero es el cultivo de la microcuenca con mayor extensión, por lo que su huella gris es muy significativa. Se observa en las figuras 6 y 7, de manera gráfica, la distribución de la demanda volumétrica para los contaminantes evaluados.



**Figura 6.** HH gris por N en el sector agrícola.

Elaboración propia.



**Figura 7.** HH gris por P en el sector agrícola.

Elaboración propia.

El tomate, el frijol y el chile se cultivan más de una vez al año, lo por lo que aumenta su consumo de fertilizantes y herbicidas.

### **5.3. Sector pecuario**

Los resultados del sector pecuario se muestran por consumo de agua por animal, pasto como fuente de alimentación y agua utilizada para aseo de establos.

#### **5.3.1 HH verde en el sector pecuario**

Se calcula la huella verde únicamente para el caso del pasto consumido por las vacas, mediante el modelado en el *software* Cropwat 8.0, lo que da como resultado un total de 1 029 150 m<sup>3</sup> al año (ver cálculos en memoria adjunta).

#### **5.3.2. HH azul en el sector pecuario**

Para la huella azul, que consta de la suma del agua de consumo y aseo de establecimientos para cada especie en la microcuenca del río Porrosatí, se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro 6.

## Cuadro 6.

*Resultados de huella azul por especie en la microcuenca.*

Tipo de animal	Cantidad de animales en la microcuenca	Consumo de agua por tipo de animal (L/d)	Total de agua consumida por tipo de animal en la microcuenca	Agua para lavado por cantidad de animales
			m <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /año
Vacuno	2 908	100	106 142	27 215,90
Porcinos	229	15	1 253	0,4
Caprino	392	6	858	-
<b>Total</b>			<b>108 253</b>	<b>27 216,30</b>

Elaboración propia.

En total, el agua azul consumida en la microcuenca debido a las dos actividades mencionadas fue 135 470,50 m<sup>3</sup>/año en el 2015, los cálculos fueron realizados en base a los cuadros 2 y 3, que especifican la cantidad de animales en la microcuenca y el volumen de agua consumida y utilizada para lavado por cada especie.

### 5.3.3. Huella Gris del sector pecuario.

Con los valores de N en excretas de cada especie, se procedió a aplicar los datos en la ecuación 7 (ver ecuación desarrollada en la memoria de cálculo adjunta), obteniéndose los resultados mostrados en el cuadro 7:

## Cuadro 7.

*Huella gris por especie para el sector pecuario.*

Tipo de animal	Cantidad de animales en la microcuenca	Demanda volumétrica
		m <sup>3</sup> /año
Vacunos	2 908	265 355 000
Caprinos	392	2 861 600
Porcinos	229	2 507 550
<b>Total</b>		<b>270 724 150</b>

Elaboración propia.

La metodología recomienda el resultado en m<sup>3</sup>/ha; sin embargo, no es representativo para este proyecto, pues, aunque el ganado de leche se encuentre en su mayor parte del día en la finca, en este caso se contabiliza el nitrógeno por animal, tanto en orina como en heces, lo cual es un dato directo o proporcional a la cantidad de animales de la microcuenca.

Además, para el consumo de agua, tanto para sus necesidades fisiológicas, como para el lavado, únicamente se contabiliza la utilizada en la lechería y la de las porquerizas, donde los cerdos se desarrollan por completo. En esta sección, se excluyen las cabras, ya que no se requiere agua para aseo, como se explicó en el apartado de huella azul. Por estas razones, el cálculo en hectáreas es innecesario, por lo que se calcula por animal, por lo que es un dato directo, para un total de HH gris de la microcuenca de 270 724 150 m<sup>3</sup>, para el periodo del 2015.

### 5.4 Sector comercial

En este sector se contabiliza únicamente la huella azul y la gris del consumo de cada comercio.

#### 5.4.1. Huella azul en el sector comercial

Se muestran en el cuadro 8 los datos resultantes de los cálculos para la huella azul del sector comercial (ver el desarrollo en la memoria de cálculo del sector).

#### Cuadro 8.

*Resultados de la huella azul en el sector comercial para los entes registrados en las patentes municipales y el sistema SIRROAR*

<b>Categoría</b>	<b>Total de comercios</b>	<b>Agua azul (m<sup>3</sup>/año)</b>
<b>Hospedaje</b>	14	8 397,29
<b>Preparación de alimentos</b>	136	4 063,02
<b>Fábrica</b>	20	2 086,67
<b>Venta de alimentos y abarrotes</b>	106	2 043,89
<b>Otros</b>	303	1 896,78
<b>Taller</b>	78	805,66
<b>Estaciones de servicio</b>	3	77,3
<b>Totales</b>	<b>660</b>	<b>19 371,18</b>

Notas: Elaboración propia.

#### 5.4.2. Huella hídrica gris del sector comercial.

Una vez aplicada la ecuación 7, en el cuadro 9 se muestra la huella hídrica gris obtenida para el sector comercial.

## Cuadro 9.

*Huella Hídrica Gris del sector comercial.*

<b>Categoría</b>	<b>HH Gris DQO (m<sup>3</sup>)</b>	<b>HH Gris DBO (m<sup>3</sup>)</b>	<b>HH Gris SST (m<sup>3</sup>)</b>
Preparación de alimentos	39 268,98	52 620,43	15 412,19
Hospedaje	54 596,62	73 930,84	29 488,00
Venta de alimentos y abarrotes	2 363,93	21 499,34	2 197,40
Taller	755,31	5 800,77	4 150,18
Fábrica	19 562,50	23 475,00	19 194,60
Otros	17 782,31	21 338,78	17 447,89
Entes registrados en SIRROAR	17 481,98	23 601,81	21 988,96
<b>Totales</b>	<b>134 329,66</b>	<b>222 266,97</b>	<b>87 890,27</b>

Elaboración propia.

Para el caso específico del sector comercial, la DBO constituye el parámetro de mayor impacto, por lo que es el utilizado para la evaluación de sostenibilidad de la HH gris (ver cálculos en memoria digital).

### 5.5 La huella hídrica a nivel de cuenca

En el cuadro 10 se muestra el resumen de los resultados de huella hídrica para la cuenca en su totalidad. Se suman los colores de las huellas de cada sector, para unificar los datos, según el alcance del proyecto. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para el caso de la HH gris se utiliza únicamente el contaminante de mayor impacto volumétrico de cada sector.

## Cuadro 10.

*Resumen de resultados de huella hídrica en la microcuenca del río Porrosatí*

Sectores	Resultados de las huellas (m <sup>3</sup> )		
	HH verde	HH azul	HH gris
<b>Residencial</b>	NA	148 456,45	1 335 945
<b>Agrícola</b>	4 991 855	2 433 290	384 158 156
<b>Pecuario</b>	1 029 150	135 470,50	270 724 150
<b>Comercial</b>	NA	19 371,18	222 266,97
	<b>6 021 005</b>	<b>2 736 697</b>	<b>656 440 518</b>
<b>Total</b>	<b>8 757 702</b>		

Elaboración propia.

La totalidad de cada huella es evaluada de manera individual de acuerdo con la disponibilidad de cada una de estas aguas, según se muestra en el capítulo 5.6. Para el análisis de calidad, es necesario evaluar el efecto acumulado de la capacidad que tiene la unidad lógica, para asimilar la contaminación de los sectores que en ella se desarrollan y entender así en qué sectores es indispensable la regulación o suspensión de más patentes comerciales.

### 5.6 Evaluación de la sostenibilidad ambiental

La evaluación de la sostenibilidad es la base de análisis para establecer las medidas de adaptación al cambio climático en materia del recurso hídrico.

#### 5.6.1 Evaluación de la huella azul multisectorial

La comparación de la demanda multisectorial anual en la microcuenca, con la oferta de agua azul, se calcula mediante la ecuación 9 expuesta en la metodología. Para el presente estudio, esta se aplica en tres escenarios, el primero en el 2014, siendo este el año utilizado

como base de disponibilidad del recurso hídrico, y para dos escenarios futuros, 2030 y 2050. El cuadro 11 muestra los resultados obtenidos.

### **Cuadro 11.**

#### *Resumen de datos de oferta y disponibilidad*

<b>Escenario</b>	<b>Oferta natural<sup>1</sup></b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Caudal ecológico</b>	<b>Oferta de agua azul (OA)</b>
<b>2014</b>	25 400 000	13 012 188,60 <sup>(2)</sup>	1 301 218,86	11 710 969,74
<b>2030</b>	23 600 000	12 090 280	1 209 028	10 881 252
<b>2050</b>	21 900 000	11 219 370	1 121 937	10 097 433

Notas: 1. Elaboración propia con datos de Montero (2016). 2. Elaboración propia con datos de Sibaja (2013).

Es importante resaltar que, del total de la oferta natural, solo un porcentaje es considerado agua disponible para las actividades humanas. Montero (2016) brinda el dato de oferta natural para los tres periodos; sin embargo, al tener la disponibilidad únicamente para el año 2014, se asumió la del 2030 y 2050 como el porcentaje que representa esta de la oferta natural para el 2014, es decir, un 51%.

Una vez realizado el balance hídrico, se calcula el índice de estrés hídrico para cada color de huella. Este dato evidencia qué tan sostenibles son las actividades en la microcuenca, respecto a los consumos. Se aplica la ecuación 10, descrita en la metodología, para el índice de estrés hídrico azul. Los resultados se muestran en el cuadro 12.

### **Cuadro 12.**

#### *Índice de estrés hídrico azul para tres escenarios*

<b>Índice de estrés hídrico azul</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Oferta de agua azul (OA)</b>	<b>HH azul anual</b>	<b>Escasez de agua azul</b>
<b>2014</b>	11 710 969,74	2 718 355.80	0,23

<b>Escenarios</b>	<b>Oferta de agua azul (OA)</b>	<b>HH azul anual</b>	<b>Escasez de agua azul</b>
<b>2030</b>	10 881 252,00	2 718 355.80	0,25
<b>2050</b>	10 097 433,00	2 718 355.80	0,27

Elaboración propia.

En cada periodo se muestra la disminución de la oferta natural y, proporcionalmente, se tiene el aumento en la escasez. Al no estar dentro del alcance de este estudio obtener datos de demanda según crecimiento demográfico para los años futuros, se utilizó como consumo de agua azul para evaluar el 2030 y 2050 el calculado para el año en estudio.

Si bien se logró determinar que, actualmente, la disponibilidad natural de agua abastece las necesidades de consumo de agua azul, se vuelve sumamente importante tener en cuenta escenarios como los planteados por Montero (2016), quien prevé una disminución en la capacidad de recarga debido al cambio de uso del suelo en el territorio. Lo anterior es un factor condicionante para el resultado de la evaluación a futuro, pues la sustitución de actividades agrícolas y ganaderas por otras del sector comercial y domiciliario resulta en una mayor impermeabilidad y disminución de la capacidad de filtración del suelo y, por ende, en mengua en la disponibilidad natural del agua, lo cual, junto con los aumentos demográficos, acercarán cada vez más el territorio a un punto de quiebre.

El escenario ya mencionado analiza también los factores meteorológicos, como la precipitación, la cual se presentará cada vez con menos frecuencia, pero con mayor intensidad. Lo anterior no permite mantener el tiempo adecuado que requiere la vegetación para absorber su requerimiento hídrico desde el suelo; además, se imposibilita conducir el agua a los depósitos subterráneos, lo cual afecta nuevamente la oferta y disponibilidad.

Todos estos análisis se encuentran directamente relacionados y se intensifican con el fenómeno de cambio climático ya descrito. Por tanto, a pesar de tener un resultado holgado para el año de estudio, la inestabilidad de los volúmenes de recarga a futuro marcará una de las premisas de vulnerabilidad, respecto a la disponibilidad del recurso hídrico para

todos los sectores de la población. En este punto, como deriva de la cogestión adaptativa de cuencas, es de suma importancia generar articulación desde los actores locales, con el fin de crear esfuerzos para la puesta en marcha de las medidas propuestas en este trabajo.

Por último, es importante destacar que los volúmenes disponibles según los resultados no garantizan la calidad del servicio por parte de los entes administradores, ya que la insostenibilidad en un futuro será acelerada por la contaminación de las fuentes, por lo cual es necesario garantizar el saneamiento del recurso desde su administración, como aspecto fundamental.

### **5.6.2 Evaluación de la huella verde multisectorial**

Por su parte, el índice de escasez de agua verde está dado por la memoria de cálculo trabajada mediante el método de Thornthwaite (ver memoria de cálculo adjunta), según los datos especificados en la ecuación 11.

El resultado obtenido es 0.8, lo cual indica que la demanda se encuentra en cercana competencia con la disponibilidad de agua verde, relacionada directamente con el fenómeno de la evapotranspiración potencial, condicionada a su vez por las lluvias y temperaturas (Arévalo, D. 2013). Es este sentido, en un escenario de cambio en los sistemas naturales, existen dos factores esenciales a tener en cuenta que determinan la disponibilidad de agua verde; por un lado, el aumento de la temperatura media de la tierra, y por otro, la variabilidad de la precipitación para Costa Rica.

La información contenida en el estudio de escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica (IMN *et al.*, 2016) generaliza la problemática del desarrollo entre el 2030 y 2050 de un patrón más seco en el invierno, pero más húmedo en verano. Esto quiere decir que, si bien se espera que uno de los cambios sea la presencia de lluvia durante los meses de época seca, los niveles de precipitación disminuirán de manera estricta en la época lluviosa.

Según lo anterior, y teniendo en cuenta lo estrecho que se encuentran los valores de disponibilidad de agua verde y su demanda actual, este fenómeno representa, para el sistema agrícola y pecuario, un punto de insostenibilidad cercano en el tiempo. El IPCC en su informe 2019, titulado “Calentamiento global de 1,5 °C” determina que este ligero aumento de la temperatura media mundial pone en riesgo a tres sectores, principales: energía, alimentación y agua. Lo anterior influenciado de manera directa por la vulnerabilidad espacial y temporal en la que se encuentren las zonas (IPCC, 2019).

Además de la deficiencia de precipitación mencionada, el aumento de temperatura genera afectaciones en el rendimiento de los cultivos, estos dos factores comprometen la seguridad alimentaria, y resaltan tres soluciones radicales, según el *Manual de Producción de Cultivos* (FAO, 2014). La primera es la intensificación como incremento de producción; la segunda, los cambios de cultivos, es decir, pasar de diversificación productiva a monocultivos; y por último, la extensificación, lograda por la incorporación de nuevos terrenos para siembra. Si bien no es posible, ya que se encuentra evidenciado el fenómeno inverso, donde cada vez se reduce más el área de siembra, se deduce como adecuada la práctica de la intensificación, la cual tiene, a su vez, dos rutas de acción en la microcuenca: la implementación de mejoras en las prácticas agrícolas, y el aumento del uso de insumos como fertilizantes, pesticidas, entre otros productos químicos.

Desde este análisis, se puede determinar que la disponibilidad de agua verde será la más amenazada por la variabilidad climática, y generará, además, una mayor presión en la extracción de agua azul para ser usada como riego. Por lo anterior, el sector agrícola sobresale como el que mayor capacidad de adaptación al cambio climático requiere para persistir, asegurar la disponibilidad de alimento y la gestión integral del recurso hídrico en la zona.

### **5.6.3 Evaluación de la huella gris multisectorial**

Respecto a calidad de agua, capacidad de asimilación de contaminación en los cuerpos de agua del río Porrosatí y determinación del nivel de contaminación (NCA), se utilizó la expresión definida en la ecuación 12.

Para el caso en estudio, se demuestra el alto impacto que existe en el río Porrosatí y sus afluentes, pues el resultado expresa que la capacidad de dilución de los contaminantes se superó 63 veces, principalmente por el alto impacto que tiene el fósforo y el nitrógeno a muy bajas concentraciones en los ecosistemas acuáticos, donde aceleran los procesos de eutrofización que conllevan a su total deterioro por la escasez de oxígeno. El dato resultante se encuentra también justificado en la falta de infraestructura de saneamiento con la que cuentan los entes administradores del recurso en la microcuenca y que conlleva que las aguas grises lleguen al cuerpo receptor con nulo tratamiento.

Otro de los factores críticos es la baja tolerancia de los cuerpos receptores a elementos como el fósforo y el nitrógeno, los cuales, aun en concentraciones muy bajas pueden tener repercusiones críticas sobre la vida acuática. Para el caso de sector agrícola, se presenta una dependencia en el uso de agroquímicos con estos compuestos, los cuales, posteriormente, mediante escorrentía, llegan a los ríos; asimismo, el sector pecuario se caracteriza por la presencia de estos en su vertido, debido a procesos de lavado de heces y orina poco eficientes, dependientes de excesivas cantidades de agua para su realización. Estas grandes cantidades de agua dulce, llamada de servidumbre, en el sector, se contaminan y amenazan la disponibilidad del recurso hídrico para fines básicos de alimentación y subsistencia humana, representando un problema que toma cada vez más protagonismo, y se refleja en situaciones a las que se les debe empezar a prestar más atención, como lo son enfermedades causadas por la ingesta de agua con contaminantes químicos, sustancias formadas por subproductos de reacción y acumuladas en el suelo y la necesidad que estas nuevas situaciones representan para los tratamientos químicos requeridos para la potabilización del agua; por lo que la diversificación de acciones de saneamiento de las aguas y utilización de procedimientos de limpieza aptos en el sector agrícola, son una necesidad inmediata (Cantero, D; Cuellar, L; Maldonado, G; & Solano, S. 2018)

Además de su presencia en los vertidos, estos elementos tienen la característica de almacenarse en el suelo, por lo que sabiendo que gran parte de los territorios dentro de la zona alta de la microcuenca, misma en la que se desarrollan estas actividades, constituyen

zonas de potencial recarga, existe la necesidad de prestar especial importancia al monitoreo de la calidad del agua subterránea por la contaminación de estos elementos.

#### **5.6.4. Análisis socioeconómico**

La evaluación de la sostenibilidad de la HH demanda el análisis socioeconómico como factor determinante del consumo, la protección y la asignación del recurso dentro del territorio que se estudia. Para efectos de este proyecto, la estabilidad económica se visualiza desde el desarrollo, como el mejoramiento del bienestar humano y la equidad social, trabajando en la escasez de recursos naturales.

El agua como derecho humano inalienable dinamiza el accionar de los entes encargados del recurso hídrico, que deben, como responsables, buscar el acceso del recurso a la población, en cantidad y calidad. Por su parte, el agua como bien económico permite a los ejecutores de la distribución obtener ingresos económicos básicos, con el fin de cumplir el derecho humano ya mencionado.

Respecto a lo anterior, se percibe un enorme vacío entre lo que se debe hacer y lo que se hace. Se tiene ya mapeada la disponibilidad del recurso hídrico en la unidad lógica, lo que asegura el desarrollo socioeconómico de la zona; sin embargo, no se tienen en la totalidad de la microcuenca los instrumentos para determinar lo que la población consume, por lo cual en estos sectores no se conoce el valor económico de esta demanda, y como consecuencia secundaria y no menos importante, no se puede medir el uso de fondos públicos para el correcto mantenimiento de los sistemas de distribución en las comunidades.

Es un hecho que derivan de esto problemas sociales como intermitencia en la recepción de agua potable a los hogares y comercios, se vulnerabilizan aún más poblaciones como personas discapacitadas, población infantil, mujeres embarazadas, migrantes, y personas adultas mayores, ya que según HelpAge International. (2015), las enfermedades de alto riesgo que padecen hombres y mujeres de más de 65 años y la reducida capacidad de

movilidad se pueden potenciar con el estrés causado por la necesidad de acceso a comida y agua de calidad, siendo cada vez más complicado.

Ahora bien, los cambios de uso del suelo en la microcuenca muestran cómo con el paso del tiempo se da una reconversión de actividades; es decir, la construcción de zonas residenciales y comerciales va sustituyendo los espacios de cultivo agrícola de la zona. Afectaciones directas o indirectas derivadas de este escenario permiten determinar la amenaza que esto significa para la recarga de agua en el acuífero que, además de abastecer a la población de la microcuenca, sostiene en la actualidad el consumo de más del 50% de la Gran Área Metropolitana del país. Esta reconversión de utilización del suelo, para el sector agrícola es un gran reto; según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en su estudio sobre perspectivas agrícolas 2013-2022, menciona que el espacio disponible para siembra está disminuyendo y el costo de producción con este factor aumenta, más aún si los terrenos utilizados son alquilados; además, el consumo de los fertilizantes se incrementa tanto en uso como en precio, así como todos los insumos de producción agrícola, estos gastos se reflejarán en el precio que tienen los productos en el mercado, situación que será determinante en la compra de alimentos básicos para familias de escasos recursos.

De acuerdo con la evaluación de los resultados, la pérdida de biodiversidad natural, disminución de zonas de reforestación, incapacidad del suelo para la infiltración, así como la impermeabilización y la erosión, convierten a mediano plazo al lugar en un “hot spot” ambiental; o sea, un punto crítico en el que se pone en riesgo no solo la disponibilidad de agua, sino también las actividades humanas. El saneamiento, por su parte, constituye un eje trascendental para el desarrollo social y económico de la microcuenca, pues las actividades productivas se ven condicionadas por la disponibilidad de agua para su desarrollo; además, este repercute directamente sobre la salud de la población, por lo que define su calidad de vida.

Como se mencionó en los antecedentes de este proyecto, las enfermedades provocadas por la proliferación de vectores producto del manejo inadecuado de las aguas residuales generan enfermedades que se traducen en un gasto económico. Lo anterior denota la necesidad de establecer un control eficiente y aumentar las zonas de cobertura con

alcantarillado sanitario, con lo cual se lograría desviar el ahorro económico producto de la disminución de la atención a la salud hacia el desarrollo de medidas de adaptación al cambio climático. La situación requiere mayor atención si se toma en cuenta que los acueductos dentro de la microcuenca dependen, en gran medida, de las tomas superficiales, las cuales tienen mayor riesgo de ser contaminadas por las aguas residuales.

Otro de los problemas detectados es la falta de fiscalización, pues aunque los vertidos a nivel nacional son regulados por MINSA, solo 6 de los 656 comercios que aparecen registrados en las patentes comerciales municipales, reportan la calidad de su vertido en el sistema SIROAR. Asimismo, la productividad es también otra variable que se ve afectada por la disminución de la disponibilidad de agua producto de su contaminación, como se ha mencionado, existe gran parte del territorio dentro de la microcuenca dedicado a actividades agropecuarias, que requieren agua en cantidad y calidad de los cuerpos receptores para actividades como el riego; además, el crecimiento previsto en el sector comercial se ve limitado por la competencia del recurso, esto condiciona las oportunidades de trabajo y, en general, el desarrollo de los cantones que ocupan la microcuenca.

Es indispensable la gobernabilidad como un sujeto de cambio, debe ser capaz de identificar las necesidades, los retos y los inconvenientes tanto de la gestión del recurso hídrico como de las aguas residuales, para buscar con esto el desarrollo de soluciones que por el momento y como punto crítico para accionar, apunten a la reducción de la contaminación de fuentes de agua y cuerpos receptores, así como a la generación de estrategias de saneamiento acordes a las realidades de cada territorio.

## **6. Medidas de adaptación al cambio climático para los sectores de la microcuenca del río Porrosatí**

Las medidas de adaptación planteadas en este capítulo, como cambio destinado a mejorar situaciones derivadas de diversos impactos, busca en la microcuenca del río Porrosatí:

- Generación de capacidades
- Uso de mecanismos innovadores
- Gestión de los recursos existentes para el lograr el bienestar del entorno natural y humano desde la resiliencia.

El desarrollo de la capacidad de adaptación natural es lo que ha permitido, a lo largo de los años, la dinámica de la vida de los sistemas naturales y humanos actuales; sin embargo, y como se ha mencionado en el proyecto, es necesaria la planificación de medidas de adaptación al cambio del clima, basadas en las realidades de los territorios, permitiendo la generación de acciones factibles para su aplicación, con el fin de reducir la vulnerabilidad, en este caso en particular, que posee el recurso hídrico de la microcuenca de río Porrosatí, y de minimizar los impactos en las poblaciones, zonas y sectores del territorio.

Las medidas de adaptación se dividen según cada sector de estudio, con el propósito de especificar sistemas acordes a la problemática expuesta; además, se desarrollan desde la adaptación gradual, la cual busca conservar la esencia e integridad de las actividades de cada sector así como de la adaptación transformativa, con la que se influye en medidas que logren un cambio, real y adecuado, de los sistemas socioecológicos del territorio.

### **6.1. Medidas de adaptación para el sector domiciliar**

- Formar redes de seguridad social en torno al recurso hídrico

Las redes de seguridad social permiten enfocar el trabajo en programas de transferencia, ya sea de conocimiento, tareas o gestión de los recursos naturales. Es indispensable que

en la microcuenca se busque la gestión integral del recurso hídrico, incluyendo como parte de los actores principales a la población de los diversos distritos. Parte del accionar comunitario ideal es la aplicación de conocimiento de la zona de manera voluntaria, organización de campañas en busca del saneamiento y la promoción de prácticas de consumo de agua potable de forma adecuadas.

- Colocación de micromedición en el sector de Santa Bárbara que no lo posea

Es indudable la necesidad que se tiene de contabilizar el consumo de agua en la zona y, con esto, resguardar el recurso disponible, en miras al razonamiento y la gestión financiera que la administración del recurso requiera.

- Articulación de los entes administradores del recurso hídrico

La relación interinstitucional respecto a gestionar y administrar el recurso hídrico es la base medular del éxito de las acciones en relación con el tema. Con esto, no se influye únicamente entre entes encargados del agua en la microcuenca, sino también en empresas que, por medio de su responsabilidad social, así como instituciones de educación, desarrollen, de manera organizada, estudios que evalúen e identifiquen las nuevas amenazas del recurso hídrico con el paso de los años, así como la ruta adecuada para la prevención de cada riesgo. Esta medida, a su vez, se dirige a la generación de capacidades de las personas tomadoras de decisiones y de la población en general.

- Destinación de fondos públicos para investigación e innovación

Desde la visión comunitaria, se pueden organizar los entes encargados del recurso, en su mayoría, gubernamentales, y destinar un fondo económico que permita, a nivel de unidad lógica, invertir en innovación tecnológica, con miras a aplicar las recomendaciones de los estudios realizados en el territorio.

- Promoción de tecnologías domiciliarias, como las válvulas de bajo caudal para los inodoros

Se pueden crear alianzas desde los entes administradores del agua con el sector comercial, para obtener descuentos en compras de tecnologías de bajo consumo de agua, como los servicios automatizados, entre otras adaptaciones, para las personas que viven en los distritos pertenecientes a cada asociación. Esto potencia, además, la oportunidad de que los comercios apliquen puntualmente su responsabilidad social en la parte socioambiental.

- Control de fugas y acometidas ilegales

Las pruebas de estanquidad consisten en introducir agua o aire a una presión determinada a la tubería de distribución y monitorear qué tan rápido cae dicha presión, por lo que, a través de estas, se pueden detectar puntos de fugas o acometidas ilegales. Es por esto que los entes administradores deberán programar, de manera periódica, muestreos en puntos aleatorios de la red de distribución para realizar este monitoreo.

Para llevar a cabo esta medida, es importante que los entes cuenten con sus sistemas de distribución inventariados y cartografiados. Como recomendación, se propone que estas pruebas inicien por los puntos más antiguos de la red.

## **6.2. Medidas de adaptación para el sector agrícola**

- Organización de grupos de apoyo agrícolas desde el MAG o el INDER

La finalidad de la creación de alianzas en el sector sería la base organizativa para la transferencia de conocimiento. Se pretende, además, que esta organización de pequeños y medianos productores y productoras, busquen asesoría en sus actividades. Este puede ser el inicio de alianzas para la creación de bancos de semillas, búsqueda de fondos de inversión que les permitan aplicar nuevos sistemas tecnológicos en sus fincas, así como alianzas productivas y de intercambio.

- Implementar el uso de modelos computacionales de simulación de crecimiento de cultivos

Derivado de la medida que plantea la organización de las personas agricultoras por medio de la guía de las instituciones que coordinan el sector, se puede el uso general de modelos computacionales que permitan analizar de manera integral el comportamiento del cultivo respecto a su rendimiento y variables del clima actual y futuro, como lo son la temperatura, precipitación y radiación solar en la influencia de parámetros determinantes del suelo, como acidez, oxígeno, y de los cultivos, como niveles de azúcar, texturas, entre otros.

- Medición semestral de los nutrientes del suelo en cada cultivo

Los eventos intensos de descarga de precipitación provocan saturación en el suelo e imposibilitan las reacciones químicas por falta de oxigenación, ya que el suelo no tiene capacidad de acción. La constante medición es una medida preventiva de control debido a los escenarios ya previstos a futuro respecto a la lluvia esperada en época seca y lluviosa, permitiendo gestionar a tiempo, y de manera no agresiva, la calidad del suelo dependiendo de cada cultivo.

- Uso de herramientas agrícolas para contención de eventos extremos

El mantenimiento del terreno es tan importante como su preparación inicial para la siembra. Entre las herramientas capaces de controlar la saturación del suelo se encuentra la creación de drenajes simulando represas de agua, con lo cual el exceso de líquido será conducido por canales, y retenido, y su liberación según necesidad será controlada; incluso, hasta puede almacenarse el recurso para su utilización posterior. Otra herramienta propuesta es el uso del plástico agrícola de termorregulación, el cual actúa reteniendo el agua del suelo cuando las temperaturas son elevadas y, a su vez, cuando se presentan grandes cantidades de lluvia en periodos cortos, funciona como barrera de contención, pues desvía el líquido a los drenajes antes mencionados.

- Utilización de plástico de termorregulación como medio para eliminar el uso de herbicidas

Además de ser una herramienta que controla la temperatura del suelo, tiene como beneficio adicional la eliminación y/o la obstrucción del crecimiento de maleza, lo que

reduce considerablemente el uso de herbicidas y evita, a su vez, la contaminación tanto de cuerpos de agua como de las fuentes de la microcuenca. Esta medida de adaptación es capaz de eliminar el 60% de la contaminación de fósforo y nitrógeno con la que se recarga la microcuenca.

- Utilización de abonos de liberación lenta

Los abonos de liberación lenta en los cultivos tienen la capacidad de alimentar de nutrientes a la planta de manera constante y son resistentes. Por lo general, la utilización de estos abonos se basa en la versatilidad del producto de liberar la sustancia cada cierto tiempo y, a su vez, su estructura le permite resistir periodos intensos de precipitación o exposiciones directas al sol. Con esto se evita que los eventos meteorológicos degraden o arrastren el producto, asegurando principalmente dos situaciones: el uso medido de fertilización, capaz de quedar en el sitio con acción prolongada, lo que disminuye considerablemente el riesgo a la contaminación de las fuentes de agua, y el ahorro económico que representa la constancia de acción, con una utilización menor de sustancia, que si se tratara de un fertilizante líquido.

- Utilización de sistemas de riego de alta eficiencia

Las mejoras en la utilización de tecnologías de riego son indispensables como medida de adaptación. Aunque en la microcuenca, según el censo agropecuario, es bajo el porcentaje del sector agrícola que utiliza riego en sus cultivos, este cada vez será más necesario, debido a los cambios del clima esperados. Entre los tipos de riego recomendados, por su alta eficiencia y ahorro de agua, están la microaspersión y riego localizado (por goteo).

Otras opciones adecuadas son la construcción de canales de conducción o estanques acumuladores de agua, para utilización en riego. En este caso, se debe asegurar muy bien la calidad del agua en determinado periodo de tiempo.

- Programación de riego con información del clima en tiempo real

Por medio de diversas herramientas, y según las horas sol, la humedad y precipitación esperadas, ya sea durante el día o la semana, el sistema adecúa, según el requerimiento hídrico del cultivo, el agua que requiere ser provisionada. La utilización de tecnología computacional, en articulación con instituciones que generan información como el IMN o las universidades, puede significar una alianza capaz de reducir el riesgo de la incorrecta utilización de agua y la promoción del ahorro del recurso. Estas tecnologías indudablemente requieren inversión, que puede ser canalizada por medio de proyectos internacionales, bajo el enfoque de adaptación al cambio climático para resguardar la seguridad alimentaria de la zona.

- Utilización de especies de cultivo con mayor tolerancia al estrés hídrico

Con esto no solo se visualiza la utilización de semillas bajo los mismos sistemas de siembra, sino que se abren las puertas a la diversificación de las actividades productivas. Con el uso de semillas de mayor tolerancia, también se prevén pequeños cambios en las formas de cultivar, que pueden asegurar la actividad bajo diferentes condiciones.

### **6.3. Medidas de adaptación para el sector pecuario**

- Producción de abonos orgánicos *in situ*

La utilización del estiércol de los animales en la producción de abono orgánico asegura principalmente la salida de la corriente de contaminación el nitrógeno y el fósforo en cuerpos receptores. Además, constituye una fuente natural y gratis de estos dos elementos como base de la fertilización en pastizales o, con un mayor tratamiento, en cultivos de la zona.

- Implementar la cosecha de agua de lluvia para aseo de galerones

La instalación de tanques de cosecha de agua de lluvia para el aseo de galerones en época seca significa una reducción en el consumo del recurso hídrico por parte del sector pecuario, además de una solución inmediata para la estación seca que se vive en los meses de verano.

- Separación y/o recolección de la boñiga en los establos, antes de utilizar agua para aseo

Separar la boñiga para hacer abono, antes del lavado, disminuye la carga de contaminantes en el agua residual. La recolección puede ser manual o con la instalación de parrillas en el caño de salida, con cedazo muy fino para retener sólidos finos.

- Manejo del sistema caprino como actividad pecuaria principal

Esta medida asegura que las personas productoras pecuarias de la zona en los próximos 20 años aseguren su actividad, previendo las condiciones climáticas y usándolas a su favor. De la producción caprina se aprovecha la leche, carne, piel y estiércol, siendo 100% rentable. Esta especie requiere espacio reducido, además, es capaz de vivir y desarrollarse sin problemas en áreas áridas y semiáridas, lo cual quiere decir que es capaz de consumir menos recurso hídrico o requerir menos agua que el ganado vacuno y su rendimiento no se ve afectado o, por lo menos, es aceptable.

- Incorporación de bebederos automatizados en las porquerizas

El uso de tecnologías como la tetina o chupeta asegura la disponibilidad de agua fresca y limpia para los animales, además de representar un ahorro en el consumo de agua para la finca.

#### **6.4. Medidas de adaptación para el sector comercial**

- Instalación de sistemas de tratamiento de bajo costo

Como se describió en capítulos anteriores, existen 136 comercios dedicados a la venta y preparación de alimentos. Estos generan aguas grises, que, por sus características, presentan grandes cantidades de grasas, producto del cocinado y lavado de utensilios. La exigencia e instalación de trampas de grasa constituye una medida fácil y de bajo costo

para el tratamiento de este parámetro; además, los desechos generados pueden ser dispuestos en las granjas porcinas, para incorporar a la dieta de los cerdos, con lo que se genera valor agregado y se contribuye al sector pecuario.

- Fortalecimiento de la fiscalización del recurso desde las municipalidades

Existe la necesidad de crear coordinación entre las municipalidades y MINSA, con el fin de establecer cuáles de los comercios registrados en las patentes, por el tipo de actividad y agua que generan, requieren la instalación de sistemas de tratamiento de sus aguas. Además, es importante que los gobiernos locales destinen presupuesto a ejercer control sobre los vertidos, por medio de inspecciones periódicas, además del control estatal ya realizado por MINSA.

- Generar códigos de construcción eficientes

Esta metodología es muy común en países desarrollados y contribuye a que las nuevas edificaciones del sector comercial tomen en la cuenta la adaptación al cambio climático en sus diseños. Así pues, se exige que un porcentaje importante de estas sea cubierto por zonas verdes, con el propósito de contribuir a la infiltración del agua.

- Capacitación a pequeños empresarios

Existe la necesidad de que, desde la municipalidad y los entes rectores, se capacite a los pequeños empresarios del sector para conocer su forma de consumo; a través de esto, podrán establecer indicadores según el servicio que brinden (litros por plato, por huésped, por producto, por cliente) y establecer metas y objetivos que los ayuden a minimizar el consumo del recurso y, con ello, la generación de aguas residuales.

- Concientización y uso de sistemas eficientes en hoteles

A través de la instalación de sistemas eficientes, los hoteles pueden ahorrar importantes volúmenes de agua, por lo que se considera pertinente migrar grifos, duchas, lavandería y

otros puntos críticos de consumo de agua hacia nuevas tecnologías. Estos sistemas recuperaran la inversión por sí solos con el paso del tiempo. Por otro lado, la capacitación del personal y la colocación de afiches en diferentes sectores que generen concientización de los huéspedes constituye también una medida fácil de aplicar y con buenos resultados.

- Responsabilidad social extendida

Esta se entiende como la responsabilidad que tienen los productores después de que el ciclo de vida de su servicio o producto se cumple, por lo cual, a través de esta tendencia, se deberá involucrar a los comercios de la zona para que financien y participen en campañas de educación ambiental, limpieza de ríos y parques entre otras. Esta metodología debe ser incentivada como una actividad que genera valor agregado en el comercio y armoniza su operar, día a día, con el resto de la comunidad donde se desenvuelve.

- Cosecha de agua de lluvia

Gran cantidad de las tomas de agua dentro de la microcuenca son superficiales. Actualmente, durante la época seca, muchas de estas nacientes disminuyen radicalmente su caudal, afectando la disponibilidad de agua. A esto se le debe contextualizar los escenarios de disminución de lluvia proyectados, por lo que, a nivel comercial, se hace necesario que los entes administradores promuevan el uso de tanques y sistemas para la cosecha de lluvia que, en verano, cuando la disponibilidad de agua se vea racionada y durante el invierno, permitirán reducir el consumo de agua potable. Otro punto importante es que, si se fortalecen estos sistemas, se disminuye el uso de químicos y gastos económicos al ser necesaria la potabilización de un menor volumen agua, dinero que puede ser destinado a campañas de uso racional del recurso y saneamiento.

- Reutilización del agua

La reutilización del agua luego de su tratamiento constituye una herramienta fundamental para disminuir el consumo de agua que se necesita para generar bienes y servicios. Es necesario, una vez se fortalezcan los sistemas de saneamiento, que las organizaciones

aprovechen este recurso para su uso en servicios sanitarios y otras actividades como riego, lavado de autos y exteriores.

### **6.5. Medidas de adaptación generales para la microcuenca**

- Desarrollar un análisis de riesgos de las tuberías de distribución de agua potable.

Aunque ya se prevé que las asociaciones y los acueductos municipales les den mantenimiento a las tuberías, no está de más identificar, mediante un análisis de riesgo, el riesgo de fugas y desperdicios; por ejemplo, perforación de tubos por raíces, tubería a un nivel del suelo muy alto, ubicación de construcciones que representan un riesgo a la conducción del recurso, entre otros.

## 7. Conclusiones

- De los sectores que abarca el estudio, se determina el agrícola como el más vulnerable ante la variabilidad y el cambio climático, esta demanda el mayor volumen hídrico (agua de lluvia y agua dulce) con un total de 7 425 145,75 m<sup>3</sup> para el año de estudio.
- El sector agrícola constituye el de mayor proporción de la huella gris debido a los importantes impactos que tienen los herbicidas y fertilizantes sobre los cuerpos receptores a bajas concentraciones. Este volumen se contabiliza en 348 158 156,80 m<sup>3</sup> y es seguido por el sector pecuario con 270 724 150 m<sup>3</sup>, producto de las altas concentraciones de N en las excretas de los animales.
- Los entes extractores no identifican con mecanismos adecuados (micromedición) la insuficiente rentabilidad del ejercicio de sus funciones y los impactos ambientales derivados de la mala praxis; por tanto, no se da una gestión integral del recurso hídrico de manera tal que se trabaje en la articulación del quehacer de los actores.
- A través de los datos recopilados, se demostró la incongruencia de información entre instituciones del Estado; sin embargo, esto se puede deber a omisión de la misma por parte de los generadores a los entes rectores como el Ministerio de Salud. Este es el caso de las empresas dedicadas al ganado porcino, que deben presentar reportes operacionales y para el año de estudio no se registran datos.
- El sector comercial de la microcuenca está conformado mayoritariamente por actividades de servicio, es decir, no existen actividades industriales para la generación de bienes, esto provoca que la mayoría de los vertidos sean constituidos por aguas residuales ordinarias y explica el reducido volumen de la huella hídrica gris para este sector
- En el sector comercial, la información del sistema SIRROAR del Ministerio de Salud se presenta para el año 2015 en adelante y se registra únicamente para el

cantón de Santa Bárbara, de los dos en estudio, por lo que fue necesario recurrir a las municipalidades de los dos cantones para solicitar las patentes.

- Como se comprobó, por medio de la valoración de la huella hídrica, la oferta de agua satisface las necesidades de agua azul de todos los usuarios; no obstante, frente al análisis en relación con el cambio climático, la afectación se verá reflejada en los medios de recarga y periodos de precipitación.
- Como se demostró, existe un gran impacto de las aguas residuales sobre la matriz ambiental. Específicamente, los volúmenes vertidos han superado 63 veces la capacidad de dilución de los contaminantes en el cuerpo receptor, para el 2015.
- Según se calculó, actualmente la huella verde se encuentra en estrecha competencia con la disponibilidad del recurso, factor que puede empeorar con la disminución de lluvias y aumentos de temperaturas esperados a futuro.
- El indicador para la evaluación de la sostenibilidad del agua verde muestra un resultado de 0,8, lo cual indica que la demanda de agua está cercana a entrar en competencia directa con la disponibilidad de agua verde, por lo tanto, será la más amenazada por la variabilidad climática y generará, además, una mayor presión en la extracción de agua azul para ser usada como riego de cultivos y pastizales.
- Las medidas de adaptación propuestas en materia de recurso hídrico están pensadas desde la planificación gradual y transformativa, con el fin de aprovechar las oportunidades beneficiosas de estos cambios y buscar siempre la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano.

## 8. Recomendaciones

- Es indudable la necesidad de contabilizar en la totalidad de la microcuenca el consumo de agua y contar con tecnología de medición de consumo, en miras del razonamiento y la gestión financiera que la administración del recurso requiera.
- Es indispensable la gobernabilidad del agua en la microcuenca, incluyendo un diálogo entre el sistema político, los entes administradores y la sociedad.
- Es importante fortalecer la comunicación y crear alianzas entre los entes que manejan el recurso dentro de la microcuenca, para lograr aumentar eficientemente las coberturas sanitarias y, con esto, garantizar la salud humana y el desarrollo socioeconómico futuro de los distritos abarcados.
- En miras de una adecuada gestión integral del recurso hídrico, se recomienda, además de utilizar de forma racional los volúmenes de agua para satisfacer las demandas de todos los sectores, la redirección de fondos públicos destinados a la protección de áreas silvestres y el entorno escénico.
- Para que a futuro, la microcuenca del río Porrosatí sea una zona estable económicamente y su crecimiento no se vea afectado por la falta de recursos, se requiere enfocar los planes de desarrollo cantonales al mejoramiento del bienestar socioambiental, con atención en la creciente escasez de los recursos naturales, o bien, a la regulación de las actividades que ponen en riesgo la contaminación de las fuentes de agua.
- Es necesario para futuras investigaciones realizar proyecciones demográficas para 2030 y 2050, con el fin de cuantificar los aumentos en la demanda del recurso y compararla con los escenarios de disminución en la disponibilidad.

- Se recomienda el desarrollo de un proyecto de graduación o práctica interdisciplinar que guíe, organice y busque la ejecución de lo planteado en el presente proyecto.
- El saneamiento deberá representar un punto de especial interés para las municipalidades y demás entes rectores, ya que la falta de información no permitirá una adecuada vigilancia y resguardo de los sistemas naturales, como los cuerpos de agua superficiales.
- Es necesario poner especial atención a los escenarios climáticos proyectados para la región, y la presión que la actividad agrícola de la zona enfrenta, lo que hace urgente la necesidad de buscar sistemas agrícolas resilientes en el tiempo.
- Con los resultados del sector agrícola, se hace visible la necesidad de empoderamiento y capacitación de los agricultores locales en miras de migrar de los sistemas actuales a otros más eficientes, en términos de producción y requerimientos de riego.
- Instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería y el Instituto de Desarrollo Rural son actores claves en la búsqueda del mejoramiento de los sistemas agrícolas. Es necesaria la reforma tanto administrativa como financiera, de los proyectos que se ejecutan desde estos dos organismos técnicos, y del acompañamiento a las personas agricultoras, buscando la sostenibilidad y diversificación del sector, así como su adaptación al cambio climático.

## 9. Bibliografía

Agencia de Servicios Agropecuarios. (2012). *Rendimiento de los cultivos del sector Central Occidental*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo y Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal y Ministerio de Agricultura y Ganadería del Salvador y Organización Mundial de la Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (Eds.). (s.f.). *La Microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales*. Recuperado de <http://www.fao.org/climatechange/30329-07fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>

Agroder y World Wildlife Fund. (2012). *Huella Hídrica en México en el Contexto de Norteamérica*. Recuperado de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/02/Libro-Huella-hidrica-en-Mexico.pdf>

Aldaya, M., Chapagain, A., Hoekstra, A. y Mekonnen, M. (2011). *The Wather Footprint Assesment Manual, Setting The Global Standard*. Wather Footprint Network. London, UK. ISBN 978-1-84971-279-8.

Alfaro, J. Blanco, K. Morera, C. 2015. *Indicadores ambientales 2015*. Programa Observatorio Ambiental-UNA: Heredia, Costa Rica. Pág 21. Recuperado de <http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/691/%C3%81reas%20Tem%C3%A1ticas%20Recurso%20H%C3%ADrico%20y%20Biodiversidad.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Alonso, A. y Camargo, J. (2007). *Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático*. España. Asociación Española de Ecología Terrestre. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Recuperado de [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7673/1/ECO\\_16\(2\)\\_11.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7673/1/ECO_16(2)_11.pdf)

Álvarez, A., Melo, S., Ordóñez, D., Riveros, L. y Romero, G. (2016). *Construcción de la matriz de contabilidad social de agua como insumo económico*. Colombia: Dirección de Estudios Económicos, Departamento Nacional de Planeación.

Álvarez, A., Menchaca, S. y Silva, S. (2011). *Agua: análisis del consumo de agua en un restaurante Mexicano*. Tijuana. Recuperado de <https://es.slideshare.net/SusanaSilva2/consumo-de-agua1>

Álvarez, A., Morábito, J. A. y Schilardi, C. (2016). *Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (Zea mays) en provincias del centro y noreste Argentino*. Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias. 48. Argentina..

Antón, X. y Salgado, A. (s.f.). *Cambio Climático. ¿ha llegado ya al mar de Galicia?* Recuperado de <http://biblioteca.climantica.org/resources/592/ha-llegado-ya-al-mar-de-galicia.pdf>

Araya, G. (2012). *Manual de recomendaciones para el cultivo de cebolla (Allium cepa L.)*. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria.

Arce, J., Villalobos, L. y WingChing, R. (2013). *Producción de biomasa y costos de producción de pastos Estrella Africana (Cynodon nlemfuensis), kikuyo (Kikuyuocloa clandestina) y Ryegrass Perenne (Lolium perenne) en lecherías de Costa Rica*. Revista Agronomía Costarricense, volumen 37(2): 91-103.

Arcila, J. (s.f.). *Crecimiento y desarrollo de la planta de café*. Colombia: CENICAFE.

Arévalo, D., Cascante, R., Castro, C., Estrada, A., González, J., Mancilla, P., Moreira, D., Parada, G. y Valencia, V. (2017). *Evaluación de la huella hídrica en cuencas hidrográficas: experiencia piloto en Latinoamérica*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Good Stuff International.

- Arévalo, D., Cascante, R., Castro, C., Kuiper, D., Poulussen, A. y Zárate, E. (2013). *Guía para la evaluación de la huella hídrica en cuenca hidrográfica*. Colombia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia.
- Baethgen, W. y Giménez, A. (2004). *La Variabilidad Climática, el Cambio del Clima y el Sector Agropecuario*. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Barrientos, I. (2012). *Propuesta de análisis de rentabilidad para una finca productora de leche, basada en un estándar de unidad productiva láctea, elaborado conjuntamente con la cooperativa de leche Dos Pinos R.L.* (tesis de Bachillerato/Licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Belén, M., Díaz, K., Falavigna, A. y Kirschenbilder, E. (2015). *Cadena espárrago: Producción de diferentes genotipos en su quinto año y comportamiento de poscosecha*. (Trabajo de investigación) Pontificia Universidad Católica, Argentina.
- Bertsch, H. (2009). *Manual de recomendaciones técnicas cultivo de frijol: fertilización*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Bonilla, N. (2009). *Manual de Recomendaciones Técnicas Cultivo de Maíz*. Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Calderón, M., Cerdas, M. y Díaz, E. (2006). *Manual de Manejo Pre y Poscosecha del Aguacate*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Cantero, D; Cuellar, L; Maldonado, G; & Solano, S. (2018). *Factores ambientales y contaminación de fuentes de abasto de agua por nitratos en una zona rural*. ISSN 1579-1734. Cuba. Recuperado de: <https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline->

Cárdenas, G. y Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Revista Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Gloria\\_Cardenas6/publication/262434460\\_Nitrogen\\_in\\_wastewater\\_origins\\_effects\\_and\\_removal\\_mechanisms\\_to\\_preserve\\_the\\_environment\\_and\\_public\\_health/links/5dc42364299bf1a47b1d2686/Nitrogen-in-wastewater-origins-effects-and-removal-mechanisms-to-preserve-the-environment-and-public-health.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gloria_Cardenas6/publication/262434460_Nitrogen_in_wastewater_origins_effects_and_removal_mechanisms_to_preserve_the_environment_and_public_health/links/5dc42364299bf1a47b1d2686/Nitrogen-in-wastewater-origins-effects-and-removal-mechanisms-to-preserve-the-environment-and-public-health.pdf).

Cascante, D., Castro, G., Chavarría, F., Cruz, J., Gelabert, C., Paniagua, W., Sánchez, N., Sibaja, K. y Tejeda, A. (2010). *Impacto antrópico en el Manto Acuífero Barva (Heredia, Costa Rica) con énfasis en el uso del suelo (1992-2006)*. Costa Rica: Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre. Recuperado de <http://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/cuadernos/article/viewFile/208/86>

Castellón, N., Gentes, I., Gómez, S., González, J., Kammerbauer, H. y León, J. (2010). *La cogestión adaptativa de cuencas para la gobernanza local: pautas para las autoridades locales en América Central*. Turrialba, Costa Rica. ISSN 1659-3480.

Castro, M. (2008). *Fundamentos, escenarios y estrategias de mitigación del cambio climático*. Recuperado de [:http://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Boletin%20ECOS/Boletin%205/Fundamentos\\_cambio\\_climatico\\_M.DE\\_CASTRO.pdf](http://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Boletin%20ECOS/Boletin%205/Fundamentos_cambio_climatico_M.DE_CASTRO.pdf)

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2012). *Construyendo territorios climáticamente inteligentes para la seguridad alimentaria y ambiental*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Centro Internacional para la Investigación del fenómeno del niño. (2017). *Variabilidad*

*Climática y Extremos.* Recuperado de [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=573:variabilidad-climatica-y-extremos&catid=98&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=573:variabilidad-climatica-y-extremos&catid=98&Itemid=131&lang=es)

Chacón, A. (2018). *Uso de Tithonia diversifolia como forraje alternativo para la reducción de emisiones de óxido nitroso en excretas de vacas.* Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Recuperado de [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8924/Uso\\_d\\_e\\_Tithonia\\_diversifolia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8924/Uso_d_e_Tithonia_diversifolia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Chapagain, A. y Hoekstra, A. (2010). *Globalización del agua. Compartir los recursos de agua dulce del planeta.* Madrid, Barcelona, Buenos Aires: Fundación AGBAR.

Cisneros, E., González, F., López, T., Martínez, R. y Rey, A. (2015). *Respuesta productiva del café al manejo del riego. Función agua-rendimiento.* La Habana, Cuba: Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542015000400001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542015000400001)

Cleves, J., Martínez, L. y Toro, J. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149-163.

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencia, Cooperación Española, Dirección de Aguas, Dirección de Cambio Climático, Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Comunicación, Ministerio de Planificación y Política Económica, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Viceministro de Aguas y Mares. (2018). *Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2018-2030.* Costa Rica. Recuperado de [http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41091/Version1/Política\\_ADAPTACION\\_24\\_abril.pdf](http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41091/Version1/Política_ADAPTACION_24_abril.pdf)

Connor, R., Franek, A., Hunziker, D. y Koncagul, E. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015. Agua para un mundo sostenible: datos y cifras*. Italia: Organización de las Naciones Unidas (ONU). Recuperado de [http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts\\_Figures\\_SPA\\_web.pdf](http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf)

Cordero, R. (2012). *Especies menores: cabras*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia (UNED). Recuperado de <http://repositorio.uned.ac.cr/reuned/bitstream/120809/527/1/Modulo%20cabras%20resumido.pdf>

Di Rienzo, M. y Fogolin, G. (2017). *Aportes a la gestión de la huella hídrica en la producción de carnes de cerdo: evaluación del uso del agua en un criadero intensivo*.(Proyecto final). Facultad de Química en Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina. Argentina. Recuperado de <https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/13003/Aportes%20a%20la%20gestion%20de%20la%20Huella%20Hidrica%20en%20un%20criadero%20de%20Cerdos.pdf?sequence=1>

Dirección General de Tecnología Agraria. (2003). *Informaciones Técnicas: Nueva estimación del contenido de N en estiércoles*. Fondo Europeo de Orientación y de Garantía Agrícola, Unión Europea. Gobierno de Aragón. Centro de transferencia agroalimentaria Núm 229.

Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. (s.f.). *El café en el mundo*. Recuperado de [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/info\\_sect/image/cafe.docx](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/info_sect/image/cafe.docx)

Fournier, A., Quesada, H. y Vargas, M. (2006). *Aumento de la competitividad de las pequeñas y medianas empresas costarricenses. Lecherías de San Jerónimo de Moravia*. Costa Rica: Centro de Investigación en Protección Animal (CIPA),

Instituto Tecnológico Nacional (TEC).

Garrido, A. y Willaarts, B. (2011). Dimensión política y de gestión de la huella hídrica. *VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua “Ríos Ibéricos +10. Mirando al futuro tras 10 años de DMA*, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Gómez, A., Robles, R. y Sánchez, F (2012). *Cambios en el uso del suelo asociados a la expansión urbana y la planeación en el corregimiento de Pasquilla, zona rural de Bogotá (Colombia)*. Colombia: Instituto de Estudios Ambientales (IDEA). Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcdg/v22n2/v22n2a14.pdf>

Gómez, R. (2017). *Interpretación de análisis de suelo y recomendación técnica de fertilización*. Santa Bárbara, Costa Rica: Agencias de Servicios Agropecuarios (ASA).

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2018). *Glosario. Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsable de políticas: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. ISBN 978-92-9169-351-1

HelpAge International. (2015). *El cambio climático en un mundo que envejece*. Londres. ISBN 978-1-910743-03-4. Recuperado de: <http://www.helpagela.org/silo/files/el-cambio-climtico-en-un-mundo-que-envejece.pdf>

Hernández, A. y Picón, J. (2013). Huella hídrica en tierras secas: el caso de turismo de sol y playa en Guanacaste (Costa Rica). *Revista Ambientico*, 45-46.

Hernández, A. y Ulate, M. (2016). *Determinación del impacto en la calidad del agua en la parte alta de la microcuenca del río Porrosatí, por vertido de aguas residuales, para la realización de planes y acciones de manejo de recursos hídricos*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional. Costa Rica.

Herrera, F. (2009). *Manual de recomendaciones técnicas cultivo de frijol: fertilización*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y Ministerio de Salud (MINS). (2016). *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045 (PNSAR 2016-2045)*. San José, Costa Rica: AyA.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Estudio Nacional de Agua 2014: Sector Porcino*. Bogotá, Colombia. IDEAM. ISBN: 978-958-8067-70-4

Instituto del Café de Costa Rica. (2011). *Guía Técnica para el Cultivo del Café*. Heredia, Costa Rica. CICAPE. ISBN 978-9977-55-041-4

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2017). *Curso: Fundamentos de huella hídrica en la agricultura. Uso del CROPWAT con cultivo anual (arroz)*. Recuperado de <https://vimeo.com/channels/1159562/189068006>

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y Ministerio de Ambiente, Energía y

Telecomunicaciones. (2016). *Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica*. Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de [http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/escenarios\\_de\\_cambio\\_climatico\\_digital\\_0.pdf](http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/escenarios_de_cambio_climatico_digital_0.pdf)

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2017). *Programa de Cambio Climático. Vulnerabilidad y Adaptación*. Recuperado de <http://cglobal.imn.ac.cr/vulnerabilidad-y-adaptacion>

Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2011). *Estadísticas demográficas 2011-2025: Proyecciones Nacionales. Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia, cantón, distrito y sexo. Costa Rica*. Recuperado de: <https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2014). *Censo Nacional Agropecuario*. Costa Rica: (INEC).

Landa, R. Magaña, V. y Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. México. SEMANART. ISBN: 978-968-817-887-4

Magrin, G. (2015). *Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Unión Europea: Naciones Unidas, Santiago de Chile. Recuperado de [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/S1501318\\_es.pdf;jsessionid=EF43C17C167E58C7C6962E386A7D1510?sequence=1](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/S1501318_es.pdf;jsessionid=EF43C17C167E58C7C6962E386A7D1510?sequence=1)

Mariscal, G. (2007). *Tratamiento excretas de cerdo: tecnologías disponibles para reducir el potencial contaminante de las excretas de granjas porcícolas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). México. Recuperado de [http://www.produccionanimal.com.ar/produccion\\_porcina/00produccion\\_porcina\\_general/63-excretas\\_cerdos.pdf](http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_porcina/00produccion_porcina_general/63-excretas_cerdos.pdf)

Martínez, P. y Patiño, C. (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a1.pdf>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2017). *Biblioteca virtual. Ciencia*. Costa Rica: MAG. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/biblioteca-index.html>

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). *Girasol*. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/tec-girasol.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-girasol.pdf)

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). *Maíz*. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/tec-maiz.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-maiz.pdf)

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). *Chile: Capsicum spp (F01-0658chile)*. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658chile.pdf>

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). *Manual de Manejo de Cuencas Módulo I, Conceptos Básicos de Cuencas*. El Salvador: EDECA. Recuperado de [http://www.edeca.una.ac.cr/files/EDECA/Gestion%20desarrollo%20local/VM-Manual\\_de\\_Manejo\\_de\\_Cuencas\\_.pdf](http://www.edeca.una.ac.cr/files/EDECA/Gestion%20desarrollo%20local/VM-Manual_de_Manejo_de_Cuencas_.pdf)

Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC)*. Costa Rica: Editorial Calderón y Alvarado S. A.

Ministerio de Salud. (2016). *Sistema de información SIRROAR: reportes operacionales*. Costa Rica.

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. (2019). *Indicadores Ambientales, Concentración de fósforo total*. Recuperado de [https://www.dinama.gub.uy/indicadores\\_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/](https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/ficha/oan-concentracion-de-fosforo-total/)

Montero, E. (2016). *Escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional. Costa Rica:

Mora, N. (2008). *Agrocadena de café: Producción*. Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Moraña, M. y Slusso, L. (2010). *Relaciones entre biomasa algal y nutrientes en embalses subtropicales de Argentina y Brasil*. *Nuestro Entorno* 3, 50-53 Universidad Nacional de Salta. Recuperado de <http://ineah.unsa.edu.ar/userfiles/downloads/lhawet/vol3/Salusso%20y%20Mora%C3%B1a%202014.pdf>

Moreno, A. y Renner I. (2007). *Gestión integral de cuencas. La experiencia del proyecto regional de cuencas Andinas*. Centro Internacional de la Papa (CIP). Perú. Recuperado de <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/003654.pdf>

Ordóñez, J. (2011). *¿Qué es una Cuenca Hidrográfica?* Perú: Sociedad Geográfica de Lima, Perú. Recuperado de [http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf)

Ordóñez, J. (2011). *Aguas subterráneas y acuíferos*. Lima, Perú: Asociación Mundial para el Agua Suramérica (GWP). Recuperado de: [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/aguas\\_subterranas.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Recuperado de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YJgytETfEnAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=evapotranspiraci%C3%B3n+del+cultivo&ots=u5wqo4KwJ3&sig=ArA3bP6rG2yFFOgiITmMrlVO2to#v=onepage&q=evapotranspiraci%C3%B3n%20del>

[%20cultivo&f=false](#)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2013). *Informe sobre sistemas hídricos. Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma, Italia: ONU.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); & Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). (2013). *Perspectivas Agrícolas 2013-2022*. Universidad Autónoma Chapingo, México. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2013-es](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es)

Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. (2014). *Manual de bioenergía y seguridad alimentaria*. Módulo de recursos naturales: producción de cultivos. Pag 10-11 Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bp865s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2017). *Base de datos CLIMWAT 2.0*. Costa Rica

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2007). *Adaptación al Cambio Climático Centrada en las Personas: Integración de la Perspectiva de Género*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a1395s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas. (2017). *Objetivos de desarrollo sostenible. Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). *Saneamiento*. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>

Ovalle, M. (2012). *Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Linares, región de Coquimbo* (Tesis de Bachillerato).

Universidad de Chile. Chile

Pérez, C. y Shinomi, Y. (s.f.). *Manejo integral de cuencas hidrográficas. Conceptos básicos*. Recuperado de

<http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR32793.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2005). *Manual de Ciudadanía Ambiental Global*. Recuperado de

<http://www.eird.org/publicaciones/doc16967-3b.pdf>

Programa Estado de la Nación. (2016). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Armonía con la naturaleza: Nuevos datos evidencian aumento de la contaminación hídrica* (22<sup>da</sup> ed.). Recuperado de:

[http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/022/EN-22-CAP4.pdf](http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/022/EN-22-CAP4.pdf)

Ramírez, R. (2007). *Recarga potencial del acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. Servicio Nacional de Aguas, Riego y Avenamiento (SENARA)*. Recuperado de

[http://201.199.127.109/textos/E.acuiferos/acuifero\\_valle\\_central/Recarga Potencial Acuiferos Colima Barva VC.pdf](http://201.199.127.109/textos/E.acuiferos/acuifero_valle_central/Recarga_Potencial_Acuiferos_Colima_Barva_VC.pdf)

Reynoso, R., Valdez, J., Escalona, M. y Posadas, H. (2015). *Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztitlán en Hidalgo, México*. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 36(3), 102–111. Recuperado de

<http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v36n3/riha08315.pdf>

Romero, M. (2013). *Rendimiento y Calidad de Producción de Cinco Cultivares de Rosa en el Municipio de Tenancingo, Estado de México* (Tesis de Bachillerato). Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Sibaja, M. (2013). *El crecimiento urbano y la producción hídrica en la cuenca del río Porrosatí, provincia de Heredia, Costa Rica: Valores totales del balance hídrico* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional. Costa Rica.

Valerio, L. (2016). *Huella hídrica. Curso: Cálculo de huellas por componentes*. [Presentación de PPT]. Recuperado de <https://namacafe.org/es/file/229>

Valverde, A. (2016). *La gobernanza ambiental como enfoque para la cogestión adaptativa*. *Integra Educativa* Vol. IX (1), 5-12

Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Ambientales*, 45, 5-12.

## 10. Anexos

### Anexo 1.

*Proporción de usos del suelo en la microcuenca del río Porrosatí*

Uso de la tierra	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Cultivo	10,1	36,1
Bosque	6,7	24,0
Plantación	3,8	13,7
Urbano	3,8	13,5
Pasto	3,6	12,7
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>100</b>

Tomado de Montero, E. 2016

### Anexo 2.

*Población para la porción de cada distrito que abarca la microcuenca*

Distrito	Cantidad de habitantes
Jesús de Santa Bárbara	8 688
San Pedro de Barva	3 144
San José de la Montaña de Barva	3 060
San Juan de Santa Bárbara	2 986
Santa Bárbara de Santa Bárbara	1 702
<b>Total de población de la microcuenca</b>	<b>19 580</b>

Elaboración propia con datos del INEC. 2014

### Anexo 3.

*Caudales totales por distrito según población real.*

Distrito	Consumo m <sup>3</sup> /d
Jesús de Santa Bárbara	1737,6

<b>Distrito</b>	<b>Consumo m<sup>3</sup>/d</b>
<b>San Juan de Santa Bárbara</b>	597,2
<b>San José de la Montaña de Barva</b>	550,8
<b>San Pedro de Barva</b>	471,6
<b>Santa Bárbara de Santa Bárbara</b>	340,4
<b>Total</b>	<b>3697,6</b>

Elaboración propia.

#### **Anexo 4.**

*Datos de precipitación de la estación de Santa Bárbara.*

<b>Mes</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Precipitación efectiva (mm)</b>
<b>Enero</b>	0,4	0,4
<b>Febrero</b>	22,7	21,9
<b>Marzo</b>	0	0
<b>Abril</b>	36,9	34,7
<b>Mayo</b>	169,3	123,4
<b>Junio</b>	220,3	142,6
<b>Julio</b>	242,3	148,4
<b>Agosto</b>	145,4	111,6
<b>Setiembre</b>	283,8	153,4
<b>Octubre</b>	570,2	182,0
<b>Noviembre</b>	294,8	154,5
<b>Diciembre</b>	128,1	101,8
<b>Total</b>	<b>2114,2</b>	<b>1174,7</b>

Elaboración propia con datos del IMN, 2015 (comunicación personal, 2018).

## Anexo 5.

*Datos meteorológicos por promedio mensual para la zona de estudio.*

<b>Mes</b>	<b>T</b> <b>Mín<sup>(2)</sup></b> <b>(C°)</b>	<b>T</b> <b>Máx<sup>(2)</sup></b> <b>(C°)</b>	<b>Humedad<sup>(2)</sup></b> <b>(%)</b>	<b>Viento<sup>(2)</sup></b> <b>(km/d)</b>	<b>Insolación<sup>(2)</sup></b> <b>(h)</b>	<b>Radiación<sup>(2)</sup></b> <b>(MJ/m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>ETo<sup>(1)</sup></b> <b>(mm/d)</b>
<b>Enero</b>	17,4	27,8	62	362,9	8,6	21,9	4,74
<b>Febrero</b>	15,7	29,0	65	285,1	7,7	23,1	5,29
<b>Marzo</b>	15,7	29,3	60	311,0	7,9	23,9	5,52
<b>Abril</b>	16,3	30,0	66	233,3	7,6	22,3	5,13
<b>Mayo</b>	17,1	29,3	75	172,8	5,1	18,4	4,01
<b>Junio</b>	18,4	28,6	79	172,8	3,8	17,5	3,36
<b>Julio</b>	17,5	28,5	77	190,1	4,5	17,8	3,67
<b>Agosto</b>	17,3	29,2	74	190,1	5,8	19,2	3,64
<b>Setiembre</b>	16,9	29,2	81	129,6	4,3	17,6	3,36
<b>Octubre</b>	16,9	29,1	85	112,3	4,4	18,8	3,17
<b>Noviembre</b>	16,6	28,9	81	129,6	5,5	18,4	3,31
<b>Diciembre</b>	16,9	29,7	67	233,3	7,4	19,9	4,01
<b>Promedio</b>	<b>16,9</b>	<b>29,0</b>	<b>72,2</b>	<b>210,2</b>	<b>6,0</b>	<b>19,9</b>	<b>4,10</b>

1. Tomado de FAO, 2017. 2. Tomado de IMN 2015 (comunicación personal, 2018)

## Anexo 6.

*Cultivos sembrados y cosechados en el distrito de San José de la Montaña*

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada</b> <b>hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad</b> <b>de producción hectáreas</b>
Ciprés	263,39	247,89
Café	157,52	149,45
Flores	10,70	10,70

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad de producción hectáreas</b>
Plantas vivas	9,59	9,59
Aguacate	2,50	2,50
Follajes	2,23	2,23
Acacia	2,00	0,05
Frijol	1,86	1,86
Cedro	1,00	1,00
Papa	0,80	0,80
Caña de azúcar	0,70	0,70
Lechuga	0,60	0,58
Maíz	0,49	0,49
Arracache	0,25	0,25
Fresa	0,24	0,22
Cebolla	0,17	0,13
Almendro	0,15	0,15
Limón	0,09	0,09
Chile	0,05	0,05
Culantro	0,02	0,02
<b>Total</b>	<b>454,34</b>	<b>428,74</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 6) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas

internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo., accesibles por internet.

### **Anexo 7.**

*Cultivos sembrados y cosechados en el distrito de Jesús.*

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad de producción hectáreas</b>
Café	238,33	224,66
Plantas vivas	18,00	18,00
Tomate	11,00	11,00
Espárrago	4,00	4,00
Maíz	1,04	1,03
Pastos	1,00	1,00
Chile	0,06	0,06
Camote	0,05	0,05
Vainica	0,05	0,00
Culantro	0,01	0,01
Frijol	0,01	0,01
<b>Total</b>	<b>273,55</b>	<b>259,83</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 7) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas

internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

### **Anexo 8.**

*Cultivos sembrados y cosechados en el distrito de Santa Bárbara.*

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad de producción hectáreas</b>
Tomate	0,15	0,15
Maíz	0,10	0,10
Total	0,25	0,25

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 8) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio (INEC), y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

### **Anexo 9.**

*Cultivos sembrados y cosechados en el distrito de San Juan.*

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad de producción hectáreas</b>
Café	140,83	81,58
Cebolla	13,20	13,20
Chile	2,13	2,13
Frijol	1,75	1,65
Guayaba	0,03	0,03

<b>Cultivos principales</b>	<b>Extensión sembrada hectáreas</b>	<b>Extensión cosechada o en edad de producción hectáreas</b>
Lechuga	0,08	0,08
Limón	0,70	0,70
Maíz	6,02	4,77
Otras raíces o tubérculos	0,03	0,03
Pastos	3,40	3,40
Pepino	1,40	0,70
Tomate	15,94	8,74
<b>Total</b>	<b>185,54</b>	<b>117,03</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 9) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

## **Anexo 10.**

*Totalidad de cultivos sembrados y cosechados en la microcuenca del río Porrosatí.*

<b>Cultivo</b>	<b>Hectáreas sembradas</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Hectáreas sembradas</b>
<b>Café</b>	536,68	Espárrago	4,00
<b>Rosas</b>	40,51	Frijol	3,62
<b>Tomate</b>	27,09	Aguacate	2,50
<b>Cebolla</b>	13,37	Chile	2,23

<b>Cultivo</b>	<b>Hectáreas sembradas</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Hectáreas sembradas</b>
<b>Maíz</b>	7,65	Pepino	1,40

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 10) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

## **Anexo 11.**

Rendimiento de los cultivos en la región Central Occidental

<b>Rubro</b>	<b>Prom. t/Ha</b>	<b>Rubro</b>	<b>Prom. t/Ha</b>
<b>Tomate<sup>(1)</sup></b>	25-75	<b>Espárragos<sup>(2)</sup></b>	9,9
<b>Chile<sup>(1)</sup></b>	15-38	<b>Café<sup>(3,4)</sup></b>	3,75
<b>Pepino<sup>(1)</sup></b>	10-60	<b>Maíz<sup>(1)</sup></b>	3-5
<b>Cebolla<sup>(1)</sup></b>	15-30	<b>Frijol<sup>(1)</sup></b>	1-2
<b>Aguacate<sup>(1)</sup></b>	20	<b>Flores<sup>(5)</sup></b>	0,8

Notas: 1. Tomado de Agencia de Servicios Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería.2012.  
2. Tomado de Belén, M et al. 2015. 3. Tomado de FINAGRO. S.f) 4. Tomado de Mora, N. 2008. 5. Tomado de Romero, M. 2013

## Anexo 12.

### *Características fenológicas del café y el aguacate.*

<b>Datos</b>	<b>Etapas</b>	<b>Café</b>	<b>Aguacate<sup>(3)</sup></b>
Kc	Inicial	0,80 <sup>(1)</sup>	0,6
	Media	0,95 <sup>(1)</sup>	0,85
	Final	1,05 <sup>(1)</sup>	0,75
Etapa del cultivo en días	Inicial	61 <sup>(1)</sup>	65
	Desarrollo	122 <sup>(1)</sup>	182
	Media	75 <sup>(1)</sup>	40
	Final	75 <sup>(1)</sup>	78
<b>Datos</b>	<b>Etapas</b>	<b>Café</b>	<b>Aguacate<sup>(3)</sup></b>
Profundidad radicular (m)		1,2 <sup>(4)</sup>	0,72
		0,4 <sup>(4)</sup>	0,7
Agotamiento crítico (%)			
Respuesta de rendimiento crítico			inicial 0,85
			desarrollo 0,9
		0,52 <sup>(2)</sup>	medio 1
			final 1,05
			término 1,2
Altura del cultivo (m)		2,5 <sup>(4)</sup>	3

Notas: 1. Tomado Arcila, J. S.f. 2. Tomado de Cisneros, E et al. 2015. 3. Tomado de Ovalle, M. 2012. 4. Tomado de Valerio, L. 2016

### Anexo 13.

*Tipo de riego por cultivo y cantidad de fincas en la microcuenca del río Porrosatí*

<b>Cultivo</b>	<b>Sistema de riego</b>				
	No utilizó	Aspersión	Gravedad	Goteo	Otro
<b>Café</b>	78	-	-	-	-
<b>Aguacate</b>	25	-	-	-	-
<b>Ciprés</b>	16	-	-	-	-
<b>Frijol</b>	13	-	-	-	-
<b>Cultivos ornamentales</b>	9	-	-	-	-
<b>Maíz</b>	9	-	-	-	-
<b>Tomate</b>	-	-	-	7	-

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 6) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

**Anexo 14.**

*Cantidades de fertilizantes recomendadas según cultivo.*

<b>Cultivo</b>	<b>Cantida d de fertilizan te (kg/ha)</b>	<b>Fórmula química (fertilizante s nitrogenado s)</b>	<b>Cantid ad real de N (kg/ha)</b>	<b>Cantid ad real de P (kg/ha)</b>	<b>Promedi o de aplicaci ón</b>	<b>Total de aplicación por cosecha (kg/ha)</b>
<b>Café<sup>1</sup></b>	250	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - K <sub>2</sub> O-MgO-B	52,5	4,36	2 veces por cosecha	N: 115,10 P: 4,36
	179	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	62,6	0	1 vez por cosecha	
<b>Maíz<sup>2</sup></b>	200	10-30-10 (N- P-K)	20	60	Siembra	N: 107,4
	250	Nitrato de Amonio (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )	87,4	0	30 DDT	P: 60
<b>Tomate<sup>3</sup></b>	252	10-30-10 (N- P-K)	25,2	75,6	al trasplant e	
	252	15-15-15 (N- P-K)	37,8	37,8	15 DDT	

<b>DDT= días después del trasplante</b>	336	18-6-12-4(N-P-K-Mg)	60,5	20,16	35 DDT	N: 155 P: 139,8
	210	15-3-31 (N-P-K)	31,5	6,3	55 DDT	
<b>Cebolla <sup>4</sup></b>	500	10-30-10 (N-P-K)	50	150	1 vez por cosecha	N: 207,4 P: 150
	450	(NH <sub>4</sub> )(NO <sub>3</sub> )	157,4	0	1 vez por cosecha	
<b>Aguacate <sup>5</sup></b>	1780	13-5-20-8(N-P-K-Mg)	231,4	89	1 vez al año	N: 231,4 P: 89
<b>Espárrago <sup>6</sup></b>	200	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	24,3	53,8	Al iniciar la plantación	N: 24,3 P: 53,8
<b>Frijol <sup>7</sup></b>	20-50	N	35	0	1 vez por cosecha	N: 35
	40-80	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	26,2	(30 días después de la siembra)	P: 26,2
<b>Ornamentales <sup>8</sup></b>	200	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	42,4	0	Al momento de la siembra	N: 42,4 P: 26,5
	100	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	26,5		

<b>Cultivo</b>	<b>Cantidad de fertilizante (kg/ha)</b>	<b>Fórmula química (fertilizantes nitrogenados)</b>	<b>Cantidad real de N (kg/ha)</b>	<b>Cantidad real de P (kg/ha)</b>	<b>Promedio de aplicación</b>	<b>Total de aplicación por cosecha (kg/ha)</b>
<b>Chile<sup>9</sup></b>	<b>Los 150 kg/ha y los 200 kg/ha según indicaciones del MAG, ya están repartidos en las aplicaciones de los fertilizantes usados por cantidades calculadas)</b>	10-30-10 (N-P-K)			10 y 25 DDT	
		18-5-10-8 (N-P-K-Mg)	150	200	5 DDT	N: 150 P: 200
	350	Nitrato de amonio (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )			85 y 115 DDT	

Notas: 1. Tomado de ICAFE, 2011. 2. Tomado de Bonilla, N. 2009. 3. Tomado de Gómez, R. 2017. 4. Tomado de Araya, G.; 2012. 5. Tomado de Calderón, M et al. 2006. 6. Tomado de Calderón, M et al. 2006. 7. Tomado de Bertsch, H. 2009. 8. Tomado de MAG, 2018. 9. Tomado de MAG, 2019

## Anexo 15.

### Cantidades de herbicidas recomendados según cultivo

Cultivo	Cantidad de herbicidas (kg/ha)	Fórmula química	Cantidad real de N (kg)	Promedio de aplicación	Total de aplicación por cosecha N (kg/ha)
Maíz <sup>1</sup>	1,50	C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> ClNO <sub>2</sub> Alacloro	0,07	1 vez por cosecha	4,66 N  7,32 P
	1,00-1,5	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> ClN <sub>5</sub> Atrazina	0,40		
	1,00-2,00	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub> C <sub>1</sub> N <sub>6</sub> Cianazina	0,52		
	0,04-0,40	C <sub>15</sub> H <sub>18</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> S Nicosulfuron	0,04		
	0,75-1,50	C <sub>13</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Pendimentalin	0,16		
	30-50	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>5</sub> P Glifosato	3,31 de N 7,32 de P		
	0,75-1	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S Benzatón	0,11		
Tomate <sup>2</sup>	1,68	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> OS metribuzina	0,44	Antes del trasplante	0,75
	1,2		0,31	Después del trasplante	
	1	C <sub>15</sub> H <sub>11</sub> ClF <sub>3</sub> NO <sub>4</sub> ( Oxiflufen)	0,04	El manual del MAG	

Cebolla <sup>3</sup>	1,8	Linurón (C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> C <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	0,20	recomienda seguir las indicaciones de la etiqueta del producto	0,24
	2 L/ha (2,36 kg/ha)	Linurón (C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> C <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	0,30	Preemergenc ia	
Espárrago <sup>4</sup>	2 L/ha (2,56 kg/ha)	Metribuzina (C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> OS)	0,70	1 vez por cosecha	1,03
	2 L/ha (2,34 Kg/ha)	Pendimetalín (C <sub>13</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	0,35	1 vez por cosecha	
	0,5-1	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S Bentazón	0,09	1 vez por cosecha	
	0,75-1	C <sub>13</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Pendimetalina	0,13	2 veces por cosecha	
	0,12-0,18	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub> F <sub>3</sub> NO <sub>4</sub> Fluazif op-butil	0,01	1 vez por cosecha	0,80 N
Frijol <sup>5</sup>	0,75-2,5	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> NO <sub>5</sub> P Glifosato	0,13 N 0,30 P	2 veces por cosecha	0,60 P
	0,12-0,37	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> NO <sub>4</sub> P Glufosinato	0,02 N 0,30 P	3 veces por cosecha	
	0,5	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> Cl <sub>2</sub> N <sub>2</sub> Paracuat	0,05	2 veces por cosecha	
	0,08-0,16	C <sub>17</sub> H <sub>26</sub> ClNO <sub>3</sub> S Cletodim	0,005	1 vez por cosecha	
Ornamental	1	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> C <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,11	En	0,11

es <sup>6</sup>		Afalon		desarrollo antes de seis pares de hojas	
Chile <sup>7</sup>	1,68	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> OS	0,44	Antes del trasplante	
	1,2	metribuzina	0,31	Después del trasplante	0,75

Notas: 1. Tomado de MAG, 2018. 2. Tomado de Gómez, R. 2017. 3. Tomado de Araya, G.; 2012. 4. Tomado de Belén, M et al. 2015. 5. Tomado de Herrera, F. 2009. 6. Tomado de MAG, 2018. 7. Tomado de Gómez, R. 2017

## Anexo 16.

*Cantidad total de nitrógeno y fósforo aplicados por medio de fertilizantes y herbicidas en los cultivos de la microcuenca del Porrosatí según censo agropecuario.*

Cultivo	Total de N y P contenidos en los fertilizantes aplicados por cultivo (kg/ha)		Total de N y P contenidos en los herbicidas aplicados por cultivo (kg/ha)	
	N	P	N	P
<b>Café</b>	115,10 <sup>(8)</sup>	4,36 <sup>(8)</sup>	NA	NA
<b>Maíz</b>	107,40 <sup>(4)</sup>	60 <sup>(4)</sup>	4,66 <sup>(9)</sup>	7,32 <sup>(9)</sup>
<b>Tomate<sup>(6)</sup></b>	310	279,60	1,50	NA
<b>Cebolla<sup>(1)</sup></b>	207,40	150	0,24	NA
<b>Aguacate</b>	231,40 <sup>(5)</sup>	89 <sup>(5)</sup>	NA	NA
<b>Espárrago<sup>(2)</sup></b>	24,30	53,80	1,03	NA

Cultivo	Total de N y P contenidos en los fertilizantes aplicados por cultivo (kg/ha)		Total de N y P contenidos en los herbicidas aplicados por cultivo (kg/ha)	
<b>Frijol</b>	105 <sup>(3)</sup>	78,60 <sup>(3)</sup>	2,40 <sup>(7)</sup>	1,80 <sup>(7)</sup>
<b>Ornamentales<sup>(9)</sup></b>	42,4	26,50	0,11	NA
<b>Chile</b>	300 <sup>(10)</sup>	400 <sup>(10)</sup>	1,50 <sup>(6)</sup>	NA
<b>Total</b>	<b>1 443</b>	<b>1 141, 86</b>	<b>11,44</b>	<b>9,12</b>

Notas: 1. Tomado de Araya, G.; 2012. 2. Tomado de Belén, M et al. 2015. 3. Tomado de Bertsch, H. 2009. 4. Tomado de Bonilla, N. 2009. 5. Tomado de Calderón, M et al. 2006. 6. Tomado de Gómez, R. 2017. 7. Tomado de Herrera, F. 2009. 8. Tomado de ICAFE, 2011. 9. Tomado de MAG, 2018. 10. Tomado de MAG, 2019.

#### **Anexo 17.**

*Total, de fincas con ganado vacuno en el distrito de San José de la Montaña por cantidad de animales y sistema de alimentación.*

Tamaño de la finca (ha)	Cantidad de fincas	Total de animales	Sistema de alimentación del ganado vacuno		
			Pasto natural	Pasto mejorado	Pasto de corte o forrajes
Menos de 5	12	164	7	-	-
5 a menos de 10	12	258	6	-	-
10 a menos de 20	11	569	5	6	-
20 a menos de 50	10	961	4	3	3
50 y más	6	737	3	-	-
<b>Total</b>	<b>51</b>	<b>2689</b>	<b>25</b>	<b>19</b>	<b>7</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 17) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

### **Anexo 18.**

*Total, de fincas con ganado vacuno en el distrito de Jesús por cantidad de animales y sistema de alimentación.*

<b>Tamaño de la finca (ha)</b>	<b>Cantidad de fincas</b>	<b>Total de animales</b>	<b>Sistema de alimentación del ganado vacuno</b>
			Pasto natural
Menos de 1 hectárea	5	54	3
1 hectárea y más	4	116	-
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>170</b>	<b>6</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 18) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

### **Anexo 19.**

*Total, de fincas con ganado caprino en el distrito de San Jose de la montaña por cantidad de animales y sistema de alimentación.*

<b>Tamaño de la finca (ha)</b>	<b>Cantidad de fincas</b>	<b>Total de animales</b>
<b>Menos de 20</b>	3	5
<b>20 a menos de 50</b>	4	363
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>368</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 19) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

### **Anexo 20.**

*Total de fincas con ganado porcino en el distrito de San José de la montaña por cantidad de animales y sistema de alimentación.*

<b>Tamaño de finca (ha)</b>	<b>Cantidad de fincas</b>	<b>Total de animales</b>	<b>Sistema de alimentación del ganado porcino</b>
			Residuos agrícolas
<b>Menos de 10</b>	5	143	3
<b>10 hectáreas y más</b>	3	86	3
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>229</b>	<b>6</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 20) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información

detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

## Anexo 21.

*Totalidad de animales en la microcuenca, por cantidad de fincas y tamaño de las mismas*

<b>Especie</b>	<b>Tamaño de la finca (ha)</b>	<b>Cantidad de fincas</b>	<b>Total de animales</b>
<b>Vacuna</b>	Menos de 1	10	103
	Menos de 5	16	280
	5 a menos de 10	12	258
	10 a menos de 20	11	569
	20 a menos de 50	10	961
	50 y más	6	737
<b>Total</b>		<b>65</b>	<b>2908</b>
<b>Caprinos</b>	Menos de 10	4	24
	Menos de 20	3	5
	20 a menos de 50	4	363
<b>Total</b>		<b>11</b>	<b>392</b>
<b>Porcino</b>	Menos de 10	4	143
	10 hectáreas y más	3	86
<b>Total</b>		<b>11</b>	<b>229</b>

Elaboración propia con datos solicitados al INEC (Comunicación personal, 2017), de los resultados del Censo Nacional Agropecuario 2014

\*Nota: los datos mostrados no se encuentran detallados de esta forma (según lo mostrado en el anexo 21) en el Censo Nacional Agropecuario, ya que se hace la solicitud directa en el sitio, y se compra la información detallada en este nivel (distritos); esto fue parte de los resultados del Censo 2014, sin embargo, por temas

internos del instituto, la información se muestra a mayor escala en los resultados del Censo, accesibles por internet.

**Anexo 22.**

*Reportes operacionales de las empresas de la microcuenca que reportan ante el Ministerio de Salud.*

<b>Tipo de actividad</b>	<b>Actividades de alojamiento para estancias cortas</b>	<b>Elaboración y venta de comidas</b>	<b>Gasolinera</b>	<b>Venta de combustibles y repuestos</b>	<b>Venta de alimentos, bebidas y artículos para el hogar</b>
<b>Código CIU</b>	5510	1075	4661	4661	4711
<b>Distrito</b>	Jesús	Santa Bárbara	San Juan	Santa Bárbara	San Juan
<b>Tipo de actividad</b>	<b>Actividades de alojamiento para estancias cortas</b>	<b>Elaboración y venta de comidas</b>	<b>Gasolinera</b>	<b>Venta de combustibles y repuestos</b>	<b>Venta de alimentos, bebidas y artículos para el hogar</b>
<b>Tipo de agua residual</b>	Ordinaria	Ordinaria	Ordinaria	Ordinaria	Especial
<b>Tipo de disposición</b>	Cuerpo receptor	Cuerpo receptor	Alcantarillado sanitario	Alcantarillado sanitario	Cuerpo receptor
<b>Cuerpo receptor</b>	Quebrada la Cruz	Quebrada Potrerillos	-	-	Río Porrosatí
<b>Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/d)</b>	50	26	-	-	20
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/d)</b>	18,3	-	1,3	2	3
<b>DBO (mg/L)</b>	41	67	6	15	18,8
<b>SST (mg/L)</b>	20	24	9	28	6
<b>DQO (mg/L)</b>	109	180	11	32	48

Tomado de Ministerio de Salud (2016), (Eugenio Androvetto, comunicación personal 2016)

**Anexo 23.**

*Total de comercios con patentes municipales según categoría para los distritos que abarca la microcuenca del río Porrosatí.*

Categoría	Número de comercios según categoría por distrito					Total de comercios
	Barva <sup>(2)</sup>		Santa Bárbara <sup>(1)</sup>			
	San Pedro	San José de la Montaña	Santa Bárbara	San Juan	Jesús	
Otros	55	24	140	58	26	<b>303</b>
Preparación de alimentos	25	15	46	34	16	<b>136</b>
Venta de alimentos y abarrotes	31	12	27	16	20	<b>106</b>
Taller	27	4	15	21	11	<b>78</b>
Fabrica	4	4	1	7	4	<b>20</b>
Hospedaje	1	6	0	2	5	<b>14</b>
Centros educativos	0	1	4	2	0	<b>7</b>

Notas: 1. Tomado de Municipalidad de Santa Bárbara (Departamento de patentes, comunicación personal 2020). 2. Tomado de Municipalidad de Barva (Departamento de patentes, comunicación personal 2020).

**Anexo 24.** Recarga y disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Porrosatí.

Periodos de recarga	Volumen de recarga <sup>1</sup>	Volumen disponible <sup>2</sup>
Volumen de recarga en hm <sup>3</sup>	25,4	13,0
Volumen de recarga en m <sup>3</sup>	25 400 000	13 012 188,60

Notas: 1. Tomado de Montero, E, 2016. 2. Tomado de Sibaja, M., 2013