

**VULNERABILIDAD EN FUNCIÓN DE OFERTA HÍDRICA, MEDIANTE EL MODELO  
WEAP.**

**CASANOVA DIAZ MAGDALY GRACE**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

**VULNERABILIDAD EN FUNCIÓN DE OFERTA HÍDRICA, MEDIANTE EL MODELO  
WEAP.**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de Ingeniera  
Agroforestal**

**CASANOVA DIAZ MAGDALY GRACE**

**Presidente de Monografía  
PAULO CESAR CABREBRA MSc.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

## 1. Contenido

INTRODUCCIÓN .....	6
2. OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo general .....	8
2.2 Objetivos específicos .....	8
3. MARCO TEÓRICO .....	9
3.1 Cuenca hidrográfica.....	9
3.2 Recurso hídrico.....	9
3.3 Oferta hídrica.....	9
3.4 Balance Hídrico .....	10
3.5 Vulnerabilidad .....	10
3.6 Modelo.....	11
3.7 Cambio climático.....	11
3.8 Software WEAP (Water Evaluation and Planning System).....	11
4. MARCO CONTEXTUAL .....	13
5. MARCO NORMATIVO AMBIENTAL .....	15
6. METODOLOGÍA .....	16
7. DESARROLLO DEL TEMA .....	18
7.1 Identificar el proceso metodológico para establecer la oferta hídrica mediante el modelo WEAP .....	18
7.1.1 Datos requeridos para la elaboración del modelo WEAP.....	18
7.1.2 Proceso de aplicación de WEAP.....	19
7.2 Comparación de oferta hídrica bajo escenarios de cambio utilizando el modelo WEAP. ...	26
7.3 Vulnerabilidad presente en el recurso hídrico. ....	30
8. CONCLUSIONES .....	38

9. RECOMENDACIONES .....39

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....40

## ÍNDICE DE CUADROS

cuadro 1 Marco normativo ambiental. ....	15
cuadro 2 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (Ras, 2017).....	17
cuadro 3 Umbrales de presión del índice de escasez. . IDEAM, 2004 .....	17
cuadro 4 Resumen de Datos Requeridos para Construir un Modelo en WEAP. (SEI,2009).....	18
cuadro 5 Estudios destacados utilizando la herramienta WEAP.....	26
cuadro 6 Caudales cuenca hidrográfica del río Aipe, tomado de Labrador (2016) .....	31
cuadro 7 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (Ras, 2017).....	32
cuadro 8 Umbrales críticos de presión, índice de escasez. Metodología índice de escasez. IDEAM, 2004.....	33
cuadro 9 índice de escasez de agua superficial cuenca río Aipe .....	33
Cuadro 10 Escenarios de población, cuenca del río Aipe. tomado de Labrador (2016).....	34
Cuadro 11 índice de escasez de agua superficial cuenca río Aipe .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama conceptual de elementos hidrológicos modelados en WEAP, ecuación del modelo de los dos baldes. (SEI,2009) .....	21
---	----

## INTRODUCCIÓN

Colombia, aunque sólo contribuye con el 0,37% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero-GEI (2004), es vulnerable al cambio climático. En general, hay evidencia que los recursos hídricos son vulnerables al cambio climático y que las consecuencias sobre la sociedad y los ecosistemas dependen de las medidas de adaptación (IPCC, 2007).

De acuerdo con Angarita (2014) las evaluaciones de cambio climático en los sistemas hidrológicos fundamentalmente buscan establecer como a diferentes escalas espaciales y temporales, los cambios en los atributos del clima pueden modificar la disponibilidad de agua en una cuenca, a su vez establecer como estos cambios pueden producir alteraciones en los sectores hidro-dependientes por ejemplo los acueductos y la agricultura o los ecosistemas que dependen de patrones específicos de disponibilidad hídrica en la cuenca. (Angarita, 2014)

El calentamiento global se asocia a los constantes cambios de los componentes del ciclo hidrológico como cambios en la intensidad de precipitación, humedad del suelo, escorrentía, derretimiento de la nieve y el hielo, aumento de evaporación y vapor de agua en la atmosfera, entre otros (IPCC, 2008).

Es necesario, por tanto, analizar la vulnerabilidad de los recursos hídricos, para cualificar el grado de fragilidad de la fuente con respecto al abastecimiento y a la amenaza de sequía cuando se presentan períodos con condiciones climáticas extremas (Sharma, 2009), con el propósito de sustentar una apropiada distribución del recurso dentro de una cuenca hidrográfica, exige la utilización de modelos.

Un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interacciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. Además de obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales. (Almorox Alonso, 2015).

WEAP ha permitido conocer con rigor conceptual y metodológico el comportamiento espacial, temporal y el estado del agua en términos de oferta, disponibilidad, calidad, uso, demanda,

amenazas y vulnerabilidad, considerando, además, incertidumbres asociadas a la variabilidad climática, actividades humanas actuales y proyectadas, (SEI. 2001). Que incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. (PURKEY, et. al 2007)

El presente estudio pretende a través de la revisión bibliográfica, analizar la vulnerabilidad del recurso hídrico, a través del software WEAP (Water Evaluation and Planning Sytem) con el fin de aportar a la óptima gestión del recurso hídrico.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

- Analizar la vulnerabilidad en función de oferta hídrica mediante el software WEAP (Water Evaluation and Planning Sytem)

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar el proceso metodológico para establecer la oferta hídrica mediante el modelo WEAP.
- Comparar la oferta hídrica bajo escenarios de cambio utilizando el modelo WEAP.
- Observar la vulnerabilidad presente en cuanto al recurso hídrico.



### **3. MARCO TEÓRICO**

Dado que este trabajo se centrará en analizar la vulnerabilidad en función de oferta hídrica mediante el software WEAP, resulta necesario revisar definiciones como algunos referentes que se tomarán en cuenta.

#### **3.1 Cuenca hidrográfica**

La Gestión Integral del Recurso Hídrico define la cuenca hidrográfica como la unidad fundamental de análisis para el desarrollo de los procesos de planificación y administración. Definido mediante el Decreto 1076 de 2015, título 3, sección 5, coherente con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH). (MINIAMBIENTE, 2018)

#### **3.2 Recurso hídrico**

Los recursos hídricos son los cuerpos de agua que existen en el planeta, desde los océanos hasta los ríos pasando por los lagos, los arroyos y las lagunas, el agua es un factor determinante en el desarrollo económico y social y, al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas. (MINIAMBIENTE, 2018)

#### **3.3 Oferta hídrica**

La oferta hídrica es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como escorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países (IDEAM, 2004)

La oferta hídrica de una cuenca, corresponde también al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua

superficial de la misma. El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca (CORPONARIÑO.2009)

### **3.4 Balance Hídrico**

Es el equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de agua en un sistema dado en un intervalo de tiempo determinado, para cada una de las diferentes fases en que se subdivide el ciclo hidrológico. Puede referirse a una cuenca hidrográfica, a un acuífero, a un país, a toda la tierra o a un organismo vivo. (SECF, 2005)

Para Sánchez San Román (2001), se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea; es decir, que es el proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable; debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes, que la ponen al alcance de sus múltiples demandantes.

### **3.5 Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad se puede definir como la susceptibilidad de los sistemas (naturales, sociales) ante “impactos” (efectos) por causas naturales (variabilidad climática) o inducidos por el hombre (cambio climático), que provocan un cambio en el “estado” de los sistemas, que a su vez origina consecuencias dentro de una cascada de efectos. Este proceso conlleva a situaciones críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad del agua que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas. El grado de vulnerabilidad hídrica depende de la seguridad hídrica, es decir, la capacidad de la sociedad para garantizar una adecuada cantidad y calidad de agua para el funcionamiento de los ecosistemas, la producción y autosuficiencia alimentaria, la satisfacción de las necesidades básicas de la población, entre otros. La relación entre disponibilidad de agua superficial y subterránea con respecto a los diferentes usos humano, agrícola e industrial es lo que se conoce como presión o estrés hídrico. (Angarita, 2008)

### **3.6 Modelo**

Un modelo describe teóricamente un objeto que existe fuera del campo de las matemáticas. Las previsiones del tiempo y los pronósticos económicos, por ejemplo, están basados en modelos matemáticos. Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables entre sí. De acuerdo con Cala (2010), en general un modelo puede ser entendido como una representación, bien sea abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto que puede ser real o ficticio. Para cada caso y por la naturaleza de cada caso, se podrán trabajar modelos fenomenológicos y/o modelos de procesos que requieren el uso formal de herramientas matemáticas y/o computacionales para representar algún sistema y su comportamiento.

### **3.7 Cambio climático**

El cambio climático según la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), se refiere a un cambio en el clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global; se da además de la variabilidad natural del clima observada a lo largo de períodos de tiempo comparables (Adger et. al., 2007). Los informes del IPCC son los principales documentos de referencia para la elaboración de estudios y políticas alrededor del tema del cambio (MINIAMBIENTE, 2018)

### **3.8 Software WEAP (Water Evaluation and Planning System)**

El software WEAP (Water Evaluation and Planning System), fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés), con el fin de simular procesos como lluvia-escorrentía, flujo base, recarga subterránea. Este es un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. El modelo trabaja con el balance de masa a nivel mensual, el agua es despachada para cumplir con los requerimientos de consumo, sujeto a demandas prioritarias (Cusgüen, 2013)

El desarrollo de aplicaciones de WEAP sigue un enfoque común, el primer paso es la definición del estudio, aquí es donde el área de estudio y el sistema de los componentes espaciales de la zona de interés se definen y el horizonte de tiempo del análisis se establece. Después de esta evaluación

inicial, se define las “cuentas corrientes (current accounts)”. Esto es una representación de la línea base del sistema - incluyendo las reglas de operación vigentes para ambas ofertas y 28 demandas.

Otra forma de interpretar las “cuentas corrientes” es la representación espacial y temporal del sistema como una fotografía, la cual es implementada en el modelo WEAP. Las cuentas corrientes sirven como punto de partida para el desarrollo de escenarios, que caracterizan conjuntos alternativos de supuestos futuros en relación a las políticas, los costos y los factores que afectan la demanda, cargas de contaminantes y suministros. Los escenarios son evaluados con respecto a la disponibilidad de agua, costos y beneficios, la compatibilidad con los objetivos ambientales y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables claves. (Logreira, 2008)

WEAP requiere la entrada de datos para estimar los componentes del balance hídrico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments. Los catchments tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas (Instituto, Guía Metodológica: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el modelo WEAP, 2009).

#### 4. MARCO CONTEXTUAL

Uno de los objetivos principales que impulsaron la creación del IDEAM fue la necesidad urgente de conocer y estudiar la riqueza en agua del país, su uso y las medidas de protección de este elemento valioso y profundizar en esto más allá de los intereses sectoriales. Colombia ha sido reconocida por su abundante oferta hídrica, pero, en términos hidrológicos el territorio nacional no es homogéneo, las cinco áreas hidrográficas del país albergan sensibles diferencias que repercuten en la vulnerabilidad tanto del sistema natural como de la estructura socioeconómica. (ENA. 2014)

La primera comunicación Nacional ante la CMNUCC, concluye que Colombia es un país altamente vulnerable, pese a su bajo nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>. A partir de las proyecciones para el año 2050, un aumento en la temperatura media anual del aire entre 1°C y 2°C, produciría una variación en la precipitación de  $\pm 15\%$ , la desaparición del 78% de los nevados y del 56% de los páramos y de un ascenso estimado en el nivel del mar de 40 cm en la costa Caribe y de 60 cm en la costa Pacífica (IDEAM, 2001).

El régimen hidrológico en Colombia se caracteriza a nivel intra- anual por periodos secos y húmedos, que serán es decir un régimen monomodal y bimodal para indicar la existencia de uno o dos periodos secos y/o húmedos. Esta variación del caudal mensual compensa en ocasiones el contraste entre la esorrentía de los períodos secos y aquellos con excedentes de agua, haciendo difícil identificar años secos con base solamente en el valor promedio anual. (ENA. 2014)

La región Andina es una de las más afectadas por el fenómeno del Niño. Los períodos con sequías más extendidas se han registrado en los años 64-65, 72-73, 76-77 y 91-92, con más de un semestre consecutivo; se presentaron además sequías en semestres aislados en más del 50% del territorio, en los años 67 B, 83 B, 85 A, 87 A y 97 B (IDEAM, 2005).

En diferentes años, los valores de las variables climatológicas fluctúan por encima o por debajo de la normal climatológica. La secuencia de estas oscilaciones, alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática. (IDEAM, 2005).

En los últimos sesenta años, en algunas partes de Sur América aumentó la variabilidad de precipitaciones extremas, con la probabilidad de que la variabilidad futura pueda afectar el riesgo de inundaciones y sequías. Durante el siglo XX, en Colombia desaparecieron ocho glaciares, mientras en 2007 se calculaba en 47km<sup>2</sup> la superficie glaciario restante, con una tasa de pérdida de

3.0km<sup>2</sup> por año. Cualquier disminución de la esorrentía implica no solo la reducción de la oferta de agua superficial, sino también una menor humedad del suelo, por lo tanto, podría tener consecuencias adversas para la agricultura. Por tal razón, existe un gran interés en el desarrollo de métodos para predecir el efecto del cambio climático en la descarga de los ríos (Tucker et. al, 2007).

Por consiguiente, la vulnerabilidad a un cambio climático potencial depende del grado de exposición al riesgo, el grado de sensibilidad dentro del sistema; y la habilidad del sistema para adaptarse al cambio, de acuerdo con Angarita, (2014) las evaluaciones de cambio climático en los sistemas hidrológicos fundamentalmente buscan establecer como a diferentes escalas espaciales y temporales, los cambios en los atributos del clima pueden modificar la disponibilidad de agua en una cuenca, a su vez establecer como estos cambios pueden producir alteraciones en los sectores hidro-dependientes por ejemplo los acueductos y la agricultura o los ecosistemas que dependen de patrones específicos de disponibilidad hídrica en la cuenca.

## 5. MARCO NORMATIVO AMBIENTAL

Dentro de la legislación Nacional que se referencia a la protección del recurso hídrico se encuentra la siguiente normatividad:

*cuadro 1 Marco normativo ambiental.*

NORMA	DEFINICIÓN
Ley 99 del 1993	Encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y de los recursos naturales renovables. (MMA, 1993).
Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. (MMADS, 2012).
Resolución 872 de 2006	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones. (MAVDT, 2006)
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (MMA, 1993).
Ley 23 de 1973	Plantea la necesidad de proteger los recursos naturales renovables, fija límites mínimos de contaminación y establece sanciones por violación de las normas. Se faculta al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente. (Congreso de Colombia, 1973)
Resolución 1096 del 2000	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS (MDE, 2000).
Ley 99 de 1993	Creación del Ministerio del Medio Ambiente y organización del Sistema Nacional Ambiental. (MAVDT, 2006)

## 6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente monografía, se empleó la metodología planteada por Sampieri & Quintana (2010) con un enfoque cualitativo, la cual fue ajustada para analizar la vulnerabilidad en función de oferta hídrica mediante el software WEAP (Wáter Evaluación and Planning System), dentro de este contexto se adapta tres etapas de conformidad con lo descrito por los autores.

**ETAPA I: Recopilación de información secundaria:** detectar, consultar y obtener la bibliografía y otros materiales que sean útiles para extraer información relevante y necesaria, mediante una búsqueda, documentación y análisis, en medios tanto físicos como digitales, para encontrar referencias de estudios tanto cuantitativos como cualitativos, que se relacionen de manera estrecha con los objetivos.

**ETAPA II: Análisis:** Identificar los componentes de un todo, hacer una precisión objetiva para mostrar con precisión las dimensiones del contexto de un hecho, mediante la lectura minuciosa con el fin de determinar la información más sobresaliente y así propiciar un punto de vista.

**ETAPA III: Elaboración:** Para el desarrollo de esta etapa, se tendrá en cuenta para la realización del tercer objetivo, el estudio generado por Labrador et, al. (2016) titulado “Desarrollo de un modelo para la planificación del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en el Huila, Colombia”, con el propósito de sintetizar en un compilado la información que servirá posteriormente como fuente de búsqueda.

La síntesis se realiza a partir de la metodología propuesta por IDEAM (2004) el cálculo del índice de escasez con el que se evalúa la vulnerabilidad frente a la reducción del caudal estableciendo la relación con los escenarios de cambio climático, donde incluye el cálculo del índice de escasez relacionado en la siguiente fórmula.

$$IE = D/On * 100\%$$

Donde:

IE = Índice de escasez (%)

D = Demanda de agua (m<sup>3</sup>)

On. = Oferta hídrica superficial neta (m<sup>3</sup>)



Los datos de oferta hídrica se tomaron del mencionado estudio de Labrador et, al. (2016) donde desarrollo un modelo para la planificación del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en el Huila, mientras que para calcular demanda se tomó en cuenta la resolución 0330 del ministerio de vivienda, ciudad y territorio por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS, donde se obtiene la dotación neta máxima (L/Hab\*Día) de acuerdo a la altura promedio sobre el nivel del mar, como se indica en el siguiente cuadro.

*cuadro 2 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (Ras, 2017)*

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
>2000 msnm	120
1000 – 2000 msnm	130
<1000 msnm	140

En la siguiente figura se establece por categoría los umbrales críticos de presión sobre el recurso hídrico e interpretación del porcentaje de oferta hídrica utilizada.

*cuadro 3 Umbrales de presión del índice de escasez. . IDEAM, 2004*

CATEGORIA	% DE LA OFERTA HIDRICA	INTERPRETACIÓN
<b>ALTO</b>	>40%	Existe fuente de presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico, se requiere fuertes inversiones económicas para mejorar la eficiencia de la utilización de agua en los sectores productivos y en los sistemas de abastecimiento de agua potable.
<b>MEDIO</b>	20-40%	cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos.
<b>MODERADO</b>	10-20%	indica que la cantidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador de desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento del agua y desarrollar proyecciones del recurso hídrico a corto y largo plazo.
<b>BAJO</b>	<10%	No se experimental presiones importantes sobre el recurso hídrico en términos de cantidad.

## 7. DESARROLLO DEL TEMA

### 7.1 Identificar el proceso metodológico para establecer la oferta hídrica mediante el modelo WEAP

WEAP (Water Evaluation and Planning System), fue desarrollado por el Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI, por sus siglas en inglés), con el fin de Simular procesos como lluvia- escorrentía, flujo base, recarga subterránea. Este es un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. El modelo trabaja con el balance de masa a nivel mensual, el agua es despachada para cumplir con los requerimientos de consumo, sujeto a demandas prioritarias. (Cusgüen, 2013).

El instituto ambiental de Estocolmo (SEI por sus siglas en inglés), elaboró una guía metodológica del modelo WEAP, donde describe el proceso para la modelación de cuencas hidrográficas, la oferta hídrica hace parte de una etapa de este proceso que se describe a continuación.

**7.1.1 Datos requeridos para la elaboración del modelo WEAP.** La recopilación de datos para aplicaciones de WEAP se muestra en el siguiente cuadro, en donde se presenta una lista de los datos que han sido procesados.

*cuadro 4 Resumen de Datos Requeridos para Construir un Modelo en WEAP. (SEI,2009)*

DATOS REQUERIDOS	FORMATO PREFERIDO	OBSERVACIONES
<b>CLIMA</b>		
Precipitación	Excel, texto o csv	Los datos de precipitación deben ser históricos y estos datos de clima son necesarios para alimentar al modelo
Temperatura	Excel, texto o csv	
Humedad relativa	Excel, texto o csv	
Viento	Excel, texto o csv	
Latitud	Excel, texto o csv	
<b>USO DE SUELO</b>		
DEM (Modelo de elevación digital)	TFF	Estos son necesarios para caracterizar la subcuenca
Cobertura vegetal	TFF	
Geología	TFF	
Tipo de suelo	TFF	
Áreas de riego	TFF	
<b>DATOS PARA CALIBRACIÓN</b>		

Ríos	Excel, texto o csv	Datos necesarios para el comportamiento del modelo y calibración
Nevados	Excel, texto o csv	
Fuentes de agua	Excel, texto o csv	
<b>OTROS</b>		
Número de usuarios	Excel, Word	El modelo requiere de estos datos para calcular la demanda
Población pecuaria	Excel, Word	
Crecimiento per cápita	Excel, Word	
Calidad de agua	Excel, Word	
Canales de riego	Excel, Word	

**7.1.2 Proceso de aplicación de WEAP.** El desarrollo de un modelo de simulación hidrológica WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

- Definición del estudio.
- Búsqueda de información.
- Desarrollo del modelo.
- Calibración.
- Uso del modelo, generación de escenarios.

**7.1.2.1. Definición del estudio.** En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema. Una modelación efectiva requiere una cantidad considerable de datos, así como tiempo y recursos para diseñar, implementar y revisar el modelo. Por esta razón, la naturaleza del problema y el propósito del modelo deben ser claros desde el principio para asegurar un uso eficiente de los recursos disponibles para un determinado proyecto.

**7.1.2.2. Búsqueda de información.** En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo al tipo de estudio definido. La recopilación de datos para la aplicación de WEAP generalmente se realiza en dos etapas. La etapa inicial de recopilación de datos tiene como objetivo dar soporte a la aplicación inicial del modelo WEAP. En esta etapa se busca recopilar la información existente en agencias de gobierno, bases de datos internacionales, información de satélite e información publicada en estudios previos. El modelo inicial implementado con estos datos permite evaluar la necesidad de recopilar más datos posteriormente. La aplicación inicial de WEAP no debe ser extremadamente detallada, pero tampoco debe arrojar resultados incorrectos. Por esta razón, se debe realizar una revisión preliminar del modelo. La revisión del modelo se debe enfocar en

identificar qué modificaciones deben realizarse en el modelo y qué datos adicionales deben recopilarse para hacer el modelo más preciso. Generalmente, los datos adicionales requeridos para mejorar la precisión del modelo pueden incluir un mayor procesamiento de datos como, por ejemplo, una delimitación más detallada de las cuencas usando algún software de Sistema de Información Geográfico (SIG). Otros datos necesarios pueden ser de tipo hidrológico, uso de suelo o datos socioeconómicos.

**7.1.2. 3. Desarrollo del modelo.** En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas (resultados) iniciales del modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores. En la etapa de desarrollo del modelo se busca representar la cuenca tomando como base la simulación de las condiciones históricas. Para llevar a cabo esta simulación es necesario rellenar el modelo con las diferentes características esenciales de oferta y demanda de agua. A continuación, se describe la metodología propuesta para cada una de estas subetapas.

**7.1.2.3.1. Métodos de simulación.** Hay tres métodos para simular la escorrentía de una cuenca a partir de datos meteorológicos, estos métodos son:

- Precipitación/escorrentía.
- Demanda de riego.
- Humedad del suelo.

**7.1.2.3.1.1. Método precipitación escorrentía.** Este método también determina evapotranspiración para cultivos irrigados y precipitados usando los coeficientes de cultivos, el resto de la precipitación no consumida por la evapotranspiración es simulada como escurrimiento hacia el río.

**7.1.2.3.1.2. Método demanda de riego.** Es el método más simple, usa los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial, luego determina alguna demanda de riego que puede ser requerida para rellenar la porción de evapotranspiración necesaria, no simula procesos de escurrimiento o infiltración.

**7.1.2.3.1.3. Método humedad del suelo o método de los dos baldes.** Es el más complejo de los tres métodos, representado cada microcuenca con dos capas de suelo, simula la evapotranspiración,

considerando precipitación y riego en tierras cultivadas y no cultivadas, escurrimiento de caudales poco profundos y cambios en la humedad del suelo, el método de humedad del suelo requiere parámetros más extensos de suelo y clima para simular los procesos.

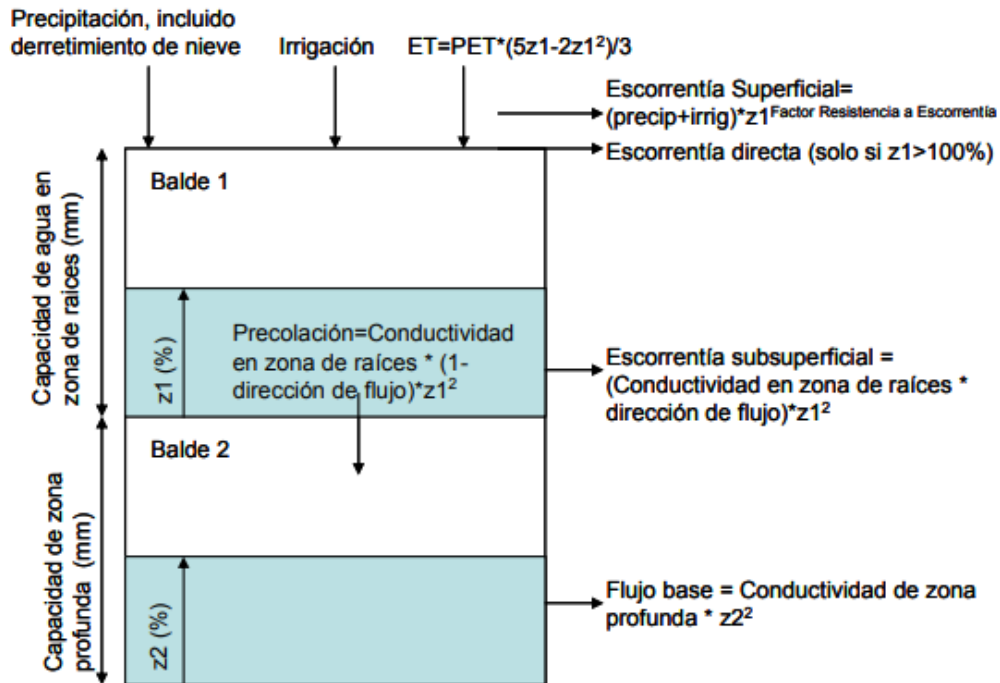


Figura 1 Diagrama conceptual de elementos hidrológicos modelados en WEAP, ecuación del modelo de los dos baldes. (SEI,2009)

Tacusi et al. (2015) afirma que, observando la ecuación del modelo hidrológico ilustrado en la figura, para el balde 1 y en el balde 2 del modelo hidrológico se observa como cada término de la ecuación que corresponde a un elemento del balance hidrológico es afectado de forma diferente por los parámetros, además que la ecuación es no lineal y por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta.

Balde 1: Cambio en la humedad del suelo = precipitación efectiva - evapotranspiración - escorrentía superficial- escorrentía subsuperficial- percolación.

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) \cdot z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j \cdot k_s \cdot z_{1,j}^2 - (1 - f_j) \cdot k_s \cdot z_{1,j}^2$$

Dónde:

Sw = Capacidad de almacenamiento agua en la zona de raíz (mm).

Pe = Precipitación efectiva (mm/mes).

t = Temperatura CC).

PET = Evapotranspiración.

kc = Coeficiente de cultivo.

Z1 = Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces(%).

Z2 = Nivel de humedad inicial en la zona profunda (%).

RRF = Factor de resistencia a la escorrentía (-).

f = Dirección preferencial del flujo.

Ks = Conductividad de la zona de las raíces (mm/mes).

Balde 2: Cambio en la humedad del suelo = - percolación + flujo base.

$$Dw \frac{dz}{dt} = -KdZ1^2 + (1 - f)KsZ2^2$$

Dónde:

Dw = Capacidad de almacenamiento agua en la zona profunda (mm).

Kd = Conductividad de la zona profunda (mm/mes).

Z1 = Nivel de humedad inicial en la zona de las raíces (%).

Z2 = Nivel de humedad inicial en la zona profundidad (%).

f = Dirección preferencial del flujo.

Ks = Conductividad de la zona de las raíces (mm/mes).

**7.1.2.3.2. Análisis de oferta de agua.** WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments. Los catchments tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen los descritos en el siguiente cuadro.

cuadro 3 Componentes análisis de oferta hídrica en el modelo WEAP. (SEI 2009)

ANÁLISIS DE OFERTA HÍDRICA EN WEAP		
INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA	Precipitación	Dependiendo de los datos de precipitación obtenidos, estos se deben procesar para lograr series de datos continuos para el periodo de modelación. Generalmente, los datos de precipitación pueden presentarse en diferentes formatos incluyendo isoyetas, y relaciones de altura-precipitación
	Temperatura	Debido a la distribución espacial y temporal de la temperatura, se considera que es suficiente una extrapolación por altura de la información de temperatura proveniente de un grupo de estaciones representativas dentro de la cuenca. El gradiente de temperatura con la altura se estima considerando los valores de temperatura promedio para estaciones ubicadas a diferentes elevaciones.
	Humedad relativa	La asignación de las variables humedad y viento requiere de una clasificación por altura de todos los catchments de la cuenca. Por ejemplo, para estas variables climáticas, se puede considerar el promedio mensual histórico de dos estaciones índices ubicadas en zonas altas y medias-bajas, asumiendo una nula variación inter-anual y una variación de altura dada por la diferencia de altura entre las estaciones base.
CONDICIONES HIDROLÓGICAS	Rios	Esta información hidrométrica se debe clasificar y ordenar de forma que se tengan disponibles datos de series históricas de caudales, las cuales serán posteriormente utilizadas en la calibración del modelo.
	Infraestructura física de control y aprovechamiento de RH	Los diferentes elementos de infraestructura física se deben localizar espacialmente. Así mismo, se debe identificar su importancia dentro de la construcción del modelo para poder asignar prioridades en el momento de la incorporación de operaciones de estos elementos. Los principales elementos a considerar como embalses, Sistemas de regadío, o sistema de distribución de agua potable para ciudades.

Para realizar la modelación se requiere de datos climáticos, entre los cuales se encuentran la precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento de la nieve, adicionalmente, se requiere de datos de los caudales, que son necesarios para poder comparar los resultados y poder

realizar calibraciones. La información obtenida relacionada con estos elementos se debe clasificar de forma que esté disponible para uso en el momento en que se incorporen los elementos dentro del modelo. (Proaño J., D. 2010)

**7.1.2.3.3. Análisis de demanda de agua.** Para complementar el balance hidrológico realizado por el modelo en sus componentes naturales e intervenidos es importante realizar un análisis de la demanda de agua. Este análisis considera una serie de sub-etapas como son:

- Definición de usos de suelo
- Cultivos de riego
- Demanda Urbana.

**7.1.2.4. Calibración.** El proceso de calibración se trata de encontrar un conjunto de parámetros hidrológicos que permitan obtener una representación de los caudales, que se asemejen a los datos históricos de la manera más cercana posible, para lograr esto, será necesario elaborar comparaciones entre las series de datos históricos versus los calculados en sitios donde existan estaciones hidrológicas.

Tacusi et. al (2016) señala que, desde el punto de vista de programación, WEAP no corre el modelo sino hasta que todos los datos necesarios están debidamente entrados en el modelo. Por ejemplo, si en un elemento específico falta un parámetro, WEAP suspende la corrida del modelo.

La calibración es evaluada por 4 índices/métricas, para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados, los índices de evaluación son: índice de eficiencia de Nash-sutcliffe, el sesgo (desviación relativa de los caudales), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación (R2)

Error medio cuadrático RMSE.

$$RMSE = \frac{100}{Qa} \sqrt{\frac{\sum(Q9-Qa)^2}{n}}$$

Dónde:

RMSE = Error medio cuadrático.

Q9 = Caudal generado.



$Q_a$  = Caudal aforado.

$n$  = Número de aforos.

Este índice permite comparar el ajuste entre los datos observados y los simulados, los valores de RMSE iguales a cero son óptimos ya que los errores no existirían y la relación sería perfecta, puede darse cualquier valor positivo.

**7.1.2.5. Creación de escenarios.** Una vez que se cuente con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos:

- Escenarios de crecimiento o cambio en la población
- Escenarios de uso de suelo
- Escenarios de clima

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas. Los escenarios de clima constituyen uno de los aspectos de mayor uso en un modelo agregado como WEAP.

Teniendo en cuenta estos postulados, se ve necesario que para el desarrollo y puesta en marcha de modelos hídricos se requiere de un uso adecuado de información que permita establecer el panorama o el escenario de referencia que represente la realidad. Duque (2015) anota que ante la falta de información para la representación total del balance hídrico se recomienda que se hagan esfuerzos de cooperación entre instituciones públicas, privadas y no gubernamentales con el fin de investigar y monitorear todos los procesos hidrológicos de las cuencas ya que ésta en el futuro será valiosa.

En lo que coincide SEI (2009) donde se afirma que en general, dependiendo de la disponibilidad de datos, se recomienda utilizar un periodo de calibración que sea lo suficientemente largo como para que capture un periodo en el cual se presente suficiente variabilidad en los parámetros climáticos, por ejemplo, que presente periodos húmedos y periodos secos, siempre y cuando la extensión en años y cantidad de datos existentes en las estaciones pluviométricas y climatológicas coincidan con los datos de caudales del mismo periodo, como por ejemplo de 20 años.

## 7.2 Comparación de oferta hídrica bajo escenarios de cambio utilizando el modelo WEAP.

En los últimos años la cantidad de agua en muchos países, se ha visto disminuida debido a actividades humanas como la deforestación, la contaminación o el uso inadecuado del recurso, es decir, cambios drásticos que alteran el curso natural de fuentes hídricas de alguna manera impredecibles, entre ellos el cambio climático, el aumento de la población y cambios en coberturas de suelo.

Por ello, resulta de gran importancia producir información y conocimiento sobre la variación de la oferta hídrica bajo diferentes escenarios donde encontramos que diversos estudios se han enfocado en este propósito, es decir en confirmar la vulnerabilidad del agua ante diferentes estímulos, utilizando la herramienta WEAP, entre los que se destacan estudios como el de Duque (2015), Tacusi, (2015) y Moncayo (2016), descritos a continuación.

*cuadro 5 Estudios destacados utilizando la herramienta WEAP.*

Estudios	Escenarios evaluados	Aportes a la monografía
Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña en función de su cobertura de suelo. Duque, 2015	* Coberturas de paramo, bosque y pasto.	Cobertura con mayor producción de flujo base fue el bosque con un valor de 11,50 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> , seguido del páramo, 6,20 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> , y el pasto, 1,40 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Modelación hidrológica en la subcuenca de pitumarca con la aplicación del modelo WEAP. Tacusi, 2015	*Aumento de la temperatura.	La oferta hídrica se redujo para los dos escenarios de 122,208 m <sup>3</sup> /s que era la oferta hídrica actual a 117,202 m <sup>3</sup> /s y 118,747 m <sup>3</sup> /s respectivamente.
	*Disminución de áreas de humedales andinos.	
Modelación hidrológica de la cuenca del rio bache, en el departamento del Huila utilizando el software WEAP. Moncayo, 2016	*Escenario de conservación. *Crecimiento de la frontera agrícola	En términos la oferta hídrica de la Cuenca disminuye para los dos escenarios en 50.4% y 30.9%
	* Cambio demográfico	

Moncayo et al. (2016) analizó el comportamiento de la cuenca del rio Baché en el departamento del Huila (Colombia) a través de un escenario de conservación y otro teniendo en cuenta los efectos

del crecimiento de la frontera agrícola o cambios en patrones de cultivo, considerando que hacia el año 2035 se haya ampliado en un 90% la zona boscosa de la cuenca abastecedora, y en igual porcentaje el crecimiento en las coberturas de café y pasto en áreas actuales.

Por su parte Tacusi et al (2016) determinó el comportamiento hidrológico en la subcuenca de Pitumarca en el departamento del Cusco (Perú) plateándose dos escenarios principales futuros proyectados para el año 2035, uno, enfocado en la disminución de áreas de humedales andinos en un 50%, y otro en el aumento de la temperatura.

Por otra parte, Duque (2015) presentó los resultados principales de la modelación hidrológica mensual de una cuenca de montaña tropical ubicada al nororiente del Ecuador, en la provincia de Napo que corresponde a la cuenca del río Cosanga, enfocado en los usos bosque, páramo y pasto, donde uno de los objetivos fue la determinación de la producción de agua de cada uso de suelo y como estos influyen en la composición del hidrograma natural de la cuenca.

Los anteriores estudios tienen en común, el haber utilizado el software WEAP (Water Evaluation And Planning System) para ejecutar la modelación, sin embargo, el proceso difiere entre estudios. En experiencias anteriores WEAP se ha utilizado para la construcción de modelos hidrológicos semidistribuidos, discretizados espacialmente ya sea por subcuencas (CCG-UC ,2009) como en el estudio de Tacusi et. al (2015) donde el área total de la subcuenca de Pitumarca se dividió en tres microcuencas que a su vez fueron consideradas las unidades hidrológicas con la ayuda del software SIG; o por bandas de elevación (Vargas, 2012) como en el estudio de Moncayo et. al (2016) donde se hizo de acuerdo al estudio de zonificación y clasificación de cuencas para el departamento del Huila del año 2005 encontrándose 18 subcuencas para el modelo, que se alimentó a través de bandas de elevación cada 500 metros, configurando un total de 66 unidades hidrológicas o catchments.

Sin embargo, Duque (2015) se plantea una discretización espacial a través de las coberturas de suelo existentes, es decir, cada cobertura de suelo (paramo, bosque y pasto) se representa como una unidad de respuesta hidrológica (URH) con el fin de evitar una fuerte parametrización del modelo, lo que conlleva a que el ajuste del modelo se realizara a través de la ecuación de continuidad.

En cuanto a la información climática que alimenta el modelo de la cuenca del Rio Bache (el estudio de Moncayo et. al, 2016) es tomada de la red de estaciones del IDEAM localizadas dentro y fuera del área de influencia, cuyos rangos de elevación van desde 866 msnm hasta 2326 msnm. Estas estaciones proporcionaron información media mensual para el periodo 1970 al 2014. Mientras que

en la zona de estudio de Duque et, al (2015) se disponía de información de doce estaciones climatológicas y una hidrológica. En contraste, el estudio de Tacusi et. al (2015) no conto con estaciones climatológicas dentro de la subcuenca, sino las existentes más cercanas que son operadas por SENAMHI (servicio nacional de meteorología e hidrología) que es la entidad encargada de los registros de datos meteorológico e hidrológicos, y se regionalizo mediante modelos matemáticos como el vector regional utilizando el software hydraccess para las 3 estaciones meteorológicas donde se elabora una “estación ficticia” que es una especie de promedio de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones. Los datos fueron considerados de los periodos de 1992 a 2011 para garantizar la validez de la información.

En la etapa de calibración que consiste en comparar entre las series de datos históricos versus los calculados en sitios donde existan estaciones hidrológicas, Tacusi (2015) tomo en cuenta descargas de caudal en un periodo de 20 años (1992-2011) y aforos mensuales obtenidos del Proyecto especial Plan Meriss - de la región Cusco, con el fin de comparar las variaciones mensuales del comportamiento mensual de los caudales generados. Mientras que Moncayo (2016) menciona que la etapa de calibración del modelo se desarrolló manualmente buscando reproducir con WEAP lo más cercanamente posible los correspondientes caudales históricos en un período de información de la estación hidrológica desde noviembre de 1971 hasta marzo de 2013 a resolución mensual, siendo necesario comparar con los simulados aplicando métricas estadísticas donde se estime la precisión del modelo. Duque (2015) en su estudio considero los periodos de calibración de enero de 1974 a diciembre de 1995 y de validación de enero de 1996 a diciembre de 2006.

En cuanto a resultados, Tacusi (2015) por su parte, con respecto al aumento de la temperatura para el año 2035 de la subcuenca de Pitumarca menciona que se tiene una nueva oferta hídrica de 118.747 m<sup>3</sup>/s a comparación del escenario actual se tiene una reducción de 2.83 % en 20 años, lo que indica una disminución de 0.173 m<sup>3</sup>/s al año; y con respecto a la disminución del área de humedales andinos en un 50 %, para una proyección futuro al año 2035, se tiene una oferta hídrica de 117.202 m<sup>3</sup>/s lo que representa 0.251 m<sup>3</sup>/s menos al año.

Moncayo (2016) en su estudio indica que en términos generales el comportamiento de la oferta hídrica de la Cuenca del río Baché disminuye tanto para el escenario de crecimiento poblacional como para uso agrícola del municipio de Santa María en el departamento del Huila, en 50.4% y 30.9% respectivamente. Duque (2015), por su parte concluyo que la cobertura con mayor

producción de flujo base fue el bosque con un valor de 11,50 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, seguido del páramo, 6,20 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, y el pasto, 1,40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Los anteriores resultados demuestran que la oferta hídrica es vulnerable ante cambios específicos como aumento de temperatura y aumento de población, así mismo la variación de coberturas también son causantes de preocupación respecto a la posible escasez física de agua ya que además se especifica que particularmente en los estudios mencionados la oferta hídrica disminuye. Lo que refuerza lo afirmado por Bates et ál., (2008) sobre que los problemas relacionados con el agua desempeñan un papel crucial en el conjunto de las vulnerabilidades regionales y por ello, la relación entre el cambio climático y los recursos hídricos suscita una preocupación y un interés de primer orden.

Frente a este panorama hay que tener en cuenta que en el quinto informe del IPCC se reporta que la temperatura mundial se ha incrementado en 0.8 °C desde principios del siglo XX y se estima que a mediados del presente siglo de continuar las emisiones de CO<sub>2</sub> como viene aconteciendo en la actualidad habrá un aumento adicional de temperatura de 1.4 a 2.6°C. (IPCC, 2013) además que la población mundial crece a un ritmo de unos 80 millones de personas al año (USCB, 2012), lo que ratifica que estos cambios exacerbarán los riesgos asociados con variaciones en la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos independientemente de la zona o el país.

Particularmente Colombia siempre se consideró un país rico en agua y así lo ratificó el IDEAM (2014) al considerar que clasifica como uno de los países con mayor oferta hídrica natural del mundo, con un rendimiento hídrico a nivel nacional de 56 l/s-km<sup>2</sup> que supera el rendimiento promedio mundial (10 l/s-km<sup>2</sup>) y el rendimiento de Latinoamérica (21 l/s-km<sup>2</sup>). Además, el ENA (2014) indica que del volumen total anual de precipitación el 62% se convierte en escorrentía superficial, equivalente a un caudal medio de 63.789 m<sup>3</sup>/s, de los cuales la cuenca Magdalena-Cauca contribuye con el 14% (8.595 m<sup>3</sup>/s), la Amazonia con 37% (23.626 m<sup>3</sup>/s), la Orinoquia con 26% (16.789 m<sup>3</sup>/s), el Caribe contribuye con el 9% (5.799 m<sup>3</sup>/s) y el Pacífico aporta el 14% (8.980 m<sup>3</sup>/s). Esto sin contar con el agua subterránea determinada por las condiciones geológicas del suelo y el agua marino costera.

Sin embargo, el IDEAM (2017) en su informe de análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático en Colombia presenta resultados a nivel departamental y municipal, revelando que el 100% de los municipios de Colombia son vulnerables y tienen algún nivel de riesgo por cambio

climático. Lo que se hace evidente en la realidad colombiana al saber que hay departamentos donde escasea el agua como en el Casanare y la Guajira y en contraposición se presentan inundaciones como la reciente en Mocoa, situaciones que afectan la calidad de vida de las personas.

Es decir que ser uno de los países más ricos en términos de disponibilidad de agua y también hacer parte del continente con más recursos hídricos no implica que no haya regiones que no padezcan escasez, entre las razones se pueden mencionar que la población y las actividades económicas estarían concentradas en cuencas de poco líquido o que no puede ser accesible físicamente o que pueda estar contaminada y no sea potable, incluso que el sistema de tratamiento de agua no tenga la cobertura suficiente para la población en crecimiento, pero más allá de eso y de la influencia que tenga el cambio climático sobre la oferta de agua, el problema en sí no es la cantidad que haya disponible sino el modo en que se la maneje y distribuya.

Con respecto a lo anterior, la puesta en marcha de procesos de modelación hídrica son acciones fundamentales, ya que como lo encontrado en los diferentes referentes se establece que dichos modelos anteceden a la toma de decisiones y permiten generar medidas para la mitigación de vulnerabilidad en el desarrollo de una comunidad. Generando el conocimiento de posibles escenarios futuros que permitan desarrollar alertas tempranas y por ende medidas de gestión del riesgo. En este sentido SEI (2009) considera que WEAP es un soporte fundamental para la gestión integral del agua en los escenarios futuros proyectados por la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) y también en un instrumento clave para la construcción colectiva del conocimiento con la participación de actores representativos en la gestión de recursos de cada subzona hidrográfica en el proceso de planificación ADR (Apoyo a decisiones robustas).

### **7.3 Vulnerabilidad presente en el recurso hídrico.**

Con el fin de analizar el grado de vulnerabilidad del recurso hídrico, se toma en cuenta el índice de escasez que se establece como la relación entre la oferta hídrica neta superficial y la demanda total de agua ejercida en el desarrollo de actividades económicas y sociales. La misma se registra cuando la cantidad de agua tomada de las fuentes existentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, de los sistemas de producción y de las demandas potenciales (IDEAM, 2004).

Para el análisis de la información se desarrolló a partir de la metodología propuesta por IDEAM (2004) el cálculo del índice de escasez con el que se evaluó la vulnerabilidad frente a la reducción del caudal estableciendo la relación con los escenarios de cambio climático. el cálculo del índice de escasez relacionado en la siguiente formula.

$$IE = D/On * 100\%$$

Donde:

IE = Índice de escasez (%)

D = Demanda de agua (m3)

On. = Oferta hídrica superficial neta (m3)

Considerando el estudio de Labrador et, al. (2016) Titulado “Desarrollo de un modelo para la planificación del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del rio Aipe, en el Huila, Colombia” se obtienen los datos de caudales de la línea base (1980-2011) y la estimación de los caudales bajo dos escenarios de cambio climático en clima húmedo y clima seco para el periodo (2011-2050), descritos en el siguiente cuadro.

*cuadro 6 Caudales cuenca hidrográfica del rio Aipe, tomado de Labrador (2016)*

	Caudal m3.s-1
Línea base	15.31
Escenario clima húmedo	18.98
Escenario Clima seco	5.24

Como se puede observar en el clima húmedo el aumento del caudal fue del 3.67 m3 s-1 lo que representa un aumento del 23.97%, mientras que en el clima seco el caudal disminuye 10.07 m3 s-1, mostrando una reducción del 65.77%. Este caudal medido se tomará como la oferta hídrica para calcular el índice de escasez en cada escenario.

En cuanto a la demanda, para su cálculo se tomó en cuenta la resolución 0330 del ministerio de vivienda, ciudad y territorio por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS, donde se obtiene la dotación neta máxima (L/Hab\*Día) de acuerdo a la altura promedio sobre el nivel del mar, como se indica en la siguiente figura.

cuadro 7 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (Ras, 2017)

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
>2000 msnm	120
1000 – 2000 msnm	130
<1000 msnm	140

Teniendo en cuenta que el rango altitudinal de la cuenca del río Aipe varía entre los 390 y los 1900 msnm, lo que indica un promedio de 1145 msnm, la dotación neta máxima (L/Hab/ Día) es de 130 litros. Para obtener la demanda, este dato lo multiplicamos por el número de habitantes de la cuenca que según el estudio es de 23.513 habitantes, así:

$$\text{Demanda} = 23.513 \text{ habitantes} \times 130 \text{ L/Hab/Día} = 3.056.690 \text{ L/Día}$$

Con el fin de poner en los mismos términos de unidades que la oferta para operar, tenemos:

$$\text{Demanda de } 3.056.690 \frac{L}{\text{Día}} = \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ Día}}{86400 \text{ s}} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aplicamos la fórmula para cada escenario:

$$\text{Índice de escasez} = \frac{\text{DEMANDA}}{\text{OFERTA}} \times 100$$

➤ Línea base

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.035 \text{ m}^3/\text{s}}{15.31 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.23\%$$

➤ Escenario clima húmedo

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.035 \text{ m}^3/\text{s}}{18.98 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.18\%$$

➤ Escenario clima seco

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.035 \text{ m}^3/\text{s}}{5.24 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.67\%$$

En el siguiente cuadro se establece por categoría los umbrales críticos de presión sobre el recurso hídrico e interpretación del porcentaje de oferta hídrica utilizada.



cuadro 8 Umbrales críticos de presión, índice de escasez. Metodología índice de escasez. IDEAM, 2004

CATEGORIA	% DE LA OFERTA HIDRICA	INTERPRETACIÓN
<b>ALTO</b>	>40%	Existe fuente de presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico, se requiere fuertes inversiones económicas para mejorar la eficiencia de la utilización de agua en los sectores productivos y en los sistemas de abastecimiento de agua potable.
<b>MEDIO</b>	20-40%	cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos.
<b>MODERADO</b>	10-20%	indica que la cantidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador de desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento del agua y desarrollar proyecciones del recurso hídrico a corto y largo plazo.
<b>BAJO</b>	<10%	No se experimental presiones importantes sobre el recurso hídrico en términos de cantidad.

Relacionando la Oferta Hídrica Neta Superficial en cada escenario con la Demanda de la cuenca del río Aipe, el índice de Escasez calculado se relaciona en el siguiente cuadro.

cuadro 9 índice de escasez de agua superficial cuenca río Aipe

CUENCA RIO AIPE	Oferta (m3/s)	Demanda (m3/s)	Índice Escasez (%)	Categoría
Línea base	15.31	0.035	0.23	Bajo
Escenario clima húmedo	18.98	0.035	0.18	Bajo
Escenario clima seco	5.24	0.035	0.67	Bajo

El río Aipe es tributario del río Magdalena, su Índice de Escasez calculado de manera global presenta un porcentaje menor al 10%, correspondiente a una categoría baja de presión sobre el recurso hídrico, denotando una alta disponibilidad de agua en condiciones de calidad y cantidad aptas para la satisfacción de los usos demandados.

En condiciones actuales del estudio (2016), es decir en la línea base el índice de escasez es del 0.23% que corresponde a una categoría de baja de presión sobre el recurso hídrico, mientras que en un escenario de clima húmedo este índice disminuye debido claramente al aumento que la

humedad. En un escenario de clima seco, es decir cuando la temperatura aumenta este índice aumenta a 0.67% lo que indica que el aumento de temperatura si influye en la oferta hídrica, tal vez no de manera grave aún, pero genera un cambio que, de continuar así, se pondría en riesgo la disponibilidad de agua de la cuenca. Lo que puede constituirse como una prueba de que la variación en los patrones de clima (cambio climático y variabilidad ) pueden alterar la disponibilidad y por ende desarrollar vulnerabilidad en cuanto al recurso.

Por otra parte, el estudio de Labrador (2016) del que se tomaron los datos, no solo tiene en cuenta como factores de cambio en el clima (húmedo o seco), sino también la variación en variables de población, es decir calcula la oferta hídrica necesaria en cuanto a un aumento de un 2% de población, y uno de 10%. Es interesante considerar estos datos también para el cálculo de índice de escasez. Así, se considerarían los siguientes datos de población y el caudal resultante.

*Cuadro 10 Escenarios de población, cuenca del rio Aipe. tomado de Labrador (2016)*

	Habitantes	Caudal m3.s-1
Línea base	23.513	15.31
Incremento del 2%	23.983	14.88
Incremento del 10%	25.864	10.87

Respecto al caudal calculado de la línea base, la relación de población y caudal es inversamente proporcional, es decir a un aumento de población, el caudal disminuye, evidentemente porque aumenta el consumo del recurso.

Entonces, según el rango altitudinal de la cuenca del rio Aipe, la dotación neta máxima (L/Hab/Día) es de 130 litros. Para obtener la demanda, este dato lo multiplicamos por el número de habitantes de la cuenca, teniendo en cuenta la variación de la población y lo expresamos en las mismas unidades de la oferta, es decir:

➤ Línea Base

$$\text{Demanda} = 23.513 \text{ habitantes} \times 130 \text{ L/Día} = 3.056.690 \text{ L/Día} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$$

➤ Aumento de población en 2%

$$\text{Demanda} = 23.983 \text{ habitantes} \times 130 \text{ L/Día} = 3.117.790 \text{ L/Día} = 0.036 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Aumento de población en un 10%

$$\text{Demanda} = 25.864 \text{ habitantes} \times 130 \text{ L/Día} = 3.362.320 \text{ L/Día} = 0.038 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ya con los datos establecidos aplicamos la fórmula de índice de escasez para cada escenario:

$$\text{Índice de escasez} = \frac{\text{DEMANDA}}{\text{OFERTA}} \times 100$$

- Escenario de aumento de población en un 2%

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.036 \text{ m}^3/\text{s}}{14.88 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.24$$

- Escenario de aumento de población en un 10%

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.038 \text{ m}^3/\text{s}}{10.87 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.34$$

En general el índice obtenido en cada escenario se muestra en el siguiente cuadro

*Cuadro 11 índice de escasez de agua superficial cuenca río Aipe*

CUENCA RIO AIPE	Índice Escasez (%)	Categoría
Línea base	0.23	Bajo
Escenario clima húmedo	0.18	Bajo
Escenario clima seco	0.67	Bajo
Aumento de población en un 2%	0.24	Bajo
Aumento de población en un 10%	0.34	Bajo

El índice de escasez calculado de manera global para la cuenca del río Aipe corresponde a una presión menor del 10%, es decir que no se experimenta presiones importantes sobre el recurso. Sin embargo, se nota una variación importante en cuanto a cada escenario, para el escenario base el índice de escasez es del 0.23% que se ve afectado cuando las condiciones cambian, así, al aumentar la humedad debido probablemente a una mayor escorrentía el índice, es decir la presión sobre el

recurso disminuye a 0.18%, por el contrario cuando el clima es seco la presión aumenta debido a que si hay mayor temperatura, aumenta también la evaporación del agua y el índice de escasez también aumenta en este caso a un 0.67%, que sería hasta aquí el escenario que más impacta la oferta hídrica.

En cuanto a los escenarios de aumento de población, la relación es directamente proporcional. A medida que la población aumenta, también lo hace el índice de escasez, aumentando el número de habitantes de apenas el 2%, el índice calculado es de 0.24% y cuando el aumento se hace del 10% de población, la presión sobre el recurso hídrico sería de 0.34%.

Ahora, con el fin de verificar aún más el efecto que tienen estos escenarios sobre la oferta hídrica, se toma en cuenta los dos peores escenarios anteriormente mencionados, es decir, la oferta más baja que arrojó WEAP en el estudio de Labrador (2016) que es de 5.24 m<sup>3</sup>/s con el aumento del 10% de la población que serían 25.864 mil habitantes, para calcular el índice de escasez. Así:

$$\text{Oferta} = 5.24 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Demanda} = 25.864 \text{ habitantes} \times 130 \text{ L/Día} = 3.362.320 \text{ L/Día} = 0.038 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Índice de escasez} = \frac{\text{DEMANDA}}{\text{OFERTA}} \times 100$$

Aplicando la fórmula:

$$\text{Índice de escasez} = \frac{0.038 \text{ m}^3/\text{s}}{5.24 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100 = 0.74$$

El índice de escasez de la cuenca del río Aipe aumenta considerablemente al asociar una oferta hídrica menor a la de la línea base que provenía del escenario de clima seco arrojado por WEAP, y el escenario de aumento de población en un 10%, obteniendo un índice de 0.74%, sin embargo, tampoco es representativo para una presión considerable, sino se mantiene dentro de un rango que indica baja presión sobre el recurso hídrico.

Lo que coincide con el primer estudio de la Evaluación Regional del Agua (ERA) en el departamento del Huila, realizado por la CAM (Región Autónoma del Alto Magdalena) donde debido a que la mayoría de caudales son permanentes, y a que el 20% del territorio del departamento corresponde a parques nacionales y regionales, el Huila es uno de las regiones con

mejor producción hídrica, tanto que, según el IDEAM, el Huila aporta la tercera parte del volumen nacional.

Sin embargo, la relación entre oferta y demanda de agua proyectadas para los siguientes años mostrarían con el transcurrir de los años un aumento en la presión del recurso hídrico ya que según el documento de ‘Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100’ entre los efectos que se esperan para el año 2100 está el aumento de la temperatura media anual en 2.14°C a nivel nacional. Además, según las más recientes proyecciones de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Colombia podría tener un crecimiento poblacional de 14.8% para el año 2050.

En conclusión, el índice de escasez es útil criterio técnico para actuar de manera afectiva sobre el recurso hídrico, a pesar de que todos los índices calculados anteriormente correspondieron a una categoría de presión baja sobre el recurso presente en la zona, tanto el cambio climático como el aumento de población afectan directamente la cantidad del recurso hídrico, por lo mismo se necesita un uso racional del mismo, como controlar las concesiones, evitar la contaminación, el mal uso en el sector agrícola, entre otros; pero además acciones encaminadas a la producción de ecosistemas productores de agua.

## **8. CONCLUSIONES**

La modelación hidrológica mediante el uso de la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos WEAP, aporta el conocimiento de la oferta hídrica bajo escenarios de cambios de uso y crecimiento poblacional y mejora el apoyo a la toma de decisiones, especialmente en instrumentos de planeación regional e integral del recurso hídrico.

El software de modelación de recursos hídricos WEAP es una herramienta de gran utilidad como apoyo a las Autoridades Ambientales, tomadores de decisión, proveedores y usuarios del recurso hídrico puesto que brinda la posibilidad en el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático brindando orientación en tareas de planificación y gestión del recurso hídrico.

Las garantías de suministro del recurso hídrico en la cuenca del río Aipe en el Huila con respecto al índice de escasez y bajo los escenarios de cambio climático, no se verán afectadas debido a que como en la línea base, los porcentajes de dicho índice encajan en la categoría baja donde no se presentan presiones importantes sobre la cantidad del recurso hídrico.

## **9. RECOMENDACIONES**

Al momento de comenzar cualquier tarea de modelación hidrológica se requiere recopilar toda la información disponible para construir la relación que mejor represente lo que efectivamente está sucediendo en la cuenca definida. Por lo tanto, se presentarían limitantes cuando la cobertura de estaciones meteorológicas no es la adecuada.

Es necesario dimensionar medidas de adaptación acordes con los escenarios de cambio climático. Por ejemplo, la promoción de cultivos con requerimientos hídricos menos exigentes, aprovechar especies y semillas nativas que no alteren la dinámica eco-hidrológica, incrementar la capacidad de infiltración y recarga de la cuenca para alimentar el acuífero a través de mayores tiempos de retención hídrica, promover prácticas de cosecha de agua lluvia, establecer prácticas de diseño hidrológico para retener agua aprovechando la topografía de la cuenca.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almorox Alonso, J. (16 de Marzo de 2015). Material de Clase, Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-laingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-7/IMPLICACIONES-HIDROLOGICAS.pdf>
- Angarita, H. (2014). Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo weap de la macro cuenca del magdalena y resultados de las simulaciones. Bogotá
- Buytaert, W., R. Célleri, B. De Bievre & F. Cisneros. 2012. Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. Revista Colombia tiene Páramos, 2: 8-27 p. C3%B3n-h%C3%ADdica.pdf
- Castro, L. 2013. Evaluación del posible efecto de escenarios de cambio climático en la calidad del agua de la cuenca Ubaté - Suarez. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia
- Dourojeanni, A; Jouravlev, A; Chávez, G. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Santiago, CL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). ISSN versión electrónica: 1680-9025. Serie Recursos Naturales e Infraestructura No. 47. 83 p. Disponible en: <http://www.cepal.org/dnri/publicaciones/xml/5/11195/lcl1777-p-e.pdf>
- Duque, L.F., Vázquez, R.F., 2015. Modelación de la Oferta Hídrica en una Cuenca de Montaña Tropical en Función de su Cobertura del Suelo. AquaLAC. 7(1), 63-76.
- Flores López, F. (2013). Documentación Técnica del Modelo WEAP para el Alto Magdalena Versión Beta
- García, M.C., Piñeros, A., Quiroga, F. A., Ardila, E. 2012. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de ingeniería. Universidad de los andes. Bogotá D.C, Colombia.



<http://weap21.org/downloads/CCAssessmentCalifornia.pdf>

[http://www.patrimonionatural.org.co/cargaarchivos/centroDoc/informe\\_regulaci%](http://www.patrimonionatural.org.co/cargaarchivos/centroDoc/informe_regulaci%)

IPCC. (2008). *Climate change and water: IPCC Technical Paper VI*. In: J. Bates, B. Kundzewicz, Z. Wu, S. Palutikof (Ed.). *Climate change and water* (Vol. 403, p. 210). doi:10.1016/j.jmb.2010.08.039

IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Labrador, A.F., Zúñiga, J.M., Romero, C.J. 2016. Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región*. 2016: 15 (1):23-35.

Logreira A. R. (2009). Metodologías técnicas en el ámbito biofísico para la determinación y monitoreo de los servicios ambientales relacionados con regulación hídrica y control de sedimento, y su relación con el uso del suelo. Convenio de Asociación No. 116 de 2008. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) – Patrimonio Natural-Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas, Republica de Colombia. Disponible en:

MAVDT. (18 de Mayo de 2006). Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/res\\_0872\\_180506.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_0872_180506.pdf)

McNaughton, K; Jarvis, P. 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In T. Kozlowski. Ed. *Water Deficits and Plant Growth*. London, UK, Academic Press, INC. p. 1-47.

MDE. (17 de Noviembre de 2000). MDE. Obtenido de Ministerio de Desarrollo Económico: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=38541#0>

MMA. (1993). Ministerio de Medio Ambiente. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley\\_0099\\_22129\\_3.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ley/ley_0099_22129_3.pdf)

- MMADS. (2 de Agosto de 2012). Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/decreto/dec\\_1640\\_020812.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/decreto/dec_1640_020812.pdf)
- Moncayo, Oscar, et al. 2016. Modelación Hidrológica De La Cuenca Del Río Baché En El Departamento Del Huila Desde La Herramienta De Planificación Integrada De Recursos Hídricos. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC). “Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” Suiza: IPCC, 2007, pp. 25-46.
- Purkey, D. R., Huber-Lee, A., Yates, D., Hanemann, M., & Herrod-Julius, S. (2007). Integrating a Climate Change Assessment Tool into Stakeholder-Driven Water Management Decision-Making Processes in California. Obtenido de
- Ramírez, R., E. 2008. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. Revista Virtual REDESMA 2 (3)
- Ramírez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud & E.
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., Bréthaut, C., 2015 Climate changes impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications. Regional Environmental Change. 15 (3), 505-515.
- SEI (Stockholm Environment Institute) 2001. WEAP: Water Evaluation and planning system – user guide. Boston, USA.
- Singh, RB ; Kumar, D. 2014. Water Scarcity. In S. Eslamian. Ed. Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Managemen. New York, US. p. 519-543.