



# EL COLEGIO DE MÉXICO

## CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS

### **MAESTRÍA EN ECONOMÍA**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN ECONOMÍA

#### **MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL HIDRO-ECONÓMICO PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO**

**JORGE JUVENAL CAMPOS FERREIRA**

**PROMOCIÓN 2016-2018**

**ASESOR:**

**DR. ANTONIO YÚNEZ NAUDE**

JULIO, 2018.

## Agradecimientos.

Al Centro de Estudios Económicos y a El Colegio de México, por permitirme el participar en un programa académico de calidad como la Maestría en Economía; por brindarme un espacio en el cual pude aprender de excelentes seres humanos que al igual que yo buscan superarse como personas, como comunidad y que buscan ayudar a resolver las grandes problemáticas del país.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por invertir en mi formación académica y científica, la cual será utilizada para ayudar al desarrollo de la ciencia y tecnología del país y la mejora de la calidad de vida de sus ciudadanos. Igualmente, agradezco al pueblo de México, cuyas aportaciones sirvieron para financiar las becas de miles de estudiantes de posgrado y que, en años futuros, verán los frutos de dicha inversión.

A mis compañeros de Maestría, por todo el apoyo brindado durante los cuatro semestres de duración del programa. Mi agradecimiento especial a Edith González, a Ratzanyel Rincón y Axel E. González, por conformar junto conmigo un fenomenal equipo interdisciplinario que hizo que los trabajos fueran más sencillos y las tardes más llevaderas.

A mi familia, por todo el apoyo que me brindaron; a mis padres, Catalina Ferreira y Juvenal Campos, por su cariño y ejemplo de integridad y disciplina; y a mis hermanos menores, Andrés y Ulises Campos, esperando que este trabajo les sirva como ejemplo y motivación para completar sus respectivas carreras.

## Resumen.

El presente trabajo consiste en la propuesta de un modelo hidro-económico (tal como lo define Harou, 2009) de equilibrio general en el que se incorporen tanto la mecánica del ciclo del agua como las interrelaciones que existen entre la oferta y la demanda de dicho recurso mediante la modelación matemática de los procesos de la naturaleza que afectan la captación del recurso y el comportamiento de los agentes encargados de su distribución y consumo. El objetivo de dicha modelación es la propuesta y evaluación de políticas públicas informadas en materia de manejo y administración del recurso hídrico. La principal aportación del trabajo es que es un modelo interdisciplinario, basado en la experiencia previa del autor en dos ramas distintas del conocimiento: la hidrología y la economía.

**Palabras clave:** Modelos Hidroeconómicos. Modelos de Equilibrio General. Modelación. Hidrología.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>i</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>ii</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Revisión de literatura.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Situación del Agua en México.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Modelos Hidrológicos.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Elementos Hidrológicos.....	8
2.2.2 Acuífero.....	9
2.2.3 Abstracciones Hidrológicas.....	10
<b>2.3 Modelos de Equilibrio General.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Modelos de Equilibrio General Computable.....	11
2.3.2 Valuación Económica del agua.....	12
<b>2.4 Modelos Hidro-económicos.....</b>	<b>13</b>
2.5 Aplicaciones.....	15
2.6 Aplicaciones a México y estudios para el país.....	18
<b>3. Propuesta de modelo hidroeconómico simple.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 El modelo simple.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Modelación Hidrológica.....</b>	<b>21</b>
3.2.2 Desarrollo del modelo.....	22
3.2.3 Ecuación de balance hídrico dentro de la subcuenca.....	23
3.2.4 Ecuación de abstracciones hidrológicas.....	23
3.2.6 Ecuación de volumen de agua aprovechable.....	26
<b>3.3 Módulo Económico.....</b>	<b>28</b>
Problema de los hogares.....	29
Problema de la industria.....	29
Problema de la agricultura.....	30

Condiciones de vacío de mercado .....	32
<b>4. Modelo hidro-económico. ....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Módulo Meteorológico. ....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Módulo Reservorio. ....</b>	<b>37</b>
<b>4.4 Módulo Agua Subterránea. ....</b>	<b>38</b>
<b>4.5 Módulo del servicio público de agua.....</b>	<b>39</b>
<b>4.6 Módulo del servicio privado de agua. ....</b>	<b>41</b>
<b>4.7 Conclusiones del Módulo de Oferta. ....</b>	<b>41</b>
<b>4.8 Módulo de Consumidores. ....</b>	<b>43</b>
#1) Hogares. ....	43
#2) Industria. ....	43
#3) Agricultura. ....	44
<b>4.9 Condiciones de equilibrio. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.10 Limitaciones del Modelo. ....</b>	<b>48</b>
<b>5. Conclusiones. ....</b>	<b>49</b>
<b>6. Referencias. ....</b>	<b>51</b>
<b>7. Anexos. ....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 1. Sobre la obtención de los datos. ....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 2. Fundamento teórico. ....</b>	<b>56</b>
<b>INDICE DE TABLAS. ....</b>	<b>63</b>
<b>INDICE DE FIGURAS. ....</b>	<b>63</b>

## 1. Introducción

La región norte de México se caracteriza por un alto dinamismo económico, altos niveles de crecimiento poblacional y grandes volúmenes de producción agrícola, principalmente en superficies de riego. El mantenimiento de esta dinámica requiere de agua, cuya demanda se satisface principalmente de la extracción de los acuíferos y de las transferencias del líquido provenientes de otras regiones del país y de los Estados Unidos (EUA), las cuales se encuentran en un grado de sobreexplotación cada vez más severo.

Salvo en las grandes urbes, la zona sur de México cuenta con una mayor disponibilidad del agua a lo largo del año. Sin embargo, igualmente se enfrenta a condiciones de presión hídrica debido al desperdicio, la ineficiencia de uso por parte de algunos sectores y a la necesidad de satisfacer las demandas urbanas con transferencias de agua de zonas donde el recurso es más abundante.

Aunado a esta problemática se tiene el cambio climático; según pronósticos del Panel Internacional por el Cambio Climático (IPCC, *International Panel on Climate Change*), para diversos escenarios posibles de emisiones de CO<sub>2</sub> se esperan aumentos de 0.6 a 4.0 °C en la temperatura promedio para el año 2099, a la vez que se espera que las regiones calurosas presenten sequías más severas y las húmedas, periodos con mayores volúmenes de precipitación (IPCC, 2014). Estas problemáticas (demandas de agua y cambio climático) necesitan del trabajo conjunto entre especialistas del agua y economistas que conozcan de las dinámicas de consumo de los diferentes agentes de la economía.

Con el presente trabajo se pretende iniciar la atención de la urgente necesidad de estudiar la problemática del agua en México a partir de un enfoque interdisciplinario de economía e ingeniería. Mientras los modelos hidrológicos se circunscriben a cuestiones de ingeniería, los económicos que consideran al uso del agua incorporan la disponibilidad del líquido y sus cambios como una variable exógena, ignorando las especificidades de tales procesos. Un estudio que combine los dos enfoques podría ayudar a tener un mejor entendimiento de la administración del agua y a plantear soluciones a problemas específicos de las regiones de estudio, a partir de la estimación de los posibles efectos de cambios en la oferta y demanda de agua. Este tipo de enfoque, basado en “Modelos Hidro-económicos”, se ha aplicado en regiones de otros países para la

planeación e implementación de políticas de manejo de agua y para el estudio del cambio climático (Harou et al., 2009).

La presente investigación se basa en este tipo de enfoque con el objetivo de proponer un modelo hidro-económico de equilibrio general en el que se incorporen las interrelaciones que existen entre la oferta y la demanda del agua. Para ello, es necesario modelar los procesos de la naturaleza que afectan la captación del recurso y su uso en las actividades humanas, así como el comportamiento de los agentes encargados de distribuirlo y de los que lo consumen en sus actividades económicas y para su subsistencia.

Excluyendo la introducción, el trabajo está compuesto de 3 secciones. La primera contiene una revisión de la literatura acerca de la situación y la problemática actual del agua en México y una descripción de la teoría detrás de los modelos hidrológicos, económicos e hidro-económicos. En la segunda se desarrolla un modelo básico de equilibrio general en el que consiste en un módulo hidrológico de oferta de agua y uno económico de demanda. Este modelo es un punto de partida básico para construir uno más complejo desarrollado en la sección 3, que sirve, entre otras, para evaluar a partir de simulaciones políticas alternativas de conservación y uso eficiente del agua. En este modelo, llamado hidro-económico, se incluyen más elementos del complejo sistema de oferta y administración del agua y de la economía en general, que consume el líquido. La tesis incluye dos anexos: en el primero se presentan las fuentes de bases de datos existentes para la calibración de los modelos propuestos, mientras que en el segundo se ahonda en el fundamento teórico de algunos términos utilizados para las ecuaciones de agua aprovechable de un sistema hidrológico.

## 2. Revisión de literatura

### 2.1 Situación del Agua en México.

Según la Comisión Nacional del Agua de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (CONAGUA-SEMARNAT, 2016) México recibe de manera anual aproximadamente 1'449,471 millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación. De esta, se estima que el 72.5% se evapora, transpira y regresa a la atmósfera; el 21.2% escurre por ríos o arroyos; y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. En el rubro de agua subterránea, México comparte derechos con Estados Unidos, Guatemala y Belice a través de la explotación de 10, 7 y 1 acuíferos transfronterizos, respectivamente.

Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, México cuenta anualmente con 446,777 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable, como puede verse en el esquema del ciclo del agua en la fig.1.

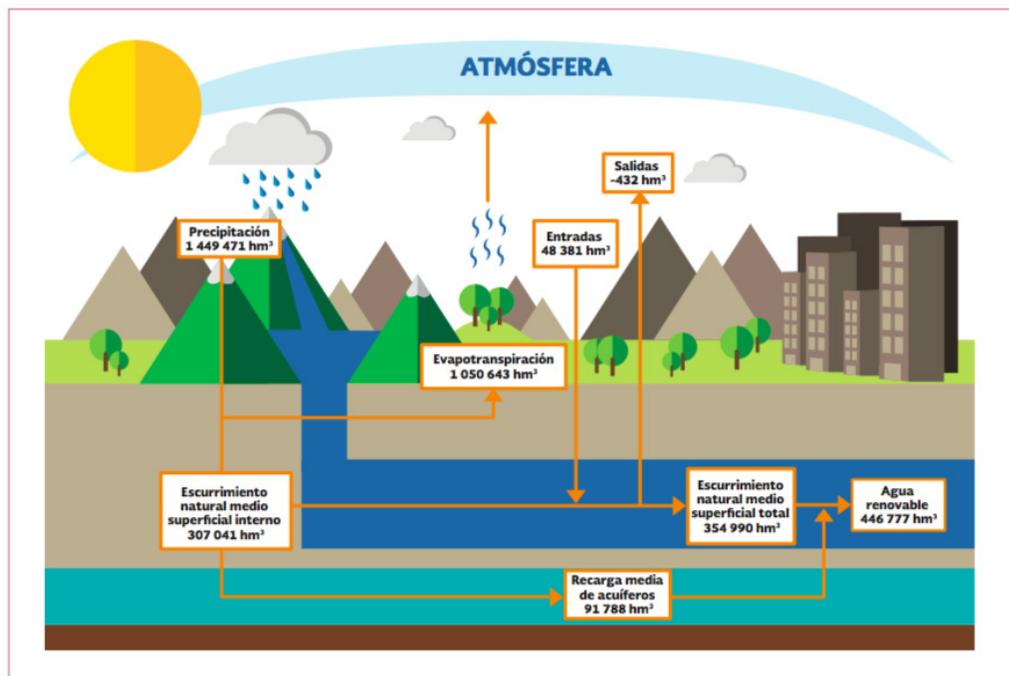


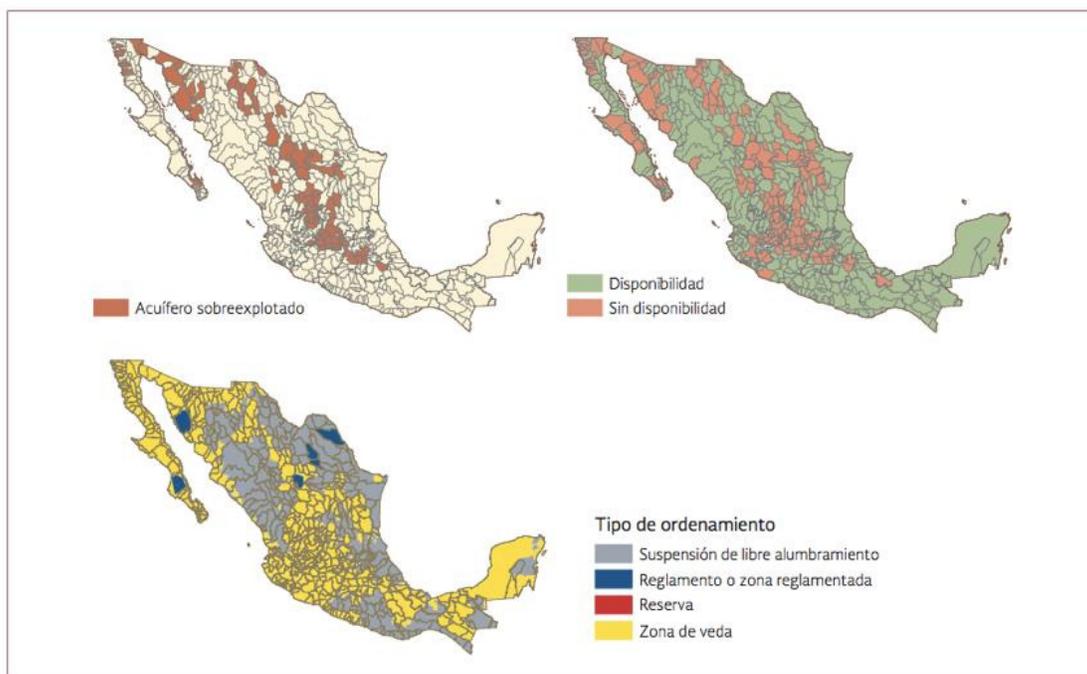
Fig. 1 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2015

Fuente: CONAGUA, 2016.

Conagua reportó que para el año 2016 el sector que más agua utiliza en el país es el agrícola con un 68.23% del agua total utilizada para fines económicos, seguido del

abastecimiento al sector público urbano (14.52%), el industrial (7.4%) y el resto se reparte entre múltiples usos como Servicios, Acuicultura, Agroindustrial, Comercio, etc. (CONAGUA-SEMARNAT, 2016).

En cuanto al agua subterránea, Conagua reporta la existencia de 653 acuíferos, los cuales aportan el 38.9% del volumen total para usos consuntivos. Hay 105 acuíferos sobreexplotados y 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión salina (fig. 2).



Fuente: CONAGUA (2016b).

Fig. 2 Situación de los acuíferos a finales del 2015. Fuente: CONAGUA, 2016.

La cantidad de agua renovable disponible por habitante en México fue de 3,692 m<sup>3</sup> para el año 2016, pronosticándose que para 2030 ésta cantidad disponible será, en promedio, de 3,250 m<sup>3</sup>, una reducción del 11%. Dicha disponibilidad diferirá por región, ya que para algunas de las regiones hidrológico-administrativas del país (principalmente las del norte), el agua renovable per cápita alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1,000 m<sup>3</sup>/hab/año (una reducción de hasta el 73%), que implica condiciones de estrés hídrico o escasez del agua para la población. Estas reducciones en la disponibilidad se deberán al crecimiento acelerado de la población y la migración interna de sur a norte motivada por la búsqueda de mejores oportunidades económicas.

México ha avanzado en la regulación del uso del agua al “incluir un sistema legal más detallado y organizado, una autoridad nacional del agua en forma, el funcionamiento de un sistema de derechos de agua y un mercado incipiente del recurso hídrico” (Guerrero García Rojas, Yunez-Naude, & Medellín-Azuara, 2008, página 11). Sin embargo, se enfrenta a problemas relacionados con usos no sustentables e ineficientes, que afectan la disponibilidad y el equilibrio de los ecosistemas a corto y largo plazo. A ello se le añade la pérdida de competitividad económica en las regiones con mayor afectación.

Estos problemas tienen su origen en políticas de precios distorsionados, subsidios y otros incentivos que dan impresión de que el recurso es abundante. Lo anterior limita la canalización del agua de riego a actividades de mayor valor económico, y conduce a asignaciones inequitativas de los programas sociales para apoyos de infraestructura y tecnificación agrícola y a racionamientos del agua en zonas de veda. Todo esto en última instancia actúa como un freno más al desarrollo económico.

En el caso agrícola, en los últimos años se ha avanzado en el proceso de tecnificación del riego, haciendo que la producción sea más eficiente en el consumo de agua. No obstante, subsisten precios bajos y subsidios a la electricidad para bombeo que no generan incentivos a los agricultores para modernizar los sistemas de riego o de cambiar su patrón de cultivos (Guerrero, García Rojas et al., 2008). A largo plazo, esto hará crecer la sobreexplotación de los acuíferos, el abatimiento de los niveles freáticos y en algunos casos extremos, la intrusión salina de los acuíferos o la contaminación por aguas fósiles.

La problemática del agua requiere de mejores mecanismos de administración del recurso, así como un cambio en los criterios de asignación y manejo. Las asignaciones deben basarse en precios vinculados con mercados relativamente libres para el líquido y la posibilidad de trasladar el recurso de actividades menos productivas e ineficientes a otras con mayor productividad. Con esto, los bienes que requieran de un uso más intensivo de este insumo podrían importarse de países o regiones donde ésta sea más abundante, y México podría especializarse en la manufactura de bienes e insumos que requieran una menor cantidad agua para su producción (Guerrero García Rojas et al., 2008).

Una propuesta de mejores mecanismos de administración del agua puede partir de la aplicación de Modelos Hidro-económicos. Estos consisten en un esfuerzo por incorporar en su totalidad el sistema hídrico y económico de una región para proponer políticas de uso y manejo

del agua y la infraestructura necesaria para llevarla de los depósitos a los consumidores. El propósito en el presente estudio de vincular la modelación hidrológica con la económica es conveniente pues con ello se puede medir y evaluar los impactos de cambios en la oferta de agua y de políticas en materia hídrica en la economía mexicana y de sus regiones (Kimaite, 2011).

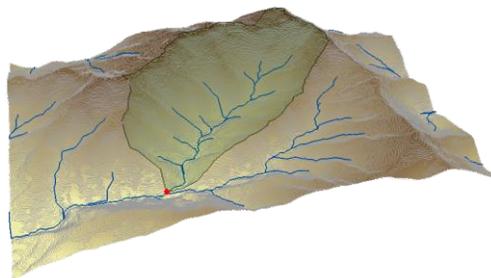
En las secciones siguientes se describen los fundamentos teóricos para entender el funcionamiento de este tipo de modelos.

## 2.2 Modelos Hidrológicos

Un modelo hidrológico es una simplificación de un sistema hidrológico real, que puede ayudar al entendimiento, la predicción y manejo de los recursos hidráulicos. La modelación hidrológica de una cuenca de interés hace relevante uso del concepto “abstracciones hidrológicas”, pues permite entender la mecánica del agua dentro de la cuenca. Además de especificar dicho concepto, en la presente sección se detallan otros básicos relativos a la modelación hidrológica, tales como los de “cuenca” y “acuífero”.

### 2.2.1 Elementos Hidrológicos

Una cuenca hidrológica es toda el área drenada por una corriente o por un sistema de corrientes, cuyas aguas concurren a un punto de concentración (como una presa, embalse o lago) o a un punto de salida (una desembocadura, el mar o un punto definido arbitrariamente, (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Como puede verse en la fig. 3, la cuenca es un área de captación de toda el agua de lluvia que precipita en una zona geográfica definida por una línea divisoria denominada “parteaguas” (línea café), a partir de la cual se generan cauces secundarios que confluyen en un cauce final, hasta llegar a un punto de salida (marcado en rojo).



*Fig. 3 Esquema de una cuenca hidrográfica.*

Una cuenca tiene los siguientes elementos:

- **Área de la cuenca:** la proyección sobre el plano horizontal del parteaguas.
- **Cauces tributarios:** que conducen corrientes o flujos de agua hacia un cauce principal.
- **Cauce principal:** que concentran el escurrimiento total de la cuenca, y que desembocan en el punto de cierre.
- **Forma de la cuenca:** la configuración geométrica que presenta la cuenca sobre el plano horizontal, y que influye en la forma y duración que tendrá el escurrimiento del agua dentro de esta.

Una cuenca no necesariamente respeta divisiones políticas. Según se defina el punto de corte, ésta puede abarcar áreas de diferentes municipalidades, estados o países, por completo o de manera parcial. Asimismo, dependiendo de la administración de los recursos dentro de la cuenca, ésta puede presentar características diferentes de un punto a otro (diferente conservación de la cobertura forestal, por ejemplo).

### 2.2.2 Acuífero

Un acuífero es aquella masa de rocas permeables que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea a través de sus poros o grietas. Estas rocas pueden ser gravas de río, limo, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla.

Los acuíferos son de vital importancia para el desarrollo de un país al funcionar como almacenes y redes de distribución permitiendo la extracción de agua en cualquier época del año y en cualquier punto de la superficie exterior del acuífero, además de ayudar a preservar la calidad del agua (en cierta medida) al purificarla durante el proceso de infiltración (CONAGUA-SEMARNAT, 2016).

La problemática más común que presentan los acuíferos es la sobreexplotación y la contaminación. La primera ocurre cuando la tasa de extracción de agua es mayor a la tasa de recarga. La contaminación ocurre cuando el agua almacenada en los acuíferos deja de ser apta para el consumo humano. El problema más severo de contaminación en el país es el de la intrusión salina, definida como la invasión del agua salada (procedente del mar) a los acuíferos de las zonas

costeras, mezclándose con las reservas de agua dulce, y haciendo que el aprovechamiento de estos acuíferos requiera de técnicas de desalinización.

### 2.2.3 Abstracciones Hidrológicas.

Las abstracciones hidrológicas son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva, siendo esta la fracción de la lluvia que es aprovechable para consumo y actividades productivas. A la larga, la precipitación efectiva va a constituir el escurrimiento de superficie. Hay varios procesos por los cuales la precipitación es abstraída por la cuenca, siendo los más importantes los siguientes:

- ✚ **Intercepción:** Fracción de la lluvia que es interceptada por el follaje, edificios u otros objetos, y que no le permite formar parte de los escurrimientos.
- ✚ **Evaporación:** Fracción del agua de lluvia que se evapora al cambiar a vapor y que deja de formar parte del escurrimiento.
- ✚ **Transpiración:** Fracción del agua de lluvia que es incorporada del suelo a la atmósfera por acción de la vegetación.
- ✚ **Depresión:** Fracción del agua de lluvia que se acumula en irregularidades de la superficie del suelo, y que no son parte de un embalse u otro depósito que aporte un beneficio económico.
- ✚ **Infiltración:** Fracción del agua de lluvia que se percola o infiltra a través del suelo.

La modelación de dichas abstracciones es necesaria para poder conocer la disponibilidad de agua en un área determinada.

### 2.3 Modelos de Equilibrio General

A partir de la teoría del equilibrio general se establece la determinación de precios de equilibrio y de las cantidades de intercambio en un sistema de mercados perfectamente competitivos (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995). Su aplicación constituye una herramienta poderosa para la evaluación cuantitativa ex-ante de los efectos directos e indirectos en la economía estudiada de choques exógenos. Los últimos pueden ser debidos a cambios de política económica o de fenómenos naturales.

Con el enfoque de equilibrio general se modela a la economía de interés como un sistema interrelacionado en el cual se determinan de manera simultánea los precios de equilibrio. Una vez

calculado un equilibrio base, para estimar los efectos de una perturbación en el ambiente económico o de la naturaleza, los niveles de equilibrio de todo el conjunto de variables endógenas de la economía tienen que ser recalculadas.

A pesar de que la teoría del equilibrio general deriva de los trabajos de León Walras publicados en 1874, lo ambicioso de la teoría, la complejidad de la aplicación, la ausencia de bases de datos adecuadas y la capacidad limitada de las herramientas de cálculo y computación imposibilitaron el aterrizaje de dichos conocimientos al campo de la práctica y de las aplicaciones hasta la década de los años 1980. Ahora, las aplicaciones de dichas teorías a trabajos aplicados se llevan a cabo mediante los modelos de equilibrio general computable.

### 2.3.1 Modelos de Equilibrio General Computable.

Los Modelos de Equilibrio General computable o Aplicados (MEGA en adelante) se utilizan para la simulación de choques exógenos a la economía estudiada como los causados por reformas fiscales y comerciales o por el medio ambiente. Con estos modelos se cuantifican los efectos directos e indirectos que tendrían dichos choques o de políticas alternativas en el conjunto de la economía, por lo son ampliamente utilizados por gobiernos, instituciones internacionales, centros de investigación e investigadores académicos (Gómez-Plana, 2005).

La elaboración de un MEGA requiere de datos, cuya organización puede describirse a partir de los siguientes pasos.

1. Obtener y capturar datos de todos los sectores de la economía a modelar.
2. Ordenar los datos en matrices de insumo/producto o de contabilidad social, las cuales contienen los flujos de bienes y servicios dentro de la economía entera, incluyendo la satisfacción de las demandas de insumo de cada sector en un área geográfica.
3. Con las matrices obtenidas pueden estimarse “multiplicadores”, que caracterizan las vinculaciones que hay entre los componentes la economía regional.

Lo anterior refleja las exigencias de información para elaborar un MEGA, a las cuales se le añaden las que corresponden a la modelación hidrológica (Kimaite, 2011).

En la figura que sigue se sintetiza los componentes de un MEGA

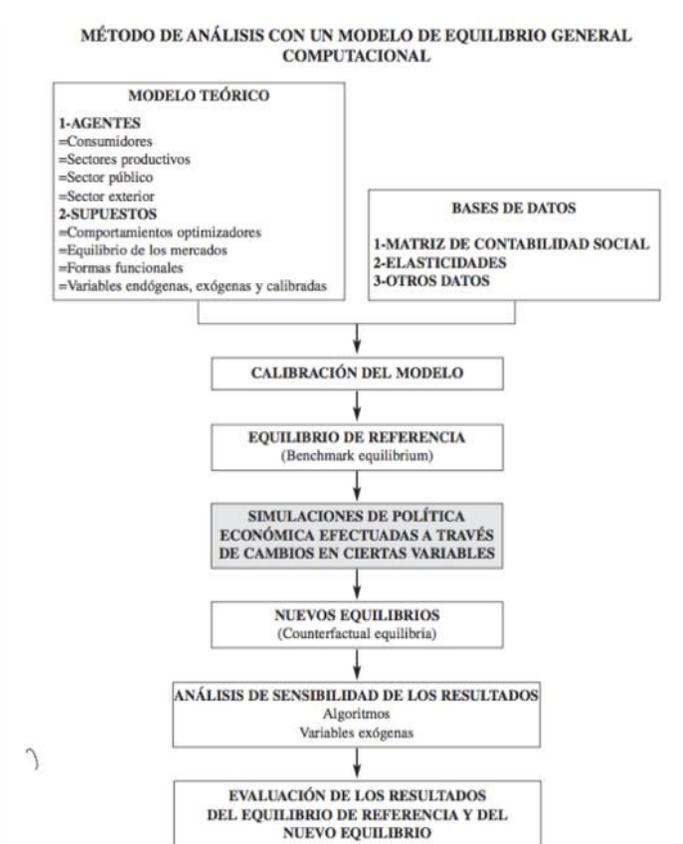


Fig. 4 Funcionamiento de un Modelo de Equilibrio General, según Gómez-Plana, 2005.

### 2.3.2 Valuación Económica del agua.

La elaboración de modelos hidroeconómicos aplicados requiere de valorar el agua. Por sus características, este recurso carece de precio de mercado, o cuando lo hay está distorsionado. Además de ello su valoración es necesaria, entre otras, para conocer costos y beneficios asociados con los sistemas hídricos, en términos monetarios (Kimaite, 2011). Según Pearce & Warford, 1993 (citado por Kimaite, 2011) el valor del agua se puede descomponer en cuatro elementos: (i) por uso directo, que es el valor que disfruta la gente que visita o aprovecha el agua de la cuenca para su uso directo, ya sea recreativo, consumo o aplicación para irrigación; (ii) el uso indirecto, que se deriva de la utilización del recurso cuando sale de la cuenca; (iii) el valor de opción, que se deriva de mantener el uso del agua en el futuro; y (iv) valor por no uso, el cual es el gozo o disfrute que la gente experimenta al saber que el recurso existe, aun aunque este no sea utilizado.

La valoración del agua también puede hacerse en función de su uso final: como insumo de la producción, como atenuador o vehículo de contaminantes o prestando servicios ambientales, teniendo una valoración diferente en cada caso, incluyendo el tipo de productivos (Harou et al., 2009).

#### 2.4 Modelos Hidro-económicos

La hidro-economía es una aplicación de los conocimientos de las ciencias económica y de la ingeniería enfocada en el manejo eficiente de los recursos hídricos en una región determinada. Estos modelos representan los sistemas hidrológicos, ambientales y económicos bajo un marco teórico coherente (Harou et al., 2009). Su uso se enfoca a encontrar soluciones a problemáticas y al análisis de distintas soluciones que ayuden a tener mejores políticas de manejo del agua. En estos modelos, la asignación del agua está regida por cambios en su valor económico que permitan comprender acerca de políticas y de oportunidades para un mejor manejo del recurso (Kimaite, 2011). Más allá de minimizar costos y maximizar beneficios, proveen de un marco para considerar los servicios del agua en los procesos de planeación y operación (Harou et al., 2009).

Los modelos hidro-económicos están basados en una detallada representación del sistema hidrológico, unido a información relevante de las actividades económicas más importantes de la cuenca o región mediante funciones de demanda apropiadas. Dichas funciones dependen de parámetros exógenos de insumos y productos y el componente hidrológico refleja un sistema de equilibrio parcial de ecuaciones de oferta y demanda (Kimaite, 2011).

Por la complejidad de los sistemas ya mencionada, se puede optar por dos enfoques de integración de modelos: el modular y el holístico. El primero consiste en la conexión de múltiples sub-modelos interdependientes que pueden interactuar a partir de distintos programas (por ejemplo, de simulación agrícola o meteorológica, de manejo de bases de datos o para resolver sistemas de ecuaciones) y pueden ser mejorados y refinados por separado. Este enfoque de modelación diferenciada proporciona la ventaja de considerar a mayor detalle los distintos sistemas (hidráulico, económico), incrementar la probabilidad de convergencia a una solución óptima y el poder actualizar, por separado, cada componente del modelo (Harou et al., 2009). Con el enfoque holístico se modela el sistema de una manera integrada, donde todas las ecuaciones se resuelven de manera endógena. Su ventaja es que representan mejor las interdependencias y los

efectos causales de las situaciones a modelar, teniendo como inconveniente que la modelación de los sistemas tiene que reducirse a la mayor simplicidad posible (Kimaite, 2011).

Los modelos hidro-económicos comparten componentes básicos, tales como los flujos hidrológicos y la incorporación de la infraestructura de manejo de agua, la de sus demandas y sus costos, así como las reglas de operación. Los sistemas se modelan con forma de redes conformadas por la infraestructura hidráulica, donde las uniones están definidas por los sistemas de conducción de agua (ríos, canales, acueductos, tuberías) y los nodos están definidos por los embalses o almacenamientos o puntos de extracción, demandas de agua (urbanas, agrícolas) y puntos donde el transporte del líquido represente un costo adicional, como las estaciones de bombeo (Harou et al., 2009). Las demandas en los nodos se representan por funciones de demanda y los costos pueden modelarse de manera exógena en función del gasto que represente el traslado de agua de un punto a otro, o del agua que pasa a través de cierto nodo en particular. Estos costos pueden ser negativos, por ejemplo, en el caso de las turbinas generadoras de electricidad.

Entre las aplicaciones de estos modelos se tienen las que siguen. La solución de problemas de distribución del agua a nivel intersectorial; el estudio de la problemática en materia de oferta de agua; la elaboración de propuestas de infraestructura; el estudio de las instituciones y de los mercados; la valuación del agua; la estimación de los efectos del cambio climático; elaborar respuestas a sequías e inundaciones; la calidad del agua; y la manera de resolver conflictos y de manejo del recurso entre fronteras soberanas (Harou et al., 2009). Es por eso que el modelador, antes de construir una herramienta que pueda ayudarle a resolver todo este tipo de preguntas, debe plantearse las preguntas o los problemas que tratará de responder, el propósito de su modelo (simulación u optimización), la adopción de un modelo holístico o modular, la representación del tiempo y la incertidumbre, el nivel de detalle de los sistemas y la especificación de las funciones de demanda de los agentes.

La implementación de estos modelos se hace mediante diversos paquetes de software. Una opción es la programación integral de todas las ecuaciones del modelo a elaborar, así como de los mecanismos para su solución. Dada la complejidad de los sistemas a modelar, es recomendable utilizar software ya programado, habiendo alternativas como el *General Algebraic Modeling System* (GAMS), *A Mathematical Programming Language* (AMPL<sup>1</sup>), el *Advanced Interactive*

---

<sup>1</sup> AMPL es un lenguaje de modelación algebraico utilizado para describir y resolver problemas de alta complejidad para computación matemática a gran escala. Mas información en: <https://www.ampl.com/REFS/amplmod.pdf>

*Multidimensional Modeling System* (AIMS<sup>2</sup>) o la librería gEcon para el lenguaje R. Estas paqueterías son programas cuyo propósito es unir sistemas de ecuaciones con “solvers” adecuados para la resolución de problemas de optimización lineal y no lineal, integrando datos, formulando métodos de solución y definiendo resultados en un marco común, así como interfaces de usuario (Harou et al., 2009).

## 2.5 Aplicaciones

En su tesis doctoral en el Instituto Tecnológico de Georgia, el ya citado Kimaite modeló mediante un sistema modular la cuenca de los ríos Apachicola-Chattahoochee-Flint, en el estado de Georgia, EUA. Los experimentos que realizó fueron en un contexto de cambio climático, usando 13 modelos climáticos de circulación general y los efectos sobre la hidrología de la cuenca de cada uno de ellos, incluyendo la disminución y cambio temporal de la distribución de las lluvias. Asimismo, evaluó políticas de restricción de oferta de agua, fluctuación en los niveles de las presas y variabilidad en la generación de electricidad (Kimaite, 2011).

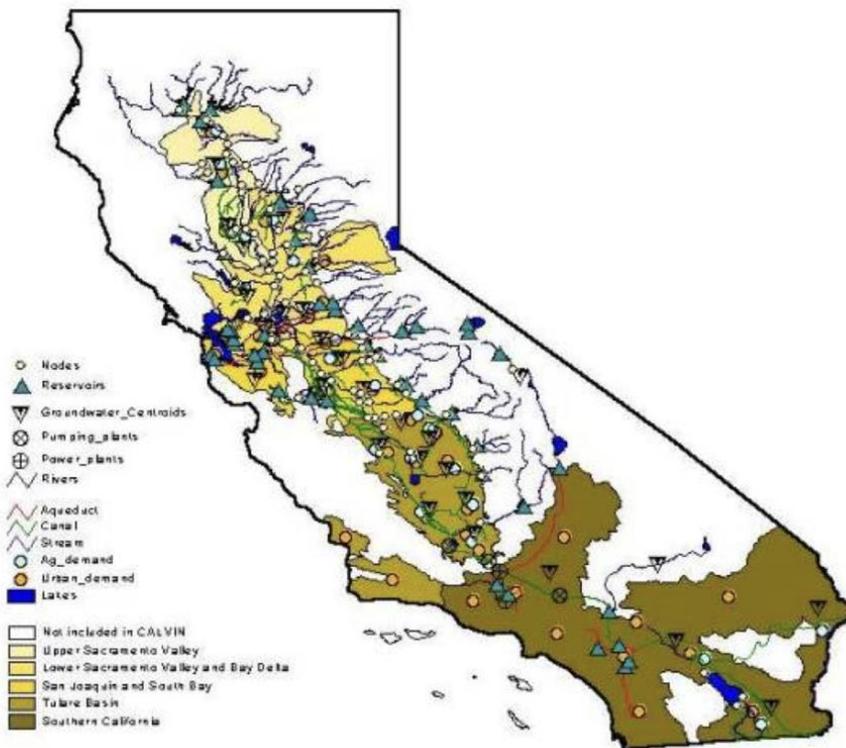
Uno de los casos donde los modelos hidro-económicos han demostrado su utilidad es en su aplicación para el manejo del agua en el estado de California, el principal productor agrícola de los EUA, que también es su estado más poblado, una potencia económica en donde suelen presentarse sequías severas y cada vez más constantes. La solución al manejo del agua del estado se basa en el modelo CALVIN, generado por la Universidad de California en Davis.

El modelo CALVIN cubre más del “90% de las demandas de agua estimadas para el año 2020 y cerca del 90% de las demandas de irrigación estimadas para el mismo año (Lund et al., 2003). El modelo integra ciertos aspectos de este sistema complejo, tales como: la hidrología superficial y subterránea, las instalaciones de manejo y conducción del agua y sus respectivas capacidades, regulaciones ambientales, valores económicos de la entrega del agua y los costos económicos de operación. El modelo CALVIN sigue la misma representación de los elementos del modelo en forma de redes, donde las uniones representan sistemas de conducción y los nodos

---

<sup>2</sup> El AIMMS Prescriptive Analytics Platform consiste en un lenguaje de modelación algebraica, un entorno de programación y una interfaz gráfica de usuario que tiene diversos Solvers a su disposición. Más información en: <https://aimms.com/english/software-solutions/software/prescriptive-analytics/>

representan depósitos, usos y puntos de aumento de costo, como puede verse en la figura 5 y tal como se describió en la sección anterior.



*Fig. 5 Representación de los elementos Modelo CALVIN*

La aplicación de este modelo consiste en la operación de infraestructura y la asignación de agua con el objetivo de maximizar el valor por su uso en los sectores urbanos y agrícolas de todo el estado. Esta búsqueda de objetivos económicos está limitada inicialmente por la disponibilidad de agua, la capacidad de las instalaciones y restricciones ambientales y de flujo.

Dicho modelo confronta más de un millón de decisiones de flujo, almacenamiento y asignación del agua durante una ventana de tiempo considerable, haciéndolo uno de los más extensivos y sofisticados de optimización construidos hasta la fecha, permitiendo el estudio y el manejo de recurso agua de la manera más óptima posible (Lund et al., 2003).

Como se sintetiza en las ecuaciones que siguen, la base teórica del modelo CALVIN consiste en minimizar los costos totales de la escasez de agua y de las operaciones para todos los

usuarios durante todos los periodos de tiempo y temporadas húmedas y de sequía, respetando restricciones ambientales, operacionales y físicas.

Minimizar

$$(1) \dots \quad Z = \sum_i \sum_j c_{ij} X_{ij},$$

Sujeto a:

$$(2) \dots \quad \sum_i X_{ji} = \sum_i a_{ij} X_{ij} + b_j, \quad \text{para todos los nodos } j$$

$$(3) \dots \quad X_{ij} \leq u_{ij} \quad \text{para todos los arcos,}$$

$$(4) \dots \quad X_{ij} \geq l_{ij} \quad \text{para todos los arcos}$$

Donde:

- $Z$ , es el costo total de los flujos a través de la red de distribución.
- $X_{i,j}$ , es el flujo que deja el nodo  $i$  para llegar al nodo  $j$
- $c_{i,j}$ , son los costos económicos (agrícolas o urbanos),
- $b_j$ , son las entradas externas al nodo  $j$ ,
- $a_{i,j}$ , son las ganancias/pérdidas en flujos en el arco  $ij$ ,
- $u_{i,j}$ , es el límite superior en el arco  $ij$ ,
- $l_{i,j}$ , límite inferior (lower bound) en el arco  $ij$ .

Dentro de las aplicaciones del CALVIN en un contexto de cambio climático, Zhu, Jenkins, & Lund, 2003, proyectan la demanda y la disponibilidad de agua a partir de 12 escenarios

climáticos hasta el año 2100 (Tabla 1). La investigación es relevante por sí misma, y porque incluye recomendaciones para futuras modelaciones con escenarios climáticos diferentes.<sup>3</sup>

Escenario	Descripción
1	Aumento de 1.5 grados Celsius de temperatura y incremento de 0% en la precipitación.
2	Aumento de 1.5 grados Celsius de temperatura y incremento de 9% en la precipitación.
3	Aumento de 3.0 grados Celsius de temperatura y incremento de 0% en la precipitación.
4	Aumento de 3.0 grados Celsius de temperatura y incremento de 18% en la precipitación.
5	Aumento de 5.0 grados Celsius de temperatura y incremento de 0% en la precipitación.
6	Aumento de 5.0 grados Celsius de temperatura y incremento de 30% en la precipitación.
7	HADCM2 2010-2039
8	HADCM2 2050-2079
9	HADCM2 2080-2099
10	PCM 2010-2039
11	PCM 2050-2079
12	PCM 2080-2099

Tabla 1. Posibles escenarios futuros considerados para el trabajo de Zhu, Jenkins y Lund, 2003.

## 2.6 Aplicaciones a México y estudios para el país

En "Perspectivas de la agricultura ante reducciones en la disponibilidad de agua para riego", Yunez-Naude y Rojas Castro estimaron, a partir de un MEGA, el efecto de los cambios de oferta del agua y políticas sobre el agua de riego en la producción agrícola y en la economía mexicana en su conjunto, así como en el bienestar de los hogares rurales y urbanos (Yúnez-Naude, Antonio, Rojas-Castro, 2008). La base de datos usada por los autores es una matriz de contabilidad social elaborada para tal fin usando como punto de partida la matriz de insumo-producto del INEGI para 2002. Enfocan el estudio en el sector agropecuario, por lo que además del trabajo, incluyen al agua usada para la irrigación y a la tierra según acceso a la misma. Los autores distinguen seis tipos de cultivos, separándolos de acuerdo a si son producidos bajo riego o temporal, y consideraron a tres tipos de hogares para cada región rural de México y del resto del país. En este trabajo se desagregó a la región de la cuenca del Rio Bravo para poder estudiar una zona que comparte agua con los EUA.

<sup>3</sup> Una revisión exhaustiva de los modelos hidro-económicos y los trabajos realizados en este tema hasta la fecha está en el artículo de Harou et al., 2009, que incluye la discusión de los fundamentos teóricos de este tipo de modelos, así como la presentación de una gran cantidad de trabajos de aplicación a situaciones de manejo del agua en países de todos los continentes.

Entre los resultados Yúnez y Rojas están que: a) la reducción de la oferta de agua generada por una hipotética transferencia del líquido a EUA tendría efectos negativos pero pequeños en las exportaciones de mercancías, aumentos de precios de cultivos básicos y de las importaciones, y que b) una reducción de la oferta de agua acompañada de un aumento de la inversión en tecnificación de riego disminuiría los efectos negativos mencionados. Este trabajo es una de las primeras aplicaciones de simulaciones de shocks y políticas sobre el agua en México a partir de un MEGA. Sin embargo, no modelaron el comportamiento hidrológico a nivel cuenca ya que la oferta de agua y sus cambios se toma de manera exógena, circunscribiéndose a la oferta del líquido para la agricultura con irrigación a partir de agua superficial.

Otro estudio para México, es el de Medellín-Azuara y Howitt, 2008. Los autores generaron un modelo de equilibrio parcial tomando datos de diversos predios agrícolas del norte del país, con el objetivo de evaluar cambios en el patrón de cultivos e intensidad del uso de factores con base en políticas como la eliminación de subsidios, reducción de la oferta de agua, incremento de costos del líquido, prioridad en la asignación de láminas de riego hacia cultivos más rentables, cambios en la disponibilidad y costos de la mano de obra y cambios en el precio de mercado de los cultivos (Howitt & Medellín-Azuara, 2008). El modelo fue calibrado con PMP, Programación Matemática Positiva (Howitt, 1995).

Entre los trabajos de aplicación del modelo CALVIN a México está el expuesto en el artículo “Un modelo de optimización para el manejo del agua en la frontera Californiana de México-Estados Unidos” (Mendoza-Espinosa, Medellín-Azuara, & Lund, 2007). Los autores presentan un “enfoque cuantitativo para identificar alternativas promisorias para ayudar a aliviar la presión del agua de la región Noroeste de Baja California para el año 2025” (p. 8795), incluyendo a la región norte de Baja California como módulo adicional del modelo CALVIN. Con ello estudian esta región en conjunto con California para evaluar políticas integradas de infraestructura, tales como expansiones de acueductos, reutilización de aguas residuales, asignaciones de agua provenientes de EUA y desalinización del agua de mar. Los autores concluyen que la reutilización de agua y la importación de ésta desde EUA constituyen la alternativa más prometedora para resolver los problemas de la demanda de agua.

Aplicación adicional de dicho modelo se encuentra en (Medellín-Azuara et al., 2009). A partir de la aplicación de una técnica de valoración deductiva, los autores estimaron el valor económico del agua para irrigación. Este método consistió en una modelación de dos etapas: del

sistema de agua del norte de Baja California, y de las disminuciones de agua del 100 al 60% en pasos de 10%. El resultado es que el valor económico del agua en la zona de Mexicali es al menos 2.6 veces mayor al precio pagado por los productores.

### 3. Propuesta de modelo hidroeconómico simple.

En lo que resta de la tesis se exponen dos modelos que se proponen para avanzar en el estudio del agua en México. Con el primero se explica la relación entre los sistemas hidrológico y económico haciendo uso de supuestos económicos y naturales fuertes. Ello con el fin de desarrollar intuición acerca de la cercana relación entre estos como un punto de partida sólido para una modelación hidrológico-económica menos estricta. Con el segundo modelo se especifican el sistema natural y los agentes de la economía, al tomar en cuenta aspectos de infraestructura hidráulica/hidrológica, meteorología y la diversidad de agentes económicos existentes, así como la presencia múltiples fuentes y periodos de uso y explotación del agua.

#### 3.1 El modelo simple.

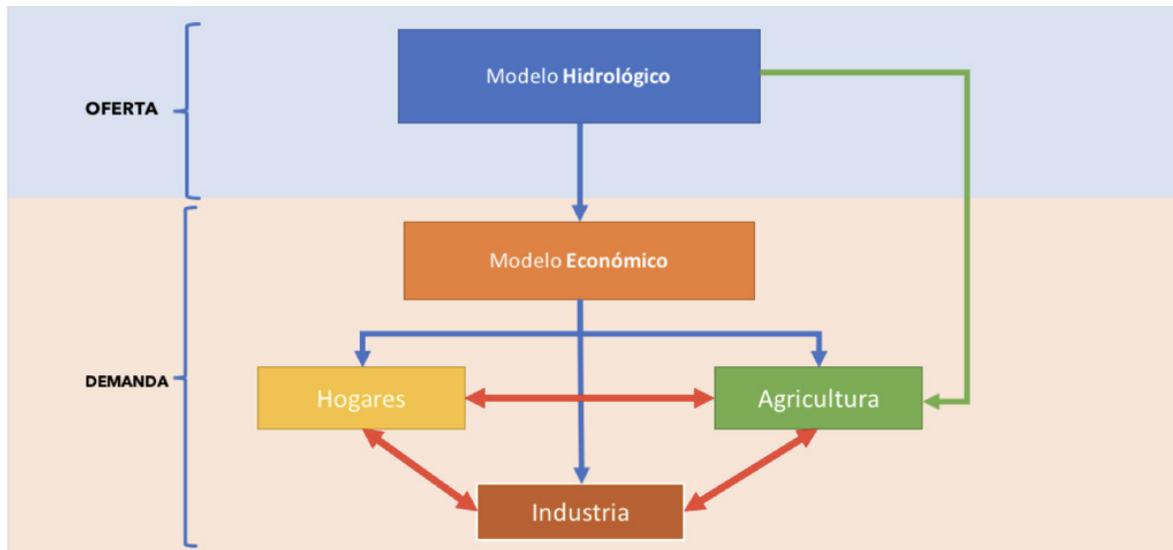
El modelo es uno hidro-económico modular y de elaboración propia, que consta de dos módulos: hidrológico y económico.

En el módulo hidrológico se modela el ciclo del agua en una unidad de estudio a la que se le denomina sub-cuenca y está basado en la teoría del ciclo del agua. Con esta modelación se obtiene el volumen de agua aprovechable dentro de la sub cuenca para la realización de las actividades económicas y, en el caso de los hogares, del consumo residencial.

Por su parte, con el módulo económico propuesto se modelan las relaciones económicas entre todos los tipos de agentes que existen dentro de la sub cuenca: hogares, regiones agrícolas y productores industriales. Cada uno de los agentes requiere, como insumo, el producto de los otros sectores y a su vez, todos los agentes necesitan de cierta cantidad de agua para sus actividades y subsistencia, cuya disponibilidad estará regulada por el volumen disponible obtenido en el módulo hidrológico.

La propuesta incluye la función de producción de los productores agrícolas tomando en cuenta que los rendimientos de sus cultivos dependen de factores como la temperatura y la precipitación. Con ello, un cambio en los valores de estas variables (por ejemplo, debido al cambio

climático) puede reflejarse no solo en la alteración del ciclo del agua, sino también en afectaciones en los rendimientos y en los costos necesarios para mitigación de estos efectos.



*Fig. 6 Esquema Modular del modelo simple.*

En el esquema presentado en la fig. 6 se visualiza la propuesta acerca del funcionamiento del ciclo hidrológico y también de cómo puede ser influenciado a partir de políticas públicas de conservación ambiental. Es un punto de partida para generar modelos con mayor complejidad en los que, por ejemplo, se consideren otros aspectos de la oferta de agua al sistema económico.

### 3.2 Modelación Hidrológica.

#### **SUPUESTOS:**

Los siguientes supuestos son algunos de los usados para simplificar la modelación del sistema hidrológico.

- Existe un número  $n$  de sub cuencas asociadas a una cuenca, y un acuífero (o ninguno) para cada una de estas subcuencas. Con esto se simplifica el comportamiento del agua subterránea al agrupar todo el almacenamiento subterráneo en un solo almacén cuya extracción es posible en todos los puntos de la sub cuenca. El supuesto evita considerar a cada acuífero con sus respectivos volúmenes de almacenamiento dentro de cada sub cuenca.
- El contexto de tiempo es discreto, el cual puede ser de días o meses. El supuesto se requiere porque la mayoría de los datos meteorológicos se recogen en periodos de tiempo discretos.

- Existe un valor para los datos meteorológicos (lluvia, temperatura, radiación, etc.) representativo de toda la sub cuenca. Con ello se simplifica el análisis de la meteorología de la sub cuenca. El supuesto evita la alta variabilidad espacial del clima en la sub cuenca y reduce el número de datos de las estaciones meteorológicas de la región.
- Se supone que el agua como un insumo que no genera desechos. Esto es, no se consideran a las aguas residuales en el sistema. Dado que un gran porcentaje del agua es parte de los insumos intermedios y para el consumo y que el agua residual se produce a partir de dichos procesos de transformación y hay sectores de la economía que podrían demandar esta agua como insumo, podría modelarse como un insumo intermedio. El supuesto implica que todos los sectores son altamente eficientes en su uso de agua.

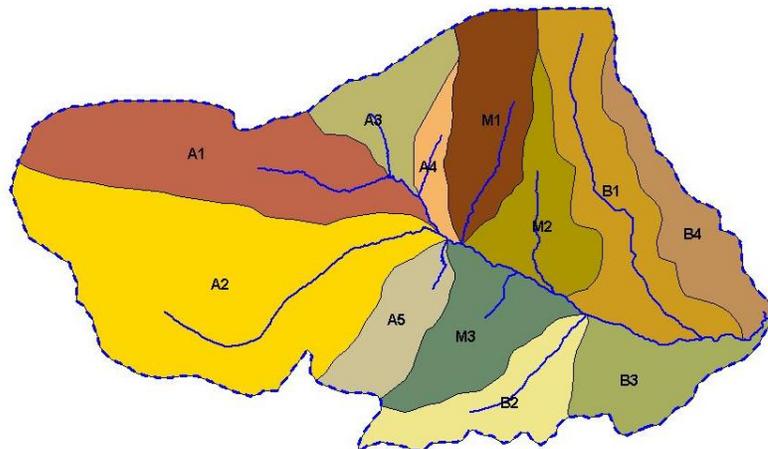
### 3.2.2 Desarrollo del modelo.

La cuenca se divide en un conjunto finito de sub cuencas de área  $a_i$  tal que:

$$\sum_{i=1}^n a_i = A$$

De donde se desprende que todo espacio dentro de una sub cuenca pertenece a la cuenca y viceversa. Se usará el subíndice  $i$  para hacer referencia a estas áreas.

Esta división se ilustra en el siguiente esquema de una cuenca y sus componentes (Fig. 7), donde el área total del dibujo es la cuenca ( $A$ ) y las áreas de colores conforman las sub cuencas.



*Fig. 7 Cuenca dividida en subcuencas.*

Como se mencionó, un acuífero es una reserva de agua que se encuentra debajo de la superficie. Dentro de una cuenca puede (o no) existir uno o varios acuíferos y los últimos pueden ser aprovechados por distintas cuencas al mismo tiempo. Por simplicidad, se considerará que existe un acuífero para cada subcuenca hidrológica, y por lo tanto también se asociará a ese acuífero con el subíndice  $i$ .

### 3.2.3 Ecuación de balance hídrico dentro de la subcuenca.

Se define el balance hídrico de la subcuenca mediante la siguiente ecuación:

$$I_{i,t} = O_{i,t} + R_{i,t} \dots (i)$$

Donde:

- $I_{i,t}$  representa las entradas de agua a la sub cuenca  $i$  en el periodo  $t$ .
- $O_{i,t}$  son las salidas de agua de la sub cuenca  $i$  en el periodo  $t$ .
- $R_{i,t}$  es el agua que se queda para formar parte de las reservas subterráneas y superficiales dentro de la sub cuenca  $i$  en el periodo  $t$ .

Esta ecuación representa la dinámica del agua dentro de la subcuenca. El término  $I_{i,t}$  va a representar la entrada de agua mediante transferencias de otras cuencas, subcuencas y también la entrada de lluvia total. El término  $O_{i,t}$  hace referencia a las salidas de agua del sistema durante el periodo  $t$ , y contiene todas aquellas exportaciones de agua que se hacen de una subcuenca a otra, así como su aprovechamiento en las actividades económicas. El término  $R_{i,t}$  hace referencia a todas las recargas que se adicionan a los volúmenes originales de los acuíferos y las reservas superficiales durante el periodo  $t$ .

A partir de esta formulación se llegará a una ecuación que puede servir para el diseño de política ambiental y de manejo del recurso hídrico.

### 3.2.4 Ecuación de abstracciones hidrológicas.

Las abstracciones hidrológicas <sup>4</sup>son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva, siendo esta la fracción de la lluvia que es aprovechable

---

<sup>4</sup> El fundamento teórico de estas abstracciones se explica en mayor detalle en el anexo 2 de este trabajo.

para los procesos en la superficie. Para simplificar el modelo, utilizaremos sólo tres abstracciones hidrológicas: Infiltración, Evapotranspiración y Escurrimiento.

En este contexto, el destino del agua de lluvia ( $PP_{i,t}$ ) puede modelarse mediante la siguiente ecuación:

$$PP_{i,t} = (\alpha_{inf,i,t} + \alpha_{etp,i,t} + \alpha_{esc,i,t}) * PP_{i,t} \quad \dots (ii)$$

Entonces, el volumen de agua de lluvia que entra a la sub cuenca  $i$  se puede descomponer en tres principales fracciones: el agua que se infiltra en el subsuelo ( $\alpha_{inf,i,t}$ ), la que se evapotranspira<sup>5</sup> ( $\alpha_{etp,i,t}$ ), y la que se escurre ( $\alpha_{esc,i,t}$ ) y que pasa a formar parte de los ríos que atraviesan la sub cuenca. Estos procesos dependen de características de la cuenca y de la meteorología del lugar.

La fracción de la precipitación que se infiltra depende de la textura del suelo, como la proporción entre arcillas, limos y arenas que componen al suelo de un área determinada. A mayor proporción de arenas en un suelo determinado, más elevada es la velocidad de infiltración de la lluvia y, por lo tanto, más elevada la fracción de esta que se infiltra en la superficie. La intensidad de la lluvia es el volumen de agua que cae en un evento de precipitación. Lluvias más intensas saturan la capacidad del suelo de retener agua en la superficie y, a partir de cierto umbral, la infiltración se hace con mayor facilidad. Esta capacidad de retención también se ve afectada por la presencia de lluvias en periodos previos. O sea que:

$$\alpha_{inf,i,t} = f(\textit{textura del suelo, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación})$$

La evapotranspiración se afecta por factores de temperatura de manera positiva (a mayor temperatura, mayor evaporación), por el uso de suelo y la cobertura vegetal (ciertas coberturas, como el concreto o los suelos rocosos fomentan la evaporación mientras que los bosques o la cobertura vegetal la disminuyen), por la evaporación bruta y el efecto de los rayos del sol, los cuales dependen a su vez de la posición geográfica de la sub cuenca de estudio. Así entonces, la proporción del agua que se evapotranspira es:

---

<sup>5</sup> Evapotranspiración es la pérdida de agua hacia la atmósfera ocasionada por la acción conjunta de la evaporación y de la transpiración llevada a cabo por la vegetación en la superficie.

$$\alpha_{etp,i,t} = f(\text{Temperatura Máxima, Mínima, Velocidad del Viento, Uso de suelo, Cobertura Vegetal, Evaporación, Radiación Solar}) \dots (iii)$$

El relieve afecta de manera positiva a la escorrentía; a mayor relieve, el agua escurre en mayor proporción y no tiene el tiempo necesario para infiltrarse de manera adecuada. Asimismo, el grado y tipo de cobertura vegetal puede afectar la fracción de la lluvia que entra en los ríos.

$$\alpha_{esc,i,t} = f(\text{Relieve (pendiente), uso de suelo, cobertura vegetal}) \dots (iv)$$

A partir de lo expuesto, el volumen de agua que entra a la sub cuenca por lluvia se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Lluvia_{i,t} = PP_{i,t} * a_i \dots (v)$$

Donde:

- $Lluvia_{i,t}$ : Volumen de agua que entra en la subcuenca  $i$  en el periodo  $t$  medido en unidades de volumen.
- $PP_{i,t}$ : Precipitación sobre la subcuenca  $i$  durante el periodo  $t$  medido en unidades de longitud (es la misma variable presentada en (ii)).
- $a_i$ : Área de la subcuenca, en unidades de área.

El volumen de agua total infiltrado en el acuífero se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$AQ_{i,t} = \alpha_{inf,i,t} * Lluvia_{i,t} \dots (vi)$$

Donde:

- $AQ_{i,t}$ : Volumen de agua que se infiltra y recarga el acuífero asociado a la subcuenca  $i$ , en unidades de volumen.

De manera similar, las ecuaciones del volumen escurrido a los ríos y de la ecuación de agua que se evapotranspira dentro de la sub cuenca  $i$  en el periodo  $t$  son:

$$ESC_{i,t} = \alpha_{esc,i,t} * Lluvia_{i,t} \dots (vii)$$

$$ETP_{i,t} = \alpha_{etp,i,t} * Lluvia_{i,t} \quad \dots (vii)$$

Donde:

- $ESC_{i,t}$ : Volumen escurrido y que aporta a los ríos, en unidades de volumen.
- $ETP_{i,t}$ : Volumen perdido por evapotranspiración, en unidades de volumen.

Asimismo, la parte de la reserva se modela de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} R_{i,t} &= AguaAprovechable - Extracciones \\ &= AQ_{i,t} + ESC_{i,t} - VExtrado_{sup,i,t} - VExtrado_{sub,i,t} \quad \dots (viii) \end{aligned}$$

Donde:

- $VExtrado_{w,i,t}$ : es el volumen de agua que se extrae para las actividades económicas dentro de la subcuenca  $i$  provenientes de la fuente  $w \in \{superficial, subterránea\}$  que se encuentra en la sub cuenca  $i$ .

El volumen de reserva, al ser calculado solo para el periodo  $t$ , puede tomar valores positivos o negativos: positivos si la recarga de las fuentes es mayor que la extracción y negativo si se presenta sobreexplotación de las fuentes de agua.

### 3.2.6 Ecuación de volumen de agua aprovechable.

En esta subsección se deriva la ecuación sobre el agua disponible para su uso por parte de los agentes económicos y, con ello para vincular el módulo hidrológico con el económico (desarrollado abajo).

Se inicia con las ecuaciones para del balance hídrico ( $i$ ):

$$I_{i,t} = O_{i,t} + R_{i,t} \quad \dots (i)$$

Donde:

$$I_{i,t} = Lluvia_{i,t} + \sum_{z=1}^n Entradas_{z,i,t} \quad \dots (ix)$$

$$O_{i,t} = \sum_{y=1}^n Salidas_{y,i,t} + ETP_{i,t} + U_{i,t} \quad \dots (x)$$

$$R_{i,t} = AQ_{i,t} + ESC_{i,t} - VExtraido_{sup,i,t} - VExtraido_{sub,i,t} \quad \dots (xi)$$

- $Entradas_{z,i,t}$ : es el volumen de agua proveniente de una región externa a la sub cuenca  $i$ .
- $Salidas_{y,i,t}$ : es el volumen de agua que sale de la subcuenca  $i$  a una región externa.
- $U_{i,t}$ : Agua utilizada por la economía de la sub cuenca  $i$  durante el periodo  $t$ .

Sustituyendo las ecuaciones  $(ix)$  a  $(x)$  en  $(i)$  se tiene que:

$$\begin{aligned} Lluvia_{i,t} + \sum_{z=1}^n Entradas_{z,i,t} &= \sum_{y=1}^n Salidas_{y,i,t} + ETP_{i,t} + U_{i,t} + AQ_{i,t} \\ &+ ESC_{i,t} - VExtraido_{sup,i,t} - VExtraido_{sub,i,t} \end{aligned}$$

Reordenando términos:

$$\begin{aligned} U_{i,t} &= Lluvia_{i,t} - ETP_{i,t} + \left( \sum_{z=1}^n Entradas_{z,i,t} - \sum_{y=1}^n Salidas_{y,i,t} \right) \\ &- (ESC_{i,t} + AQ_{i,t} - VExtraido_{sup,i,t} - VExtraido_{sub,i,t}) \end{aligned}$$

Redefiniendo variables:

$Vaprovechable_{i,t}$

$$= LluviaEfectiva_{i,t} + Transferencias_{i,t} - AportaciónReservas_{i,t} \quad \dots (xi)$$

Donde:

- $LluviaEfectiva_{i,t}$ :  $Lluvia_{i,t} - ETP_{i,t}$
- $Transferencias_{i,t}$ :  $(\sum_{z=1}^n Entradas_{z,i,t} - \sum_{y=1}^n Salidas_{y,i,t})$
- $AportaciónReservas_{i,t}$ :  $(ESC_{i,t} + AQ_{i,t} - VExtraido_{sup,i,t} - VExtraido_{sub,i,t})$

La ecuación  $(xi)$  describe el volumen disponible dentro de la sub cuenca para realizar las actividades económicas de los agentes ubicados en esta. A partir de esta ecuación, podemos

construir políticas de manejo de recursos naturales para poder aumentar la cantidad de agua disponible.

### 3.3 Módulo Económico.

El módulo económico propuesto se basa en el enfoque de equilibrio general aplicado (MEGA). Contiene 3 tipos de sectores-agentes: industria y de servicios, agrícola y hogares. Para modelar la demanda de agua del sector industrial y la urbana (para el caso de este modelo, consumo doméstico) se usa la teoría básica del productor y el consumidor, respectivamente. La modelación del sector agrícola incluye, además de la mano de obra y agua, variables adicionales en cuanto a los insumos para su función de producción: tierra e insumos agroquímicos (proveídos por el sector industria).

Características generales del modelo:

- Se consideran 3 tipos de sectores y agentes; producción agrícola, industrial-servicios y los hogares.
- Los hogares cuentan con una dotación inicial de trabajo, el cual puede utilizarse para trabajar en el sector agrícola o en el industrial.
- En la producción de un sector se usan insumos proveídos por éste o por el otro sector (y mano de obra).
- Ambos sectores requieren de agua como insumo para su producción. La cantidad del líquido que pueden usar proviene del módulo hidrológico.
- La utilidad de los hogares depende de los bienes producidos por los dos sectores, así como del consumo de agua.

El MEGA se basa en la teoría de equilibrio general a partir de la cual hay un vector de precios que hace que:

- A) Todos los agentes de la economía resuelvan sus problemas de optimización.
- B) Se vacíen todos los mercados; es decir, la oferta = demanda.

Los problemas de optimización son los que siguen.

### Problema de los hogares

$$\max_{C_h, M_h, A_h} H(C_h, M_h, A_h)$$

sujeto a:

$$p_h^C * C_h + p_h^M * M_h + p_h^A A_h = w_h^{Agg} L_{Agg} + w_h^{Ind} L_{Ind}$$

Donde:

- $H(C_h, M_h, A_h)$ , es la función de utilidad de los hogares. Esta depende de  $C_h$ , el consumo de producción agrícola (*C por comida*),  $M_h$ , el consumo de manufacturas de la industria y  $A_h$ , el consumo de agua de los hogares.
- $p_h^C, p_h^M, p_h^A$ : son los precios que el hogar asigna para consumir  $C_h, M_h$  y  $A_h$ , respectivamente.
- $w_h^{Agg}$  y  $w_h^{Ind}$ : son los precios de la dotación de trabajo de los hogares (salarios) y  $L_{Agg}$  y  $L_{Ind}$  es la cantidad de trabajo empleada en el sector agrícola e industrial.

### Problema de la industria

La industria  $j$  busca el nivel de producción que le permita maximizar su respectivo beneficio. El problema de la industria consiste en:

$$\max_{C_j, L_{Ind}, A_j} \pi_j = p_I^M M_j - p_I^C C_j - w_j^L L_{Ind} - p_j^A A_j$$

sujeto a una función de producción:

$$M_j = f(C_j, L_{Ind}, A_j)$$

Donde:

- $C_j, A_j, L_{Ind}$  son el consumo de bien agrícola, de agua y de mano de obra por parte de la industria<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> No se incluye al capital físico dado que el modelo es de corto plazo, en donde por simplicidad este considera fijo.

- $M_j$  es la cantidad de manufactura producida.  
 $p_i^M, p_i^C, p_j^A$  son los precios que la industria le da a la manufactura, al producto agrícola y al agua, respectivamente.

### Problema de la agricultura

El problema de la región productora agrícola  $g$  consiste en:

$$\max_{M_g, L_{Agg}, A_g} \quad \pi_g = p_g^C C_g - p_g^M M_g - w_g^L L_{Agg} - p_g^A A_g$$

sujeto a una función de producción:

$$C_g = f(M_g, L_{Agg}, A_g)$$

Para este caso se propone una función de producción detallada ya que la actividad agrícola depende en mayor medida que la industria de los recursos naturales y del clima.

En un contexto donde existen  $g$  unidades de producción agrícola y  $x$  número de cultivos, se propone que la función de producción debe depender de los siguientes factores:

$$C_{g,x} = f(\text{Características del Suelo}_{g,x}, \text{Agua}_{g,x}, \text{Temperatura}_{g,x}, \text{Fertilización}_{g,x}, \\ \text{Agroquímicos}_{g,x}, \text{Semillas}_{g,x}, \text{Mano de Obra}_{g,x}, \text{Maquinaria}_{g,x})$$

Un supuesto típico usado para para la solución del problema de maximización es el de rendimientos decrecientes; es decir, a medida que aumenta la aplicación de uno de los factores de producción, crece menos el aumento de ésta.

Siguiendo a (Medellín-Azuara, Harou, & Howitt, 2010), se propone el siguiente problema de maximización de la producción agrícola:

$$\max \quad \pi_{g,x} = (v_{g,x} * yld_{g,x} - \sum \omega_{g,x,l} a_{g,x,l}) x_{g,i,tierra}$$

La cual normaliza los insumos a una cantidad en función de una unidad de área de cultivo (típicamente hectáreas o acres) y donde:

- $C_{g,x}$ : Producción del cultivo  $x$  en la zona  $g$ .

- $v_{g,x}$ : Ingreso marginal por tonelada del cultivo  $x$  en la zona  $g$ , en unidades monetarias por área.
- $yl d_{g,x}$ : Rendimiento del cultivo  $x$  por unidad de área para la zona  $g$ .
- $\omega_{g,x}$ : Costos de los insumos adicionales al insumo tierra.
- $a_{g,x,l}$ : Matriz de coeficientes de Leontieff de uso de insumo por unidad de área.
- $x_{g,i,tierra}$ : Tierra (área) utilizada en la zona  $g$  para el cultivo  $i$ .

Lo expuesto sobre las características de la función de producción está concentrado de manera indirecta en la variable de rendimientos,  $yl d_{g,x}$ , donde, de manera agronómica se tiene que:

$$yl d_{g,x} = f(\text{Agua}, \text{Temperatura}, \text{Fertilizante}, \text{Semilla} \dots)$$

En donde:

- La cantidad de agua presenta rendimientos a escala decrecientes.
- La de temperatura presenta rendimientos decrecientes y que influyen en la disminución de los rendimientos a partir de un punto máximo conocido como “*temperatura óptima del cultivo*”.
- Los fertilizantes y agroquímicos presentan rendimientos a escala y, dependiendo de su toxicidad, igualmente pueden influir de manera negativa en la planta si se utilizan en exceso.
- La variable “*semilla*” sirve para representar las diferencias debidas al tipo de especie y variedad de la planta a cultivar, ya que cada una de estas tiene un rendimiento base único, independiente de la cantidad de factores que se utilicen para su producción.

Entonces, para el caso del modelo simple:

$$\begin{aligned} \max \quad \pi_{g,x} &= (v_{g,x} * yld_{g,x}(\blacksquare) - \sum \omega_{g,x,l} a_{g,x,l}) x_{g,i,tierra} \\ \max \quad \pi_{g,x} &= v_{g,x} * yld_{g,x}(\blacksquare) * x_{g,i,tierra} - \sum \omega_{g,x,l} * a_{g,x,l} * x_{g,i,tierra} \end{aligned}$$

Como en el modelo simple  $x = 1$ , ya que solo existe un cultivo, el problema de maximización de los beneficios se vuelve:

$$\max_{M_g, L_{Agg}, A_g} \quad \pi_g = p_g^C C_g - p_g^M M_g - w_g^L L_{Agg} - p_g^A A_g$$

Con

- $p_g^C = v_g$
- $C_g = yld_g(\blacksquare) * x_{g,tierra}$
- $-\sum \omega_{g,l} * a_{g,l} * x_{g,tierra} = -p_g^M M_g - w_g^L L_{Agg} - p_g^A A_g$ ,  
donde  $l \in \{\text{Insumo Industrial; Mano de Obra}\}$

Condiciones de vacío de mercado

El vacío de mercado en un contexto de equilibrio general se da cuando se encuentra un vector de precios que hace que la oferta y demanda de bienes y factores se iguale. En el MEGA simple que se acaba de proponer, el vacío de mercado se da cuando se cumple con lo siguiente:

$$C_g = C_h + C_j$$

$$M_j = M_g + M_h$$

$$L_{Agg}^g + L_{Ind}^j = L_{Agg} + L_{Ind}$$

$$p_h^C = p_j^C = p_g^C$$

$$p_h^M = p_j^M = p_g^M$$

$$w_h^{Agg} = w_g^L$$

$$w_h^{Ind} = w_j^L$$

Además, se imponen las siguientes restricciones:

$$L_{Agg} + L_{Ind} \leq \bar{L}$$

$$A_h + A_g + A_j \leq V_{aprovechable_{sup,i,t}}$$

La primera restricción señala que los hogares tienen una cantidad de trabajo limitada. La segunda restricción establece que el consumo de agua de los hogares, las industrias y de la agricultura no debe sobrepasar el volumen aprovechable calculado en el módulo hidrológico. En caso de no respetar esa restricción a largo plazo ocurrirá un déficit y un agotamiento del recurso hídrico.

La solución del MEGA consiste en resolver los tres problemas de maximización expuestos, sujeto a las restricciones indicadas y a las condiciones de vacío de mercado. Para llegar a una solución analítica es necesario asignar formas funcionales a las funciones de utilidad y de producción, y en caso de querer implementar de forma numérica este modelo es recomendable el utilizar programas de optimización matemática como GAMS.

#### 4. Modelo hidro-económico.

En la presente sección se desarrolla una propuesta para modelar la vinculación entre el sector hidrológico con el económico, tomando como referencia lo expuesto en la sección previa, aunque extendiendo la cantidad de los componentes que forman al sector agrícola e industrial. La estructura del modelo que se propone está en la Fig. 8, que; es una generalización del modelo particular presentado por Srinivasan et. al para el caso de la oferta de agua en la ciudad de Chennai, India (Srinivasan, Gorelick, & Goulder, 2010).

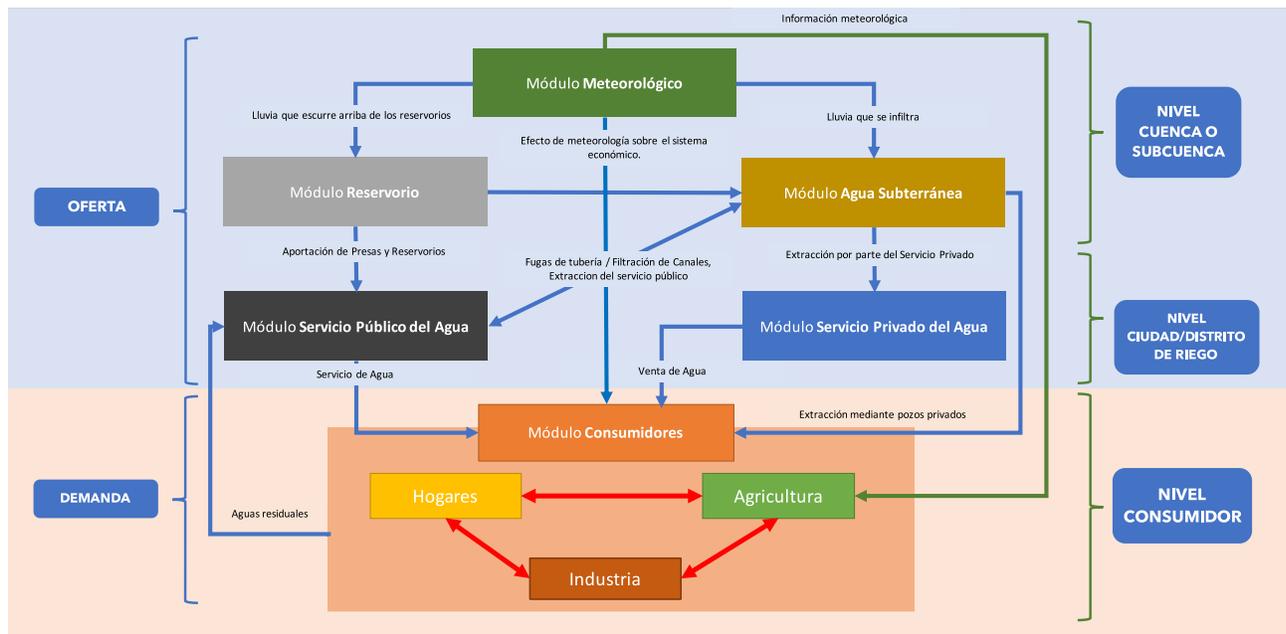


Fig. 8 Esquema modular del modelo general.

El modelo es dinámico y tiene dos grandes componentes: oferta y demanda de agua. La oferta está formada por 5 módulos: meteorológico, reservorio, de agua subterránea, del servicio público y privado de agua. La demanda está representada en el módulo de consumidores, en el cual se encuentran las actividades/agentes del MEGA expuesto previamente.

Como se observa en la Fig. 8, todos los módulos están interrelacionados, lo que implica que la modelación de cada uno de ellos requiere vincularlos con el resto.

El modelo hidro-económico tiene las siguientes características y supuestos

- La modelación es a nivel cuenca/subcuenca.

- La cuenca cuenta con un número  $i$  de reservorios superficiales,  $j$  de ciudades o poblaciones urbanas y  $k$  de regiones agrícolas, así como  $l$  acuíferos.
- Los datos meteorológicos se registran en una cantidad  $em$  de estaciones meteorológicas.
- Existen tres tipos de agentes que resuelven sus problemas de optimización en un contexto de equilibrio general y en un marco de competencia perfecta y
- No se considera al gobierno.

#### 4.2 Módulo Meteorológico.

El módulo meteorológico tiene tres funciones principales:

1) Captar el volumen de escurrimiento superficial captado por cada uno de los reservorios dentro de la cuenca.

2) Calcular el volumen de precipitación que se infiltra y aporta agua a cada uno de los acuíferos de la cuenca.

3) Proporcionar información de Temperatura, Precipitación, Vientos y Radiación solar al módulo del consumidor (módulo de producción agrícola).

##### #1) Escurrimiento a los reservorios.

Sea  $A_i$  el área del elemento  $i$ , donde los elementos pueden ser el área de captación del reservorio, el área de captación del acuífero o el área de influencia de las observaciones de una estación meteorológica.

Sea  $PP_{em}(m)$  el valor de la precipitación obtenido en la estación meteorológica  $em$  durante el periodo  $m$ , en unidades de longitud.

La expresión para valor del volumen escurrido hacia el reservorio  $re$  por parte de su respectiva subcuenca de captación es:

$$Esc\_Res_{re}(m) = \alpha_{esc,re} * \left( \sum_{em} I_{em \cap re} PP_{em}(m) * Intersección(A_{em}, A_{re}) \right)$$

**Donde:**

- $\alpha_{esc,re}$ , coeficiente de escurrimiento del área de captación correspondiente al reservorio  $re$ . Este coeficiente es función de las características del suelo, del uso del suelo y de la pendiente del terreno.
- $PP_{em}(m)$ , valor de precipitación recogido de la estación meteorológica  $em$ .
- $Intersección(A_{em}, A_{re})$ <sup>7</sup>, función para obtener el área de la intersección del polígono de influencia de la observación meteorológica de la estación  $em$  con el área de captación correspondiente al reservorio  $re$ .
- $I_{em \cap re}$ , función indicadora de que existe una intersección entre las áreas de interés.

**#2) Cálculo de infiltración al acuífero.**

La expresión para el cálculo del volumen del agua de lluvia que infiltra al acuífero  $aq$  se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Inf\_AQ_{aq}(m) = \alpha_{inf,aq} \left( \sum_{em} I_{em \cap aq} PP_{em}(m) * Intersección(A_{em}, A_{aq}) \right)$$

**Donde:**

- $Inf\_AQ_{aq}(m)$ , Volumen de agua que se infiltra al acuífero  $aq$  durante el periodo  $m$
- $\alpha_{inf,aq}$ , coeficiente de infiltración del área sobre el terreno (proyección xy) del acuífero  $aq$ .
- $Intersección(A_{em}, A_{aq})$ , función para obtener el área de la intersección del polígono de influencia de la observación meteorológica de la estación  $em$  con el área de la proyección del acuífero  $aq$  sobre el terreno.
- $I_{em \cap aq}$ , función indicadora de que existe una intersección entre las áreas de interés.

---

<sup>7</sup> Generalmente estos polígonos  $A_{em}$  se calculan mediante la metodología de polígonos de Thiessen, la cuál arroja polígonos que no se interseccan entre sí.

### #3) Captación urbana de agua de lluvia.

La expresión para el cálculo de la captación del agua de lluvia viene dada por:

$$Captación_i = \sum_{em} I_{em \cap cap} PP_{em}(m) * Interseccion(A_{em}, A_{cap})$$

Donde:

-  $Captación_i$ , Volumen de agua que se puede captar directamente de la lluvia para ser aprovechada para uso productivo o consumo por parte del agente  $i$ , el cual puede ser el productor agrícola mediante la construcción de ollas de captación o la industria, el servicio público y los hogares mediante la captación de agua que precipita directamente sobre las edificaciones.

-  $PP_{em}(m)$ , valor de precipitación recogido de la estación meteorológica  $em$  en el periodo  $m$ .

-  $Intersección(A_{em}, A_{cap})$ , función para obtener el área de la intersección del polígono de influencia de la observación meteorológica de la estación  $em$  con el área de captación efectiva por parte del agente  $i$ .

### #4) Captación de los valores meteorológicos que impactan sobre la producción agrícola.

Dada un área de producción agrícola  $g$  que se encuentra en el área de influencia de una estación meteorológica  $em$ , su correspondiente vector de información meteorológica  $Clima_g$  viene dado por la información captada por dicha estación. Esta información será de utilidad para la función de producción del sector agrícola en el módulo de Consumidores.

#### 4.3 Módulo Reservoirio.

Un reservorio es un depósito de agua superficial que ha sido creado de forma natural (lago, laguna) o artificial (presa) que sirve para almacenar agua para su uso humano. Bajo el supuesto de que en la cuenca de estudios existen  $re$  reservorios, el volumen de cada reservorio está dado por:

$$\begin{aligned} Volumen_{re}(m) &= Volumen_{re}(m - 1) + Esc\_Res_{re}(m) + Transf_{re}(m) - Evap_{re}(m) \\ &\quad - Div_{re}(m) - RLoss_{re}(m) - Spill_{re}(m) \end{aligned}$$

Donde:

- $Volumen_{re}(m)$ , volúmen en el reservorio  $re$  durante al tiempo  $m$ .
- $Volumen_{re}(m - 1)$ , volúmen en el tiempo anterior.
- $Esc\_Res_{re}(m)$ , volumen escurrido del área de captación asociada al reservorio  $re$ .  
Calculado en el módulo meteorológico.
- $Transf_{re}(m)$ , Transferencias de otras presas distintas al reservorio  $re$ .
- $Evap_{re}(m)$ , Evaporación directa del volumen del reservorio menos la precipitación directa sobre el reservorio.
- $Div_{re}(m)$ , agua derivada del reservorio al sistema de agua público.
- $RLoss_{re}(m)$ , volumen del reservorio que se infiltra al acuífero.
- $Spill_{re}(m)$ , volúmen derramado de la presa cuando este excede del volúmen máximo de operación de esta.

#### 4.4 Módulo Agua Subterránea.

El agua subterránea es el agua que se almacena en el subsuelo mediante la infiltración del agua en la superficie. El volumen de agua de un acuífero  $aq$  que se encuentra dentro de la cuenca de captación es:

$$\begin{aligned}
 Volumen_{aq}(m) &= Volumen_{aq}(m - 1) + Inf\_AQ_{aq}(m) + fugas_{aq}(m) + Rloss(m)_{re \in aq} \\
 &- \sum_i Extracciones_i(m) \\
 &+ \sum_j Transflaterales_j(m) \\
 &- \sum_{spub} Extracciones_{spub}(m) - \sum_{spriv} Extracciones_{spriv}(m)
 \end{aligned}$$

Donde:

- $Volumen_{aq}(m)$ , es el volumen del acuífero  $aq$  al tiempo  $m$ .
- $Volumen_{aq}(m - 1)$ , es el volumen al tiempo anterior.
- $Inf\_AQ_{aq}(m)$ , volumen que se incorpora al acuífero proveniente de la precipitación.  
Calculado en el módulo meteorológico.

- $Rloss(m)_{re \in aq}$ , volúmen de agua infiltrado del reservorio  $re$ , si este se encuentra sobre el acuífero  $aq$ . Calculado en el módulo de reservorio.
- $\sum_i Extracciones_i(m)$ , Total de extracciones hechas al acuífero.  $i$  puede ser el servicio público o privado del agua o el abasto particular de los agentes de la economía.
- $Transf\_laterales_j$ , es el volumen que el acuífero  $aq$  transmite a sus  $j$  acuíferos vecinos y el volumen que el acuífero  $aq$  recibe de sus  $j$  acuíferos vecinos.

Donde además se tiene que cumplir que:

$$\begin{aligned}
 Inf\_AQ_{aq}(m) + fugas_{aq}(m) + Rloss(m)_{re \in aq} + \sum_j Transferencias\_Laterales_j \\
 \leq + \sum_i Extracciones_i(m) \\
 + \sum_{spub} Extracciones_{spub}(m) + \sum_{spriv} Extracciones_{spriv}
 \end{aligned}$$

Esta desigualdad representa la ecuación de balance del acuífero, y nos dice intuitivamente que, para el periodo  $m$ , el total de las recargas debe ser mayor o igual a la suma de las extracciones para el acuífero  $aq$ . Consumir más allá de este nivel implicaría someter al acuífero a una condición de sobreexplotación que, a medida que avance el tiempo, conllevará a el agotamiento del recurso.

#### 4.5 Módulo del servicio público de agua.

El servicio público de agua es el órgano público que se encarga del abastecimiento público del agua hacia la población, agricultura e industria. Típicamente existe un órgano público de abastecimiento por ciudad (servicio de aguas municipales) y uno para la administración del agua en las zonas agrícolas de riego.

Para diferenciar los volúmenes de almacenamiento, es necesario dividir el conjunto total de pozos y reservorios públicos, considerando que existen pozos exclusivamente para uso agrícola y pozos exclusivos para uso urbano.

Entonces, el volumen de agua final que ofrece el servicio público de agua es el siguiente:

$$ServPublico = \sum_{ciudad} Agua\_uso\_urbano_{ciudad} + \sum_g Agua\_uso\_agrícola_g$$

Donde:

$$\begin{aligned} Agua\_uso\_urbano_{ciudad} &= \sum_{res=ciudad} Div(m) + \sum_{k=ciudad} Transferencias_k + \sum_{w=ciudad} Extracciones_w \\ &+ \gamma \left( \sum_{h,hogares} \sum_{j,industrias} Agua\ Tradada_{g,h} \right) \end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned} Agua\_uso\_agrícola_{DR} &= \sum_{res=Riego} Div(m) + \sum_{k=Riego} Transferencias_k + \sum_{w=Riego} Extracciones_w + \\ &(1 - \gamma) \left( \sum_{h,hogares} \sum_{j,industrias} Agua\ Tradada_{g,h} \right) \end{aligned}$$

Siendo  $\gamma$  es la fracción del agua residual tratada que vuelve hacia el uso urbano. El índice *DR* hace referencia a “Distrito de riego”, pero puede ser otro tipo de organismo de administración del agua para la producción agrícola.

Teniendo en cuenta que:

$$\sum_{re} Div_{re}(m) = \sum_{res=ciudad} Div(m) + \sum_{res=Riego} Div(m)$$

$$\sum_{spub} Extracciones_{spub}(m) = \sum_{w=ciudad} Extracciones_w + \sum_{w=Riego} Extracciones_w$$

Donde:

- $Div_{res}(m)$ , volúmen derivado del reservorio  $res$  durante el periodo  $m$
- $Entradas_k(m)$ , volúmen importado de otros sistemas de agua durante el periodo  $m$  menos las exportaciones a otros sistemas de agua provenientes del sistema  $k$ .
- $Extracciones_w(m)$ , volumen extraído del acuífero durante el periodo  $m$ .
- $res = ciudad, w = ciudad$  y  $k = ciudad$  nos dice que el reservorio, el pozo  $w$  y la transferencia proveniente de la fuente  $k$  tiene como destino el consumo en la ciudad. Lo mismo sucede cuando estas fuentes se dedican al riego.

#### 4.6 Módulo del servicio privado de agua.

El servicio privado del agua es una empresa (o conjunto de empresas) encargada de proveer agua con fin de conseguir un beneficio, ya sea desde agua embotellada como mediante pipas a zonas alejadas o de difícil acceso. Dado que este tipo de empresas no tiene los recursos para llevar a cabo obras de almacenamiento superficial considerable, se considera que solamente extraen agua de las fuentes subterráneas.

Este módulo resuelve el siguiente problema.

$$\max \quad \pi_{priv} = p_{priv}^A * A_{priv} - \sum_i \text{Costos de extracción y distribución}_i$$

Sujeto a:

$$A_{priv} = f(\text{profundidad del agua}_{AQ}, \text{combustible})$$

Y donde los costos de extracción y distribución dependen del producto que ofrecen y su mecánica de distribución. La literatura (Srinivasan et al., 2010) reporta que esta función se puede determinar de manera empírica mediante observaciones de campo de dichas empresas privadas.

#### 4.7 Conclusiones del Módulo de Oferta.

La oferta de agua cuenta con 4 tipos de fuentes para llevar a cabo las actividades económicas y el consumo de los hogares; a saber:

- Agua del servicio público para poblaciones urbanas.
- Agua del servicio público para uso agrícola.

- Agua del servicio privado para uso urbano.
- Agua extraíble por los agentes de la economía de fuentes subterráneas para autoconsumo.

Asimismo, el módulo de consumidores puede producir agua residual como subproducto o como desecho de sus actividades domésticas e industriales y puede captar directamente agua de lluvia mediante estructuras de captación domésticas.

Si se considera el uso de agua residual como una fuente adicional provista por la misma economía y que existe un desperdicio de agua por parte de esta (agua que no se utiliza) se tiene que:

$$\begin{aligned}
 \sum_h A_m^h + \sum_j A_m^j + \sum_g A_m^g + \sum Salidas(m) \\
 \leq \sum Entradas(m) + \sum_{ciudad} Agua_{uso_{urbano\ ciudad}}(m) \\
 + \sum_{DR} Agua_{uso_{agricola\ DR}}(m) + \sum_i Extracciones_i(m) + \sum_{priv} A_{priv}(m) \\
 + \sum_{g,h} AguaTratada_{g,h}(m) + \sum_i Captaciones(m)
 \end{aligned}$$

Donde el lado derecho de la desigualdad es la oferta de agua y la parte izquierda es la demanda del líquido más la cantidad desperdiciada. El término de “Agua tratada” hace referencia a la suma de los volúmenes de agua tratada del organismo público proveniente de los hogares y las industrias, que es apta para ser reutilizada por la economía. Por su parte, el término “Captación<sup>8</sup>” hace referencia a los volúmenes de agua susceptibles de ser captados por los hogares y las ciudades para consumo urbano.

---

<sup>8</sup> En este modelo hidro-económico se incluye esta variable, por la relevancia de incentivar la captación de agua de lluvia y porque este propósito se ha convertido en una de las banderas de las campañas electorales mexicanas en curso.

#### 4.8 Módulo de Consumidores.

El módulo de los agentes considera los mismos tres tipos de agentes que el modelo anterior.

##### #1) Hogares.

El hogar representativo  $h$  es un agente que cuenta con una dotación de trabajo,  $L$ , que puede dividirse en trabajo agrícola y trabajo industrial. Este agente se enfrenta al siguiente problema de maximización:

$$\max H_h(C_{g,x}^h, M_{j,y}^h, A_m^h)$$

Sujeto a:

$$\sum_g \sum_x p_h^{C_{g,x}} C_{g,x}^h + \sum_j \sum_y p_h^{M_{j,y}} M_{j,y}^h + \sum_j \sum_y p_m^h A_m^h = w_g L_{Agg} + w_j L_{ind}$$

Donde:

- $H_h$ , función de utilidad del hogar representativo  $h$ .
- $C_{g,x}^h$ , Consumo del cultivo  $x$  proveniente del rancho  $g$  por el hogar  $h$
- $M_{j,y}^h$ , Consumo de la manufactura  $y$  proveniente de la industria  $j$  por el hogar  $h$ .
- $A_m^h$ , Consumo de agua residencial por el hogar  $h$  proveniente de la fuente  $m$ .
- $p_h^{C_{g,x}}$ ,  $p_h^{M_{j,y}}$ ,  $p_m^h$ , vectores de precios para los productos agrícolas, manufacturas y agua.
- $w_g, w_j$ , salarios ofrecidos al hogar por el rancho  $g$  y la industria  $j$ .
- $L_{Agg}, L_{ind}$ , cantidad de trabajo ofertada por el hogar en la agricultura y la industria.

##### #2) Industria.

La industria total es un conjunto de industrias que tratan de maximizar sus beneficios. La industria se enfrenta al siguiente problema de optimización:

$$\max \pi_{ind} = \sum_j \sum_y p_j^{M_{j,y}} M_{j,y} - \sum_g \sum_x p_j^{C_{g,x}} C_{g,x}^j - \sum_j \sum_m p_m^j A_m^j - \sum_j w_j L_j$$

Sujeto a:

$$M_{j,y} = f(C_{g,x}^j, A_m^j, L_j)$$

Donde:

- $\pi_{ind}$ , es la función de beneficios de la industria.
- $M_{j,y}$ , es la cantidad de la manufactura y elaborada dentro de la industria  $j$ .
- $C_{g,x}^j$ , es la cantidad de materia prima  $x$  proveniente de la industria  $g$ .
- $A_m^j$ , es la cantidad de agua que utiliza la industria  $j$  proveniente de la fuente  $m$  para llevar a cabo su producción.
- $L_j$ , es la cantidad de trabajo que ocupa la industria  $j$ .
- $p_j^{M_{j,y}}$ ,  $p_j^{C_{g,x}}$ ,  $p_m^j$ ,  $w_j$  son los precios a los que se enfrenta la industria  $j$  para adquirir sus factores de producción.

### #3) Agricultura.

La agricultura es un caso especial de la industria, que enfrenta una función de producción particular al depender tanto de insumos como de factores de producción (clima, suelo, temperatura). Los primeros provienen de la producción de los demás agentes de la economía, los segundos provienen de la naturaleza.

El sector agrícola se enfrenta al problema de optimización<sup>9</sup>:

$$\max \quad \pi_{agg} = \sum_g \sum_x p_g^{C_{g,x}} C_{g,x} - \sum_j \sum_y p_g^{M_{j,y}} M_{j,y}^g - \sum_g \sum_m p_m^g A_m^g - \sum_g w_g L_g$$

Sujeto a:

$$C_{g,x} = f(M_{j,y}^g, A_m^g, L_g)$$

Dada la función de producción propuesta:

$$\max \quad \pi_{g,x} = \left( v_{g,x} * yld_{g,x} - \sum \omega_{g,x,l} a_{g,x,l} \right) x_{g,i,tierra}$$

Se extrae la función de producción de tal modo que:

---

<sup>9</sup> En el problema de optimización del sector agrícola, si la unidad de producción  $g$  es de agricultura de temporal, entonces su término  $p_m^g A_m^g$  deberá ser igual a cero.

$$C_{g,x} = yld_{g,x}(Agua, Temperatura, Fertilizante, Semilla \dots) * x_{g,x,tierra}$$

El rendimiento del cultivo depende de factores de la naturaleza (temperatura) así como de factores de producción generados en otras industrias (Fertilizante, semilla) y del agua, proveída tanto por el riego como por la precipitación. En contexto con nuestro modelo actual, los insumos o factores proveídos por otras industrias estarán representados por  $M_{j,y}^g$ , el agua por  $A_m^g$ , y todas las variables climatológicas por  $Clima_g$ . La función de producción queda entonces como:

$$C_{g,x} = yld_{g,x}(M_{j,y}^g, A_m^g, Clima_g) * x_{g,x,tierra}$$

Y donde la función de costos sería:

$$\sum \omega_{g,x,l} a_{g,x,l} * x_{g,x,tierra}$$

Donde:

- $\omega_{g,x,l}$  son los costos unitarios de cada uno de los  $l$  insumos que utiliza el productor en el rancho  $g$  para producir el cultivo  $x$ .
- $a_{g,x,l}$  es la cantidad de insumos  $M_{j,y}^g, A_m^g, L_g$  normalizada por unidad de área (hectárea) necesaria para el cultivo  $x$  en el rancho  $g$ .
- $x_{g,i,tierra}$ , es la cantidad de tierra sembrada en el rancho  $g$  para el cultivo  $x$ .
- $v_{g,x}$  como el ingreso por hectárea del cultivo  $x$  en el rancho  $g$ .

El problema de maximización que debe resolver cada rancho ( $g$ ) es el siguiente:

$$\max \quad \pi_g = (v_{g,x} * yld_{g,x} - \sum \omega_{g,x,l} a_{g,x,l}) x_{g,i,tierra}$$

El cuál es la función propuesta previamente con las variables definidas en el contexto de nuestro modelo.

#### 4.9 Condiciones de equilibrio.

Como se ha mencionado, en un MEGA el equilibrio se da cuando se encuentra un vector de precios a partir del cual la oferta y la demanda de bienes y factores de producción se iguale. En

el contexto del modelo hidro-económico esto ocurre cuando se cumplen las condiciones que siguen:

Vacío de mercado:

$$\sum_g \sum_x C_{g,x} = \sum_j C_{g,x}^j + \sum_h C_{g,x}^h$$

$$\sum_j \sum_y M_{j,y} = \sum_g M_{j,y}^g + \sum_h M_{j,y}^h$$

$$\sum_j L_j + \sum_g L_g = \sum_h L_{Agg}^h + L_{Ind}^h$$

Igualdad de precios:

$$p_h^C = p_j^C = p_g^C$$

$$p_h^M = p_j^M = p_g^M$$

$$w_h^{Agg} = w_g^L$$

$$w_h^{Ind} = w_j^L$$

$$p_{demanda,m}^{Agua} = p_{oferta,m}^{Agua}$$

Limitación de uso de agua:

$$\begin{aligned} \sum_h A_m^h + \sum_j A_m^j + \sum_g A_m^g + \sum Salidas(m) \\ \leq \sum Entradas(m) + \sum_{ciudad} Agua_{uso_{urbano\ ciudad}}(m) \\ + \sum_{DR} Agua_{uso_{agricola\ DR}}(m) + \sum_i Extracciones_i(m) + \sum_{priv} A_{priv}(m) \\ + \sum_{g,h} AguaTratada_{g,h}(m) + \sum_i Captaciones(m) \end{aligned}$$

Además de que se debe cumplir la condición de balance del acuífero para todos los acuíferos  $aq$  de la subcuenca:

$$\begin{aligned} Inf\_AQ_{aq}(m) + fugas_{aq}(m) + Rloss(m)_{re\in aq} + \sum_j Transferencias\_Laterales_j \\ \leq + \sum_i Extracciones_i(m) \\ + \sum_{spub} Extracciones_{spub}(m) + \sum_{spriv} Extracciones_{spriv} \end{aligned}$$

La aportación básica del presente trabajo se refleja en estas restricciones con las que se relacionan las actividades productivas de oferta y demanda con las restricciones de uso de agua. Cualquier shock negativo de oferta de agua (parte derecha de la primera desigualdad) y dadas las funciones de producción/consumo, va a generar un impacto negativo sobre la economía total y viceversa para shocks positivos.

Con base en la parte de oferta de agua de la restricción de uso de ésta es posible discutir políticas para la conservación del recurso, tales como:

- Medidas para la importación de agua de otras regiones (aumentar  $\sum Entradas(m)$ ).
- Aumento de la cantidad de agua disponible en los acuíferos (y en consecuencia su disponibilidad para la extracción pública y privada) mediante políticas de conservación de suelos y reforestación.

- Incrementar el agua disponible por escurrimiento mediante la construcción de estructuras de captación (reservorios) o aumentando la cantidad de agua que escurre a estos (políticas de conservación ambiental).
- Aumento de la cantidad de agua tratada proveniente de los hogares y de las industrias, mediante incentivos para que estos agentes traten su agua residual y a partir de la construcción de infraestructura municipal de tratamiento de agua urbana.
- Incremento de captaciones de agua de lluvia: mediante incentivos para los hogares, industria y productores agrícolas que lleven a captar y almacenar el agua que cae directamente sobre las áreas ocupadas por estos agentes.
- Políticas de mejoramiento de la infraestructura de conducción: eliminación de las fugas de agua y mejoramiento de los canales para evitar que se pierda mientras se conduce de un lugar a otro.

Del lado de la demanda tenemos las siguientes propuestas de política:

- Reducir el consumo de agua en los hogares, mediante campañas de concientización acerca de la necesidad de conservar el recurso y establecimiento de cuotas que reflejen la condición de escasez de este o, en caso extremo, un servicio más limitado de agua.
- Disminuir el consumo de agua en la industria y servicios, mediante cuotas más altas (que reflejen escasez) e incentivos para que la empleen de forma eficiente (subsidios o financiamiento para proyectos de mejoramiento en la eficiencia de uso y tratamiento).
- Reducir el consumo en el sector agrícola mediante el financiamiento para la adquisición de capital para la aplicación de riego, el cambio a siembras con requerimientos menores de agua en zonas áridas, cuotas del agua que reflejen el valor de esta de manera más adecuada, mejoramiento de la infraestructura de los distritos de riego para evitar las pérdidas y el desperdicio, y disminuir el uso de agroquímicos que contaminen los mantos freáticos y reduzcan el volumen y la calidad de los depósitos de los acuíferos.

#### 4.10 Limitaciones del Modelo.

La solución del modelo hidro-económico de equilibrio general propuesto será de manera simultánea a partir de los tres problemas de maximización, sujeto a las restricciones expuestas y a las condiciones de vacío de mercado. Para llegar a una solución analítica se deben definir formas

funcionales a las ecuaciones de utilidad y de producción, que pueden ser funciones del tipo CES (Elasticidad de sustitución constante).

Una solución numérica del modelo requiere alimentarlo de datos. En la literatura en la que se hacen estimaciones de impactos a partir de MEGA es frecuente que la base de datos provenga de una matriz de contabilidad social y que para la calibración del modelo y las simulaciones de impactos de choques exógenos se use el software GAMS, ver por ejemplo a Yúnez-Naude y Rojas-Castro, 2018). Un reto para la aplicación a México del modelo hidro-económico expuesto es la necesidad de elaborar matrices de contabilidad social para cuencas y sub cuencas, lo cual requiere de información desagregada, tanto de la economía de estas regiones como de datos meteorológicos y de disponibilidad de agua en presas, reservorios. También se requiere información diaria de los sistemas de conducción de agua y la que hay es anual y calculada con datos históricos. No obstante, lo anterior, vale la pena atender estas exigencias de información por la urgencia que hay de contar con diagnósticos sólidos de la oferta y demanda de agua para el diseño de políticas que conduzcan al cuidado y uso eficiente del líquido (en el Anexo 1 se presenta un avance al respecto, a partir del recuento de la información existente para aplicar a México el modelo hidro-económico).

## 5. Conclusiones.

Una vez calibrado en el ámbito de sub cuenca, el modelo propuesto en esta tesis sería el punto de partida para llevar a cabo simulaciones de choques climáticos o de políticas hidrológicas y con ello estimar sus posibles efectos de equilibrio general (o directos e indirectos) en la economía de cuencas o sub cuencas. Es decir, el modelo hidro-ecológico desarrollado, al incluir tanto la oferta como la demanda de agua, podrá usarse para evaluar los impactos que tendrían fenómenos relacionados con el recurso hídrico y políticas correspondientes sobre el sector agrícola, industrial y urbano de la región estudiada. Ya que el enfoque es de equilibrio general los resultados de su aplicación serán más completos y precisos que los provenientes de modelos de equilibrio parcial.

Las simulaciones podrían ser *ex ante* (como las repercusiones que tendría la adopción de nuevas tecnologías que hagan eficiente el uso del agua) o contra factuales (como la reducción de la oferta actual de agua para la producción agrícola) En específico, los que siguen son algunos de los choques cuyas repercusiones pueden estimarse con el modelo.

Por el lado de la oferta del agua, las políticas aplicables para un uso más eficiente del recurso y cuyos efectos se medirían con base en el modelo, se pueden enfocar a aumentar la cantidad del líquido aprovechable a partir de: 1) reducir la evaporación del agua de lluvia mediante la construcción de infraestructura de captación y aprovechamiento y de pozos de inyección de agua a los acuíferos y de políticas de conservación de bosques, agua y suelos que aumenten la fracción de agua escurrida e infiltrada; y 2) de aumentar el volumen neto de transferencias de agua a la región mediante la construcción de infraestructura de conducción y almacenamiento de agua proveniente de zonas con mayor abundancia del recurso o, en caso contrario, a partir de la disminución de las exportaciones de agua hacia otras regiones.

En cuanto a la demanda, con el modelo se podrían simular políticas que acompañen a las previas de tal manera que no disminuyan o aumenten las reservas de agua. Las que siguen son algunas de las medidas que podrían evitar el aumento de las extracciones del líquido —o hasta reducirlas—por parte de los consumidores del recurso serían: 1) promover en el sector agrícola la eficiencia del riego mediante la tecnificación y la inversión en capital agrícola, así como cambios en los patrones de cultivos; 2) inducir el uso eficiente del agua en la industria y el sector urbano e invertir en la infraestructura necesaria para ello; 3) aumentos en las tarifas de consumo de agua y 4) una política de desarrollo regional balanceada que reduzca la migración a las grandes urbes del país.

A lo anterior hay que añadir la posibilidad de aplicar el modelo hidro-económico de equilibrio general propuesto para evaluar los posibles efectos del cambio climático en la oferta y demanda de agua.

Se espera que la investigación realizada para elaborar la presente tesis promueva el estudio riguroso de un tema fundamental para el desarrollo económico de México y de otros países, que exige un enfoque multidisciplinario. También se espera que se superen las limitaciones de datos que impidieron aplicar el modelo expuesto a una cuenca o subcuenca del país, que podrán superarse cuando el Estado mexicano se proporcione la información requerida.

## 6. Referencias.

- Agua.org.mx. (2017).** Visión General del Agua en México. Retrieved from <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988).** Applied Hidrology. McGraww Hill Book Co.
- CONAGUA-SEMARNAT. (2016).** Estadísticas del Agua en México 2016. Retrieved from [www.gob.mx/conagua](http://www.gob.mx/conagua)
- Espejel R., A. (2017).** “Efecto del uso de suelo sobre los escurrimientos en la cuenca del rio Papalotla, Estado de México”. Tesis Profesional. Chapingo, México. Departamento de Irrigación. 2017.
- Gómez-Plana, A. (2005).** Simulación de políticas económicas: los modelos de equilibrio general aplicado. Cuadernos Económicos de ICE. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2039013>
- Guerrero García Rojas, H., Yunez-Naude, A., & Medellín-Azuara, J. (2008).** El agua en México. Consecuencias de las políticas de intervención en el sector. (FCE, Ed.) (Colec de L). México.
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009).** Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects.(Report). Journal of Hydrology, 375(3 4), 627.
- Howitt, R. E. (1995).** Positive Mathematical Programming. American Journal of Agricultural Economics, 77(2), 329–342. <https://doi.org/10.1016/B978-813120376-7/50026-9>
- Howitt, R. E., & Medellín-Azuara, J. (2008).** Un modelo Regional Agrícola de Equilibrio Parcial. El caso de la cuenca del Rio Bravo. El Agua En México. Consecuencias de Las Políticas de Intervención En El Sector., Lecturas., 151–182.
- IPCC, 2014:** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kimaite, F. M. (2011).** A Hydro-Economic Model for Water Resources Assessments With Application To the Apalachicola- Chattahoochee-Flint River Basin a Hydro-Economic Model for Water Resources Assessment : With Application To the Apalachicola- Chattahoochee-Flint River Basin.
- Lund, J. R., Jenkins, M. W., Zhu, T., Tanaka, S. K., Pulido, M., Ritzema, R., ... Ferriera, I. (2003).** Climate Warming & California’s Water Future. World Water and Environmental Resources Congress, 805–814. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)349](https://doi.org/10.1061/40685(2003)349)

**Mas-Colell, A., Whinston, M. D., & Green, J. R. (1995).** Microeconomic theory. Oxford University Press. <https://doi.org/10.2307/135312>

**McCuen, R. H. (2004).** Hydrologic analysis and design (2a ed.). EUA: Prentice-Hall. 814 p.

**Medellín-Azuara, J., Harou, J. J., & Howitt, R. E. (2010).** Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5639–5648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>

**Medellín-Azuara, J., Harou, J. J., & Howitt, R. E. (2010).** Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5639–5648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>

**Medellín-Azuara, J., Howitt, R. E., Waller-Barrera, C., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., & Taylor, J. E. (2009).** A calibrated agricultural water demand model for three regions in northern Baja California. *Agrociencia*, 43(May 2014), 83–96.

**Mendoza-Espinosa, L. G., Medellín-Azuara, J., & Lund, J. R. (2007).** An Optimization Model for Water Management in the USA-Mexico Californian Border. *Proceedings of the ...*, (May 2014). <https://doi.org/10.2175/193864707787780710>

**Ortiz-Partida, J. P., Sandoval-Solis, S., & Diaz-Gomez, R. (2017).** Hydrology and climate elements on the Rio Grande/Bravo basin. U.S. Geological Survey data release.

**Pearce, D., & Warford, J. J. (1993).** World without end: economics, environment, and sustainable development. New York, NY: Oxford University Press. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/716131468764410726/World-without-end-economics-environment-and-sustainable-development>

**SAGARPA, & Garcia, G. (2014).** Escurrimientos superficiales, 82(mm), 1–35. Retrieved from [http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller Desarrollo de capacidades orientadas a/Attachments/24/02.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/24/02.pdf)

**Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., & Santos, E. A. (2010).** Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5), 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>

**Srinivasan, V., Gorelick, S.M. & Goulder, L., (2010).** A hydrologic-economic modeling approach for analysis of urban water supply dynamics in Chennai, India. *Water Resources Research* 46(7), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2009wr008693>

Vega, L. (2018). INFILTRACIÓN. Retrieved from <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/INFIL.htm>

Yúnez-Naude, Antonio, Rojas-Castro, L. G. (2008). Perspectivas de la Agricultura ante reducciones en la disponibilidad de Agua para Riego. *El Trimestre Económico*. FCE., 100(El agua en México. Consecuencias de las políticas de intervención en el sector.), 183–211.

Zhu, T., Jenkins, M. W., & Lund, J. R. (2003). Climate change surface and groundwater hydrologies for modelling water supply management. Appendix A. Climate warming & California's water future. CEC Report 2003.

## 7. Anexos.

### ANEXO 1. Sobre la obtención de los datos.

Una de las mayores dificultades en el proceso de implementación de un modelo aplicado viene dada por la disponibilidad de la información necesarios. Para el modelo expuesto previamente son necesarias las siguientes bases de datos.

#### - **Área y forma de la cuenca y de las subcuencas:**

Algunos de estos datos los proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) o por centros de investigación que trabajen con información geográfica, principalmente si se requiere hacer un estudio para cuencas conocidas. Igualmente, es posible obtener un Modelo de Elevación Digital que permita, mediante un programa de Sistemas de Información Geográfica, la forma y área de cuencas, subcuencas y la trayectoria de los ríos que la atraviesan.

Los modelos de elevación digital (a partir de los cuales se puede generar el archivo \*.shp para la geometría de la cuenca) están en:

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>

Asimismo, es posible descargar la información de las subcuencas a nivel de consejo de cuenca<sup>10</sup> (entre otros datos) en la siguiente dirección:

<http://www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=1111&n3=1133>

---

<sup>10</sup> El **consejo de cuenca** es el mecanismo que establece la Ley de Aguas Nacionales para incorporar la participación ciudadana en la toma de decisiones sobre el agua. En México hay 16 consejos de cuenca que gobiernan un área determinada de la república.

- **Información Meteorológica:**

Esta información se puede conseguir del Servicio Meteorológico Nacional (principalmente a nivel mensual promedio), a través de bases de datos conocidas como “Normales climatológicas” que generalmente incluyen datos de precipitación, evaporación, radiación solar en algunos casos, posición geográfica y temperaturas máxima, mínima y promedio. Igualmente, es posible conseguir las series de tiempo a nivel diario de estos datos acudiendo a las estaciones meteorológicas que tienen como obligación levantar estos datos.

Los promedios mensuales de estas variables climatológicas pueden obtenerse en:

<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

- **Cobertura Vegetal y Uso de Suelo**

Esta información es posible obtenerla de imágenes satelitales y archivos de información geográfica proporcionadas por agencias de estadística del país. En el caso mexicano, esta información puede obtenerse de dos fuentes distintas: la proporcionada por el INEGI con desagregación a 182 tipos diferentes de uso de suelo y la agrupada de la CONABIO que considera 16 tipos diferentes de uso de suelo.

CONABIO:

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv731mgw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv731mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)

INEGI:

<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>

- **Información de Acuíferos.**

La CONAGUA emite reportes de disponibilidad de agua por acuífero para todos los acuíferos del país. En dichos reportes se puede obtener información de las recargas medias anuales, volúmenes concesionados, volúmenes de extracción, disponibilidad media anual, etc.

Esta información se encuentra disponible en:  
[http://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad\\_Acuiferos.html](http://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html)

- **Información de Presas.**

Información general de las presas y almacenamientos superficiales en el país se puede obtener del catálogo de presas de la CONAGUA:

<http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>

Además, información pública relativa a la infraestructura hidráulica puede obtenerse en los reportes de “Estadísticas del agua en México” el cual puede descargarse en su versión más reciente en el siguiente enlace:

[http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf)

Sin embargo, información actualizada de volúmenes actuales de almacenamiento de presas y datos en serie de tiempo necesitan ser obtenidas de los organismos operadores de dicha infraestructura, al no encontrarse en línea.

- **Información de entradas y salidas de agua.**

Estos datos son recogidos diariamente por estaciones de aforo colocadas en los canales de distribución y los ríos que cruzan una región determinada, y son útiles para determinar la disponibilidad local del recurso hidráulico, el volumen que sale de la región y el cumplimiento de acuerdos relativos a la distribución del agua entre regiones.

Igual que en el caso de los almacenamientos de presas, el valor de las entradas y salidas de agua no se encuentra fácilmente en línea y típicamente hay que acudir con los agentes encargados de estas mediciones para poder obtener datos en forma de series de tiempo para obtener estos datos.

- **Información Económica.**

A nivel macro se cuenta con matrices de insumo-producto (2003) y la matriz de contabilidad 1996. En su artículo, Yúnez y Rojas Castro (2008) hacen referencia a la construcción de una matriz de contabilidad social para el año 2002 donde se divide al país en 5 regiones de estudio. Dicha base podría ser de utilidad si se consideran dichas regiones como una cuenca a nivel agregado.

Igualmente, para datos de gastos en insumos agrícolas se cuenta con el Sistema Agropecuario de Consulta (SIACON) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), así como en su respectivo Sistema de Información de Agricultura y Pesca (SIAP), al cuál es posible acceder en el siguiente enlace:

<http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>

Para información acerca de los gastos e ingresos de los hogares se cuenta con la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH), la cual se publica generalmente cada dos años y puede consultarse en el siguiente enlace:

<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/regulares/enigh/nc/2016/default.html?init=2>

Otros datos que podrían resultar de utilidad pueden consultarse de bases de datos de la Secretaría de Hacienda Federal, del Banco de México, entre otras fuentes.

## ANEXO 2. Fundamento teórico.

Teóricamente, hay que fundamentar las formas funcionales de  $\alpha_{inf,i,t}$ ,  $\alpha_{etp,i,t}$  y  $\alpha_{esc,i,t}$  para mostrar que efectivamente dependen de los factores naturales y climatológicos expresados en el modelo previo y de esta manera políticas de conservación de la naturaleza tienen un efecto sobre la oferta de agua total del sistema.

**Para el caso de la infiltración en una cuenca**, el método más utilizado es el del número de curva de la USGS (Servicio de Geología de los Estados Unidos), el cuál es un modelo empírico que determina el potencial de infiltración a partir de un coeficiente agregado de características de la cuenca: 1) tipo hidrológico de suelo; 2) uso de la tierra y tratamiento; y 3) condición previa de humedad (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Para calcular la retención potencial máxima en el suelo,  $S$ , el modelo del número de curva utiliza la siguiente expresión:

$$S = \left( \frac{1000}{CN} \right) - 10$$

Donde empíricamente se considera que el agua infiltrada es equivalente a:

$$Ia = 0.2 S$$

Y donde CN se obtiene de tablas que siguen:

*Clasificación Hidrológica del Suelo:* El SCS clasificó hidrológicamente más de 4,000 tipos de suelos basándose en su potencial de escurrimiento fueron agrupados en cuatro grupos de suelos cuya identificación fue con las letras A, B, C y D

Tabla 2. Características de los grupos de suelos del SCS

Grupo de suelo	Características
<b>A</b>	Potencial de escurrimiento bajo, suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas. Suelos con alta transmisión de agua.
<b>B</b>	Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua.
<b>C</b>	Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente con suelos que contienen una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Tiene baja transmisión de agua.
<b>D</b>	Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión de agua muy baja.

Fuente: McCuen, 2004, citado por Espejel, 2017.

*Condición hidrológica:* El tipo de vegetación y cobertura de la cuenca tiene una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. El porcentaje se estima cualitativamente en los planos respectivos:

*Tabla 3. Cuadros de Condición Hidrológica.*

<b>Condición Hidrológica</b>	<b>Cobertura</b>
<b>Buena</b>	> 75% cubierta por pasto. Intensidad ligera de pastoreo.
<b>Regular</b>	50% - 75% del área cubierta por pasto. Intensidad media de pastoreo.
<b>Mala</b>	< 50% del área cubierta por pasto. Alta intensidad de pastoreo.

<b>Condición Hidrológica</b>	<b>Cobertura</b>
<b>Buena</b>	Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie.
<b>Regular</b>	Con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pastos.
<b>Mala</b>	Bosque regularmente quemado con pocos arbustos y poco humus vegetal.

Fuente: McCuen, 2004, citado por Espejel, 2017.

*Uso y Tratamiento del Suelo:* El uso de suelo está asociado a las coberturas forestales y vegetales de la cuenca como son el tipo de vegetación, los usos agrícolas, tierra en descanso, superficies impermeables y áreas urbanas.

*Tabla 4. Numero de Curva para localidades y zonas urbanas.*

Descripción de Uso del Suelo	% de Permeabilidad <sup>b</sup>	Grupo Hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
<b>Áreas urbanas totalmente desarrolladas</b> <sup>a</sup> (vegetación establecida). <b>Césped, espacios abiertos, parques, campos de golf, cementerios, etc.</b> Óptimas condiciones: cubierta de pastos en un 75% o más del área.		39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta de pastos en un 50 % a 75 % del área.		49	69	79	84
Condición pobre; cubierta de pastos menor del 50 % del área.		68	79	86	89
<b>Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.</b>		98	98	98	98
<b>Calles y Carreteras</b>					
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		83	89	92	93
<b>Áreas empresariales y comerciales</b>	85	89	92	94	95
<b>Distritos industriales</b>	72	81	88	91	93
<b>Hileras de casas, poblados y áreas residenciales con tamaño de 1/8 de acre o menos</b>	65	77	85	90	92
<b>Residencial: tamaño de lote promedio</b>					
1/4 de acre	38	61	75	83	87
1/3 de acre	30	57	72	81	86
1/2 de acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82
<b>El desarrollo de áreas urbanas</b> <sup>c</sup> (ninguna vegetación establecida)					
Área recién clasificada		77	86	91	94
<b>Áreas urbanas del desierto occidental.</b>					
Paisajes desérticos Naturales <sup>f</sup>		63	77	85	88
Paisajes desérticos Artificiales		96	96	96	96

Fuente: McCuen, 2004, citado por Espejel 2017.

<sup>a</sup> Para usos de suelo con áreas impermeables, los números de curva son calculados asumiendo que 100% de las áreas impermeables son conectadas directamente al sistema de drenaje. Las áreas permeables (césped) son consideradas como equivalentes a los céspedes en buenas condiciones. Áreas impermeables tienen un NC de 98.

<sup>b</sup> Incluye calles pavimentadas.

<sup>c</sup> Use para el diseño de medidas provisionales durante clasificación y construcción. El porcentaje de área impermeable para las zonas urbanas en desarrollo varía bastante. El usuario determinará el porcentaje impermeable.

<sup>f</sup> Los números de curva para el grupo A se han desarrollado sólo para arbusto del desierto.

Como se puede observar en las tablas previas, el S depende del valor del número de Curva, y este a su vez, depende de valores de características del suelo y uso de suelo y cobertura vegetal, además de la precipitación, la cual da origen a los volúmenes de agua. Por lo tanto, es posible justificar que:

$$\alpha_{inf,i,t} = f(\textit{textura del suelo, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación})$$

**Para el caso de la evapotranspiración**, existen diferentes expresiones para poder calcular esta fracción de la precipitación. Entre las más populares se encuentran las siguientes (Sentelhas, Gillespie, & Santos, 2010):

**Método de Priestley-Taylor:**

$$ET_o = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right)$$

Donde:

$\lambda$ , es el calor latente de vaporización del agua (2.45 MJ kg<sup>-1</sup>).

R<sub>n</sub>, Radiación neta (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)

G, Densidad de flujo de calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) (considerada nula para estimados diarios)

$\Delta$ , la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación (MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)

$\gamma$ , constante psicométrica (0.0677 kPa grados C<sup>-1</sup>)

**Método de Hargreaves:**

$$ET_o = C_o Ra' (T_{max_c} - T_{min_c})^{0.5} (T + 17.8)$$

Donde

- $C_o$ , Parámetro de conversión de unidades (= 0.0023)
- $Ra'$ , Radiación solar extraterrestre
- $T_{max_c}$ , Temperatura Máxima, en C
- $T_{min_c}$ , Temperatura mínima, en C
- $T$ , Temperatura promedio del Aire, en C.

En estas dos funciones para estimar la evapotranspiración de la zona, se necesitan datos de temperatura y radiación solar, así como características físicas del suelo. Por lo tanto, se concluye que nuestra forma funcional está fundamentada en la teoría.

$$\alpha_{etp,i,t} = f(\text{Temperatura Máxima, Mínima, Velocidad del Viento, Uso de suelo, Cobertura Vegetal, Evaporación, Radiación Solar})$$

**Para el caso del escurrimiento superficial**, la expresión que se maneja en la literatura (Vega, 2018) es:

$$Q = C_e * i * P$$

Donde:

$Q$  = volumen de escurrimiento directo (m<sup>3</sup>)

$C_e$  = coeficiente de escurrimiento (%)

$i$  = la intensidad de la lluvia

$P$  = volumen de lluvia (m<sup>3</sup>)

Al tomar la lluvia como principal variable y debido a que ni la capacidad de infiltración ni el coeficiente de escurrimiento pueden considerarse constantes, el *United States Conservation Service* (USCS) propone una relación entre la lluvia y la infiltración según el cual la relación entre el coeficiente de escurrimiento  $C_e$  y la altura de precipitación total  $hp$  es:

$$C_e = \frac{(h_p - 0.2S)^2}{h_p^2 + 0.8Sh_p}$$

Donde S es un parámetro medido en las mismas unidades que  $h_p$  (mm), siendo esta la lámina de precipitación. De S se prueban distintos valores hasta encontrar el que hace mínima la variancia del error en el cálculo de  $C_e$ . Conocido el volumen de escurrimiento, por diferencia con el de precipitación se calcula el de infiltración.

En la literatura se dispone de valores ya previamente calculados. A continuación se muestra una tabla de valores del coeficiente de escurrimiento (SAGARPA & García, 2014):

Tabla 5. Valores del coeficiente de escorrentía considerados para estudios de SAGARPA.

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
<b>Bosque</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
<b>Pastizales</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
<b>Terrenos cultivados</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Fuente: Sagarpa y García, 2014.

En esta tabla es posible ver que el escurrimiento depende de la textura de suelo, del uso del mismo y de la pendiente de la superficie. Por ejemplo, a mayor contenido de arcillas (textura fina), en terrenos cultivados y a mayores pendientes el coeficiente de escorrentía tiende a aumentar. Dado que el coeficiente de escurrimiento es una fracción de la precipitación se obtiene directamente  $\alpha_{esc,i,t}$  de la tabla 4 teniendo datos de las características promedio del área a estudiar.

En la literatura se fundamenta que el coeficiente  $\alpha_{esc,i,t}$  efectivamente depende de uso de suelo, pendiente, textura de suelo y precipitación y su intensidad.

## INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Posibles escenarios futuros considerados para el trabajo de Zhu, Jenkins y Lund, 2003.	18
Tabla 2. Características de los grupos de suelos del SCS .....	57
Tabla 3. Cuadros de Condición Hidrológica. ....	58
Tabla 4. Numero de Curva para localidades y zonas urbanas. ....	59
Tabla 5. Valores del coeficiente de escorrentía considerados para estudios de SAGARPA. ....	62

## INDICE DE FIGURAS.

Fig. 1 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México .....	5
Fig. 2 Situación de los acuíferos a finales del 2015. Fuente: CONAGUA, 2016. ....	6
Fig. 3 Esquema de una cuenca hidrográfica. ....	8
Fig. 4 Funcionamiento de un Modelo de Equilibrio General, según Gómez-Plana, 2005. ....	12
Fig. 5 Representación de los elementos Modelo CALVIN. ....	16
Fig. 6 Esquema Modular del modelo simple. ....	21
Fig. 7 Cuenca dividida en subcuencas. ....	22
Fig. 9 Esquema modular del modelo general. ....	34