

RUTA METODOLÓGICA

# Para el análisis de la dinámica del agua en el territorio

Integración de la oferta y la demanda para la  
modelación y simulación de escenarios



## RUTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL TERRITORIO

©THE NATURE CONSERVANCY (TNC)

[www.nature.org](http://www.nature.org)

[colombia@tnc.org](mailto:colombia@tnc.org)

Teléfono TNC (+57) 1-6065837

Claudia Vásquez Marazzani  
Directora de la unidad de conservación del Norte de  
Andes y Sur de Centro América (NASCA)

Andrés Zuluaga Salazar  
Coordinador de la Estrategia de Tierras

### Equipo interno The Nature Conservancy:

Jonathan Nogales Pimentel  
Carlos Rogéliz Prada  
Deissy Arango González  
Elena Montes Jaramillo  
Tomas Walschburger

### Cita de la obra:

The Nature Conservancy. Ruta metodológica para el  
análisis de la dinámica del agua en el territorio. Integración  
de la oferta y la demanda para la modelación y simulación  
de escenarios.  
Bogotá D.C. 2020.

### Producción editorial:

Fairatie Creatividad

### ISBN Obra digital:

978-958-52666-9-8

### ISBN Obra impresa:

978-958-52666-7-4



Con el apoyo de:





# Introducción

El entendimiento de la dinámica del agua al interior de un territorio es esencial para llevar a cabo un adecuado manejo de los recursos naturales. Un ejemplo claro de esto se encuentra en las culturas indígenas Zenú, Chimilas, Taironas y Wayúu, cuya comprensión de la dinámica hídrica les permitió prosperar moldeando el paisaje para sus labores de agricultura e infraestructura frente a las grandes inundaciones de los ríos Cauca, San Jorge y Magdalena.

La modelación hidrológica es uno de los medios más utilizados para la comprensión de la dinámica hídrica al interior de un territorio, ya que esta permite de manera simplificada, no solo entender las formas en las cuales interactúan los diferentes procesos hidrológicos, sino que también, brinda la posibilidad de evaluar a futuro los impactos sobre el recurso hídrico en términos de cantidad y calidad bajo cambios en las condiciones climáticas, en el uso de la tierra, en la infraestructura, etc.

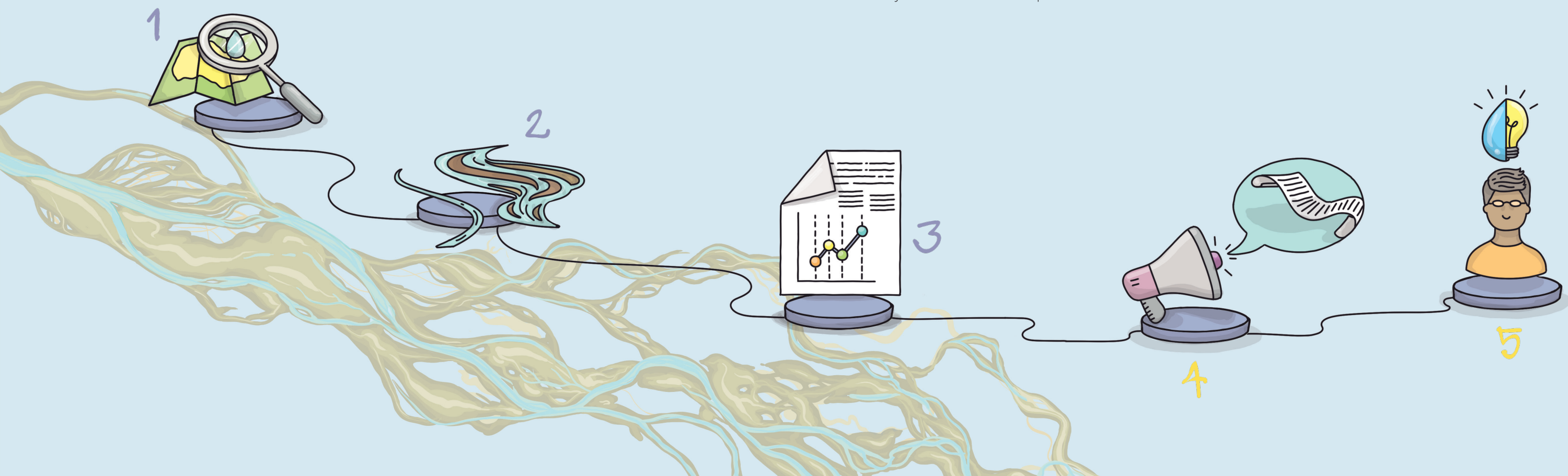
Realizar una modelación hidrológica no es una tarea trivial, pues es necesario entender cuáles son los procesos hidrológicos de mayor relevancia, cuáles son las presiones a las que se ve sometido el recurso hídrico y qué preguntas se quiere que responda el modelo, por ejemplo, saber cómo cambia la disponibilidad de agua en un río si se desarrollan diferentes actividades productivas como la ganadería, la agricultura o la minería. El ejercicio de modelación es útil para orientar la toma de decisiones que favorezcan no solo a los seres humanos, sino también a la misma naturaleza, a través de la identificación de los lugares donde ciertas actividades puedan tener un menor impacto en los ecosistemas y en sus servicios. Saber si en una región se pueden otorgar más concesiones de agua, es un asunto de interés para líderes, empresarios, científicos, ambientalistas, administradores, tomadores de decisiones y todos los interesados en el buen manejo del agua.

En este sentido, esta guía tiene como objetivo brindar un marco metodológico para analizar la dinámica del agua en un territorio en términos de cantidad. La calidad del agua, si bien es un factor clave y determinante en la disponibilidad hídrica de un territorio, no se aborda en la presente guía, sin embargo, se enfatiza que esta variable debe considerarse para la gestión del territorio. Inicialmente, se abordan los aspectos metodológicos para la descripción de la oferta y de la demanda del agua, luego las características que explican su dinámica y en tercer lugar, los elementos para la predicción de su cambio en diferentes escenarios. Finalmente, se dan a conocer algunos aspectos para la comunicación de resultados, el uso de la información para la toma de decisiones y recomendaciones a tener en cuenta, ya que los modelos son útiles pero pueden presentar distintas limitaciones.

Metodológicamente, podemos resumir los pasos para el análisis de la dinámica del agua en el territorio en:

- 1) Comprensión del territorio.
- 2) Reconocimiento de la complejidad del análisis.
- 3) Entendimiento del agua en el territorio a través de la identificación y recolección de información ambiental; el procesamiento y análisis de la condición climática; reconocimiento de los actores que hacen uso del agua, cuáles son sus necesidades de uso, dónde y cuánta agua están tomando; la conceptualización, selección, construcción, calibración y validación del modelo hidrológico siguiendo el protocolo de modelación; y la construcción y simulación de escenarios.
- 4) Comunicación de resultados.
- 5) Apropiación y uso de la información.

Los pasos 1 al 3 están enfocados en el análisis de la dinámica del agua, los pasos 4 y 5, en la aplicación, generación y uso de información para la toma de decisiones.

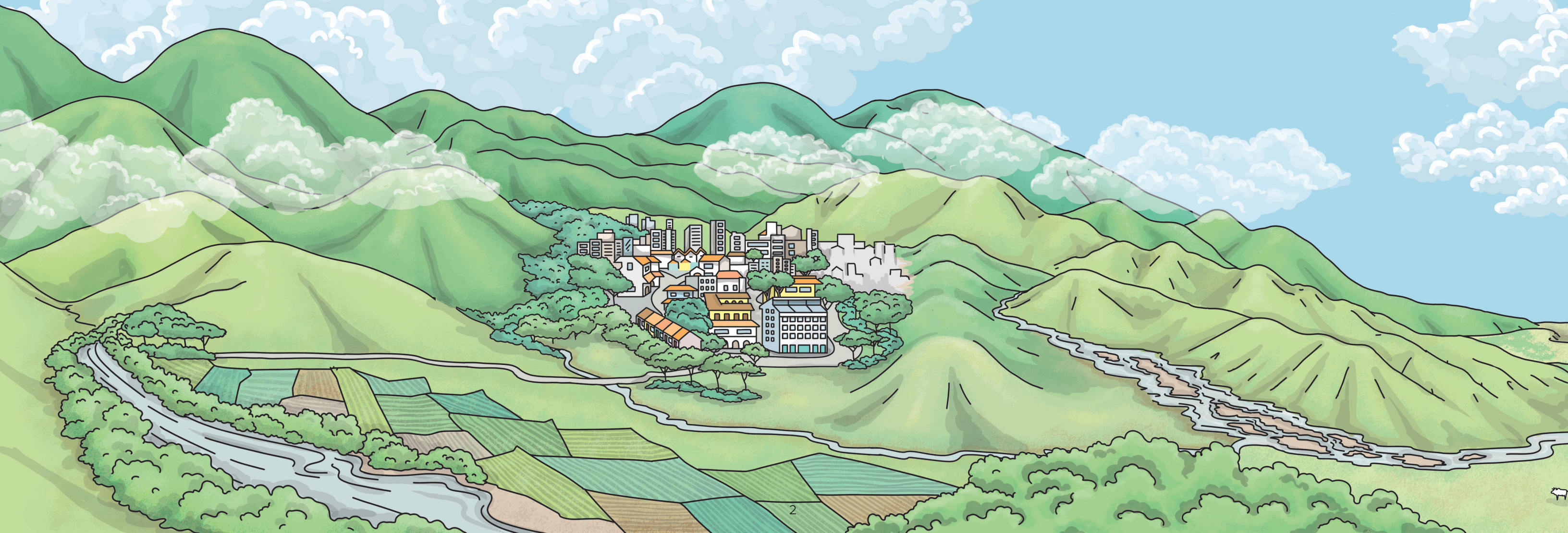
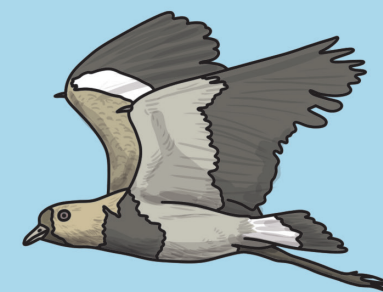






# La importancia del agua y su relación con el territorio

El agua en el territorio determina en gran medida las dinámicas físicas y biológicas que tienen lugar en él. A su vez, estas dinámicas también afectan el comportamiento del agua. Esta relación tan estrecha, hace que, al momento de pensar en la gestión y desarrollo de una región, no se pueda dejar de lado el componente hídrico, puesto que es un elemento esencial y determinante para el desarrollo de las actividades humanas.







# La diversidad de ríos y la importancia de comprender el ciclo del agua

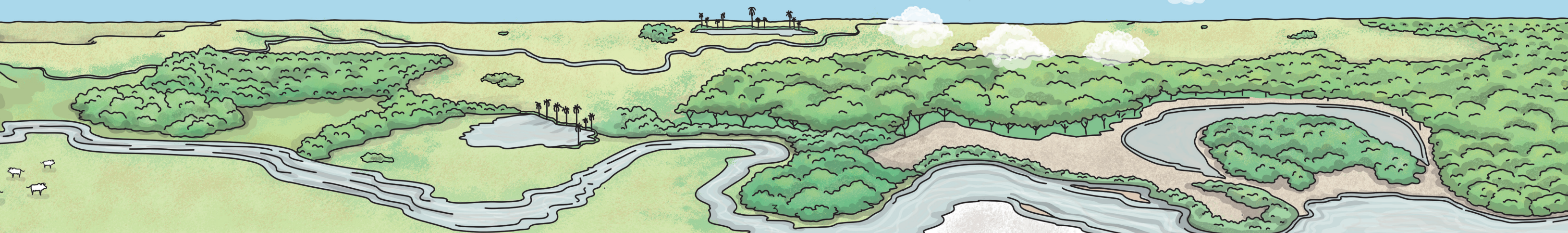
Conocer y entender la diversidad de ríos en un territorio, es fundamental a la hora de analizar y modelar la dinámica del agua. Dentro del ciclo hidrológico, cada río tiene un comportamiento particular vinculado con el transporte de agua y sedimentos, con unas características propias de geomorfología y biodiversidad.

Dependiendo del tamaño del territorio que se quiera analizar, este puede comprender varios tipos de ríos que se comportan de manera diferente. La interacción de la lluvia con otros fenómenos como la evaporación y con los diferentes elementos del paisaje (formas del relieve), no solo determinan la cantidad de agua, sino también su movimiento. Esto hace que el flujo de agua en un río sea muy diferente en sus partes alta, media y baja.

En un mismo río, existen lugares en los que el agua lleva gran velocidad, como cuando pasa por un valle estrecho, otros donde la pendiente es moderada y el valle es un poco más amplio por lo que se acumulan muchas rocas y sedimentos. En otros sectores, el río pasa por zonas planas donde el agua es más lenta y cuando crece se desborda e inunda muchos terrenos a la redonda; en este último caso, cuando terminan las crecientes, parte del agua que se desbordó regresa nuevamente al río y la otra parte alimenta ciénagas, lagos y lagunas. Es así como el agua hace

un amplio recorrido y movimientos, interactuando de distintas maneras con el paisaje y formando diferentes tipos o patrones de ríos.

Al observar los ríos desde el aire, se pueden identificar diversas formas que hablan de los procesos naturales que tienen lugar en ellos, cada uno recibe nombres particulares, por ejemplo, a los ríos de las zonas planas que presentan ondulaciones con forma de serpiente se le llama meándricos, y estos cambian constantemente su curso producto de los procesos de erosión y sedimentación. Cuando en un río ocurren procesos de erosión y acumulación de depósitos al interior de su cauce, se forman canales interconectados separados por islas, a este tipo de cauces se les denomina trezados si no hay vegetación consolidada en sus islas y anastomosados si existe vegetación consolidada en sus islas. Así como estos, existen muchos otros más. Toda esta complejidad exige un marco técnico para el análisis en el componente del agua en un territorio.







# El método para abordar el entendimiento del agua en el territorio

Para comprender la dinámica del agua es necesario estudiar los diferentes procesos físicos o fenómenos naturales asociados a su ciclo, muchos de los cuales son registrados a través del tiempo.

A partir de estos registros y de distintos métodos se pueden modelar, de manera integrada los procesos, con el fin de prever lo que puede pasar con el agua en el futuro, según las decisiones que se tomen sobre el uso del territorio.

Para el análisis del sistema hídrico, Brierley & Fryirs (2005)<sup>1</sup> plantean las siguientes etapas:

## Descripción

¿Cómo se ve?

¿Cómo se comporta?

## Explicación

¿Por qué se ve así?

¿Qué controla el comportamiento del sistema?

## Predicción

¿Cómo será el sistema en el futuro?

Si cambiamos x, y, z, ¿Cómo es probable que responda el sistema?

## DESCRIPCIÓN

Para responder a las preguntas de ¿Cómo se ve? y ¿Cómo se comporta?, es necesario conocer a profundidad el territorio, sus condiciones climáticas, hidrológicas y las demandas y necesidades de agua.

### 3.1 Clima e hidrología

*Consiste en detallar los aspectos climáticos que determinan la dinámica del agua en el territorio objeto del análisis*

#### 3.1.1 ¿Cuál es el territorio objeto de análisis?

Es necesario establecer y conocer cuál es el territorio o área hidrográfica sobre la que se pretende realizar el análisis. Ese puede ser, por ejemplo, una gran cuenca. Al interior del área hidrográfica se pueden establecer unas subunidades de análisis denominadas unidades hidrológicas.

#### 3.1.2 ¿Cuáles son las variables que se analizan?

Una variable es un aspecto físico o natural que interviene en el ciclo hidrológico y que puede ser medido y analizado para estudiar su dinámica en el espacio y en el tiempo. En el análisis es posible incorporar variables de clima, paisaje y agua.

Identificar adecuadamente la relevancia de cada variable de acuerdo con la escala en la cual se desea analizar la dinámica hídrica del territorio, es fundamental para establecer correctamente el nivel de complejidad para la representación del ciclo hidrológico.

#### Variables para el análisis

##### CLIMA

#### Precipitación

Es la cantidad de agua en forma de lluvia que cae a la superficie terrestre.

#### Temperatura

El grado de calor que presenta el aire en un momento determinado.

#### Evaporación

El agua que se transforma en vapor por la acción del sol.

#### Transpiración

El resultado físico-biológico por el cual el agua cambia del estado líquido a gaseoso, a través del metabolismo de las plantas y pasa a la atmósfera.

##### PAISAJE

#### Geología

La estructura que tiene el interior de la tierra y la materia que lo compone, determinan la dinámica del agua bajo la superficie terrestre.

#### Geomorfología

Las formas de la superficie terrestre, inciden en la dinámica del agua.

#### Pendiente

El grado de inclinación que tiene el terreno, determina la velocidad con la que se mueve el agua.

#### Suelos

La capa más superficial de la tierra, es moldeada por el clima y el agua y a su vez también incide en la dinámica de la misma.

#### Cobertura de la tierra

La cobertura física de la tierra cumple un papel importante en cuanto a la amortiguación y regulación del agua.

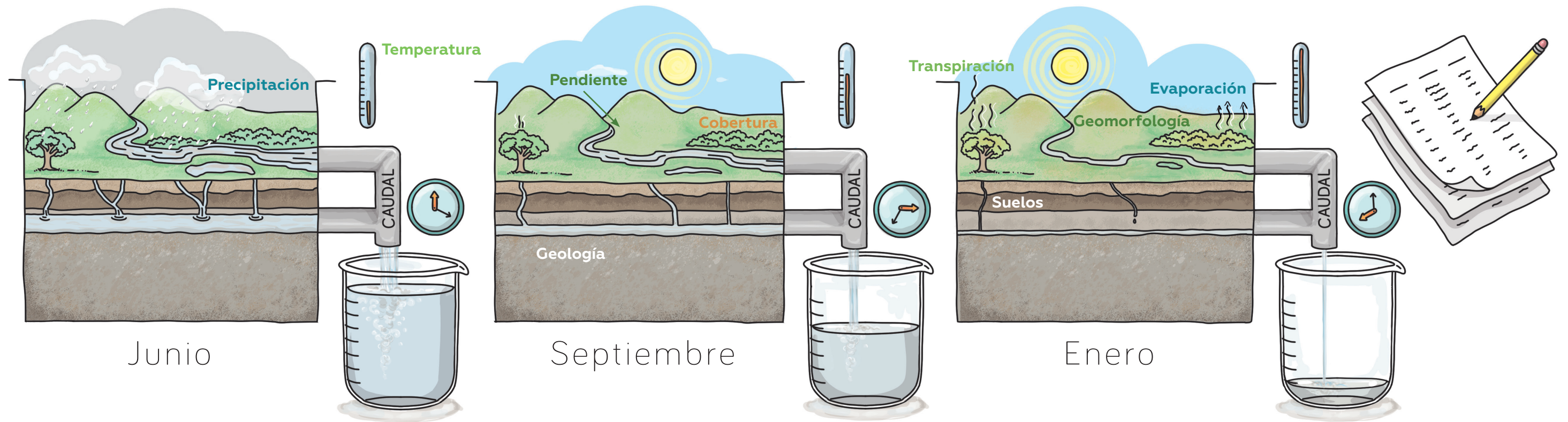
##### AGUA

#### Caudal

La cantidad de agua que pasa por un punto determinado de un río o quebrada a una determinada velocidad, depende de todos los otros factores.

<sup>1</sup> Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. 2005, 1–398. <https://doi.org/10.1002/9780470751367>





### 3.1.3 ¿De dónde se obtiene y cómo se procesa la información de estas variables?

Identificar cuáles son los actores al interior de un territorio que recolectan información ambiental para diversos propósitos, permite gestionar la mayor cantidad de información posible para realizar el análisis de la dinámica del agua. Dentro de estos, se encuentran las entidades gubernamentales o privadas de carácter nacional o regional, como universidades, institutos, autoridades ambientales, agricultores, entre otros.

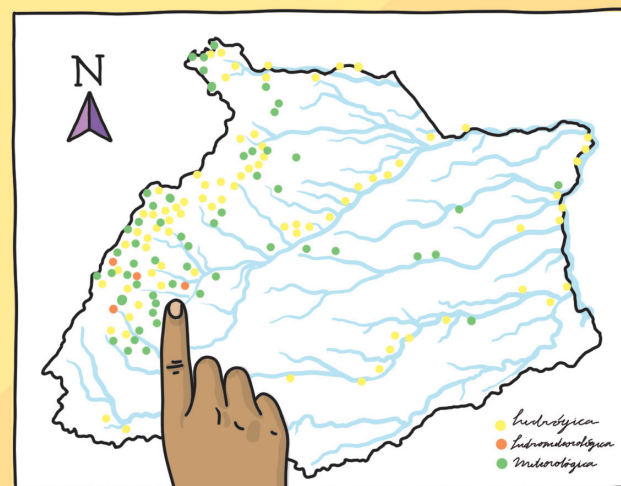
La información meteorológica en la mayoría de los casos presenta discontinuidad temporal en sus registros, así como también ciertas inconsistencias debidas posiblemente a fallas en los instrumentos de medición o a factores operativos de carácter humano en las estaciones de monitoreo. En este sentido, es necesario realizar una serie de actividades que permiten seleccionar los datos más apropiados, para garantizar que los resultados sean de la mejor calidad posible.

### Pasos para procesar la información

#### PASO 1

Recopilar la información tomada por la red de estaciones que registran los datos del clima y del agua.

¿Cuál es la información disponible?



#### PASO 2

Seleccionar la serie de datos más apropiados para usar en el análisis.

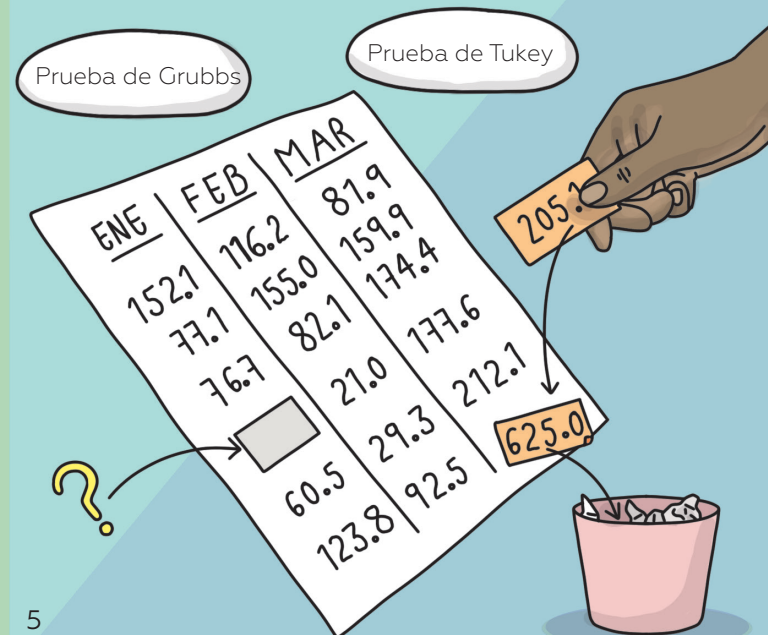
¿Cuáles de los datos disponibles conviene usar?



#### PASO 3

Revisar la calidad de los datos para completar los faltantes, eliminar datos extraños y reemplazarlos por información más correcta.

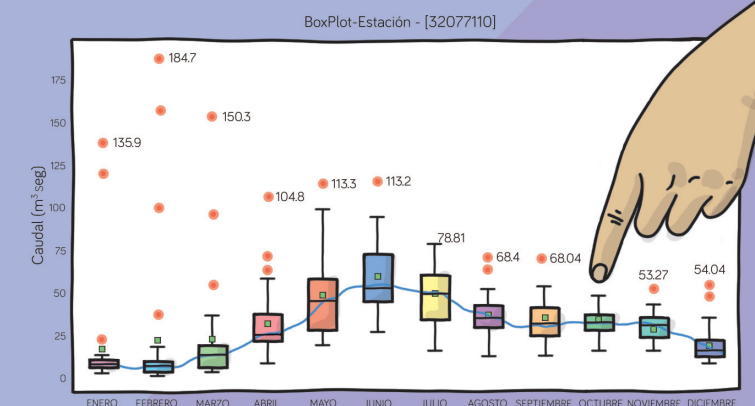
¿Qué tan bien se encuentran los datos de la serie seleccionada?



#### PASO 4

Generar el análisis estadístico en el tiempo y en el espacio para entender cómo se comporta la variable.

¿Cómo se comportan las variables?



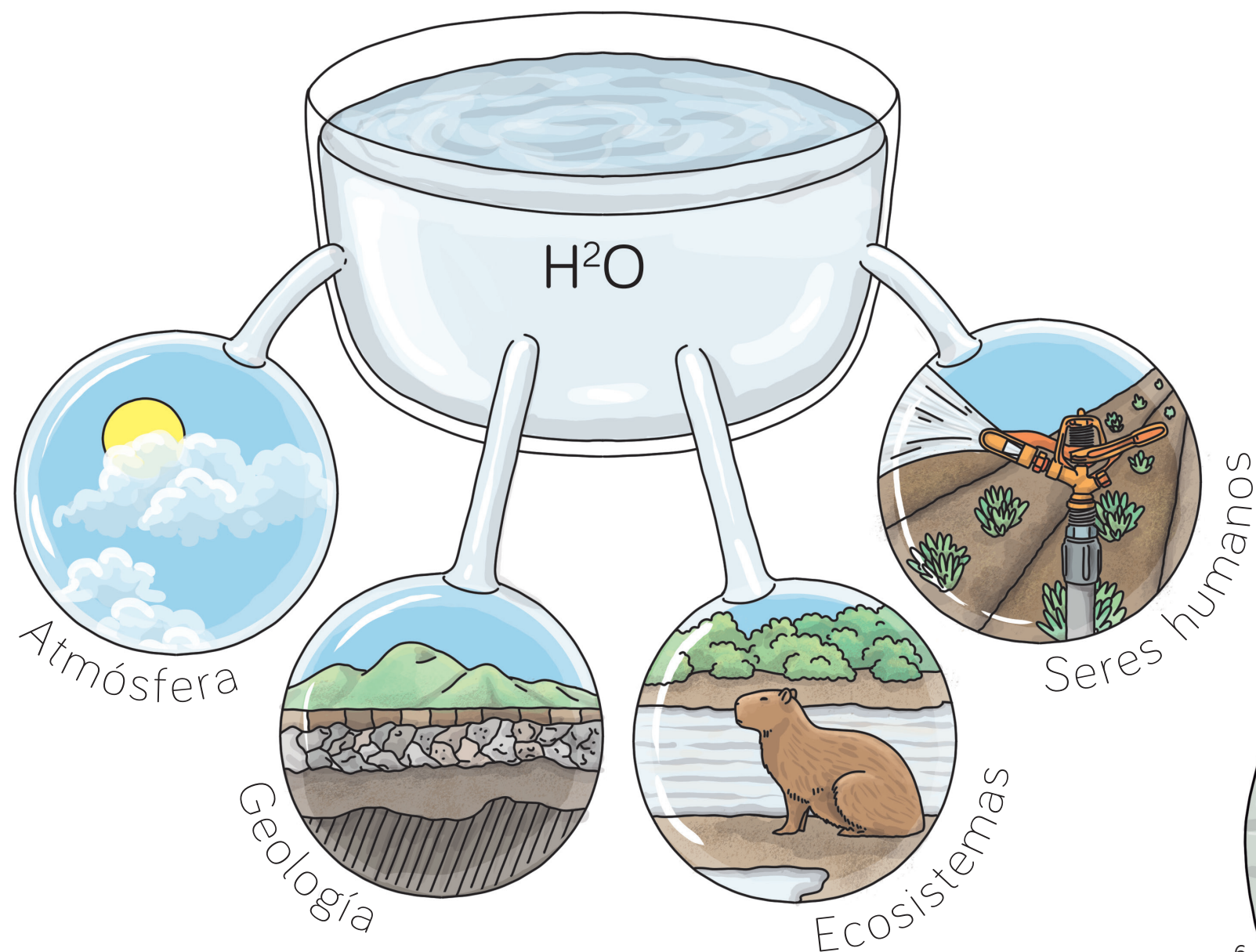


## 3.2 Demandas y necesidades de agua

Entender adecuadamente quién usa el agua, dónde y cuánto está usando, es fundamental para la gestión del recurso hídrico y del territorio. En este sentido, se debe realizar un inventario de todos los actores que hacen uso del agua.

### 3.2.1 ¿Cuáles son las necesidades de agua?

Es importante considerar que, de toda el agua disponible en la naturaleza, existen otros componentes diferentes al humano que también necesitan del agua para mantener el equilibrio natural y para subsistir. Este es un aspecto sobre el cual se debe tomar conciencia puesto que, al momento de plantear acciones de desarrollo, es necesario considerar que todas las partes necesitan agua y esa distribución es fundamental para el mismo equilibrio del recurso. Una parte del agua que ingresa al territorio, es redirigida a la atmósfera, otra alimenta las capas de la tierra, otra es tomada por los ecosistemas y las especies y otra por los seres humanos para el desarrollo de sus diferentes actividades.



### 3.2.2 ¿Dónde se usa el agua?

Es conveniente analizar cómo se distribuyen los usos del agua y cómo su localización puede afectar la oferta natural. Por ejemplo, si las actividades más demandantes de agua se localizan en un mismo sector, pueden ocasionar reducción en su disponibilidad y afectar la salud de los ecosistemas.

No es lo mismo tener a cientos de agricultores extrayendo agua para sus cultivos de una pequeña quebrada a que si la estuvieran extrayendo del gran río Meta o el majestuoso río Orinoco. Es por esto, que entender dónde se está usando el agua, le permite a un tomador de decisiones establecer qué zonas al interior de la cuenca se encuentran presionadas en mayor medida y de esta manera dirigir acciones para gestionar dicho territorio.

#### ¿Cómo determinar dónde se usa el agua?

Las demandas de agua las podemos identificar de varias maneras: la primera es realizar visitas de campo en el territorio objeto del análisis, sin embargo si este es muy grande, existe información como la consolidada por las corporaciones autónomas regionales y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) en su inventario nacional de recurso hídrico. Por último si no se encuentra información, puede estimarse la demanda haciendo uso de información secundaria y de metodologías como las expuestas en los estudios nacionales del agua<sup>2</sup> o en otras registradas en la literatura<sup>3</sup>.

#### Caracterización de la demanda hídrica determinada por la cantidad de agua consumida

##### Agrícola

A partir de la consolidación de áreas sembradas, tipos de cultivo, estados fenológicos, coeficientes de cultivo y la cantidad de agua que requieren.

##### Pecuario

A partir de la cantidad de agua consumida por animales según su edad, sexo y tipo (bovino, porcino, caprinos, ovinos, equinos, búfalos, acuícola pesquera, capacidad instalada para cría de aves) en momentos como la cría, beneficio y sacrificio.

##### Hidrocarburos

A partir de inventario de pozos, polígonos de áreas otorgadas, de tierras pertenecientes al sector (por ejemplo, explotación, reservada, evaluación técnica, exploración); teniendo en cuenta el agua consumida por producción por barril en las etapas de producción, transporte y refinación.

##### Hidroeléctrico

A partir de la cantidad de agua consumida por las centrales hidroeléctricas de producción mayor a 20 MW.

##### Industrial

A partir de la cantidad de agua consumida por la pequeña, mediana y gran industria.

##### Minero

A partir de los títulos mineros vigentes y solicitudes mineras, según la cantidad de agua por tipo de actividad.

##### Doméstico

A partir de población total y centros poblados, de acuerdo con el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento, asignado por consumo per cápita según la elevación del centro poblado (metros sobre el nivel del mar).

##### Institucional

A partir de la cantidad de agua consumida por instituciones educativas, instalaciones gubernamentales, hospitales, bomberos, hogares de adulto mayor, etc.

##### Ecológico

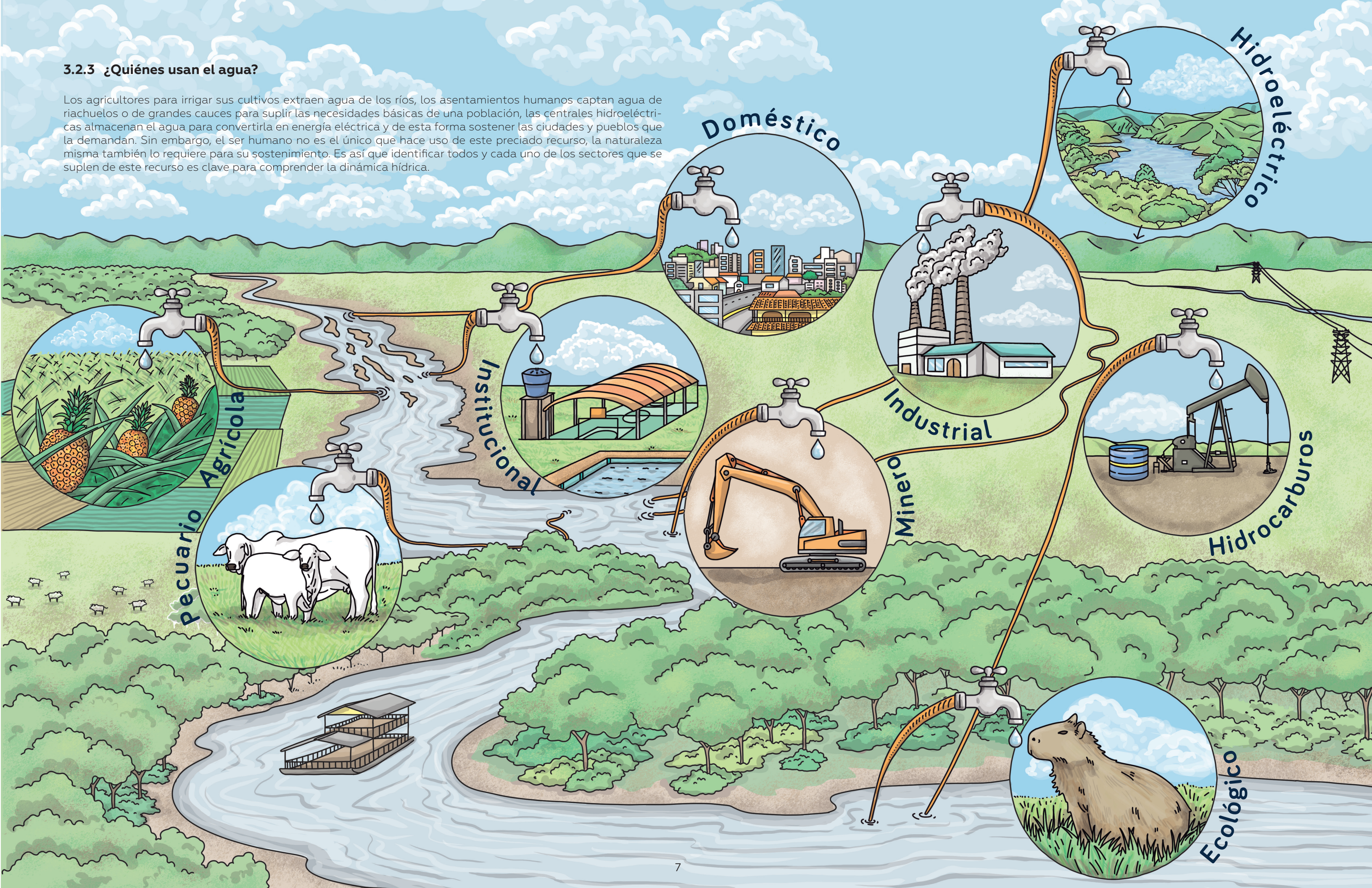
A partir de la cantidad de agua requerida por los ecosistemas. Se representa a través del caudal ecológico, cuyo cálculo depende de muchas variables, entre ellas el tipo de ecosistema, las especies que habitan en él, la recarga de los acuíferos, el tiempo geológico, los regímenes de lluvia, entre otras.

<sup>2</sup>. Ideam. Estudio Nacional de Agua 2018. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Marzo de 2019, 452 pp.  
<sup>3</sup>. Nogales, J. Análisis de disponibilidad hídrica para el departamento del Meta con énfasis en la región del Ariari. The Nature Conservancy. 2018.



### 3.2.3 ¿Quiénes usan el agua?

Los agricultores para irrigar sus cultivos extraen agua de los ríos, los asentamientos humanos captan agua de riachuelos o de grandes cauces para suplir las necesidades básicas de una población, las centrales hidroeléctricas almacenan el agua para convertirla en energía eléctrica y de esta forma sostener las ciudades y pueblos que la demandan. Sin embargo, el ser humano no es el único que hace uso de este preciado recurso, la naturaleza misma también lo requiere para su sostenimiento. Es así que identificar todos y cada uno de los sectores que se suplen de este recurso es clave para comprender la dinámica hídrica.





Para responder a las preguntas de ¿Por qué se ve así? y ¿Qué controla el comportamiento del sistema?, es necesario identificar los procesos físicos asociados.

### 3.3 Lo que controla la dinámica del agua en el territorio

Para entender la dinámica del agua en el territorio, primero debemos identificar cuáles son los procesos físicos de mayor relevancia que controlan dicha dinámica y cómo los diferentes actores en el territorio modifican o influyen en la misma. Para esto, es útil construir un modelo conceptual del sistema hidrológico del territorio en análisis, de tal forma que se pueda tener una visión global de todo el sistema.

#### 3.3.1 ¿Cuánta agua tenemos?

La oferta es la cantidad de agua disponible en un territorio en un tiempo determinado; esta se clasifica en superficial y subterránea, siendo la última de difícil estimación. Por lo anterior, se evalúa la oferta superficial en términos de escorrentía representada en el drenaje de ríos, quebradas y lagos.

#### 3.3.2 ¿Cuáles son los procesos físicos a analizar?

Un proceso físico hace referencia a la ocurrencia de un fenómeno natural en el espacio y en el tiempo. La dinámica del agua está asociada a diferentes procesos físicos que es necesario comprender de manera integrada.

Los siguientes son algunos de los procesos físicos que determinan la dinámica del agua

#### 1 Precipitación

El agua que ingresa en modo de lluvia.

#### 2 Evapotranspiración

El agua que se pierde por la acción del sol y la transpiración de las plantas y del suelo.

#### 3 Escorrentía directa

El agua que escurre por la superficie del terreno y que no se infiltra, sino que se va directamente a las quebradas y ríos, gracias a la acción de la gravedad y la pendiente.

#### 4 Agua infiltrada y percolada

El agua que no escurre inmediatamente, sino que pasa a través de la superficie del suelo y se mueve hacia el interior de la tierra.

#### 5 Interacción-Río Planicie

El agua que se mueve del río hacia las planicies inundables en épocas de lluvia y el agua que se mueve de las planicies hacia el río cuando han pasado las crecientes.

#### 6 Caudal subterráneo

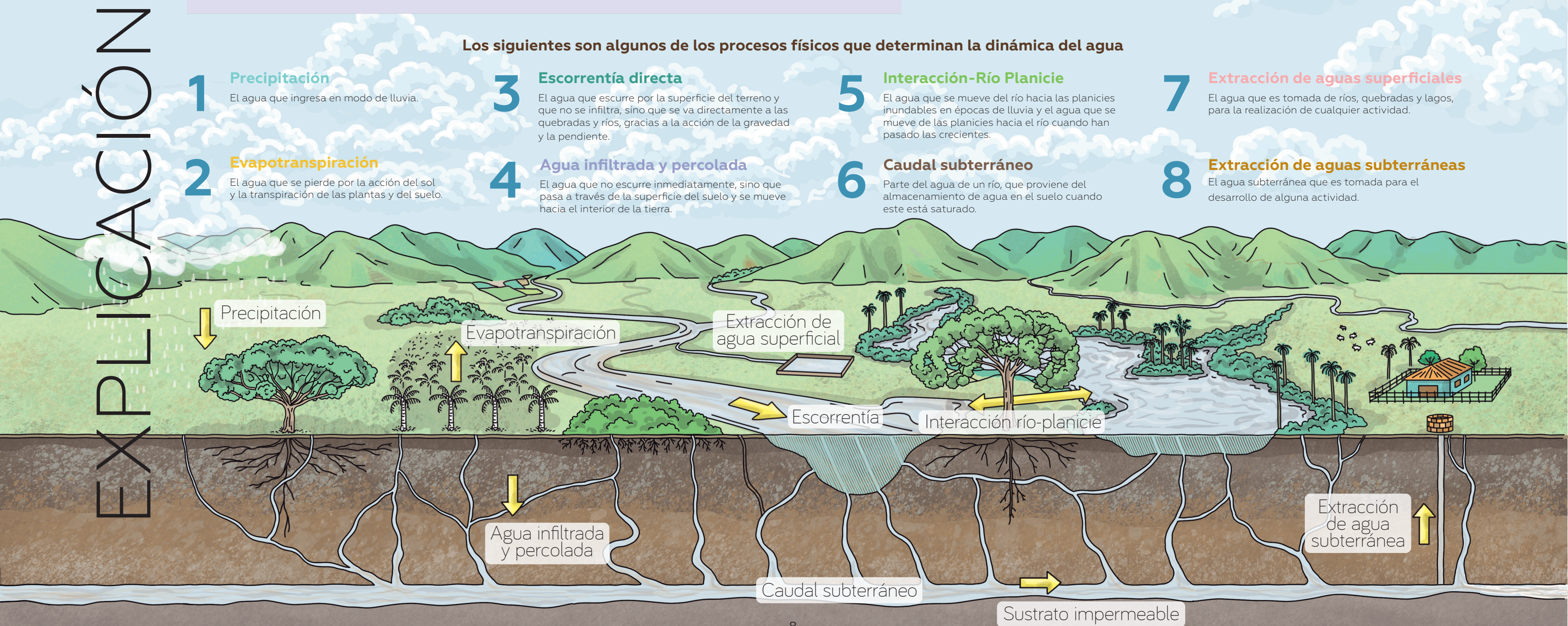
Parte del agua de un río, que proviene del almacenamiento de agua en el suelo cuando este está saturado.

#### 7 Extracción de aguas superficiales

El agua que es tomada de ríos, quebradas y lagos, para la realización de cualquier actividad.

#### 8 Extracción de aguas subterráneas

El agua subterránea que es tomada para el desarrollo de alguna actividad.





Para responder a las preguntas de ¿Cómo será el sistema en el futuro? y ¿Cómo responderá a los cambios que sucedan?, es necesario emplear modelación matemática y construir escenarios para evaluar posibles futuros.

### 3.3.3 ¿Cómo se puede comprender la dinámica del agua en el territorio?

La modelación hidrológica es uno de los medios más utilizados para la comprensión de la dinámica hídrica al interior de un territorio, dado que, permite de manera simplificada no solo entender las formas en las cuales interactúan los diferentes procesos hidrológicos, sino que también brinda la posibilidad de evaluar a futuro los impactos sobre el recurso hídrico bajo cambios en las condiciones climáticas, en el uso de la tierra, en la infraestructura, etc.

#### El modelo matemático

Un modelo matemático es un conjunto de expresiones matemáticas y/o lógicas destinadas a representar o simular un proceso<sup>4</sup>. Todo modelo se compone de tres elementos (Figura 1):

#### 1. Entradas

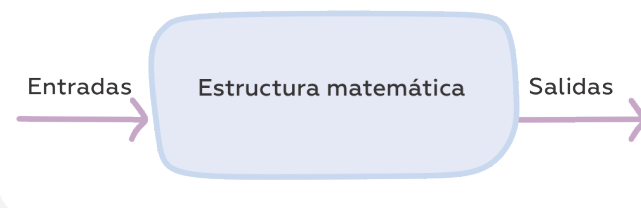
#### 2. Salidas

#### 3. Estructura matemática

Representan la influencia externa sobre el sistema (en forma de flujo de masa y energía) y la respuesta del sistema (o evolución del proceso) a las mismas.

Es el operador que se encarga de transformar (desde el punto de vista numérico) las entradas en salidas.

Figura 1. Esquema general de un modelo matemático. Fuente: Adaptado de Domínguez (2000)<sup>4</sup>.



### 3.3.4 ¿Cómo seleccionar el modelo?

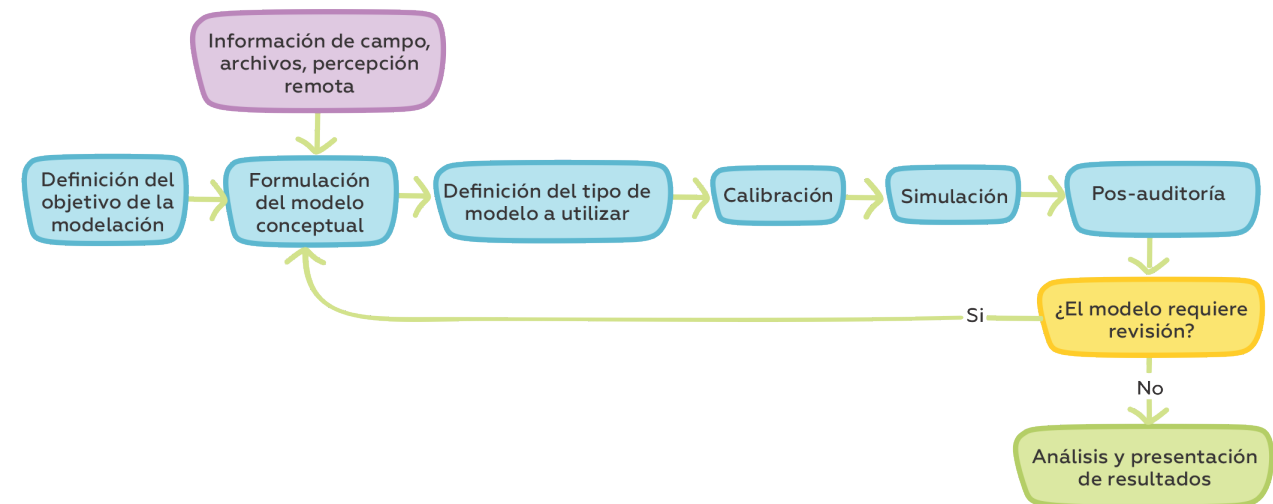
Para el proceso de modelación matemática es importante seguir un protocolo de modelación. Como parte de este ejercicio se deberá seleccionar un modelo que represente los procesos a analizar.

El protocolo de modelación es una secuencia lógica, discreta, de pasos orientados a la obtención de un resultado o simplemente la forma en la cual se debe implementar un modelo como herramienta para la evaluación de procesos hidrológicos<sup>5</sup>. Los pasos de un protocolo estándar pueden observarse en la figura 2.

<sup>4</sup>. Domínguez, E. 'Protocolo para la modelación matemática de procesos hidrológicos', Meteorología Colombiana, 2(May) 2000, pg. 33-38.

<sup>5</sup>. Nogales, J. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia The Nature Conservancy, 2018.

Figura 2. Protocolo de modelación. Fuente: Adaptado de Domínguez (2000)<sup>4</sup>.



#### Conceptualización

A partir del modelo conceptual del sistema hidrológico del territorio, se define la resolución temporal a la que se va a trabajar (diaria, mensual, anual), lo cual determina si unos procesos hidrológicos pueden ser simplificados y otros omitidos. Se identifican entonces los procesos de mayor relevancia que van a analizarse.

#### Identificación del o los modelos hidrológicos a emplear

En la literatura existen muchos modelos hidrológicos disponibles, por lo que es conveniente identificar cuál o cuáles pueden servir para representar el sistema.





Se requiere definir una serie de criterios de evaluación que permitan escoger de esa amplia gama, el mejor modelo que se ajusta a las necesidades del territorio, entre ellos:

- 1

**Capacidad para representar los procesos**  
¿Los modelos existentes están en capacidad de representar todos los procesos involucrados en el análisis?
- 2

**Exigencia de información**  
¿Son claros los requerimientos mínimos de información para su construcción y funcionamiento? ¿Existe toda la información que los modelos requieren para su aplicación?
- 3

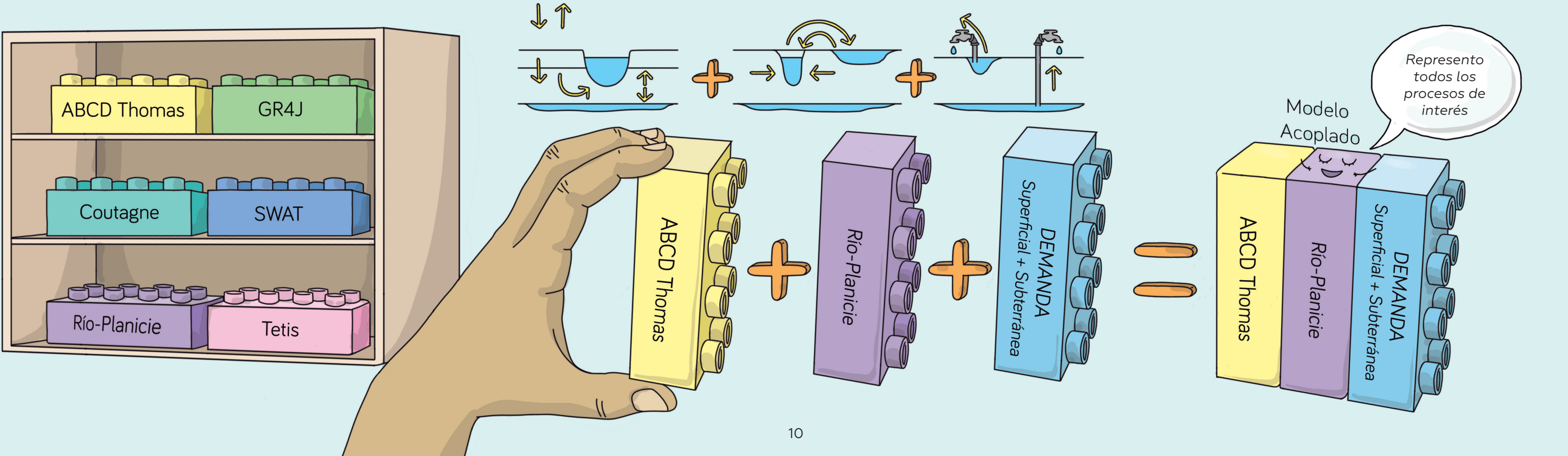
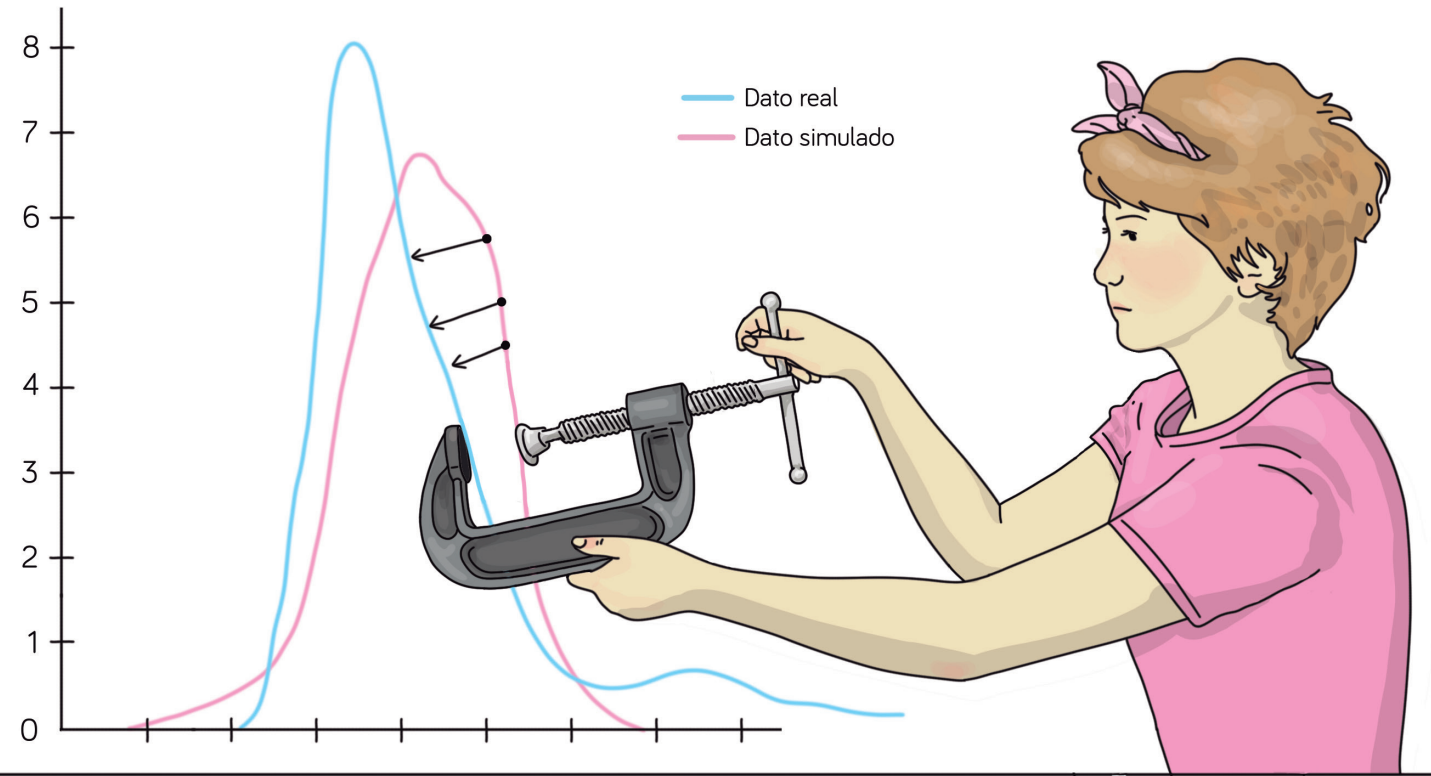
**Resolución temporal**  
¿Los modelos existentes permiten hacer los análisis en la resolución temporal que se requiere (diaria, mensual, anual)?
- 4

**Facilidad de acceso**  
¿El modelo es gratuito o licenciado? ¿Se cuenta con dinero para adquirir una licencia en caso de que el modelo seleccionado la requiera?

Terminada la evaluación, se escogen el o los modelos que mejor se adaptan a las necesidades de análisis y si no existe uno solo que represente todos los procesos, entonces es posible realizar un acople de modelos.

3.3.5 ¿Cómo calibrar y validar un modelo?

La calibración es el proceso que identifica los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de mejor manera a la serie de datos observados. A través de la calibración, validación y evaluación del modelo se busca demostrar su habilidad para representar ciertos procesos que ocurren en las cuencas, comparando el comportamiento simulado con el observado mediante indicadores, pruebas estadísticas y métricas de desempeño.





Pasos para calibrar y validar el modelo

Los modelos hidrológicos, para representar adecuadamente el agua en un territorio, deben ser sometidos a un proceso de calibración y validación. Dicho proceso consiste en identificar ciertos parámetros que son particulares para una zona. Este proceso es de vital importancia, pues los parámetros son valores que capturan condiciones propias del terreno, como la capacidad de almacenamiento de agua en suelo o la cantidad de agua que ingresa al mismo. Según el tipo de modelo hidrológico que se esté usando, los parámetros pueden ser determinados mediante mediciones en campo o pueden ser identificados mediante algoritmos de búsqueda, algunos de ellos con optimización matemática.

Independientemente del método que se emplee para encontrar los parámetros, se debe realizar una evaluación cualitativa (la cual está asociada al criterio del experto) y cuantitativa (la cual se asocia a un estadístico) de su desempeño, siendo estas dos aproximaciones complementarias en el proceso de calibración del modelo. Finalmente, cuando se identifican los parámetros, se realiza una validación de los mismos, de tal forma que se garantice el mejor uso del modelo para la generación de escenarios.

A continuación se describen los pasos para este proceso.

PASO 1. Seleccionar las estaciones y series de caudal

Para calibrar y validar el modelo hidrológico, se toman datos de caudal, medidos en los cauces de los ríos, a los cuales se les realiza un análisis de calidad al igual que a los datos climáticos. Las series de caudal para cada paso del proceso se divide de la siguiente manera:

**70%** de los datos se usan para **calibrar:** Ajustar el modelo para que los datos simulados sean lo mas cercanos a los datos reales.

**30%** de los datos se usan para **validar:** Hacer pruebas para confirmar los datos generados por el modelo.

Dependiendo de la calidad de los datos y la longitud del registro, la división porcentual anteriormente mencionada puede cambiar.

PASO 2. Evaluar el desempeño del modelo

Como se mencionó antes, el proceso de evaluación del desempeño de un modelo hidrológico requiere tanto estimaciones cualitativas como cuantitativas de la relación que existe entre el comportamiento simulado y el comportamiento observado.

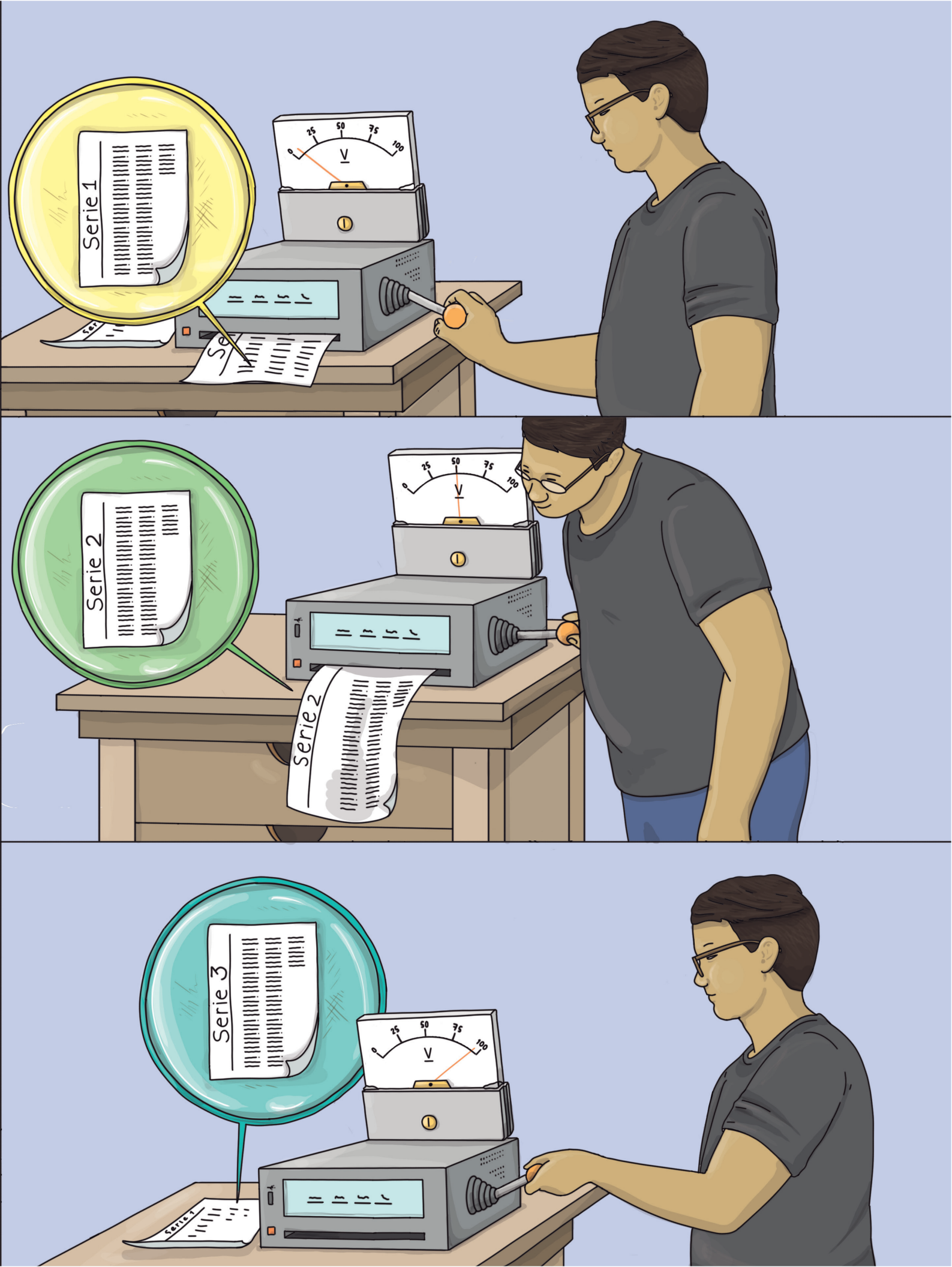
Las **evaluaciones cualitativas** consisten en la observación del comportamiento de las simulaciones realizadas por el modelo, detallando cómo se realiza la aproximación a los valores máximos y mínimos, también de la coherencia con los periodos de lluvia y no lluvia.

Las **evaluaciones cuantitativas**, por su parte, hacen uso de estadísticos o métricas que comparan ciertos atributos de la serie simulada por el modelo, con lo datos observados en campo. En este sentido, la selección de dicha métrica juega un papel importante al momento de decidir si el modelo es adecuado o no. Así pues, tener muy claro las preguntas que se le van a realizar al modelo, permite seleccionar la mejor métrica de evaluación.

Elementos para la selección de métricas

- ¿El modelo es capaz de representar el comportamiento promedio de los caudales observados?
- ¿Qué proporción de la varianza estadística de los caudales observados puede ser explicada por el modelo?
- ¿En qué grado el modelo es capaz de representar la dinámica de los caudales observados?

Cuando la métrica es seleccionada, esta se utiliza para evaluar el desempeño del modelo hidrológico. Por lo general, dependiendo del valor que tomen dichos coeficientes, se puede evaluar de manera cuantitativa si el modelo hidrológico presenta un desempeño deficiente a muy bueno. La categorización, depende de si la métrica seleccionada presenta un rango de variación fijo o variable. Si la métrica seleccionada corresponde a esta última, el criterio del investigador es clave para su definición.





## 3.4 Construcción de escenarios para evaluar posibles futuros

Consiste en construir o idear un conjunto de circunstancias que ofrecen posibilidades o perspectivas en relación al manejo del agua en el territorio. Se construyen a partir de las apuestas de desarrollo o de situaciones probables.

### 3.4.1 Creación de escenarios: ¿Qué pasaría si...?

Para identificar las posibles situaciones o escenarios futuros es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

#### 1 Escenarios creados por los actores

Los habitantes del territorio pueden plantear sus propios escenarios de acuerdo a las perspectivas de desarrollo y a sus necesidades.

#### 2 Escenarios definidos en los instrumentos de planificación

Sobre el territorio objeto del análisis pueden existir instrumentos de planificación que ya consideren escenarios. Ejemplo de ello son los Planes de Desarrollo Departamentales, Planes de Ordenamiento Productivo y Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Si estos no consideran algunos escenarios planteados por los actores, entonces pueden complementarse.

### Ejemplos de escenarios

#### Tendencia histórica

Se definen los objetivos de expansión proyectando la tendencia actual de cada uno de los sectores (agricultura, ganadería, minería, etc.) hasta un año determinado. **Si seguimos como vamos...**

#### Plan de expansión

Se utilizan los objetivos de expansión definidos por cualquier plan de desarrollo que pretenda expandir un determinado sector, por ejemplo una iniciativa que busque maximizar las tierras subutilizadas para la agricultura. **Le vamos a apuntar a incrementar....**

### 3.4.2 ¿Qué es lo más conveniente para el territorio?

Una vez creados los escenarios, se corre el modelo con cada uno de ellos para observar cuál sería el posible comportamiento hidrológico en cada caso. Posteriormente se pueden hacer comparaciones para ver cuál de estos resulta más adecuado en términos ambientales, sociales y económicos.

Gracias al modelo, se pueden simular variadas situaciones dentro de un mismo escenario dando origen a múltiples posibilidades. Por ejemplo, cada escenario puede ser analizado con o sin presencia del fenómeno del niño y con o sin presencia del fenómeno de la niña.

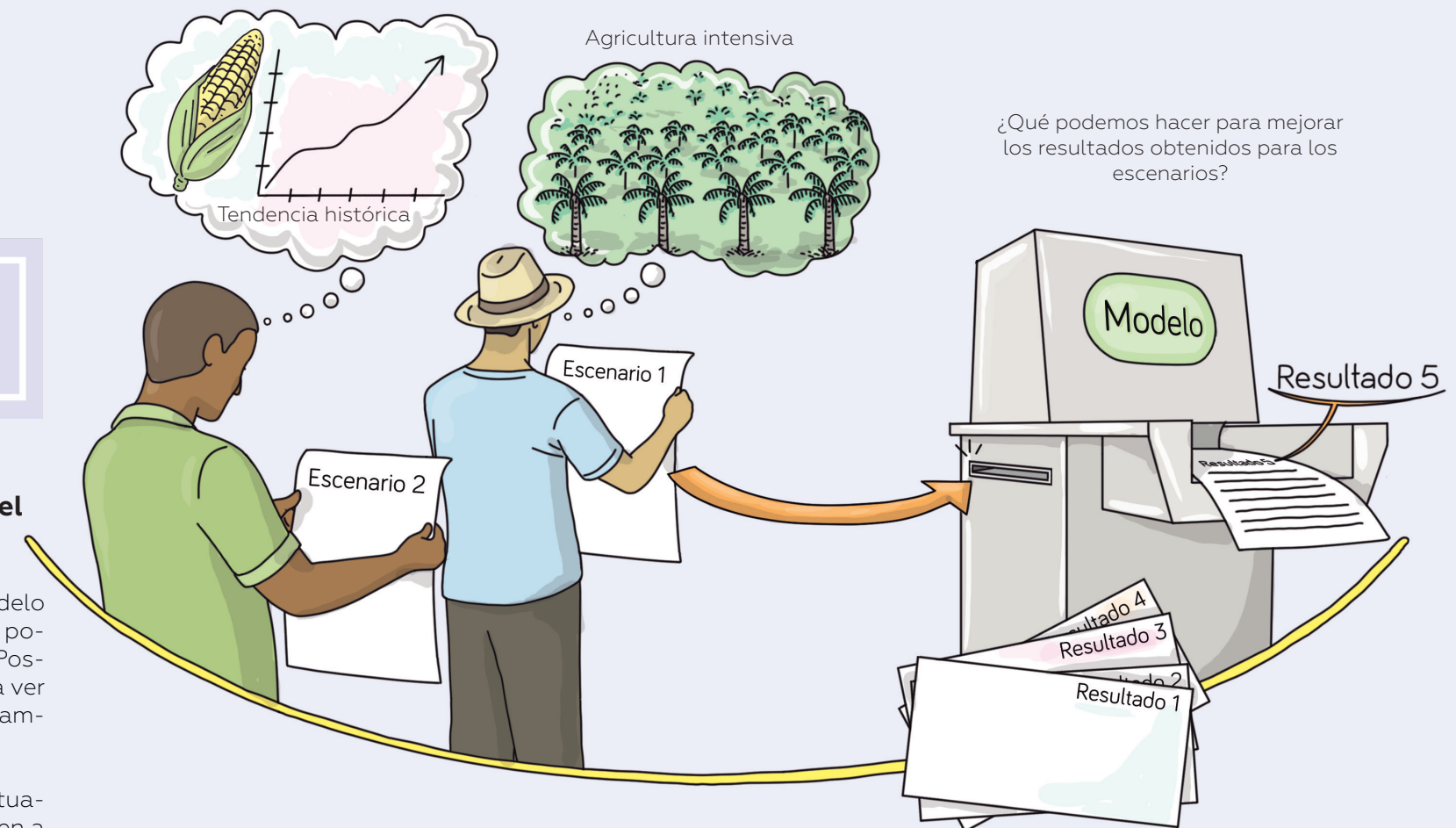
De esta manera, la simulación de escenarios se constituye en una herramienta muy valiosa para orientar la toma de decisiones, sin antes aclarar que, ningún modelo es perfecto.

#### Agricultura intensiva

A partir de las áreas definidas para la agricultura, dentro de la frontera agrícola, se van a intensificar dichas actividades. **Le vamos a sacar el máximo provecho a...**

#### Percepción de actores

Empleando grupos focales con actores, se desarrolla un escenario en el que se pretende reflejar la percepción de los mismos. Se identifica el interés de los pequeños agricultores y el interés de las empresas. **Nosotros queremos... y ustedes quieren....**



¿Qué es lo más conveniente para el territorio dado el escenario de agricultura intensiva?







# Comunicación de resultados

La comunicación de los resultados generados a partir de la aplicación del modelo es un aspecto muy importante, sobre todo por los impactos que puede generar en la toma de decisiones. Por ello deben ser lo más claros posible y expresar las limitaciones del modelo.

Si nos dedicamos al cultivo X en el 70% del territorio, el agua se disminuirá en un 40%

## Elementos para la comunicación de resultados

- 1 Entender los resultados** Los resultados a veces no son fáciles de entender. Es necesaria la habilidad de algún experto del equipo técnico para traducirlos a un lenguaje común para todo tipo de público.
- 2 Informar sobre las limitaciones del modelo** La dinámica hidrológica responde a muchas variables y algunas de ellas pueden no haber sido tratadas por el modelo, por ejemplo la calidad del agua: puede haber suficiente agua pero de mala calidad; no todas las especies silvestres requieren la misma cantidad de agua para su desarrollo, subsistencia, etc.
- 3 Comunicar el desempeño del modelo** Es importante informar sobre el desempeño del modelo hidrológico para saber en qué medida este representa la dinámica del agua en el territorio. Adicionalmente, indicar la incertidumbre (o el grado de confianza) que ofrece el modelo sobre los resultados generados.
- 4 Ejemplificar los resultados** La ilustración de ejemplos de los resultados facilita su comprensión. Los modelos pueden generar reportes denominados narrativas, que van acompañados de gráficos y mapas que facilitan el entendimiento por parte de los tomadores de decisiones.







# Apropiación y uso de la información

La utilidad final de estudiar la dinámica del agua, se materializa en la toma de decisiones basadas en conocimiento, a través de los instrumentos de planificación del territorio, que plantean medidas concretas para orientar y regular las actuaciones que se desarrollan en el mismo, en beneficio de los seres humanos y de la naturaleza.

Como se dijo anteriormente, todo modelo tiene unas limitaciones que deben ser explicadas de forma clara antes de tomar decisiones. Pueden estar relacionadas con la calidad de la información, su temporalidad, su exactitud en la localización, las fuentes de información, entre otras. Si estas características no son tenidas en cuenta, las decisiones pueden sesgarse y como consecuencia, afectar el territorio.

**El agua es el eje estructurante para la planeación del territorio**

## Usos generales de la información



### Gobernaciones

- Planes de Desarrollo Departamental ¿Qué estrategias diseñar de acuerdo a la disponibilidad de agua?
- Planes de Desarrollo Productivo. ¿A qué actividades le apostará el departamento para lograr la sostenibilidad?



### Autoridades ambientales

- Planes de Gestión Ambiental Regional ¿Qué estrategias se proponen para articular a los sectores en función de la disponibilidad de agua?
- Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas ¿Qué actividades de la cuenca están afectando en mayor medida la disponibilidad de agua?
- Planes de Manejo Ambiental de Microcuencas ¿En qué proporción se deben recuperar las microcuencas que abastecen acueductos para garantizar la oferta de agua a la población?
- Otorgamiento de concesiones de agua y licenciamiento ambiental ¿Hasta dónde es conveniente otorgar concesiones de agua? ¿Cuál es el impacto ambiental de cierta actividad?



### Alcaldías

- Planes de Ordenamiento Territorial ¿Qué áreas se deben conservar para garantizar el agua?
- Planes de Desarrollo Municipal ¿Dónde se puede promover cierto tipo de desarrollo?
- Implementación de proyectos productivos ¿Qué actividades es conveniente promover e incentivar?



### Sector productivo

- Planificación de gremios ¿A qué le pueden apostar los gremios?
- Análisis de posibilidades de expansión productiva ¿Dónde se pueden desarrollar las actividades de interés?
- Análisis de requerimientos ¿Qué adaptaciones productivas se deben hacer de acuerdo a la disponibilidad de agua?



### Sociedad civil

- Participación en procesos de planificación ¿De qué manera una actividad productiva puede afectar la disponibilidad de agua para el consumo humano?
- Participación en la toma de decisiones ¿Cuál es la mejor alternativa que beneficie el desarrollo sin detrimento del bienestar humano?



### Academia e investigación

- Conservación de ecosistemas ¿De qué manera una actividad productiva puede afectar a un determinado ecosistema?
- Investigación en alternativas frente a un determinado escenario ¿Cuáles técnicas pueden ser más favorables para el uso adecuado del agua?
- Apropiación de conocimiento ¿Qué actividades de educación ambiental y de transferencia de conocimiento se deben realizar?





# Resumen del proceso

