

JOSÉ RAFAEL CÓRDOVA RODRÍGUEZ

Ingeniero agrónomo, Universidad Central de Venezuela, UCV, 1968. *Magister Scientiarum* en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, UDO, 1971; *Magister Scientiarum* en Ingeniería Hidráulica, UCV, 1975; *Master of Science in Civil Engineering*, Massachusetts Institute of Technology (MIT, 1977). Ph.D. en Water Resources and Hydrology (MIT, 1979). Director CGR Ingeniería. Profesor titular, Universidad Simón Bolívar y Facultad de Ingeniería de la UCV. Ha participado en más de veinticinco estudios hidrológicos internacionales y más de doscientos cincuenta en Venezuela. Ha publicado diez capítulos en libros, cincuenta publicaciones en revistas y memorias de congresos y doscientos setenta y cinco reportes técnicos y realizado sesenta presentaciones en congresos nacionales e internacionales.

IGNACIO RODRÍGUEZ ITURBE

Ocupa la silla profesoral James S. McDonnell Distinguished University Professor y profesor de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Princeton en los Estados Unidos. Es miembro de numerosas academias de ciencia e ingeniería en diversas partes del mundo, entre ellas, la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Ingeniería de Estados Unidos; la Pontificia Academia de Ciencias del Vaticano; la Academia Americana de Ciencias y Artes, la Sociedad Real Española de Ciencias; la Academia Nacional de Ingeniería de México; la Academia de Ingeniería y del Hábitat de Venezuela; el Instituto Venezolano de Ciencias, Artes y Letras; la Academia de Ciencias del Tercer Mundo.

Ha recibido numerosos premios internacionales, entre los que destacan: el Premio de Estocolmo del Agua; la medalla Bowie, la medalla Horton, la medalla Macelwane, el Premio de Ciencias Hidrológicas y el premio-conferencia Langbein, todos ellos de la Unión Geofísica Americana. El Premio México de Ciencia y Tecnología y el Premio Nacional de Ciencias de Venezuela así como otros numerosos reconocimientos. Es autor de más de doscientos cincuenta trabajos publicados en revistas con arbitraje internacional, así como de capítulos en libros colectivos, y publicaciones de memorias de congresos.

capítulo **2.**

El ciclo hidrológico y su significación ecológica

JOSÉ RAFAEL CÓRDOVA RODRÍGUEZ

IGNACIO RODRÍGUEZ ITURBE

CONTENIDO

- 2.1.** El ciclo del agua *pág. 81*
- 2.2.** El ciclo hidrológico, la variabilidad climática y la estructura de los ecosistemas *pág. 87*
- 2.3.** Control hidrológico sobre los ciclos de nutrientes *pág. 89*
- 2.4.** El agua como modelador de paisajes *pág. 90*
- 2.5.** Influencia antrópica sobre los componentes del ciclo del agua *pág. 92*
- 2.6.** La medición de los componentes del ciclo hidrológico *pág. 94*

Referencias *pág. 101*

2. 1. EL CICLO DEL AGUA

- 1 El ciclo del agua, también conocido como el ciclo hidrológico, representa el principio fundamental de la ciencia hidrológica, que describe el continuo movimiento del agua a través de la atmósfera y la tierra, en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros, dentro de la atmósfera (en la troposfera), hasta más o menos un kilómetro de profundidad en la litosfera o corteza terrestre (CHOW *et al.*, 1994). Este ciclo se mantiene en continuo movimiento gracias a los rayos del sol que proveen la energía necesaria. El espesor de la atmósfera es del orden de 966 km, mientras que el espesor de la troposfera varía entre 8 km en los polos y 16 km en el ecuador, es decir, un promedio del orden de unos 12 km. Si se compara el espesor de la troposfera con el diámetro de la tierra, que alcanza los 12.759 km, se llega a la conclusión de que la zona donde se desarrollan los procesos atmosféricos, que forman parte del ciclo hidrológico, es una capa que recubre el globo terráqueo, de un espesor muy pequeño.
- 2 Durante este ciclo el agua puede cambiar de estado entre gaseoso (vapor de agua), líquido y sólido (hielo). El agua se evapora desde los océanos y la superficie de la tierra, sube a la atmósfera y luego precipita en forma de lluvia, nieve o granizo, hasta llegar a la superficie de la tierra donde parte de la precipitación es interceptada por el follaje de las plantas, otra se infiltra en el suelo, y el resto escurre superficialmente hasta alcanzar un curso de agua. Parte del agua que se infiltra se almacena en el suelo y alimenta el proceso de evapotranspiración, mientras que el exceso sale como flujo subsuperficial y alimenta la zona acuífera donde se almacena el agua subterránea. Tanto el escurrimiento superficial como el subsuperficial y el proveniente del agua subterránea, alimentan la red de drenajes de las cuencas, que, finalmente, descargan sus aguas en el océano. El ciclo no tiene principio ni fin, y sus procesos ocurren en forma simultánea y continua, mientras que el volumen total del agua que se mueve dentro del ciclo es finito.

2. 1. 1. ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA

- 3 En la Biblia, en los primeros versículos del Génesis, el origen de los mares se describe de la siguiente manera:

*« 1:6 Luego dijo Dios: Haya firmamento en medio de las aguas, y separe las aguas de las aguas.
1:7 E hizo Dios el firmamento, y separó las aguas que estaban debajo del firmamento, de las aguas que estaban sobre el firmamento. Y vio Dios ser bueno.
1:8 Y llamó Dios al firmamento Cielos. Y hubo tarde y mañana, segundo día.
1:9 Dijo también Dios: Júntense las aguas que están debajo de los cielos en un lugar, y descúbrase lo seco. Y fue así.
1:10 Y llamó Dios a lo seco Tierra, y a la reunión de las aguas llamó Mares. Y vio Dios que era bueno. »*
- 4 Los investigadores especializados en esta área, consideran que el detalle del origen del agua en la tierra no se conoce con exactitud. Existen varias teorías. Según Dooge (1983), la fuente más probable fue la de degasificación del vapor de agua proveniente del interior de la tierra, que salieron como parte de la extrusión de material

ígneo, a través de los volcanes y de los afloramientos que se produjeron en el fondo de los océanos. Este vapor de agua, una vez que alcanzó la superficie de la tierra, se condensó y pasó a estado líquido. Este es un proceso que se produjo en nuestro planeta por las temperaturas que ocurren en la superficie terrestre, y que no se produce en otros planetas ya que las temperaturas son o muy calientes, no permitiendo la condensación, o muy frías, lo que determina el congelamiento del agua a nivel de la superficie. Debido a esto, nuestro planeta es el único, dentro del sistema solar, que tiene agua en sus tres estados, sólido, líquido y gaseoso. Este proceso tomó millones de años, y según las evidencias experimentales que se tienen en la actualidad, permiten establecer que el agua está presente en la Tierra desde hace unos 3.800 millones de años.

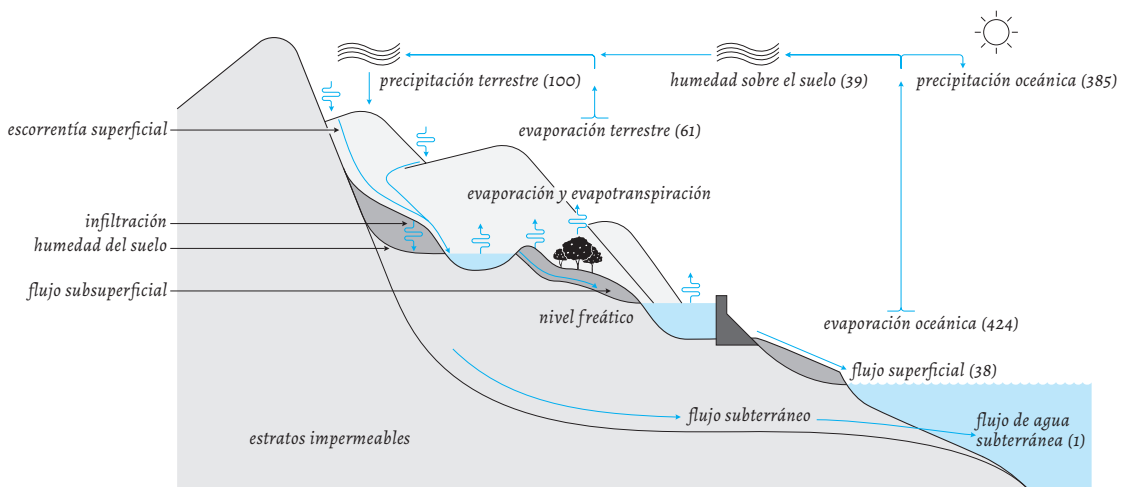
- 5 Adicionalmente, una teoría más reciente, apoyada por numerosos estudios realizados por la NASA (2001), establece que el agua llegó a la Tierra en forma de hielo, en el interior de numerosos meteoritos, que al impactar sobre la superficie terrestre liberaron este compuesto y llenaron los océanos (MOJZSIS,1998 y SCIENCEWEEK,1999).
- 6 Las dos teorías expuestas, sobre el origen del agua en la Tierra, siguen discutiéndose en las escuelas de científicos que toman una u otra posición, aunque actualmente se ha visto que lo más razonable es aceptar ambas teorías, ya que una complementa a la otra (FONTURBEL *et al.*, 2004).

2. 1. 2. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO

- 7 Los componentes que integran el ciclo hidrológico se ilustran en la figura 2.1, mientras que la descripción de cada uno de ellos, se incluye a continuación:

FIGURA 2.1 Componentes del ciclo hidrológico

Fuente: Chow *et al.* (1994).



- **Precipitación.** Es el proceso mediante el cual, el agua en sus fases líquida y/o sólida, alcanza la superficie terrestre, proveniente de la troposfera, en forma de lluvia, llovizna, nieve, aguanieve o granizo. La precipitación es la fuerza que mueve la fase terrestre del ciclo del agua, y su naturaleza estocástica es la que le introduce la mayor parte de la aleatoriedad que caracteriza este ciclo.
- **Evaporación.** Es un proceso físico, que consiste en el paso del agua de un estado líquido hacia un estado gaseoso, desde diferentes tipos de superficies, tales como

lagos, ríos, humedales, áreas impermeables, suelos y follaje vegetal. La evaporación se produce a cualquier temperatura y su tasa aumenta a medida que el ambiente es más caliente.

- **Transpiración.** Es un proceso que consiste en la vaporización del agua contenida en el tejido de las plantas y la remoción de ese vapor hacia la atmósfera. La pérdida del agua de las plantas, debido al proceso de transpiración, se produce a través de los estomas, que son unas pequeñas aberturas ubicadas en el envés de las hojas (entre dos células llamadas guardianes), donde además se produce la entrada del CO₂ y del oxígeno, que requieren las plantas para la fotosíntesis y la respiración.
- **Evapotranspiración.** Los procesos de transpiración y evaporación ocurren en forma simultánea, lo cual hace difícil poder separar ambos procesos. Por este motivo, la combinación de ellos se conoce como el proceso de evapotranspiración. La tasa de evapotranspiración potencial depende del suministro de la energía requerida por el proceso, a través de la radiación solar, de la temperatura ambiente, de la humedad relativa y de la velocidad del viento. El viento remueve el aire saturado de vapor de agua por aire seco, creando un gradiente de humedad entre la superficie evaporante y el aire que la rodea. Esta tasa también es función del tipo de vegetación, y representa la tasa máxima a la cual puede evapotranspirar una planta, dada las condiciones climáticas existentes. Hay que considerar también la evapotranspiración real, que es el verdadero componente del ciclo hidrológico, ya que representa la tasa real, a la cual se produce la pérdida del agua a través del follaje. Ella es función de la tasa potencial y de la disponibilidad de agua en el suelo. Cuando hay suficiente agua almacenada en el suelo, las plantas evapotranspiran a una tasa potencial, mientras que al reducirse el almacenamiento de agua en el suelo, la tasa de evapotranspiración es, generalmente, inferior a la potencial.
- **Intercepción.** La intercepción o interceptación es el proceso mediante el cual la precipitación es retenida en el follaje de las plantas. El agua interceptada por las hojas se evapora directamente a la atmósfera, y no llega a alcanzar la superficie del suelo. La lámina de agua interceptada es una función de la biomasa vegetal. Los bosques interceptan una mayor cantidad de agua que las sabanas gramíneas.
- **Infiltración.** Infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo. La capacidad o tasa de infiltración de un determinado tipo de suelo corresponde a la velocidad a la cual el agua penetra en el suelo, y depende de muchos factores como la textura y la estructura del suelo. Algunos suelos tienen horizontes con texturas contrastantes, como por ejemplo una capa arcillosa compacta que limita la tasa de infiltración. En general, esta tasa disminuye con el tiempo a medida que el espacio poroso del suelo se va llenando de agua, y tiende a un valor constante, característico de cada tipo de suelos, que se conoce como la tasa de infiltración básica.
- **Flujo superficial.** La parte de la precipitación que no es interceptada por el follaje de las plantas cae sobre el suelo, de la cual una parte se infiltra y el resto se almacena en la superficie o se mueve en forma de flujo superficial o escurrimiento superficial.
- **Escorrentía superficial.** El flujo superficial, eventualmente, alcanza un curso de agua, que forma parte de la red de drenajes de la cuenca, transformándose en escorrentía superficial, que va a integrar el flujo de agua que transportan los surquillos, riachuelos y ríos, hasta llegar al océano.
- **Flujo subsuperficial.** Parte del agua que se infiltra es almacenada en el suelo, adhiriéndose a las partículas minerales, que integran este medio poroso, mediante las fuerzas adhesivas y cohesivas. Cuando el suelo alcanza un grado de saturación tal, que las fuerzas adhesivas y cohesivas de las moléculas que se ubican en la parte exterior de la película de agua, adherida a las partículas minerales, son inferiores a la fuerza de la gravedad, se produce el proceso de percolación, o drenaje del exceso de agua del suelo hacia la zona acuífera. El movimiento del agua en la zona no

saturada del suelo se conoce como flujo subsuperficial. Algunas veces, este tipo de flujo, conjuntamente con el flujo de aguas subterráneas, puede aflorar a la superficie del suelo, a través de lo que se conoce con el nombre de manantiales.

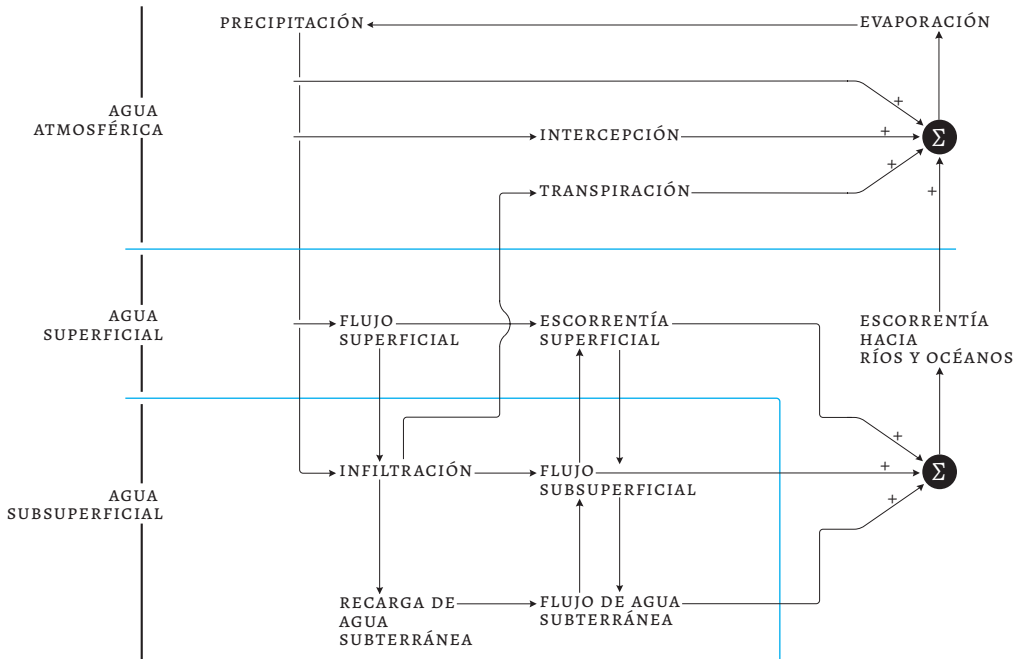
- *Recarga de agua subterránea.* El agua subterránea es aquella que se almacena en el subsuelo, constituyendo lo que se conoce como acuífero, que es una zona donde el medio poroso está completamente saturado. Esa zona tiene un espesor determinado, con un nivel superior que se conoce con el nombre de nivel freático. Este nivel es el límite entre las zonas no saturada y saturada del perfil de suelo. El proceso de percolación, que drena el agua gravitacional de la zona no saturada, recarga las aguas subterráneas almacenadas en la zona acuífera.
- *Flujo de agua subterránea.* El nivel freático, eventualmente, se conecta hidráulicamente con el nivel del agua que transporta la red de drenaje. Esta conexión permite que el flujo de agua subterránea entre a los cauces, en forma de flujo base. Este flujo representa la contribución del agua subterránea al caudal que se observa en la red de drenajes, y es el que permite que muchos cursos de agua no se sequen durante la época de verano, cuando la precipitación alcanza sus valores mínimos. Cuando un curso de agua se seca, el nivel freático puede no existir (no existe zona acuífera) o puede estar localizado por debajo del nivel mínimo del cauce.
- *Escorrentía hacia ríos y océanos.* La suma de la escorrentía superficial, flujo subsuperficial y flujo de aguas subterráneas (flujo base), constituye la escorrentía que se observa en el cauce de los ríos y que, eventualmente, si la cuenca es exorreica (como la mayoría de las cuencas), es descargada a los océanos. Si la cuenca es endorreica, la descarga se realiza hacia un lago, como es el caso de la cuenca del lago de Valencia, en nuestro país.

2. 1. 3. APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE SISTEMAS EN LA MODELACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO

- 8 En la naturaleza, la cuantificación de los diferentes componentes que integran el ciclo hidrológico y la definición de la interrelación que existe entre ellos, es algo extremadamente complejo, dada la variación tanto temporal como espacial de todos estos procesos. Por eso, una forma de abordar este problema es simplificarlo, aplicando el concepto de sistemas. Según esta metodología, los componentes se agrupan en subsistemas que se analizan separadamente y luego combinan los resultados de acuerdo a las interacciones que existen entre ellos.
- 9 En la figura 2.2 se presenta un diagrama de bloques, donde cada uno de ellos representa uno de los componentes del ciclo hidrológico. Luego estos componentes se agrupan en tres subsistemas: agua atmosférica, agua superficial y agua subsuperficial.
 - *Agua atmosférica.* Este subsistema incluye los procesos de precipitación, evaporación, transpiración e interceptación. El proceso de precipitación representa la entrada de agua al sistema hidrológico, mientras que el proceso de evapotranspiración representa la salida de agua más importante que tiene este sistema. Ambos procesos son estocásticos y son ellos los que introducen la mayor parte de la aleatoriedad que tienen todos los componentes del ciclo.
 - *Agua superficial.* Los componentes que integran este subsistema corresponden al flujo superficial que alimenta al componente escorrentía superficial, que representa el flujo de agua que llega a la red de drenaje a través de la superficie del terreno.
 - *Agua subsuperficial.* Este subsistema contiene el resto de los componentes del ciclo hidrológico: infiltración, flujo subsuperficial, recarga de aguas subterráneas y flujo de agua subterránea (flujo base) que entra a la red de drenajes de la cuenca.

FIGURA 2.2 Representación del ciclo hidrológico como un sistema

Fuente: Chow et al. (1994)



- 10 Adicionalmente, en el diagrama de bloques mostrado en la figura 2.2, se observa la interrelación (conectividades) que existe entre los diferentes componentes del ciclo. Este tipo de representación es la que se utiliza en el desarrollo de los llamados modelos lluvia-escorrentía. En estos modelos, se utilizan ecuaciones matemáticas para representar cada uno de los procesos que integran el ciclo del agua y para definir las interrelaciones que existen entre ellos, permitiendo así la transformación de información de lluvia en la escorrentía superficial que ella produce. Las características de las cuencas, en términos de suelos, geomorfología, vegetación y uso actual de la tierra, se les introducen a estos modelos a través de los llamados parámetros. El uso más importante de este tipo de modelos, está en la estimación de la escorrentía superficial en sitios de aprovechamiento hidráulico (embalses, derivaciones directas, etc.), que no disponen de información hidrométrica registrada en estaciones de medición.

2. 1. 4. BALANCE DE AGUA A NIVEL MUNDIAL

- 11 En la figura 2.1, mostrada anteriormente, se presenta un balance de agua, promedio anual, expresado como un porcentaje de la precipitación terrestre. Como se observa en dicha figura, 61% de la precipitación terrestre regresa a la atmósfera a través del proceso de evapotranspiración, mientras que el 39% restante escurre en forma superficial (38%) y subsuperficial (1%), hasta alcanzar el océano. La evaporación que se produce sobre el océano es del orden de 424% de la precipitación terrestre, de la cual 385% regresa al océano en forma de precipitación y 39% regresa a la zona terrestre que, sumado al 61% evapotranspirado, resulta en el 100% de la precipitación terrestre.

- 12 En la tabla 2.1, se presenta el balance global del agua, a nivel anual, descrito en la referencia UNESCO (1978). Según esta tabla la superficie de los océanos alcanza los 361.300.000 km², mientras que la superficie terrestre es de unos 148.800.000 km², de los cuales 118.800 km² corresponden a cuencas exorreicas (que descargan su agua a los océanos), y 30.000 km² son de cuencas endorreicas (que tributan las aguas a lagos, que no tienen salidas de agua hacia los océanos). Adicionalmente, la precipitación sobre los océanos es del orden de los 458.000 km³/año, y sobre la tierra de 119.000 km³/año, mientras que la evaporación es de 505.000 km³/año y 72.000 km³/año, respectivamente. Finalmente, la escorrentía que descarga en los océanos provenientes de los ríos, es de 44.700 km³/año, y la del agua subterránea, de 2.200 km³/año.

TABLA 2.1 Balance de agua global, promedio anual

Fuente: Unesco (1978)

	<i>océano</i>	<i>tierra</i>
Área (km ²)	361.300.000	148.800.000
Precipitación (km ³ /año)	458.000	119.000
Precipitación (mm/año)	1.270	800
Evaporación (km ³ /año)	505.000	72.000
Evaporación (mm/año)	1.400	484

ESCORRENTÍA HACIA LOS OCÉANOS

Ríos (km ³ /año)	44.700
Agua subterránea (km ³ /año)	2.200
Escorrentía total (km ³ /año)	46.900
Escorrentía total (mm/año)	316

2. 1. 5. PROCESOS DE TRANSPORTE EN EL CICLO HIDROLÓGICO

- 13 El agua representa el principal agente de meteorización de rocas y suelos, erosionándolos, disolviéndolos y acarreado tanto el sedimento como los sólidos disueltos, hasta su descarga en los océanos, a través de un inmenso proceso de transporte.
- 14 Adicionalmente, iones como cloruros y sulfatos son transportados a la atmósfera conjuntamente con el agua evaporada de los océanos, disolviéndose en el agua de lluvia que puede traer consigo compuestos de nitrógeno y azufre, productos de la quema de los combustibles fósiles, resultando en lo que se conoce como lluvia ácida. Este es un fenómeno característico de atmósferas contaminadas que pone en riesgo la conservación y desarrollo de los ecosistemas y se identifica cuando el pH del agua de lluvia es inferior a 5,6. Los óxidos nitrosos y el dióxido de azufre son los principales culpables de la ocurrencia de lluvia ácida, provenientes de las chimeneas que se ubican en zonas altamente industrializadas.
- 15 Brasil ha reportado extensos daños en sus reservas forestales del Amazonas debido a la lluvia ácida que se forma muy lejos, en sus complejos industriales de São Paulo. En los Estados Unidos se han reportado tormentas que han arrojado sobre Pennsylvania lluvias tan ácidas como el vinagre (pH 2,7) y sobre West Virginia con una acidez más fuerte que el jugo de limón (pH 1,5) (NOTICIAS MÁS VERDE, 2012).

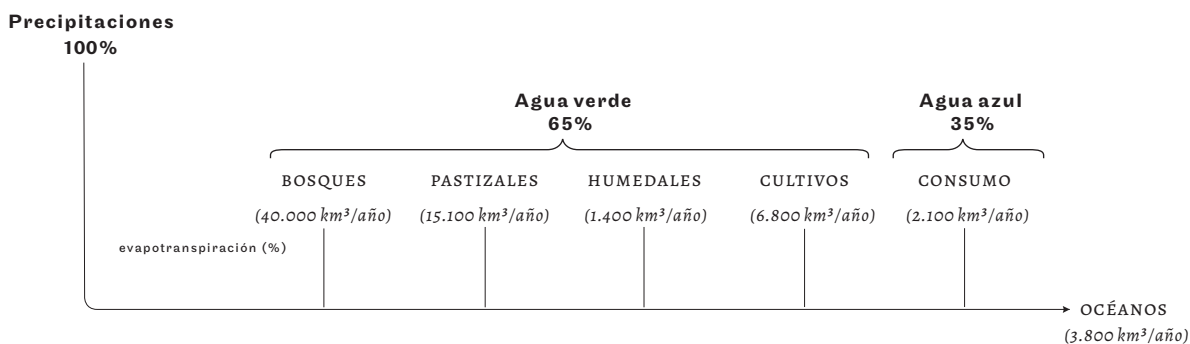
2. 2. EL CICLO HIDROLÓGICO, LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y LA ESTRUCTURA DE LOS ECOSISTEMAS

- 16 Según el Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB), ratificado por más de 175 países en Río de Janeiro, en junio de 1992, un ecosistema se define como «un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente (abiótico) que interactúan como una unidad funcional». El ambiente abiótico lo definen las características del clima, del relieve y de los suelos.
- 17 Desde un punto de vista global, y en una categoría superior, los biomas corresponden a áreas con condiciones climáticas parecidas, que contiene comunidades similares de plantas, animales y organismos del suelo (cuando corresponde). Los biomas pueden ser terrestres, de agua dulce y marinos. La ecohidrología se ocupa principalmente del estudio de las relaciones entre los suelos y las plantas, como parte del ciclo hidrológico en los biomas y ecosistemas terrestres, la limnología de los biomas y ecosistemas de agua dulce y la oceanografía los biomas marinos, entre otros componentes del medio marino.
- 18 Más específicamente, la ecohidrología es la ciencia que estudia las interrelaciones que existen entre el ciclo hidrológico y los ecosistemas, la cual enfatiza el estudio de las interrelaciones que existen entre la humedad almacenada en el suelo, que es el centro del ciclo hidrológico, y las plantas, que son los principales elementos bióticos de los ecosistemas terrestres.
- 19 Según se describe en la referencia Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004), la interacción que existe entre el balance hídrico y las comunidades vegetales, es la responsable de algunas de las diferencias fundamentales entre algunos biomas (por ejemplo, bosques, pastizales y sabanas) y de sus patrones de desarrollo, tanto en tiempo como en espacio. La estructura de los tipos de vegetación es fuertemente dependiente de la hidrología de la región, y de la dinámica y variabilidad de los controles hidrológicos.
- 20 Analizando la variabilidad climática y la estructura de los ecosistemas, Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004) consideran que la cantidad total de lluvia durante la estación de crecimiento de las plantas es sumamente importante y se ha usado para diferenciar entre zonas áridas, semiáridas, húmedas, etc. Sin embargo, no es en lo más mínimo suficiente, ya que la misma lluvia total puede ser repartida de manera muy diferente. Por ejemplo, en regiones no muy húmedas, se ha establecido que existen dos variables sumamente importantes: I) la frecuencia de los eventos de precipitación, que basta representarlos a nivel diario (número de días con lluvia, sobre el total de días, es un parámetro fundamental); y II) la profundidad promedio de lluvia en un día lluvioso (calculada dividiendo el total de lluvia, durante la estación de crecimiento de las plantas, entre el número de días lluviosos, que ocurren en dicha estación). Son estos dos parámetros los que controlan la respuesta de la vegetación. Así, por ejemplo, los pastizales con raíces poco profundas no pueden «aprovechar» lluvias con grandes láminas, que terminan percolando más allá de la profundidad de las raíces. Este no es el caso de los árboles con raíces más profundas. Junto con la temperatura

- 21 y la precipitación total, es la relación entre la frecuencia de la precipitación y su profundidad de lámina (cantidad de agua) lo que controla los tipos funcionales de vegetación, y, por lo tanto, los tipos de biomas (*p.ej.* sabana o bosque).
- 22 La variabilidad interanual de precipitación puede manifestarse a través de cambios en la lluvia durante la estación de crecimiento de las plantas, que a su vez refleja cambios en la frecuencia de días lluviosos o en la profundidad promedio de lluvia en los días lluviosos, o más frecuentemente, en ambos parámetros. Esta variabilidad es importante pues confiere un carácter aleatorio a los parámetros de control que se mencionaron antes. Con frecuencia el resultado de la aleatoriedad de esos parámetros es que la distribución de probabilidades de la humedad de suelo sea bimodal con una preferencia a un valor muy bajo (moda inferior) o a un valor relativamente alto (moda superior). Esto es importante pues entonces la condición promedio de humedad de suelo pierde importancia para la relación planta-suelo, que se desarrolla en su mayor parte en dos modos diferentes.
- 23 Otro ejemplo del papel fundamental de la dinámica hidrológica y su variabilidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, es el caso de los hidroperíodos en los humedales. Los hidroperíodos son aquellos períodos de tiempo en que un humedal tiene agua sobre la superficie. Ellos varían dramáticamente en espacio y en tiempo. Así diferentes localidades de un humedal tienen, frecuentemente, condiciones muy distintas de hidroperíodos, que conducen al establecimiento de nichos para diversos tipos de vegetación (por ejemplo, algunos tipos se dan en zonas con extensos hidroperíodos, mientras que otros se dan en localidades que permanecen sin hidroperíodos, la mayor parte del tiempo). En el caso de humedales, para manejarlos con propiedad, es preciso establecer las características de los hidroperíodos, en cuanto a su variabilidad en espacio y tiempo, y luego establecer la dependencia de los distintos tipos de vegetación en las características así establecidas.

FIGURA 2.3 Consumo de agua en los ecosistemas terrestres

Fuente: Falkenmar (2001)



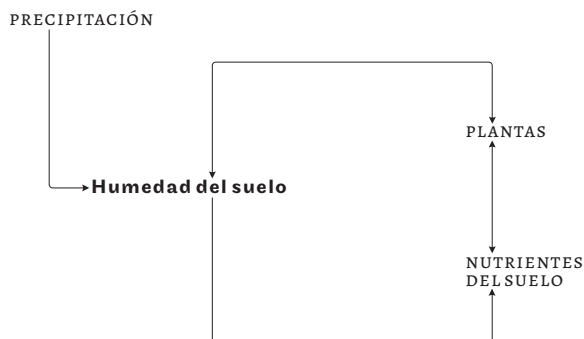
- 24 Finalmente en la figura 2.3, se presenta el consumo de agua global de los ecosistemas terrestres, donde se observa que el agua evapotranspirada (agua verde) representa un 65% de la precipitación (según la referencia UNESCO [1978], este valor es de 61%), mientras que el resto es el agua de escorrentía total (agua azul). Esta figura refleja la importancia que tienen los ecosistemas terrestres sobre el proceso de evapotranspiración, que es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico.

2. 3. CONTROL HIDROLÓGICO SOBRE LOS CICLOS DE NUTRIENTES

- 25 La vegetación de los ecosistemas y, más específicamente, la producción de biomasa está principalmente controlada por la presencia de la humedad de suelo y los nutrientes a los que tienen acceso las plantas. Es importante, sin embargo, tener muy presente que la deficiencia en humedad contribuye fundamentalmente al déficit de nutrientes a través de una compleja serie de mecanismos. Aunque esta interacción entre agua y nutrientes ha sido conocida desde hace ya mucho tiempo, sus consecuencias y dinámica están todavía lejos de ser entendidas a cabalidad.
- 26 La humedad del suelo, la cual es resultado de la acción conjunta del sistema clima-suelo-vegetación, controla directa e indirectamente los ciclos del carbono y el nitrógeno en el suelo. Directamente ella impacta muchas de las más importantes ramas de esos ciclos, tales como la descomposición, y la toma por las plantas de los nutrientes. Indirectamente, afecta en forma crucial la cantidad y composición de los residuos vegetales, a través de su control del crecimiento de las plantas (RODRÍGUEZ-ITURBE Y PORPORATO, 2004). Esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.4.

FIGURA 2.4 Papel central de la humedad del suelo en el sistema suelo-planta-atmósfera

Fuente: Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004)

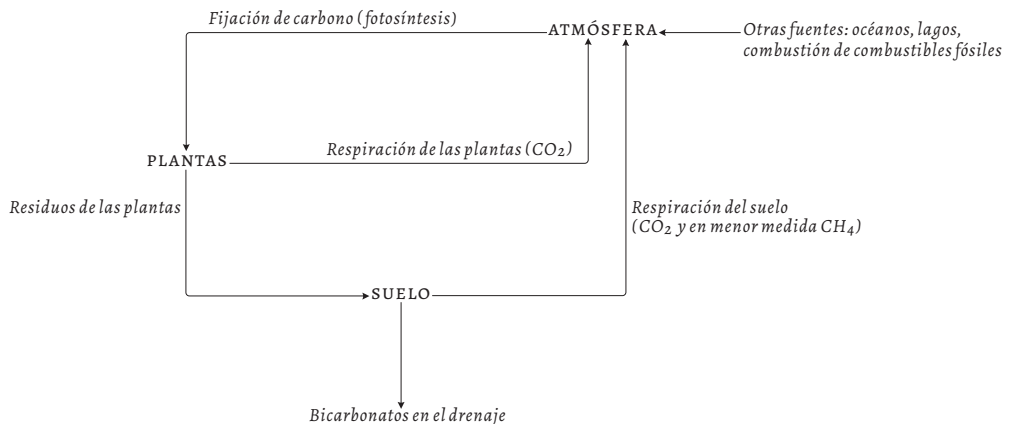


- 27 Históricamente los estudios de la relación entre humedad de suelo y los nutrientes comenzaron en el campo de la agricultura y es solo recientemente que el modelaje matemático y la dinámica entre estos factores se ha convertido en campo de enorme interés en el estudio de los ecosistemas.
- 28 Las plantas toman carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis, parte de ese carbono es usado por las mismas plantas como fuente de energía y después pasa directamente a la atmósfera a través de la respiración. Otra parte es asimilada por las

plantas e incorporada en sus estructuras (*p.ej.* hojas, ramas) y posteriormente transferida como materia residual al suelo donde pasa a formar parte de la materia orgánica del suelo. A través de procesos de oxidación, la descomposición de la materia orgánica del suelo genera compuestos inorgánicos como el amoníaco y también dióxido de carbono que vuelve a la atmósfera en un proceso que se denomina respiración del suelo. Parte del carbono en el suelo se combina con otras sustancias para formar compuestos muy complejos denominados «humus», algunos de los cuales son muy estables y contribuyen a mantener en el suelo nutrientes esenciales para las plantas.

FIGURA 2.5 Esquema simplificado del ciclo del carbono en el sistema suelo-planta-atmósfera

Fuente: Rodríguez-Iturbe y Porporato (2004)



- 29 En el caso del nitrógeno, aunque es un elemento fundamental para las plantas, se encuentra en el suelo en forma de compuestos orgánicos que lo hacen, en su mayor parte, no accesible a las plantas. Las plantas toman el nitrógeno principalmente en forma de compuestos inorgánicos, tales como el amoníaco (NH₄) y los nitratos (NO₃), los cuales están disponibles a través de la descomposición de la materia orgánica del suelo. Por esta razón, los ciclos del nitrógeno y el del carbono están íntimamente ligados. La mayor cantidad de nitrógeno en ecosistemas terrestres está localizado en el suelo, el cual contiene entre 10 y 20 veces más nitrógeno que la vegetación.

2. 4. EL AGUA COMO MODELADOR DE PAISAJES

- 30 Constituye prácticamente una disciplina –o más bien una subdisciplina– de la geomorfología, en tanto se le atribuye una gran significación en el desarrollo y evolución de los paisajes, donde destaca decididamente la influencia de los procesos fluviales. La contribución conceptual sobre la evolución secuencial de los paisajes de uno de los más influyentes científicos de las ciencias de la tierra –William Morris Davis– a finales del siglo XIX y primer tercio del XX, permite visualizar en términos sencillos el rol del agua en la modelación de los paisajes.
- 31 William Morris Davis, a la edad de 19 años, obtuvo la licenciatura en geografía en la Universidad de Harvard, (EE.UU.), y luego la maestría en ingeniería, habiendo sido, en 1885, designado profesor titular de esa prestigiosa universidad (WIKIPEDIA).

Davis fue un gran impulsor de la geografía y uno de los pilares fundacionales de la geomorfología como ciencia, que la definió como el subcampo de la geografía que estudia el relieve. A través de sus investigaciones desarrolló una teoría que denominó Ciclo Geográfico, mediante la cual se describe la creación y destrucción del paisaje. Según esta teoría el ciclo comienza con el levantamiento del relieve debido a la ocurrencia de procesos geológicos, como la tectónica y el volcanismo, etc. Posteriormente, el escurrimiento superficial a través de surquillos, riachuelos, quebradas y ríos, comienzan a crear (modelar) valles en forma de uve (v), entre las montañas, lo que Davis reconoce como la etapa juvenil del paisaje, durante la cual los procesos más importantes son la erosión laminar, la formación de cárcavas, los deslizamientos en masa y deslaves. Luego, las corrientes de agua tiende a tallar valles más anchos, donde los procesos importantes son tanto la erosión como la deposición de sedimentos, durante lo que se conoce como la etapa de la madurez; y después, continúa la etapa del envejecimiento o senectud, durante la cual el proceso más importante es la deposición, donde solo sobresalen suaves colinas, hasta llegar a lo que Davis definió como peniplanicie o «casi llano». A partir de esta etapa comienza el rejuvenecimiento, produciéndose nuevamente levantamientos de montañas, lo cual da inicio a un nuevo ciclo.

- 32 Aunque la teoría de Davis, fue superada posteriormente por geomorfólogos americanos y europeos, en su época fue revolucionaria, y ha permitido visualizar fácilmente el rol preponderante que tiene el agua en la modelación de los paisajes.
- 33 En general, los agentes que actúan sobre la superficie terrestre, modelando su forma, son agentes externos como el agua, los glaciares, el viento, la atmósfera y los seres vivos. Entre ellos el agua es, probablemente, el agente de la erosión más importante, que actúa a través de tres procesos:
- La separación de partículas individuales de la masa del suelo, y de las rocas previamente alteradas (regolita) por procesos de meteorización, en los cuales han actuado, además del agua, conjuntamente, el viento y los cambios de temperatura. A este proceso se denomina comúnmente erosión.
 - El transporte. Los materiales erosionados son transportados por los cursos de agua, que llevan consigo una carga de sedimentos en suspensión y una carga o arrastre de fondo. La carga de sedimentos en suspensión la alimenta, principalmente, la erosión laminar, en surquillos y cárcavas, que se produce en la cuenca tributaria, y consiste en fracciones de arcilla, limo y arena muy fina. La carga de fondo proviene del material que constituye el lecho de los cursos de agua, donde las fracciones predominantes son las arenas y las gravas, y el método de transporte es a través de la tracción cuando las partículas son arrastradas, rotación si las partículas son rodadas y saltación cuando las partículas se despegan del fondo y se mueven saltando.
 - La sedimentación. Este proceso se produce cuando el material transportado por los cursos de agua se deposita, lo cual ocurre, principalmente, en la parte baja de las cuencas, donde los cauces tienen baja a muy baja pendiente. Aun cuando los procesos de erosión y transporte siguen activos, el proceso más importante es la sedimentación. En épocas de crecidas, los cursos de agua se desbordan y ocupan las planicies de inundación, donde las velocidades disminuyen considerablemente, aumentando el proceso de deposición de sedimentos, que generalmente contienen

adsorbidos una gran cantidad de nutrientes, transformando estas vegas en zonas fértiles. En nuestro país esto se evidencia en las planicies de inundación del río Orinoco, que son cultivadas después que las aguas regresan al cauce principal. Algunos de estos cursos de agua, antes de su descarga al mar, desarrollan una estructura deltaica, subdividiéndose el cauce principal a través de una serie de difluencias, que se producen por la gran cantidad de agua y sedimentos, por las bajas pendientes (que determinan velocidades muy pequeñas) y el efecto de las mareas que pueden revertir parte del flujo de agua en los cauces que integran este complejo deltaico.

- ³⁴ Es importante destacar que Schumm (1977), desde el punto de vista geomorfológico, propuso la división de un sistema fluvial en zonas de oferta o producción, zonas de transporte y zonas de depósito de sedimentos.
- ³⁵ Desde el punto de vista del ciclo hidrológico, los paisajes son sistemas dinámicos y abiertos, que están interrelacionados con la variación temporal y espacial de las variables climáticas (principalmente con la precipitación), la variación espacial de la cobertura vegetal y de los suelos, la geología y la topografía, y muy especialmente con la hidrología que define la variación espacial y temporal del escurrimiento superficial, determinando la estructura de las redes de drenajes naturales de las cuencas y los flujos de agua y sedimentos.
- ³⁶ Todo lo anterior permite concluir que los factores principales, que son responsables de la construcción de los paisajes, son tanto el agua como el sedimento que transporta. El tipo de sedimentos y las sustancias disueltas que transporta el agua dependen del sustrato geológico, procesos formativos de los suelos, el régimen climático y la cobertura vegetal (INSTITUTO DE ECOLOGÍA DEL GOBIERNO DE MÉXICO, 2012).

2. 5. INFLUENCIA ANTRÓPICA SOBRE LOS COMPONENTES DEL CICLO DEL AGUA

- ³⁷ En condiciones naturales las cuencas hidrográficas tienen una dinámica que está sujeta al efecto que tienen los factores climáticos, biológicos, edáficos y geológicos. El crecimiento poblacional ha generado la intervención antrópica de las cuencas, creando poblaciones, ciudades y desarrollos industriales, expandiendo las áreas dedicadas a la agricultura y la ganadería, desarrollando obras hidráulicas como embalses, derivaciones, trasvases entre cuencas, canalizaciones, sistemas de riego, obras de control de inundaciones, drenajes y saneamiento de tierras; que han cambiado la dinámica natural de las cuencas y, por lo tanto, afectado los componentes del ciclo hidrológico.
- ³⁸ La principal intervención antrópica se debe al cambio progresivo de los patrones de uso de la tierra, que han generado la construcción de obras hidráulicas (llegándose a extremos de sobreexplotación de los recursos hídricos) y han aumentado la emisión de gases que producen el efecto invernadero, acelerando el calentamiento global y, por lo tanto, generando cambios climáticos que están afectando los componentes del ciclo del agua.
- ³⁹ Uno de los principales cambios en los patrones de uso de la tierra, que tiene mucho efecto sobre los componentes del ciclo del agua, es la deforestación, que en el mundo

actual representa, principalmente, la sustitución de la vegetación boscosa por otro tipo de uso. Una de las razones por las cuales se produce la deforestación es debido a la producción maderera, sin embargo, una explotación racional debería contar con un programa de reforestación simultáneo. Por otra parte, la actividad más importante, que es la principal causa de deforestación, es el aumento de la frontera agrícola, y se realiza a través de la tala y la quema. La quema la utilizan, principalmente, los campesinos que no tienen recursos para contratar o comprar maquinaria agrícola que realice la tala de los árboles, y muchas veces queman un área superior a la necesaria para desarrollar sus conucos (siembras en espacios pequeños).

- 40 Durante la agricultura de secano, al comienzo de la temporada lluviosa se prepara la tierra para realizar las labores de siembra, eliminando la vegetación existente, removiendo el suelo (arado y rastreo) y generando una superficie de suelo desnudo, lo que determina que no haya intercepción de la lluvia, por lo que cambian las relaciones de infiltración y escurrimiento superficial; adicionalmente, cambia el albedo y, por lo tanto, el efecto de la radiación solar sobre el proceso de evapotranspiración. A medida que el cultivo se desarrolla, van cambiando los componentes del ciclo hidrológico, ya que aumenta la intercepción y el albedo, y cambia la infiltración, el escurrimiento superficial, y, lo más importante, comienza a aumentar el proceso de evapotranspiración real.
- 41 La agricultura bajo riego produce unos cambios similares a la agricultura de secano, pero, dado que los cultivos tienen una suplencia de agua adecuada, la tasa de evapotranspiración real tiende a igualar a la tasa potencial.
- 42 Otro proceso de cambio en los patrones de uso de la tierra es la urbanización e industrialización, que también requiere de la deforestación. Este proceso afecta los componentes del ciclo del agua de una manera más intensa, ya que se cambia área permeable por impermeable, y se conecta hidráulicamente todo el sistema de drenajes que incluye obras de captación como los sumideros, y de conducción, como los colectores, que descargan finalmente a los cursos de agua. Adicionalmente, se canalizan los tramos que cruzan los desarrollos urbanos, para aumentar la capacidad de transporte y disminuir la amenaza de inundación. En resumen, los procesos de urbanización conllevan a:
 - Aumento del escurrimiento superficial y disminución de la infiltración.
 - Disminución del tiempo de respuesta de la zona urbana, ante la ocurrencia de una tormenta, ya que aumenta la velocidad del agua en calles y colectores, en comparación con las velocidades alcanzadas en la zona sin urbanización.
 - Al disminuir la infiltración, disminuye la evapotranspiración real, la percolación y, por lo tanto, la recarga de las aguas subterráneas, disminuyendo el caudal base.
 - Al aumentar el escurrimiento superficial y disminuir el tiempo de respuesta, aumenta el caudal pico de los hidrogramas de crecidas (aumentando la amenaza de inundación) y el volumen del hidrograma.
 - Al disminuir el caudal base, disminuyen los caudales mínimos observados en los cursos de agua durante las épocas de sequía.

- 43 Uno de los ejemplos más relevantes del efecto de la expansión del área urbana en nuestro país, lo representa la cuenca del río Guaire, la cual contiene a buena parte de la ciudad capital (Caracas) y de los Altos Mirandinos. Esta expansión del área urbana está produciendo un incremento continuo de la amenaza de inundaciones en las zonas aledañas al cauce del río Guaire y de sus principales tributarios.
- 44 Otra de las afectaciones de la intervención antrópica sobre los componentes del ciclo hidrológico, lo representan los trasvases extracuenas. El crecimiento poblacional ha generado requerimientos de agua para usos como abastecimientos urbanos e industriales y desarrollos agrícolas, que superan la disponibilidad del recurso en las cuencas donde se ubican estos centros de demandas. Este tipo de trasvase se produce en nuestro país, desde la cuenca del río Guárico, desde el embalse Camatagua, y desde la cuenca del río Tuy (derivaciones directas y desde los embalses Quebrada Seca, Lagartijo, Taguaza y próximamente Cuira), hacia la región capital, es decir, principalmente, hacia la cuenca del río Guaire. Un caso similar ocurre en la cuenca del lago de Valencia, donde ha sido necesario trasvasar agua desde los embalses Cachinche y La Balsa, ubicados en la cuenca del río Pao. Otro ejemplo, es el trasvase desde la cuenca del río Yacambú hacia la cuenca del río Turbio, para regar los valles de Quíbor.
- 45 Finalmente, están los efectos de los posibles cambios climáticos en nuestro país, que, principalmente, producirían aumentos de temperatura y disminución de la precipitación, lo que dará como resultado una disminución importante de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales en las cuencas hidrográficas. También es muy importante resaltar que los cambios climáticos, probablemente, conllevarán a un incremento en la variabilidad temporal de las precipitaciones, lo cual se traduciría en un incremento de la variabilidad de la escorrentía y en la posibilidad de que las obras existentes de almacenamiento tuvieran un bajo diseño si se quiere conservar el mismo nivel de confiabilidad en su operación.

2. 6. LA MEDICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO

2. 6.1. MEDICIÓN DEL AGUA ATMOSFÉRICA

- 46 Los componentes del ciclo hidrológico que forman parte del agua atmosférica son precipitación, evapotranspiración e interceptación.

2. 6.1.1. MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

- 47 La precipitación pluvial se mide en milímetros, que equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría con la precipitación de un litro de lluvia sobre una superficie plana e impermeable, de un metro cuadrado (1 m²). La medición de la precipitación se realiza utilizando aparatos conocidos como pluviómetros.
- 48 Existen los pluviómetros de cántaro, que son totalizadores, que acumulan el agua precipitada, que por norma se lee cada 24 horas, a las 8:00 a.m. (en Venezuela a las 7:30 a.m.) de cada día, descargando el agua acumulada en el cántaro en un cilindro graduado, que permite estimar la lámina precipitada. Otro tipo de pluviómetro es el

pluviógrafo que registra la lámina precipitada en una banda que se mueve a través de un sistema de relojería, que grafica la lámina precipitada como una función del tiempo. Finalmente, existen los pluviómetros de las estaciones automáticas (electrónicas), que disponen de diferentes mecanismos para registrar la precipitación; uno de ellos es el balancín que se mueve accionado por la lámina de lluvia, enviando señales eléctricas a un sistema de almacenamiento de información conocido como *Data Logger*, que es un dispositivo electrónico que registra mediciones ordenadas en el tiempo, provenientes de diferentes sensores, donde cada medición es almacenada en una memoria (ubicada en una caja que se conoce como Nema), junto con sus respectivas fecha y hora.

2. 6.1.2. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

- 49 La forma como se mide la evapotranspiración potencial de un determinado tipo de vegetación, es utilizando un lisímetro, que es un dispositivo introducido en el suelo, relleno con el mismo suelo del lugar y cubierto con la vegetación seleccionada. Este tipo de procedimiento se utiliza en estaciones experimentales con fines de investigación. En la práctica, la evapotranspiración potencial se estima utilizando información de variables climáticas como temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y las características de la vegetación.
- 50 El método recomendado por la FAO (1998), para llevar a cabo esta estimación, es el conocido como Penman-Monteith, que utiliza la información meteorológica, a los fines de estimar la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia (ET_o), que equivale a un pasto de doce centímetros de altura, con una densidad adecuada y sin limitaciones de humedad en el suelo. Luego, se utilizan los llamados coeficientes de cultivo, a los fines de estimar la evapotranspiración potencial de cualquier tipo de vegetación a partir de la ET_o.
- 51 Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son variables climáticas que permiten estimar la energía requerida para la vaporización y la remoción del vapor del agua de la superficie evaporante. Estas variables son las siguientes (FAO,1988):
- *Radiación solar*. El proceso evapotranspiratorio está determinado por la cantidad de energía disponible para que se evapore el agua. La radiación solar es la fuente de energía que permite el cambio de grandes cantidades de agua (estado líquido) a vapor de agua (estado gaseoso). La radiación potencial que puede alcanzar la superficie de la tierra está determinada por la latitud y el día del año, mientras que la radiación que realmente llega a la superficie de la tierra dependerá de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que absorben y reflejan parte de esta radiación. Adicionalmente, una porción de la radiación que finalmente alcanza la tierra, es reflejada dependiendo del albedo de la superficie, que representa el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Al evaluar el efecto que tiene la radiación sobre la evapotranspiración es importante tener en cuenta que no toda la radiación se utiliza en el proceso evapotranspiratorio, ya que parte de ella es usada para calentar la atmósfera y el perfil del suelo. La radiación solar se mide utilizando un aparato conocido como actinógrafo. Las unidades recomendadas por la FAO (1988), para expresar la radiación

son millones de Joule por metro cuadrado por día ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$).

- *Temperatura del aire*. La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra aumentan la temperatura del aire. El calor sensible que rodea a las plantas transfiere energía y tiene influencia en el control de la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y caliente la pérdida de agua por evapotranspiración es mayor que en días fríos, húmedos y nublados. Para medir la temperatura se usan los termómetros, y la lectura se expresa en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- *Humedad del aire*. Mientras la suplenia de energía a través de la radiación solar y la temperatura del aire, que rodea el ambiente, provee el calor latente de vaporización; la diferencia entre la presión de vapor de la superficie y del aire que la rodea, es lo que determina el transporte de vapor de agua. Un campo con suficiente agua, en un clima caliente y seco, evapotranspira grandes cantidades de agua ya que existe suficiente energía y hay poco contenido de vapor de agua en el aire que rodea la superficie; mientras que en climas húmedos, a pesar de tener suficiente energía, la evapotranspiración es reducida ya que el contenido de agua en el aire está cerca de la saturación y, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento adicional es reducida. La humedad del aire se mide como humedad relativa, que se expresa como un porcentaje (%) de la máxima cantidad de humedad que puede almacenar un volumen de atmósfera a una temperatura dada. El aparato utilizado para realizar la medición es el higrómetro.
- *Velocidad del viento*. El proceso de remoción del vapor del agua depende del viento. Cuando el agua se evapora, el aire que se ubica sobre la superficie se satura en forma gradual con el vapor de agua. Si este aire no se remueve en forma continua, reemplazándolo con aire seco, la tasa de evapotranspiración decrece. La demanda evapotranspiratoria en climas calientes y secos es alta, debido a la sequedad del aire y la suplenia de energía por la radiación solar. En estas circunstancias una gran cantidad de vapor de agua puede ser almacenada en el aire mientras que el viento transporta este vapor de agua permitiendo que se evapore mayor cantidad de agua. En climas húmedos, la alta humedad del aire y la nubosidad disminuyen la tasa de evapotranspiración. En este caso el viento sustituye el aire saturado por aire menos saturado pero con un buen contenido de humedad. El aparato utilizado para medir la velocidad del viento es el anemómetro, y las unidades son en metros por segundo.

52 Cuando no existe información climática, pero se dispone de información de evaporación al sol en tinas evapormétricas, la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia se estima a través de estos datos, utilizando un coeficiente de tina, menor que la unidad. Luego, para estimar la evapotranspiración potencial asociada a un determinado tipo de vegetación, al igual que en el caso anterior, se utilizan los coeficientes de cultivo.

2. 6.1.3. MEDICIÓN DE LA INTERCEPCIÓN

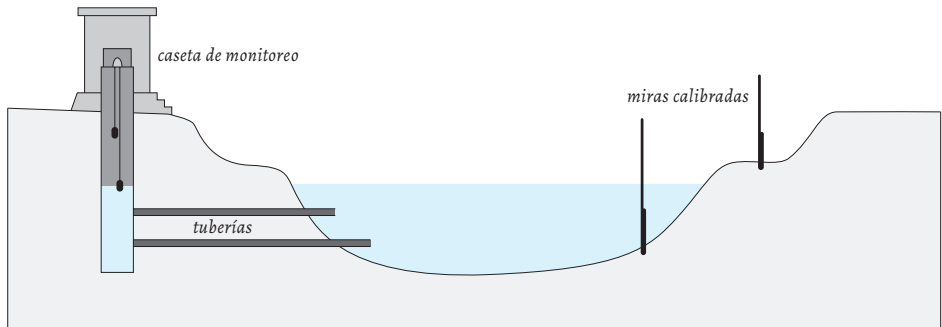
53 La forma de determinar la intercepción de la lluvia en el follaje de las plantas es localizando pluviómetros debajo de la vegetación y en un lugar cercano y abierto; adicionalmente, se colocan aparatos de captura del agua que drena a lo largo del tronco de los árboles. Este es el procedimiento utilizado en forma experimental que ha permitido derivar expresiones que estiman la intercepción como una función de la biomasa vegetal y la lámina precipitada. Una experiencia de este tipo se llevó a cabo en la cuenca del río Caroní cuyos resultados se describen en la referencia Rabinovich (1977).

2. 6. 2. MEDICIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL

- 54 El agua superficial se mide en los cauces de los cursos de agua. Esta medición se realiza en las estaciones hidrométricas, mediante el registro de los niveles del agua observados en forma discreta, a través de un sistema de miras (reglas graduadas), o en forma continua, utilizando fluviógrafos. Hay fluviógrafos que utilizan sistemas de flotadores o sensores de presión, localizados en el fondo del cauce, registrando el nivel del agua en bandas que tienen un sistema de relojería que grafica el nivel como una función del tiempo, o en sistemas de almacenamiento tipo *Data Logger* (estaciones automáticas).

FIGURA 2.6 Estación hidrométrica con sistema de flotadores y miras

Fuente: Chow et al. (1994)



- 55 A los fines de definir el caudal, que representa el volumen de agua por unidad de tiempo, que transita a nivel de la estación hidrométrica, es necesario realizar aforos de ese caudal, que permiten construir una curva que relaciona el nivel de agua con el caudal de tránsito, la cual se conoce como curva de gastos. Para estimar el caudal, en cada aforo, es necesario determinar el área de la sección transversal, expresada en metros cuadrados (m^2), y la velocidad media del flujo del agua expresada en metros por segundo (m/s). De esta forma, al multiplicar el área por la velocidad media, se obtiene el caudal, expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Para llevar a cabo el aforo, se pueden utilizar dos metodologías:

- **Método convencional.** En este caso se subdivide la sección transversal en subsecciones, determinando la profundidad promedio y ancho en cada una de ellas para obtener el valor del área; mientras que la velocidad media se obtiene utilizando correntímetros. El producto del área y velocidad media, en cada subsección, resulta en el caudal de tránsito en la subsección. La suma de los caudales aforados en cada subsección, resulta en caudal total que pasa por la sección, el cual se asocia al nivel del agua.
- **Método integral.** Mediante la aplicación de este método se determina el área de la sección transversal y la velocidad promedio, simultáneamente y en forma continua, a lo largo de la sección transversal del curso de agua. El instrumento utilizado es un perfilador acústico por efecto «Doppler». El efecto Doppler, llamado así por el austríaco Christian Andreas Doppler, es el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. El aparato se acopla a una embarcación que se mueve de una margen a la otra, y el resultado es el área, la velocidad promedio, el caudal y la variación de la velocidad a lo largo y ancho de la sección.

2. 6. 3. MEDICIÓN DEL AGUA SUBSUPERFICIAL

2. 6. 3. 1. HUMEDAD DEL SUELO

- 56 La humedad del suelo se puede estimar por métodos gravimétricos, tomando una muestra de suelo húmedo y pesándola, luego se seca la muestra en una estufa y se vuelve a pesar el suelo seco; la diferencia resulta en el contenido de humedad almacenada en el suelo. Existen otros métodos que miden variables subrogadas que son función del contenido del agua en el suelo, como los Bloques de Yeso (que miden el paso de la electricidad a través de ellos), las sondas de neutrones que miden la reflexión de los neutrones emitidos por un aparato insertado en un agujero dentro del suelo, y los tensiómetros que registran la tensión a la cual se encuentra retenida el agua en el suelo.

2. 6. 3. 2. INFILTRACIÓN

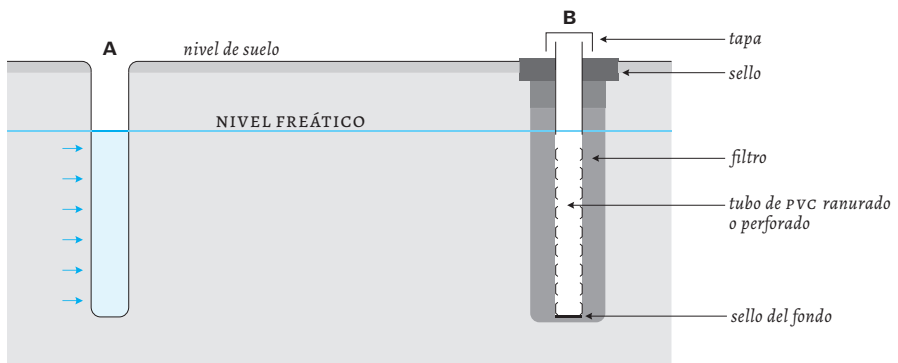
- 57 La tasa de infiltración en un suelo se mide utilizando infiltrómetros de anillo, que son dos anillos cilíndricos que se entierran en el suelo, se llenan de agua y se registra la variación del nivel del agua respecto al tiempo. De esa manera se obtiene la curva de infiltración acumulada respecto al tiempo, de la cual se puede calcular la tasa de infiltración como una función del tiempo.

2. 6. 3. 3. AGUA SUBTERRÁNEA

- 58 Los niveles de agua subterránea (nivel freático) se miden en pozos de observación, estos niveles observados se pueden referenciar al nivel medio del mar en metros sobre el nivel del mar (msnm). Los pozos de observación son agujeros cilíndricos, de forma tubular, que se perforan en el suelo penetrando el estrato permeable del acuífero, hasta una profundidad que se ubica por debajo del nivel del agua subterránea (nivel freático). Observando el nivel en dos pozos ubicados a una cierta distancia se puede determinar la pendiente del nivel del agua, la cual se obtiene dividiendo la diferencia de los niveles entre la distancia que separa los pozos. Esta pendiente define la dirección del movimiento del agua subterránea, que conjuntamente con las características hidráulicas del medio poroso que define el acuífero, se puede estimar la cantidad de metros cúbicos por día por metro cuadrado, que fluye a través de la sección transversal del acuífero.

FIGURA 2.7 Pozos de observación del nivel freático (A) no entubado y (B) entubado

Fuente: Chow et al. (1994)

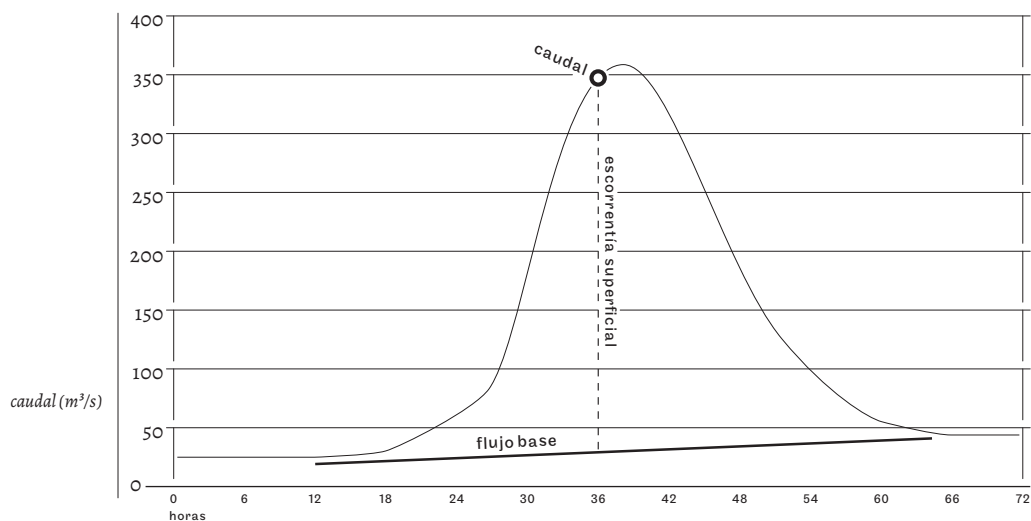


2. 6. 3. 4. CAUDAL BASE

59 El caudal base o flujo de aguas subterráneas, que entra al cauce de los cursos de agua, se puede estimar utilizando los hidrogramas, que representan la variación del caudal que transita a través de una sección transversal, con respecto al tiempo. Estos hidrogramas se registran en las estaciones hidrométricas. Existen métodos hidrológicos que permiten estimar qué parte del hidrograma se debe al escurrimiento superficial (escorrentía directa) y qué parte proviene del acuífero en forma de flujo base.

FIGURA 2.8 Hidrograma observado en el río Yuruaní, en San Ignacio de Yuruaní. 18, 19 y 20 de junio de 1997

Fuente: Elaboración propia



2. 6. 4. LA RED HIDROMETEOROLÓGICA EN VENEZUELA

60 Para comentar la situación de la red de mediciones hidrometeorológicas en nuestro país, a continuación se incluye lo descrito en la referencia Córdova y González (2007):

61 «La base principal para cualquier trabajo relativo a los recursos hídricos en el país parte de la disponibilidad de la información climática, hidrométrica e hidrogeológica. En Venezuela, en las últimas décadas, esta conciencia sobre la necesidad de la medición hidrológica ha venido perdiendo importancia. A finales de la década de los años 70, el país, a través del Ministerio de Obras Públicas (MOP), disponía de una gran red de información y de un conjunto de técnicos observadores que permitieron que hoy en día se pueda lograr la estimación de información climática e hidrométrica, en la mayoría de nuestras fuentes superficiales de agua, para un período de datos de unos 30 años de longitud. (...) En la actualidad, la empresa EDELCA es la única institución que ha mantenido esa tradición, densificando su red de monitoreo en la cuenca del río Caroní, estableciendo una red de observaciones cada vez más confiable. La institución responsable de la red que cubre el resto del país –Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales– ha disminuido considerablemente las actividades de recolección y procesamiento de información, a tal punto que en los últimos años las campañas de aforos de ríos no se realizan y la mayoría de las estaciones pluviométricas no

están en funcionamiento. (...) A manera de ejemplo, en el caso de los aludes torrenciales del Litoral ocurridos en 1951, se pudo monitorear la tormenta que originó el problema en quince estaciones de lluvia, mientras que el evento ocurrido en 1999 solo se pudo registrar, con limitaciones, en dos estaciones ubicadas en los límites del área afectada; adicionalmente, en la cuenca del río Guapo, donde se produjo el colapso de la presa, en diciembre de 1999 no se registró la tormenta extrema en ninguna de las estaciones pluviométricas ubicadas en toda el área de afectación que incluía cuencas vecinas.

Por otra parte, resulta de vital importancia la consolidación de instituciones dedicadas a medir y a recopilar la información básica de aguas subterráneas correspondiente a la litología y características de los acuíferos, censo de pozos existentes y tareas de protección y conservación de acuíferos.»

- 62 La situación actual se ha agravado, en comparación con lo descrito en la referencia anterior. Por ejemplo, en la cuenca del río Caroní ya no se están realizando mediciones con la intensidad y frecuencia con que se hacían antes.
- 63 A los fines de ilustrar la situación actual, consideremos la cuenca del río Guaire que atraviesa la ciudad capital y, como se ha establecido anteriormente, el crecimiento poblacional está provocando que la amenaza de desborde del río y, por lo tanto, el peligro de inundaciones en la ciudad capital, se haga más patente. En la actualidad, en la cuenca de este río, hasta su salida de la región capital (en El Encantado, después de la confluencia de la quebrada La Guairita, donde tiene un área tributaria de 611 km²), no existen estaciones hidrométricas operativas. Adicionalmente, la mayoría de las estaciones pluviométricas, representativas de la cuenca, disponen de datos continuos hasta años anteriores al año 2000; y algunas de ellas solo llegan hasta el año 1983. En la actualidad, el Instituto Nacional de Meteorología y Hidrología (INAMEH), está haciendo un esfuerzo para reactivar algunas estaciones pluviométricas y procediendo a la instalación de nuevas estaciones automáticas. Sin embargo, esta falta de información hidrometeorológica no permite evaluar el efecto que está teniendo la impermeabilización de la cuenca, debido al incremento de la zona urbana, sobre la ocurrencia de caudales extremos y, por lo tanto, sobre la amenaza de las inundaciones. Este tipo de ejemplo se repite en la mayoría de las cuencas hidrográficas de nuestro país.

REFERENCIAS

- CHOW, V. T.—D. MAIDMENT—L. MAYS. (1994)
Hidrología aplicada, McGraw Hill, Santafé de Bogotá, Colombia.
- COLMENARES *et al.* (1968)
Esquema para el estudio de drenaje de zonas húmedas y su aplicación a la zona sur del lago de Maracaibo, sector Chama. Dirección de Obras Hidráulicas, Venezuela.
- CÓRDOVA, J.—M. GONZÁLEZ. (2007)
«Cuencas, hidrografía y recursos hídricos en Venezuela», en *GeoVenezuela* (Coord. Pedro Cunill Grau), tomo 2, Fundación Empresas Polar, Caracas, Venezuela.
- DOOGE, J. C. (1983)
«On the study of water», *Hydrol. Sci. J.*, vol. 28, pp. 23-48.
- FALKENMARK, M. (2001)
More crops or more ecological flow? – In search of a «Golden Section» in catchment rainwater partitioning. SIWI Seminar. Water security for cities, food and environment—Towards catchment hydro solidarity, Estocolmo, Suecia.
- FAO. (1998)
Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, United Nations, Roma, Italia.
- FONTURBEL, F.—C. ARAMAYO—S. PALOMEQUE. (2004)
«Influencia de los principales procesos geológicos en el desarrollo de la biodiversidad en la Tierra», en *Ecología, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, Publicaciones Integrales, La Paz, Bolivia.
- INSTITUTO DE ECOLOGÍA DEL GOBIERNO DE MÉXICO. (2012)
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/488/elpaisaje.html>. Consultado: 8.6.2012.
- MAIDMENT, D. (1993)
Hand Book of hydrology, McGraw Hill, Nueva York.
- MOJZSIS, S. (1998)
«El origen de la vida en la Tierra», *National Geographic* en español, vol. 2(3), pp. 54-81.
- NASA GODDARD SAPCE FLIGHT CENTER. (2001)
First evidence that comets filled the oceans: A dying comet's kin may have nourished life of earth. EE.UU.
- NOTICIAS MÁS VERDE. (2012)
<http://noticias.masverdedigital.com/2012/venezuela-lluvia-acida/>. Consultado: 15.3.2012
- RABINOVICH, J. (1977)
Modelo Guri. Centro de Ecología del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I.—A. PORPORATO. (2004) *Ecohydrology of Water-controlled Ecosystems*, Cambridge University Press, United Kingdom.
- SCHUMM, S. A. (1977)
The fluvial system, Wiley-Interscience; New York, USA.
- SCIENCEWEEK. (1999)
Science-week focus report: Earth science: Origin of water on earth.
- UNESCO. (1978)
World Water Balance and Water Resources of the Earth. USSR Committee of the International Hydrological Decade, vol. 25, París, Francia.