

CAPÍTULO 2

EL BALANCE DE AGUA EN AREAS URBANAS

Curso: HIDROLOGÍA EN MEDIOS ANTROPIZADOS

**Maestría en Recursos Hídricos de Llanura
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario**

Dr. Ing. Civil GERARDO RICCARDI

ROSARIO, 2004.

ÍNDICE

- 2.1 BALANCE HIDROLÓGICO**
 - 2.1.1 Balance Hidrológico Anual**
 - 2.1.1.1 Cuenca Hidrológicamente Aislada**
 - 2.1.1.2 Cuenca Hidrológicamente No Aislada**
 - 2.1.2 Balance Medio Anual**
 - 2.1.3 Balance para una Tormenta**

- 2.2 EL BALANCE HIDROLÓGICO EN AREAS URBANAS**
 - 2.2.1 Impacto de la Urbanización en el Balance Hidrológico**
 - 2.2.2 Objetivos de los Estudios de Balance Hidrológico en Áreas Urbanas**
 - 2.2.3 Procesos del Sistema Hidrológico Urbano**
 - 2.2.4 El Balance en Cuencas Urbanas**

- 2.3 ECUACIÓN DEL BALANCE DE AGUA**

- 2.4 EL ROL DEL BALANCE DE AGUA PARA EL CONOCIMIENTO DEL SISTEMA Y EL DISEÑO INGENIERIL**

- 2.5 SÍNTESIS FINAL**

- 2.6 BIBLIOGRAFÍA**

EL BALANCE DE AGUA EN ÁREAS URBANAS

El balance de agua y las características hidroclimáticas, sin duda tienen una consecuencia importante sobre la planificación y desarrollo de ambientes urbanos. Como se ha reportado en la Capítulo 1, en los años recientes debido a la fuerte tendencia de la población mundial ha concentrarse en ciudades se han producido fuertes perturbaciones sobre el ciclo del agua debido a las urbanizaciones. Además, los cambios climáticos transitorios y permanentes observados se traducen en alteraciones de procesos naturales los cuales repercuten también en ambientes urbanos. En este contexto cobra importancia para la gestión del agua urbana no solo el conocimiento de la respuesta del ambiente urbano a corto plazo (escala de tormentas) sino también, al igual que en cuencas rurales, a mediano o largo plazo (escala del ciclo hidrológico).

Los estudios del balance de agua son esencialmente el punto de partida de un análisis del sistema hidrológico en áreas urbanas (McPherson, 1973 citado por Van de Ven (1990)). Proveen una apreciación global del flujo de agua a través de los múltiples caminos posibles del sistema y la importancia de los diferentes parámetros. Si bien las cuencas urbanas en términos de extensión superficial son menores a las cuencas rurales, existen en el ciclo del agua en ambientes urbanos diversos procesos, propios de la perturbación producida por la presencia del hombre, que no existen en ambientes rurales. Un claro ejemplo de ello es el ingreso de agua a sistema a partir de la red de suministro de agua potable en ambientes urbanos.

2.1 BALANCE HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico (Figura 2.1 y 2.2) bajo un enfoque sistémico puede explicarse en términos de cuatro niveles de almacenamiento (Zimmermann, 2000).

La precipitación P (lluvia, nieve, granizo, niebla, etc.) es la variable que excita al sistema y ante la cual reacciona todo el resto. Una parte de P se evapora antes de alcanzar la superficie terrestre. Este proceso tiene importancia si la precipitación se produce en una atmósfera ávida de vapor de agua y con elevadas temperaturas.

El primer nivel de almacenamiento lo constituye la cubierta vegetal (intercepción por follaje (F)). Esta es una variable de almacenamiento transitorio porque parte del agua retenida al cabo de un corto tiempo escurre por las ramas y tronco y gotea desde las hojas llegando al suelo y el agua retenida en las hojas se evapora.

El agua que desde la precipitación directa P llega al suelo en conjunto con la fracción de la intercepción F que también llega al suelo se denomina precipitación efectiva P_e . Puede ser cuantificada como: $(P-F)+$ fracción de F .

La P_e que llega al suelo constituye el segundo nivel de almacenamiento llamado superficial S y esta compuesto por una componente transitoria (cantidad de agua inicial necesaria para que el flujo levante tirante y pueda escurrir) y otra componente medianamente transitoria constituida por los volúmenes retenidos en las cavidades y ondonadas impermeables, sin poder escurrir. Estos volúmenes son lentamente agotados por evaporación (E_v).

La infiltración (I) es la cantidad de agua que se introduce desde la superficie hacia el interior del suelo. El flujo superficial (A_s) comienza una vez superada la capacidad de infiltración del suelo.

El tercer nivel de almacenamiento lo constituye el agua infiltrada y se denomina almacenamiento de humedad en el suelo (H). Durante la lluvia el agua que ingresa a poca profundidad suele encontrarse con capas de suelo relativamente impermeables, lo que produce un escurrimiento paralelo al superficial a poca profundidad y con menor velocidad que se denomina flujo subsuperficial (o hipodérmico) A_{ss} . El A_{ss} frecuentemente aflora en la superficie o aporta directamente al curso. La suma del escurrimiento superficial y el subsuperficial constituye el denominado escurrimiento directo (A_d): $A_s + A_{ss} = A_d$. En muchos casos el A_d puede considerarse como indivisible para una tormenta.

El agua que se ha introducido en el suelo, a medida que lo va saturando avanza en profundidad movilizada por la gravedad. Este volumen excedente constituye lo que se denomina recarga (R) y alcanza el cuarto nivel de almacenamiento, el freático (G). Por otra parte las raíces de las plantas toman agua del

suelo y la transpiran a través de las hojas a la atmósfera. Además se produce una evaporación de agua desde las capas superiores, este procesos muy difícil de separar se lo denomina evapotranspiración (ET). A medida que por efecto de la ET se va consumiendo el agua del suelo se produce un ascenso capilar (C) desde el nivel freático.

En cuencas hidrológicamente aisladas, cuando la superficie freática intercepta a un curso de agua con nivel inferior al freático, se produce el escurrimiento desde la freática al curso conformando el denominado escurrimiento de base del curso (Ag) o subterráneo, de modo tal que $A_d + A_g = A$ (escurrimiento total). Cuando la situación de niveles es inversa (nivel de río mayor al freático) se produce la recarga del acuífero freático (R).

En una cuenca hidrológicamente no aislada pueden aparecer aportes subterráneos (G_a) que podrán interactuar con el tercer y cuarto nivel de almacenamiento y pérdidas subterráneas (G_p) profundas.

El escurrimiento de base proporciona el agua en períodos secos mientras que generalmente A_d constituye el aporte más importante que conforma la crecida en los períodos lluviosos.

El movimiento del flujo que circula por el ciclo hidrológico esta gobernado por el principio de conservación de masa (continuidad) y de conservación de cantidad de movimiento, debiendo existir un equilibrio entre entradas y salida. Las relaciones cuantitativas que representan este equilibrio constituyen las expresiones del balance hidrológico. Para poder establecer el balance hidrológico es imprescindible definir:

- la unidad hidrogeológica al que se aplica
- el intervalo de tiempo que se considera.

Por lo tanto no existe una única expresión del balance hidrológico o hídrico, sino tantas como asociaciones de sistemas físicos e intervalos de tiempos que se plantean. La unidad hidrogeológica puede ser la cuenca ya sea hidrológicamente aislada o no, pudiendo ser también un ambiente urbano. En este caso la unidad de estudio puede estar compuesta por una fracción de una cuenca o por múltiples fracciones de cuencas. Por ejemplo la ciudad de Rosario abarca las cuencas bajas de dos arroyos de la provincia de Santa Fe, el arroyo Ludueña y el Arroyo Saladillo.

El intervalo de tiempo puede ser variado: el año hidrológico medio, un número determinado de años, un mes, un número de días, o el tiempo de duración de una tormenta.

En la Figuras 2.1 y 2.2 se expone una representación esquemática del ciclo hidrológico y un enfoque sistémico del mismo.

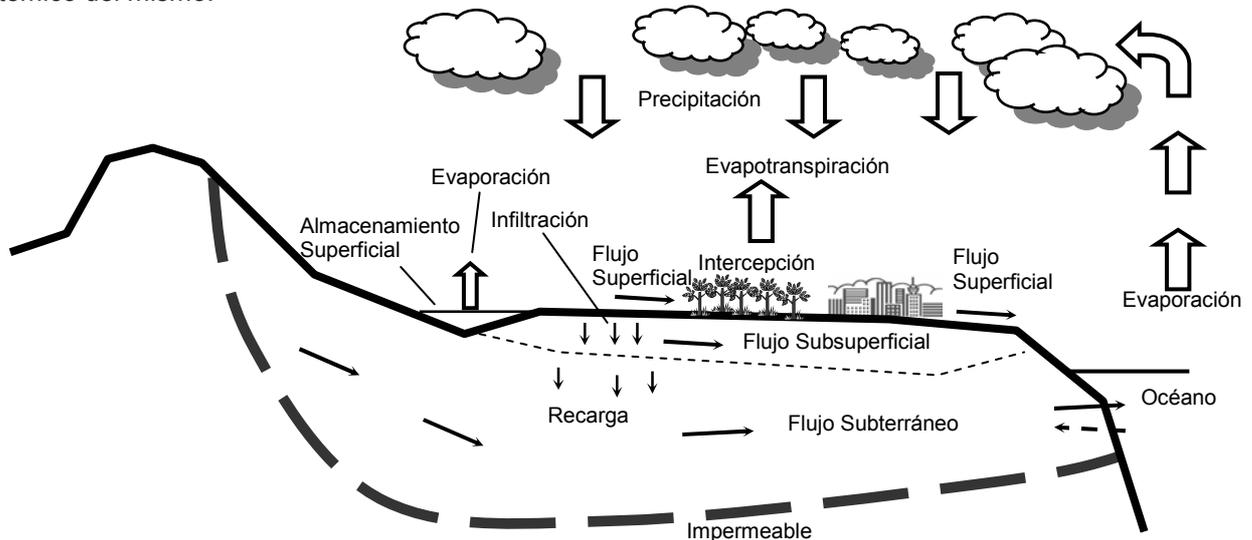


Figura 2.1. Representación Esquemática del Ciclo Hidrológico. Fuente: adaptación de Zimmermann (2000).

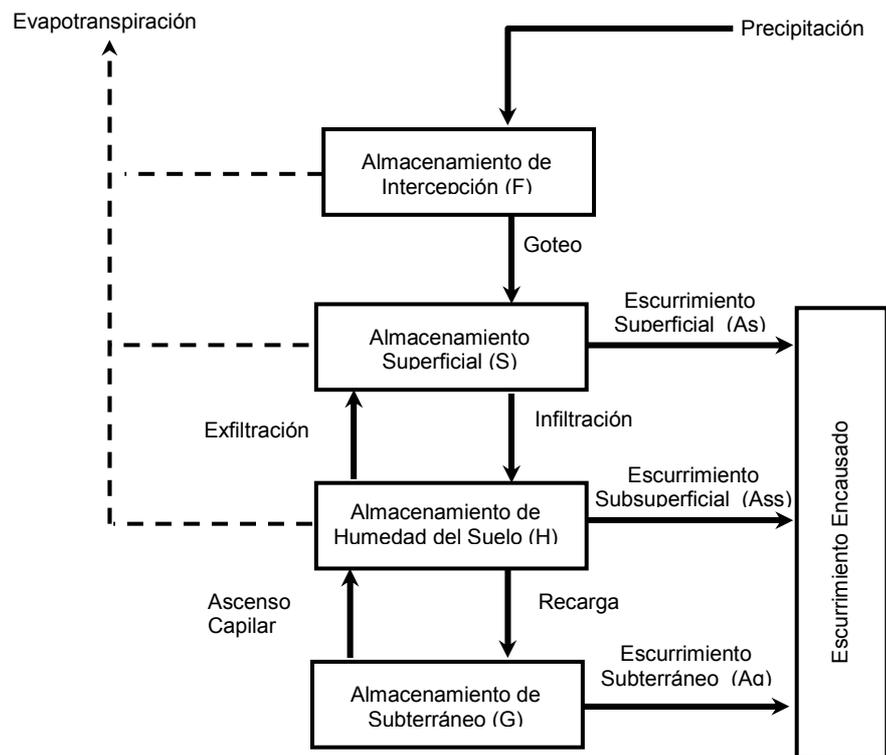


Figura 2.2. Enfoque Sistémico del Ciclo Hidrológico. Fuente: adaptación de Zimmermann (2003)

2.1.1 Balance Hidrológico Anual

La elección del inicio del año hidrológico para el cálculo del Balance Hidrológico Anual (BHA) depende del objetivo de estudio perseguido, de todos modos es habitual considerar el inicio del ciclo cuando se sale de periodos de precipitaciones mínima, de este modo se asegura que los períodos de máximas precipitaciones siempre quedan incluidos en un único ciclo anual, cuestión que no se logra si se consideraría el año calendario (Zimmermann, 2000). En la zona de Rosario para los cursos menores (Arroyos Saladillo, Ludueña, Frías, San Lorenzo, etc.) el año hidrológico comienza a partir de septiembre.

2.1.1.1 Cuenca Hidrológicamente Aislada

Una cuenca es hidrológicamente aislada cuando los intercambios de flujo subterráneo con otras cuencas son despreciables al cabo de una año hidrológico. La ecuación del BHA en una cuenca aislada puede escribirse (Zimmermann, 2000):

$$P = ET + A \pm \Delta S \pm \Delta H \pm \Delta G \tag{2.1}$$

donde ΔS es la variación anual de almacenamiento superficial, ΔH es la variación anual de almacenamiento en humedad de suelo y ΔG es la variación anual de almacenamiento subterráneo.

El primer nivel de almacenamiento por intercepción en follaje (F) no interviene por cuanto es de carácter transitorio, al cabo de un año la cantidad de agua retenida se transformó en evaporación o alcanzó el suelo. Las variables de transporte interno dentro del sistema físico (goteo y escurrimiento por tronco, infiltración y exfiltración, recarga y ascenso capilar) tampoco intervienen porque al cabo de un año quedan computadas como variables de salida o de almacenamiento (Zimmermann, 2000).

La precipitación (P) es un proceso natural episódico pero en el BHA se la considera una variable que resulta la suma de los aportes individuales de cada tormenta. Depende de las características climatológicas del lugar y es la señal de entrada al sistema (en cuencas rurales) y la más importante del ciclo (Zimmermann, 2000).

La evapotranspiración (ET) es una salida del sistema y representa un fenómeno continuo, pudiéndose obtener su valor en forma indirecta. Es habitual agregar la (ET) a nivel mensual, aunque en ocasiones

se suele trabajar con valores diarios. Depende de las características climatológicas del lugar, pero además el máximo está doblemente condicionado por el agua disponible en el sistema físico y por la capacidad evaporante de la atmósfera (Zimmermann, 2000).

Las variables de almacenamiento superficial (S), en el suelo (H) y freático (G) fluctúan entre un mínimo y un máximo que dependen de las características fisiográficas, geomorfológicas, vegetación, suelo y subsuelo. En la ecuación del BHA estos términos se computan como variación con respecto al año anterior (Zimmermann, 2000).

El escurrimiento superficial (A) es un fenómeno continuo, pero puede ser nulo en algunos períodos del año. Su valor anual se obtiene por integración de los períodos con escurrimiento no nulo. Los valores anuales presentan la mayor variabilidad porque son el resultado de todos los procesos anteriores. (Zimmermann, 2000).

2.1.1.2 Cuenca Hidrológicamente No Aislada

La expresión del BHA puede escribirse como:

$$P + G_a = ET + A + G_p \pm \Delta S \pm \Delta H \pm \Delta G \quad (2.2)$$

donde G_a y G_p constituyen entrada y salida de flujo subterráneo de otras cuencas.

2.1.2 Balance Medio Anual

La expresión del balance hidrológico planteado como medio de valores de una serie de años en una cuenca hidrológicamente aislada y además con un sistema estacionario en el tiempo (vale decir almacenamientos superficiales promedios, la humedad promedio del suelo y el nivel freático promedio no tienden ni a aumentar ni a disminuir) puede resumirse a la expresión (Zimmermann, 2000):

$$P_{ma} = ET_{ma} + A_{ma} \quad (2.3)$$

donde P_{ma} es la precipitación media anual durante el período (de varios años), ET_{ma} es la evaporación y evapotranspiración media anual para el período y A_{ma} es el escurrimiento medio anual para el período.

2.1.3 Balance para una Tormenta

En una cuenca rural hidrológicamente aislada si la duración de la tormenta es relativamente corta, el planteo de la cuantificación de las variables del ciclo hidrológico se considera hasta el almacenamiento superficial (S) (Zimmermann, 2000):

$$P = \Delta F + \Delta S + I + A_s \quad (2.4)$$

La evaporación a partir del almacenamiento por intercepción de follaje no se computan porque es mínima durante la lluvia e inmediatamente después. A medida que el período de tiempo aumenta estos valores pueden llegar a ser no despreciables. Las variaciones de ΔF y ΔS son siempre positivas (aumentan) y su valor final dependerá de las condiciones iniciales. En general estos procesos "toman" parte de la lluvia en los tiempos iniciales de la tormenta. La infiltración (I) pasa a ser una variable de transporte interno del sistema (como por ejemplo en el BHA) a ser una variable de salida. Si se despeja el escurrimiento superficial de ec. (2.4):

$$A_s = P - \Delta F - \Delta S - I \quad (2.5)$$

obsérvese que si se considera que las variaciones de almacenamiento y la infiltración están acotadas a valores máximos, todo aumento de la precipitación se traducirá en un aumento de escurrimiento directo. Además, teniendo en cuenta que la capacidad de infiltración depende de la velocidad con que el agua ingresa al suelo, la cantidad de agua a aportar al escurrimiento superficial no solo depende de la cantidad de lluvia precipitada sino de su velocidad de caída o sea la intensidad (Zimmermann, 2000).

2.2 EL BALANCE HIDROLÓGICO EN ÁREAS URBANAS

2.2.1 Impacto de la Urbanización en el Balance Hidrológico

El balance hidrológico en una cuenca rural es alterado al producirse una urbanización. Esta alteración mayormente se traduce en el aumento de escurrimiento superficial, reducción de recarga natural de acuíferos, reducción de evapotranspiración y en casos aumento de humedad del suelo y recarga artificial por pérdidas de la red de provisión de agua. Tucci y Genz (1995) presentan una las características de una alteración típica del balance hidrológico anual en un área urbana, considerando apenas la entrada de agua desde lluvia (Figura 2.3). En el ejemplo el escurrimiento superficial era de alrededor del 10% de la precipitación en el caso de un estado preurbanización y luego post urbanización el escurrimiento entre el drenaje por conductos y superficial llega al 72% de la precipitación.

Además de la precipitación y la correspondiente recarga, el acuífero recibe parte del agua de la red de abastecimiento de agua. Según datos de Tucci y Genz (1995) las pérdidas pueden ser entre el 10% y 50% del volumen transportado en la red de provisión. Este nuevo aporte al acuífero puede llegar en términos de lámina entre 100 y 300 mm al año (Lerner, 1990 citado por Tucci y Genz, 1995) en función de la densidad poblacional y de la red de abastecimiento. Por ejemplo en la ciudad de San Pablo, considerando un caudal medio de abastecimiento de 54 m³/s, un 35% se pierde en un área de 700 km², obteniéndose una recarga de 851 mm anuales (Tucci y Genz, 1995).

Por otra parte, existen pérdidas en las redes de drenaje pluvial y cloacal que también operan como recarga, en tanto que en ciudades sin red de cloacas todos el escurrimiento cloacal es una recarga a través de pozos negros.

La evapotranspiración se altera de acuerdo a la época del año y el clima. En períodos con altas temperaturas es probable que debido al calor almacenado en pavimentos, techos, hormigones, etc. produzca un aumento de la ET (y la evaporación). En cambio en otros períodos (de temperaturas medias y frías) es probable que ocurra una reducción de la ET (Tucci y Genz).

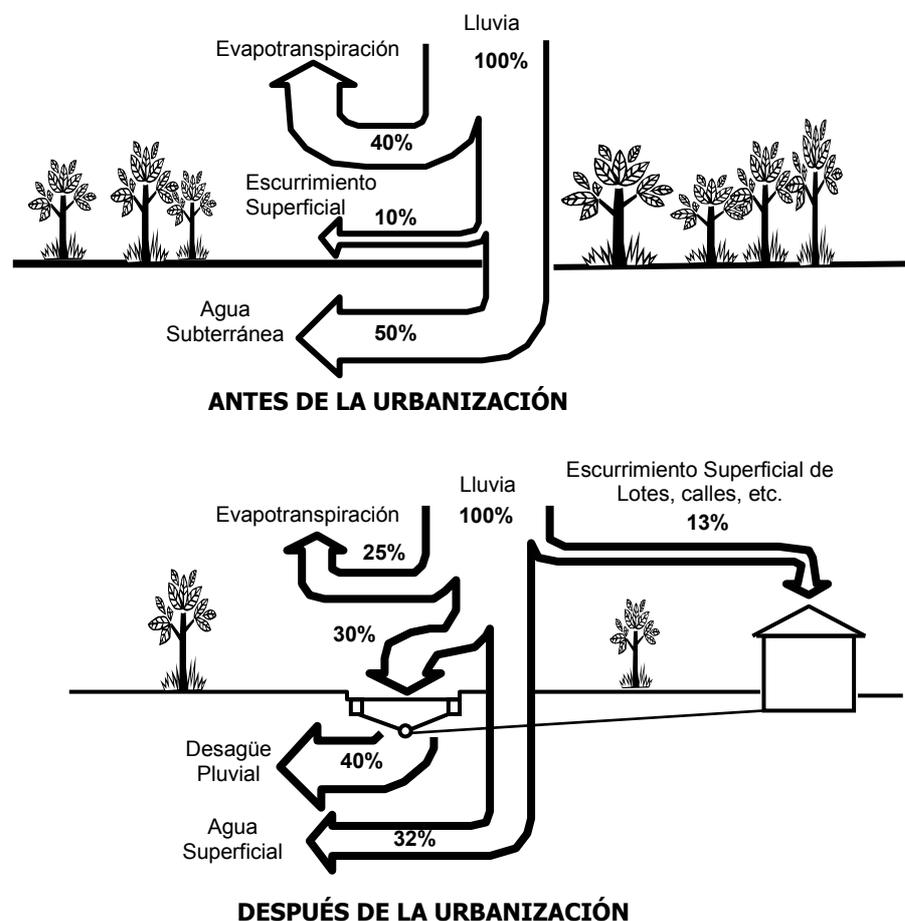


Figura 2.3. Características de la Perturbación del Balance Hidrológico en Áreas Urbanas.
Fuente: OECD (1986) citado por Tucci y Genz (1995)

2.2.2 Objetivos de los Estudios de Balance Hidrológico en Áreas Urbanas

Teniendo en cuenta el cambio de escenario hídrico que significa el análisis del balance hidrológico en zonas urbanas respecto al BH típico de cuencas rurales (reseñado en punto anterior), los objetivos de los estudios del balance de agua en áreas urbanas pueden ser múltiples. Van de Ven (1990) cita como las principales razones para llevar a cabo el estudio de balance a:

- (i) Verificación de los procesos del sistema;
- (ii) Cuantificación del flujo en los diferentes procesos;
- (iii) Cuantificación de las cargas de contaminantes en ciertos procesos del sistema;
- (iv) Evaluación período a período de variaciones de parámetros a largo plazo;
- (v) Incidencia de impacto por cambios en la geografía del área;
- (vi) Evaluación de parámetros

Una pregunta que surge es sobre cual es el interés del balance de agua en un abordaje integral de la gestión del agua en ambientes urbanos?. La respuesta tiene que ver con la cuantificación del flujo y carga (contaminantes y sedimentos) a lo largo de ciertos caminos del flujo, tanto para el conocimiento propio del sistema hidrológico urbano, como para la evaluación de los efectos de la urbanización sobre el sistema en vista a la mitigación de los efectos perturbadores. Es claro que el aporte de conocimiento del balance de agua urbana cobra mayor importancia cuando se estudia el sistema a mediano y largo plazo en escalas de tiempos mayores a la de los episodios de tormentas individuales.

2.2.3 Procesos del Sistema Hidrológico Urbano

Los sistemas hidrológicos urbanos pueden diferir de ciudad a ciudad en función de:

- aspectos sociales, culturales y económicos de la población;
- diferentes grados de desarrollo urbano
- diferentes regiones geográficas
- diferentes climas

Sin embargo a pesar de las diferencias, todos se caracterizan por dos fuentes de agua y dos procesos que involucran el transporte del flujo de mayor relevancia. Las fuentes son la atmósfera (lluvia y nieve) y el suministro de agua potable y los procesos de circulación son el escurrimiento superficial y escurrimiento por redes de conductos (rápidos) y el sumamente más lento escurrimiento subterráneo. El sistema hidrológico urbano en términos de cantidad de escurrimiento se representa en la Figura 2.4.

Van de Ven (1990) resalta algunas cuestiones; (i) el agua puede drenar de áreas pavimentadas a no pavimentadas y viceversa; (ii) ciertos tipos de pavimentos pueden resultar claramente permeables (bloques, baldosas, adoquines); (iii) las fisuras y hendiduras en redes de conductos pueden permitir el flujo desde los conductos al acuífero o viceversa; (iv) las pérdidas en el suministro de agua potable pueden ser importantes fuentes de recarga de acuíferos; (iv) la interacción con los acuíferos puede influir en el drenaje en forma extensiva.

Considerando aspectos de calidad de agua Van de Ven (1990) presenta un esquema diferente del sistema hidrológico (Figura 2.5). El autor puso la mayor atención a factores que influyen sobre la demanda de oxígeno, nutrientes, microcontaminantes y contaminación bacteriana.

Notar la diferencia entre ambos planteamientos del sistema hidrológico. En el esquema en términos de calidad aparecen nuevas fuentes y posibles procesos. En un futuro la descripción del sistema en términos de calidad y cantidad debería aproximarse, en vistas a un abordaje integral de la gestión del agua urbana.

Los balances son significativos para estudios de largos períodos de tiempo. Los procesos con variación a corto plazo deben ser integrados a intervalos de tiempo superiores a su propia variación, por ej. las pérdidas de agua de un sistema de provisión de agua potable, si bien el proceso puede presentar una variación horaria, puede agregarse a escala diaria, mensual o anual. Para una correcta interpretación de los procesos agregados a escalas superiores, deben ser conocidas las escalas propias de cada proceso. Una cuantificación de las escalas de tiempo de algunos procesos se presenta en la Figura 2.6.

Las escalas de tiempo de los procesos de precipitación van desde unos pocos segundos hasta casos de horas. Para el escurrimiento superficial y por redes de conductos los valores los mayores períodos tem-

porales son del orden de horas a días en tanto que la escalas de los procesos de flujo subterráneo puede ser de semanas a años. Para una mejor interpretación podemos ejemplificar que una lluvia de 30 minutos de duración, puede tener una influencia sobre el escurrimiento superficial y por conductos de algunas horas, una influencia sobre cuerpos receptores superficiales de algunos días y sobre un acuífero profundo desde unos días hasta años.

En lo referente a calidad la carga de lavado es el único proceso cuya escala de influencia es inferior al día, otros procesos como demanda de oxígeno, bacterias, eutroficación, etc tienen escalas sumamente superiores.

2.2.4 El Balance en Cuencas Urbanas

Datos de mediciones sobre balances de agua en zonas urbanas son escasos. Para un mejor comprensión del fenómeno a modo ilustrativo se muestran datos presentados por Van de Ven (1990) correspondientes a mediciones de balances de aguas anuales de 3 cuencas urbanas en Suecia (ciudad de Lund) (Niemczynowicz, 1990) y Holanda (ciudad de Lelystad). Los tres balances de agua anuales involucrados se ilustran en la Figura 2.7. Las cuencas corresponden a un predio de estacionamiento de 7600 m², una zona de viviendas de 2 ha de superficie y una cuenca de 19.4 km². Las características generales de las cuencas se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 2.1. Características de las cuencas estudiadas. Fuente: Van de Ven (1990)

	Cuenca en ciudad de Lund	Barrio de Viviendas en Lelystad	Estacionamiento en Lelystad
Area Total	19.4 km ²	0.02 km ² (2 ha)	0.0076 km ² (0.76 ha)
Pendiente	0-4%	< 0.5%	<0.5%
Superficie Pavimentada y Techos	37%	41%	93%
Pavimento permeable (a)	No hay datos	11%	51%
Sistema combinado (b)	3.25 km ²	0	0
Sistema separativo (b)	4.0 km ²	0.0082 km ²	0.0070 km ²
Habitantes	60000	200	0
Suelo	Arena + Arcilla	Arcilla	Arcilla

(a) bloques y baldosas permeables; (b) Superficie pavimentada y techos conectadas

Las ciudades donde pertenecen las cuencas están localizadas en zonas de clima marítimo templado. El uso de agua de red de provisión para riego está permitido como pasa en muchas ciudades. Según otros autores, están ausentes en los balances significativas entradas al sistema provenientes del rocío y de neblina. También se aclara que las pérdidas desde la red de provisión de agua potable en Lelystad no son mencionadas.

En todos los balances puede observarse que la cantidad de escurrimiento pluvial descargada directamente en el cuerpo receptor es solamente una fracción de la entrada de agua al sistema, aún con un sistema de desagües separativo.

Obsérvese el escurrimiento superficial relativamente alto (39% de la entrada total) en el caso del estacionamiento. Esto es una clara evidencia de la permeabilidad del pavimento. Además, se explica la percolación elevada debido a la escasa evapotranspiración. El pavimento actúa como un bloqueador de la evaporación para el agua infiltrada y el descenso de percolación por evaporación es prácticamente nulo. El incremento de recarga de acuífero puede darse también por el escurrimiento desde áreas impermeables a áreas permeables.

Mediante el uso de pavimentos porosos y la estimulación de conectar áreas impermeables con permeables, es posible mitigar los efectos de la urbanización (al menos en términos de cantidad) sobre la recarga subterránea. Debe prestarse especial atención que desmedidas prácticas de infiltración puede producir el efecto no deseado de elevación de la napa freática, especialmente en ciudades en las cuales en sus alrededores rurales existen problemas de ascenso de napa por causas regionales.

La provisión pública de agua potable es una entrada importante al sistema, especialmente en períodos de sequía y zonas áridas. En muchas ciudades esta agua es tratada al menos primariamente después de su uso, antes de ser descargada a un cuerpo receptor. Posibles filtraciones desde acuíferos a la red

de desagües cloacales o pluvio-cloacales puede hacer funcionar a estos como drenes de depresión del acuífero e incrementar notablemente el caudal entrante a la planta de tratamiento. Esto podría influenciar negativamente en la eficiencia de la planta de tratamiento.

El punto de vista débil en los balances presentados es la estimación de la evapotranspiración. El conocimiento de la transpiración de las distintas especies vegetales existentes en las ciudades no es aún preciso. Por otro lado la evaporación desde pavimento es de muy difícil evaluación a causa de que el flujo de calor subsuperficial es desconocido y la disponibilidad de agua sobre el pavimento es un factor incierto y altamente variable.

Algunos datos de la ciudad de Rosario, Argentina.

En lo referente a pérdidas del sistema de provisión de agua potable, en la ciudad de Rosario con aproximadamente 1000000 distribuidos en 100 km² de superficie urbanizada, se verifican pérdidas del sistema de suministro entre 10-20%, convertidos valores anuales en la superficie urbanizada esto arroja valores cercanos a 200-300 mm anuales. Considerando que la lluvia media anual es de 950 mm, puede inferirse la importancia relativa de la transferencia del sistema de provisión al medio subterráneo. Este flujo en parte drena hacia vías de desagües naturales a cielo abierto, parte drena y filtra hacia conductos subterráneos (ingresando por grietas y fisuras) y parte drena como flujo subterráneo hacia el río Paraná, que es el gran cuerpo receptor de los desagües pluviales y cloacales de la región.

Respecto a estimaciones de otros procesos, el escurrimiento directo puede valorizarse en un 30-40% del valor de la precipitación. No existen cuantificaciones precisas de evapotranspiración urbana, flujo neto de escurrimiento subterráneo y variación anual de almacenamiento subterráneo a nivel del ambiente urbano.

2.3 ECUACIÓN DEL BALANCE DE AGUA

Al igual que en cuencas rurales, la ecuación de balance de agua básicamente representa el resultado neto entre el flujo entrante y saliente al volumen de control considerado y la variación de almacenamiento en el mismo. En áreas urbanas el volumen de control puede ser considerado con una superficie igual a la cuenca considerada y una altura desde el nivel de techo hasta una profundidad en el suelo tal que bajo esa profundidad sea posible asumir que no ocurre ningún intercambio neto de agua durante el período de interés.

Para un microcuenca como la correspondiente al barrio de viviendas (2 ha) la ecuación de balance puede formularse como:

$$P + K - E_p - E_{np} - ED - ESS = \Delta G \quad (2.5)$$

donde P es la precipitación, K es la filtración desde aguas arriba, E_p es la evapotranspiración desde áreas pavimentadas, E_{np} es la evapotranspiración desde áreas no pavimentadas, ED es el escurrimiento directo al cuerpo receptor, ESS es el escurrimiento subsuperficial al cuerpo receptor y ΔG es la variación de almacenamiento en el volumen de control subterráneo.

En el caso de una cuenca urbana con sistema de desagües combinado como la mostrada en el punto anterior, la ecuación de balance se torna más compleja y puede escribirse (sin considerar nieve):

$$P + PAP + DADC - DPTC - ED - ETP - PER = \Delta G \quad (2.6)$$

donde PAP es la provisión de agua potable, DADC es el flujo neto entre el acuífero y la red pluvio-cloacal; DPTC es la descarga a la planta de tratamiento de efluentes cloacales, ETP es la evapotranspiración total y PER es la precolación.

Una forma más general presentada por Ojo (1990) es:

$$P + S = E + \Delta F + \Delta G \quad (2.7)$$

donde S es la provisión de agua potable, E la evapotranspiración, ΔF es el escurrimiento neto (directo, subsuperficial y subterráneo) y ΔG es el cambio neto de almacenamiento.

Métodos para determinar los procesos involucrados en el balance hidrológico en cuencas rurales y que pueden tener adaptaciones a cuencas urbanas pueden encontrarse en Chow et. (1994), Orsolini et al. (2000) y Ritzema (1994) entre otros.

2.4 EL ROL DEL BALANCE DE AGUA PARA EL CONOCIMIENTO DEL SISTEMA Y EL DISEÑO INGENIERIL

Si bien el conocimiento y la experiencia hidrológica del balance de aguas en áreas urbanas es limitado, su rol en la gestión integral del agua en áreas urbanas es de relevancia. Todo conocimiento ganado desde el balance puede contribuir al planteo, estudio y análisis a mediano y largo plazo de medidas alternativas para la mejor gestión del agua urbana. Entre algunas de tales medidas y otras utilidades del conocimientos del balance de agua urbana Van de Ven (1990) cita:

- Minimización de escurrimiento a planta de tratamiento (por ej. mediante obras de infiltración de desagües pluviales, mejoramiento de evapotranspiración, etc.) en sistemas combinados.
- Minimización de efluentes y reducción de carga contaminante desde planta de tratamiento a cuerpo receptor.
- Análisis de reuso de efluentes tratados, por ej. para riego.
- Incidencia a mediano plazo de sobre los caudales máximos y volúmenes de escorrentía del uso de reservorios urbanos (secos y húmedos).
- Utilización de vegetación para evapotranspirar agua urbana.
- Utilización de pavimentos permeables para mejorar la recarga de acuíferos en casos de que la impermeabilización haya producido un déficit de la recarga.
- El flujo subterráneo es una de las vías de transporte y en casos la más importante del drenaje urbano. El uso de esta alternativa debe ser cuidadosamente estudiada en términos de contaminación.
- Control de pequeños flujos contaminantes originados en pérdidas de sistemas pluvio-cloacales y cloacales y
- Análisis de ventajas o desventajas de una determinada propuesta integral para la gestión del agua urbana.

2.5 SÍNTESIS FINAL

Los estudios e investigaciones relacionados al balance de agua en ambientes urbanos contribuyen claramente al conocimiento de los diferentes procesos del sistema hidrológico, como así también a la cuantificación de variables y parámetros. En la actualidad, la importancia del balance es siempre mencionada, pero por otro lado la mediciones al respecto son escasas y los intentos de poner en marcha programas de mediciones sistemáticas de variables involucradas son siempre relegados en las prioridades por las autoridades hídricas de las distintas jurisdicciones (municipio, provincial, nacional).

Como se ve en las diferencias de importancia de procesos involucrados en el ciclo del agua si el análisis es en términos de cantidad o en términos de calidad, los nuevos estudios deberían volcarse hacia aquellos procesos que no son significantes para la cuantificación del flujo pero que gravitan fuertemente en la calidad del agua urbana.

Los estudios reportados en bibliografía sobre el balance del agua urbana indican que debe ponerse una mayor atención a la evaluación de los componentes subterráneos del balance. Si bien el abordaje de los procesos de flujo subterráneo urbano son trabajosos y complejos (teniendo en consideración la alteración del subsuelo que hace la actividad urbana) es uno de los procesos más importantes en el drenaje de las aguas urbanas.

Otro proceso del ciclo hidrológico con déficit de conocimiento es la evapotranspiración en ambientes urbanos. Si bien el proceso es bastante bien conocido en ambientes rurales, dentro de las ciudades surgen serias heterogeneidades de cobertura superficial que agregan que agregan incertidumbre a los clásicos métodos utilizados en cuencas mayormente rurales.

Por último es de interés reafirmar que el conocimiento del balance de agua en ambientes urbanos constituye un importante basamento la definición de acciones a seguir en la gestión integral del agua urbana, a escalas de mediano y largo plazo.

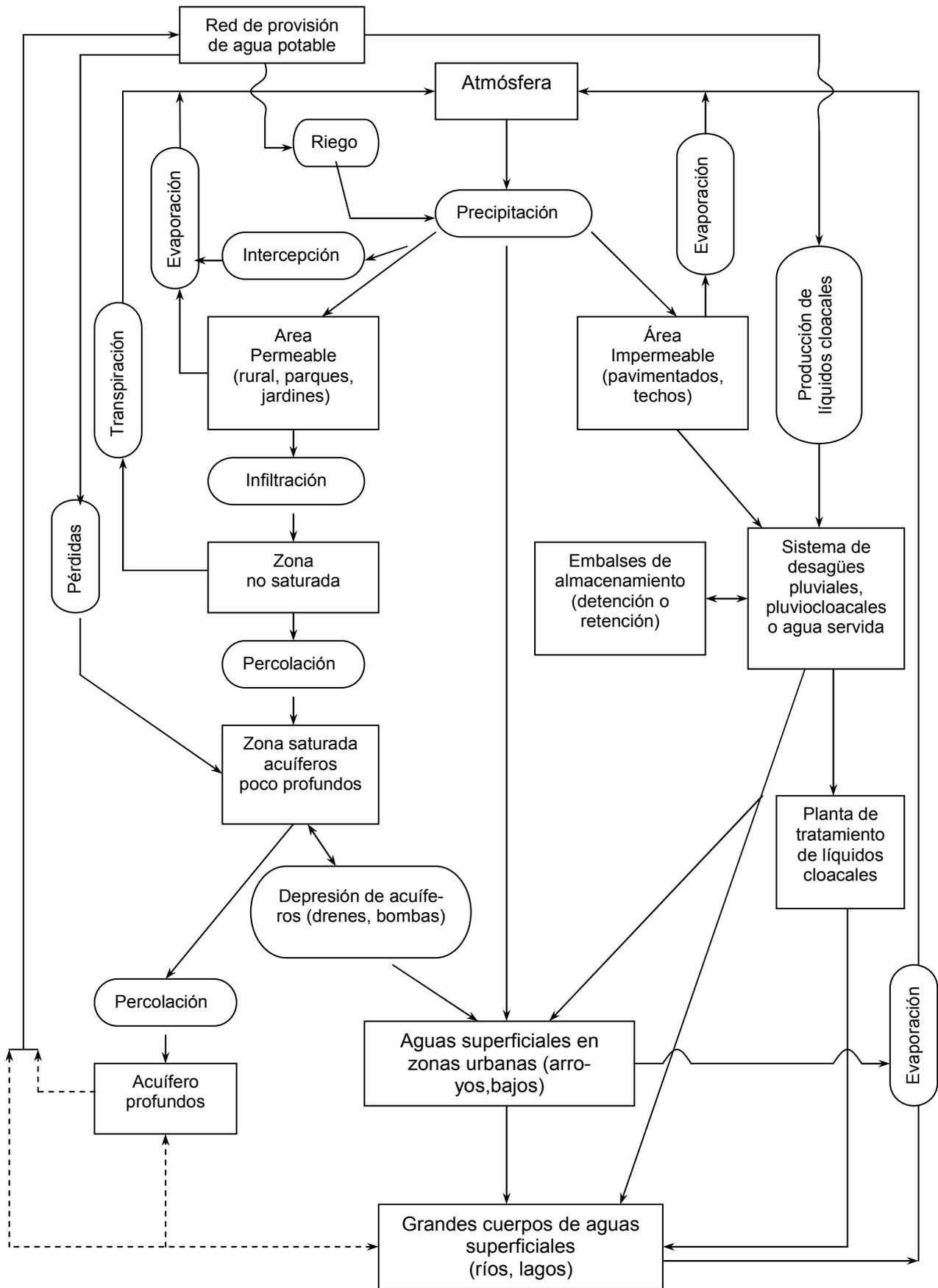


Figura 2.4 El Sistema Hidrológico Urbano en términos de cantidad de agua. Fuente: Van de Ven (1990)

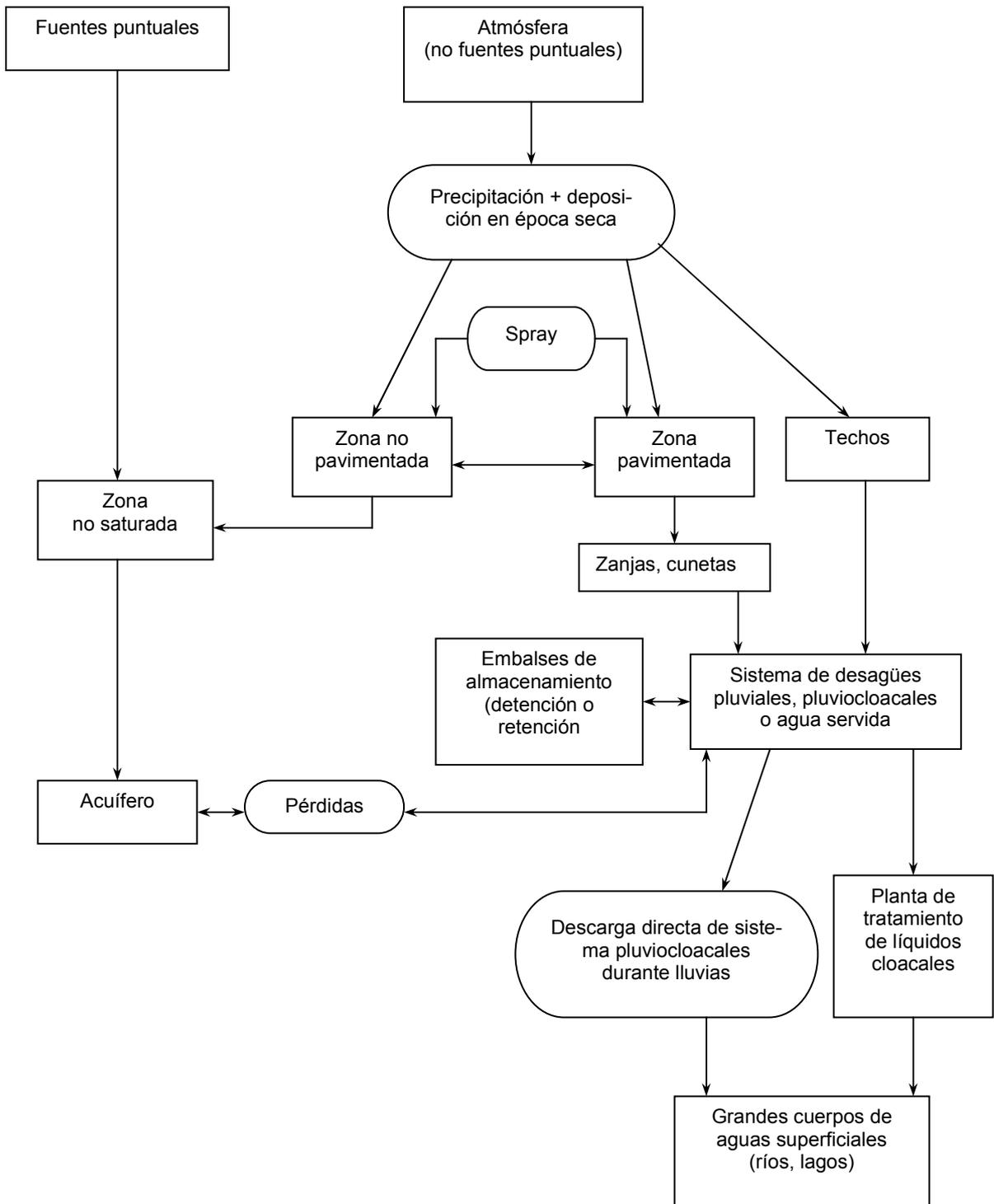


Figura 2.5 El Sistema Hidrológico Urbano en términos de calidad de agua. Fuente: Van de Ven (1990)

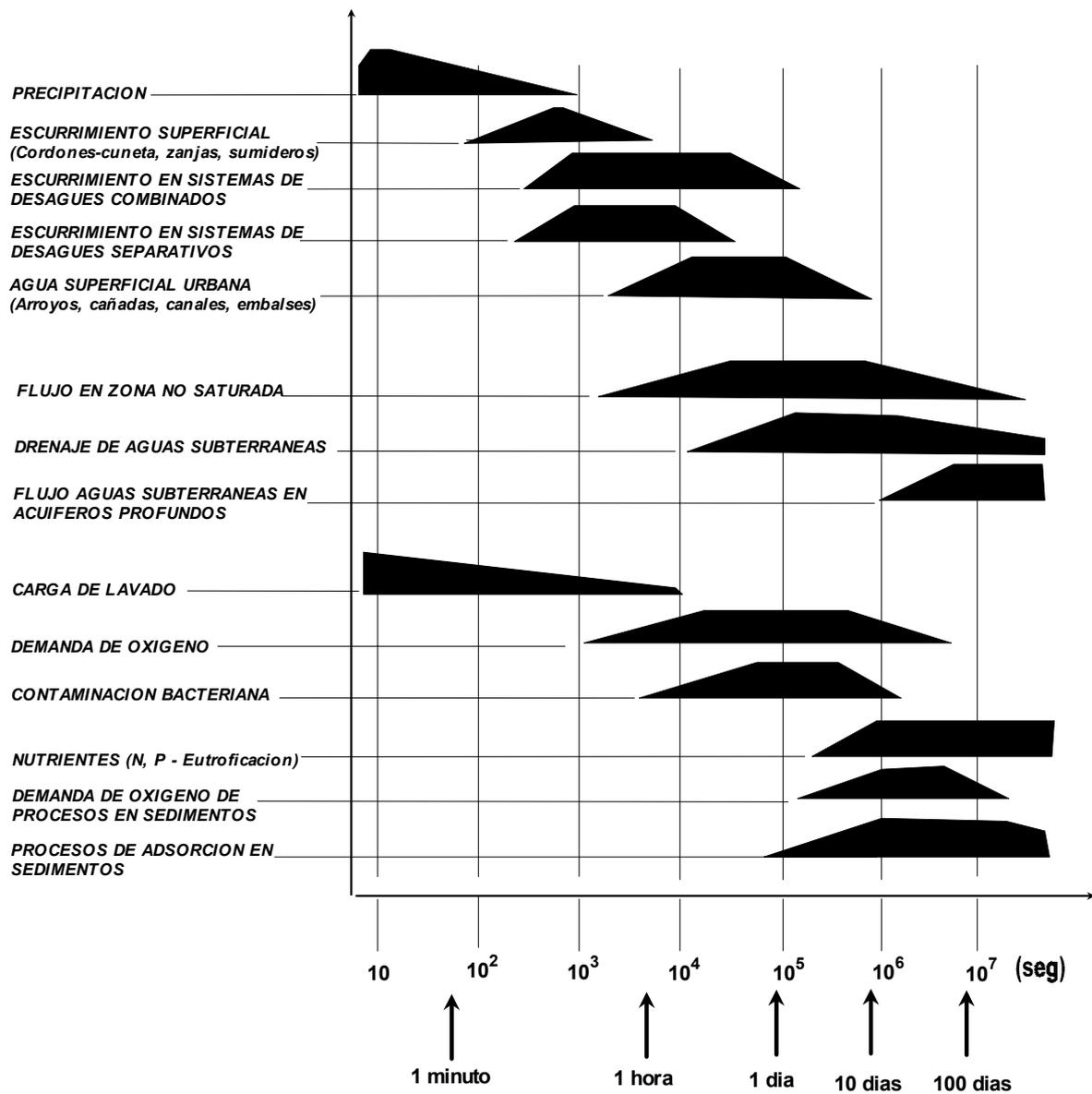
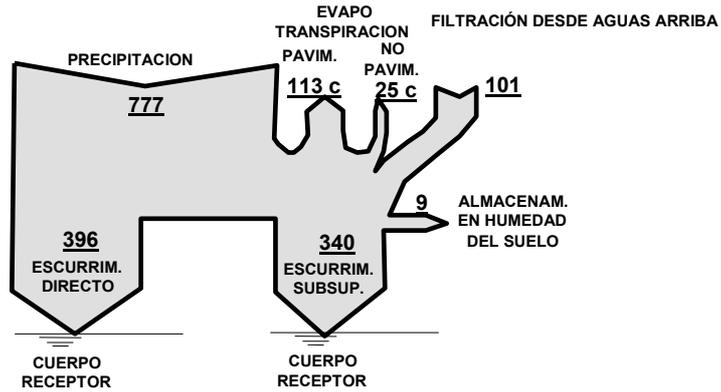


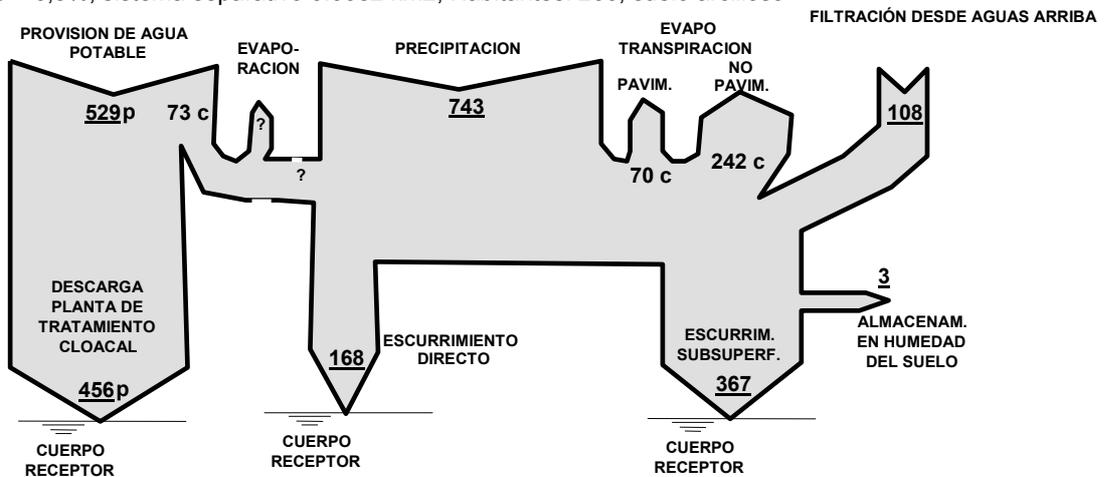
Figura 2.6. Escala de tiempo de algunos Procesos involucrados en el Escurrimiento Pluvial Urbano.
Fuente: Van de Ven (1990)

Predio de Estacionamiento. Lelystad (Holanda). A= 0.0076 km²; 93% pavimentado; pavimento permeable 51% ; pendiente<0,5% ; suelo arcilloso; sistema separativo en 0,0070 km²

REFERENCIAS:
396 VALOR MEDIDO
113 c VALOR CALCULADO
242 p VALOR PROMEDIO DE LA CIUDAD



Área con grupo de viviendas. Lelystad (Holanda). A= 0.020 km²; 41% pavimentado y techos; pavimento permeable 11%; pendiente < 0,5%; sistema separativo 0.0082 km²; Habitantes: 200; suelo arcilloso



Ciudad de Lund (Holanda). A= 19.4 km²; 37% pavimentado y techos; Pendiente= 0 a 4%; Sistema separativo 4.0 km²; Sistema combinado 3.25 km²; Habitantes: 60000; suelo arena+arcilla

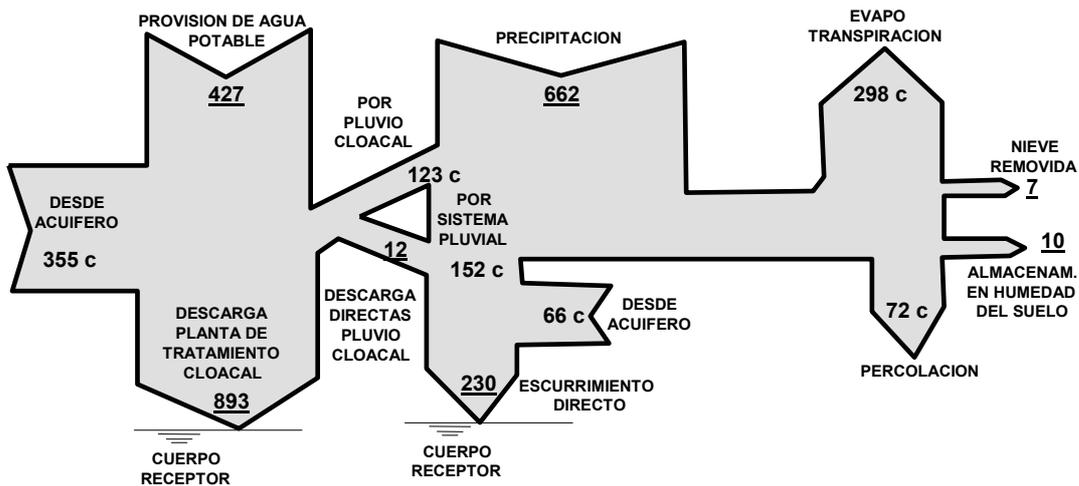


Figura 2.7 Balances de agua anuales en 3 cuencas urbanas. Fuente Van de Ven (1990) y Niemczynowicz (1990)

2.6 BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994), Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana, Buenos Aires. 584 p.
- Niemczynowicz J., (1990), A Detailed Water Budget for the City of Lund as a Basis for the simulation of different future Scenarios en *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas* (Massing H., Packman J. y Zuidema F., editores), IHAS Pub. N° 198. pp. 51-58.
- Ojo, O. (1990), Recent Trends in Precipitation and The Water Balances of Tropical Cities, en *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas* (Massing H., Packman J. y Zuidema F., editores), IHAS Pub. N° 198. pp. 33-41.
- Orsolini H., Zimmermann E. y Basile P. (2000), Hidrología Procesos y Métodos, UNR Editora, Rosario. 319 p.
- Ritzema H. (Editor in Chief) (1994), Drainage Principles and Applications, ILRI Publication 16, Wageningen, Holanda.
- Tucci C. y Genz F. (1995), Controle do Impacto da Urbanização, Cap. 7 Drenagem Urbana, (Tucci C., Laina Porto R. y Barros M., 1995), Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre. pp- 277-347.
- Van de Ven F. (1990), Water Balances of Urban Areas, en *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas* (Massing H., Packman J. y Zuidema F., editores), IHAS Pub. N° 198. pp. 21-32
- Zimmermann E. (2000), Ciclo Hidrológico en la Naturaleza, Cap. I Hidrología Procesos y Métodos, (Orsolini H., Zimmermann E. y Basile P., 2000), UNR Editora, Rosario. pp-1-18.