

Recursos Hídricos

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesor James McPhee.

El ciclo hidrológico



Procesos del ciclo hidrológico

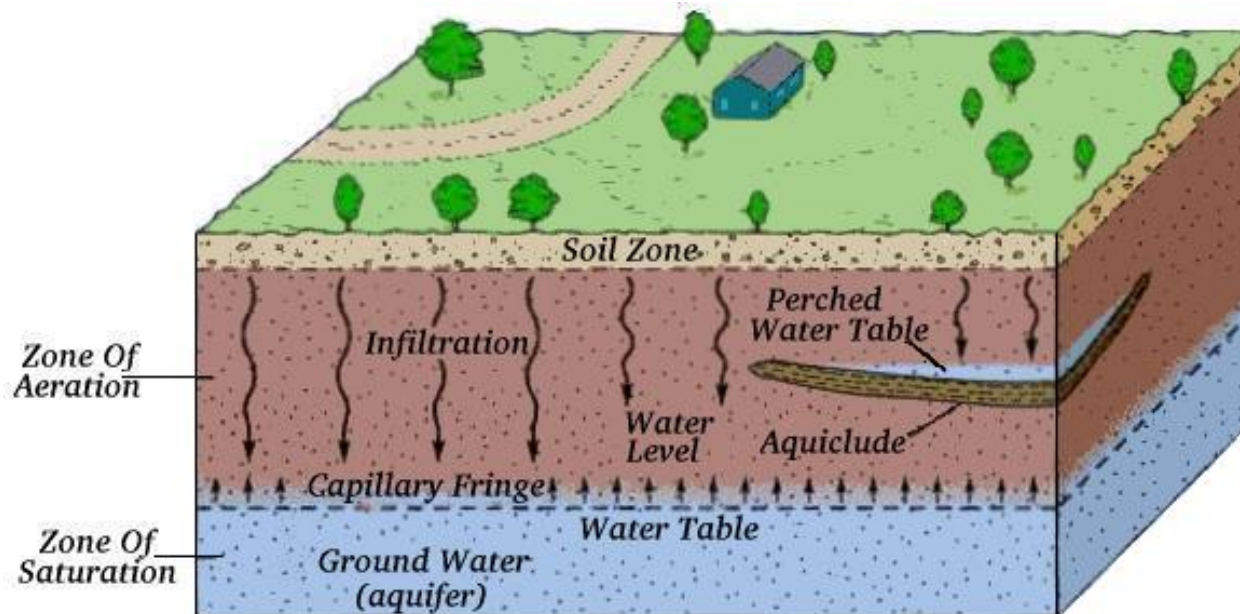
- **Precipitación:** agua (en estado líquido o sólido) proveniente de la atmósfera que cae sobre la superficie
- **Evaporación:** flujo de agua desde cuerpos de agua superficiales (lagos, ríos, humedales, etc) y desde el suelo sin vegetación
- **Transpiración:** flujo de agua desde las plantas hacia la atmósfera
- **Evapotranspiración:** Evaporación + transpiración. Depende de factores tales como radiación solar, temperatura del aire, humedad, velocidad del viento, tipo de cubierta vegetal (transpiración).
- **Escorrentía superficial:** Flujo de agua sobre la superficie terrestre
- **Percolación:** flujo de agua desde la superficie hacia el subsuelo
- **Deshielo:** derretimiento de agua acumulada en forma sólida
- **Sublimación:** paso del agua de estado líquido al gaseoso

Agua superficial y subterránea

El balance de masas que incorpora estos procesos se denomina balance hidrológico

Agua superficial se define como toda el agua que está expuesta a la atmósfera, incluyendo cursos de agua (ríos, esteros) y cuerpos de agua (lagos, lagunas).

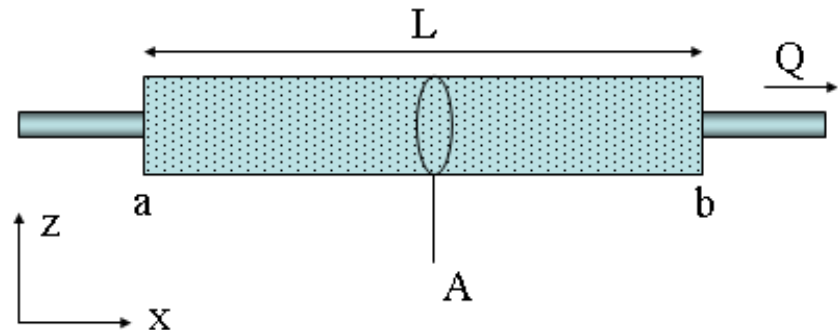
El **agua subterránea** se encuentra en el subsuelo, incluyendo la zona no saturada (humedad) y la zona saturada.



Agua subterránea

El movimiento del agua en la zona saturada se puede describir a partir de la Ley de Darcy, que relaciona la velocidad del flujo con el gradiente hidráulico:

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{(h_b - h_a)}{L}$$



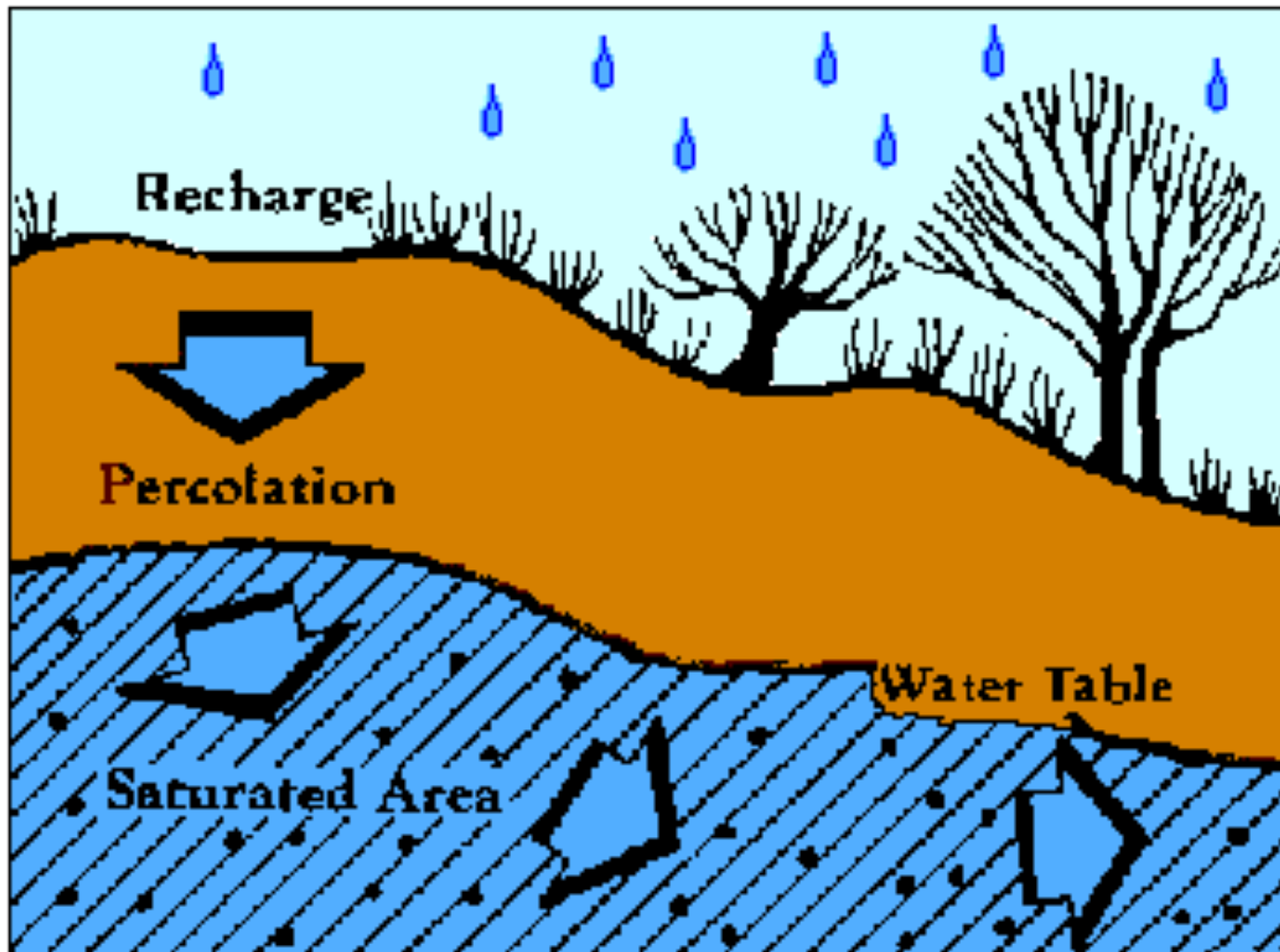
h : nivel piezométrico

$h_b - h_a$ es la pérdida de carga entre los puntos a y b

K : conductividad hidráulica. Depende de las propiedades del medio (permeabilidad) y del fluido (viscosidad).

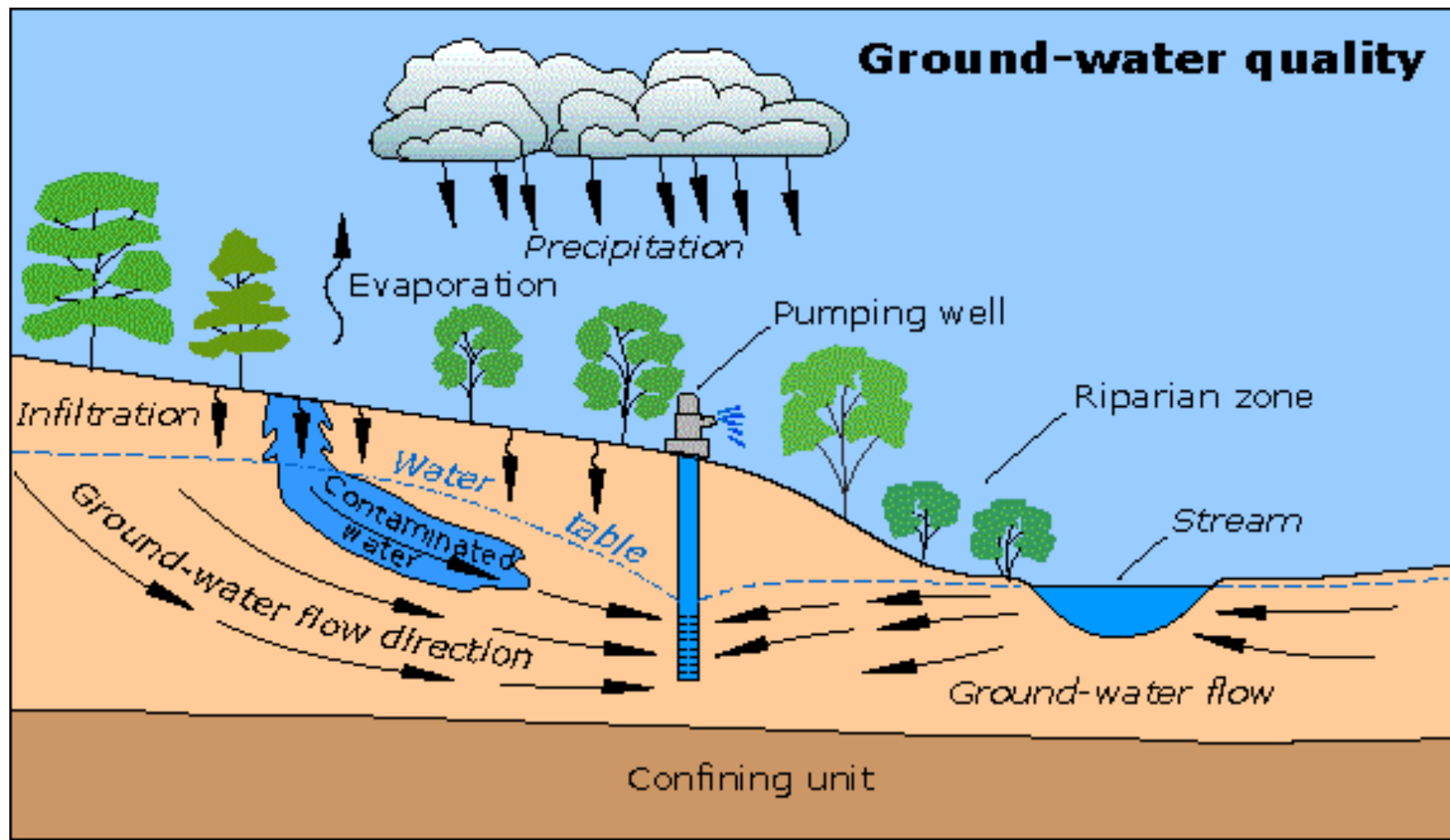
$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dx}$$

Flujo en acuíferos

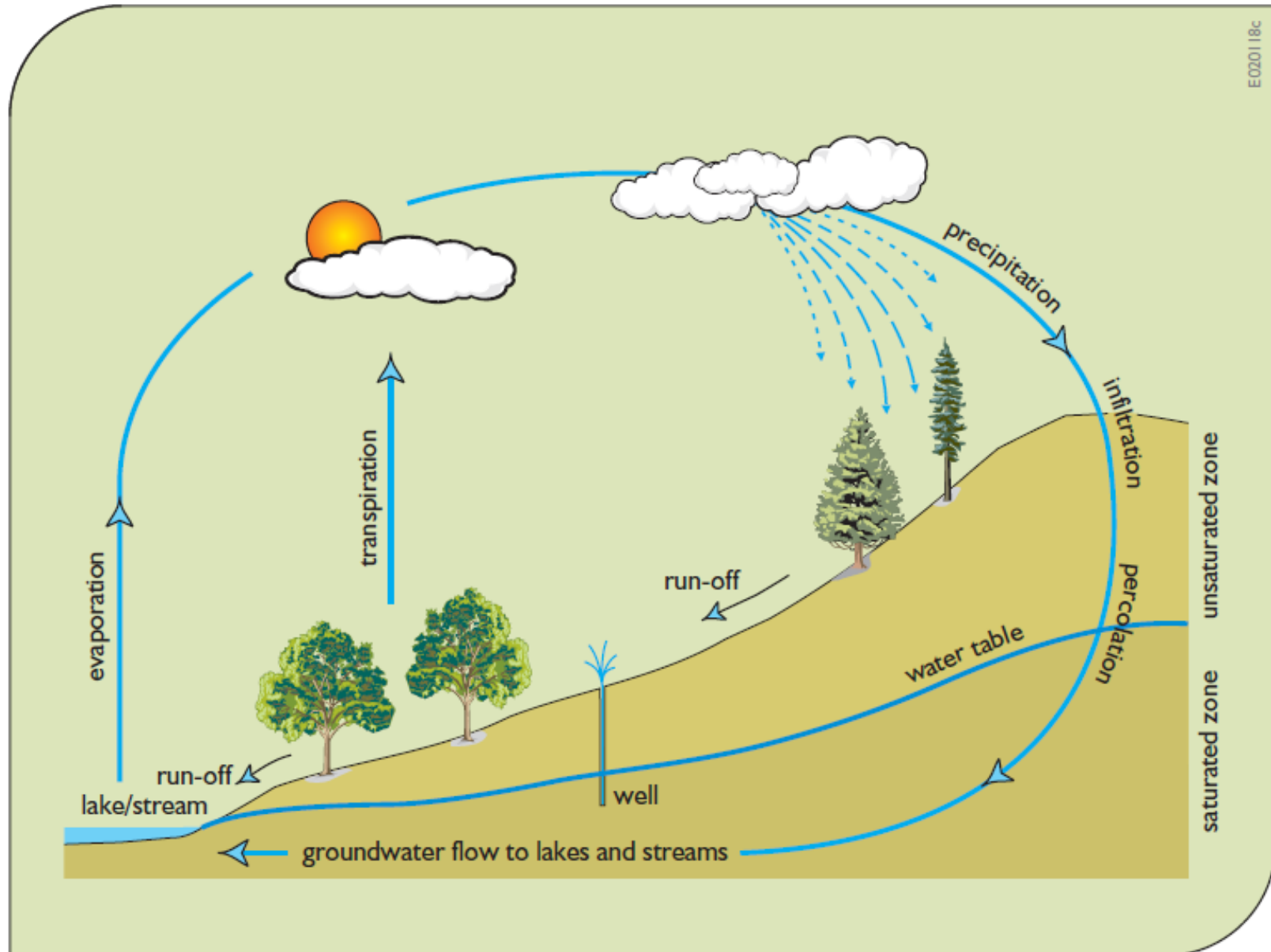


Flujo en acuíferos

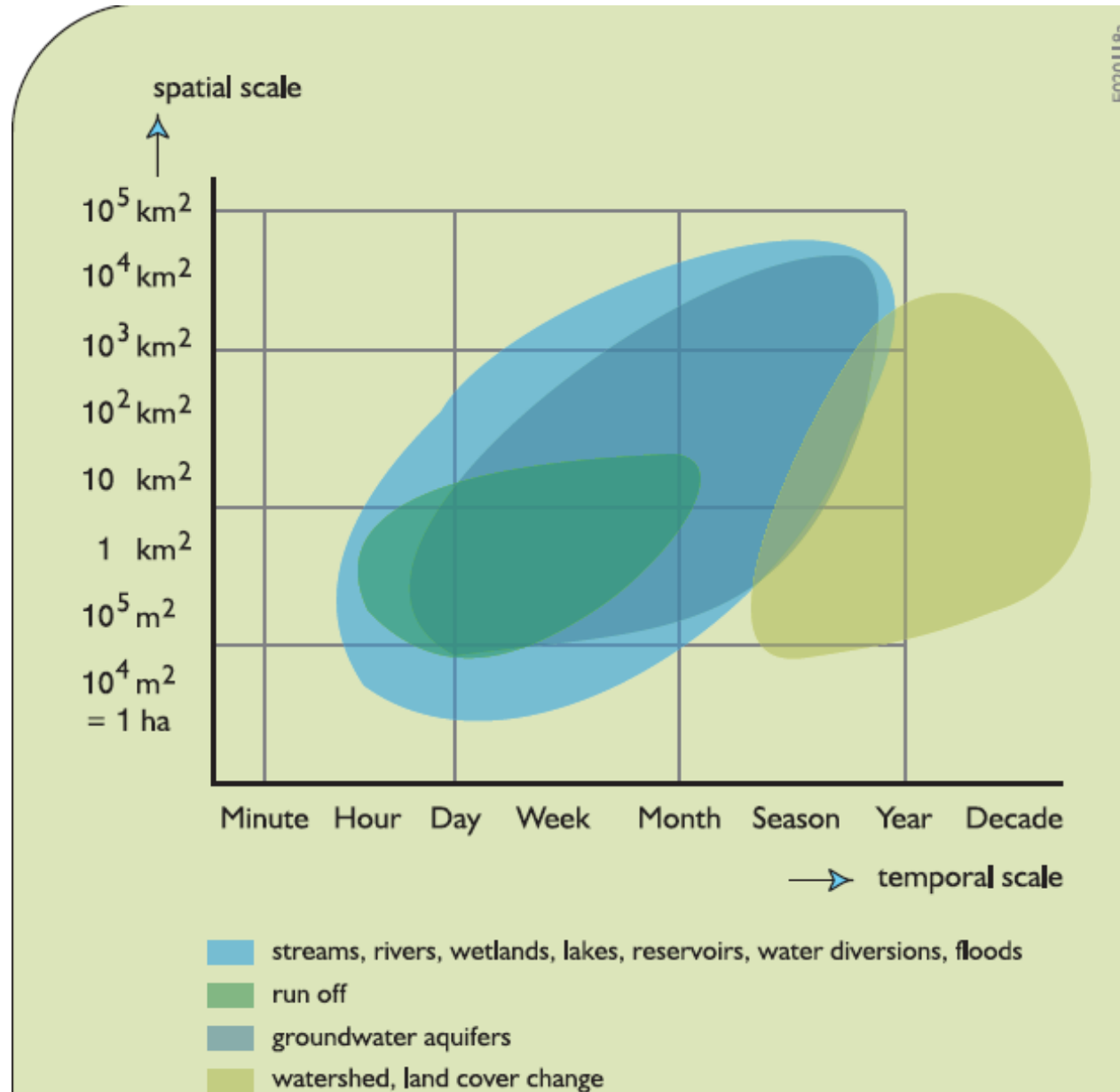
El agua almacenada en un acuífero se puede extraer usando pozos de bombeo.



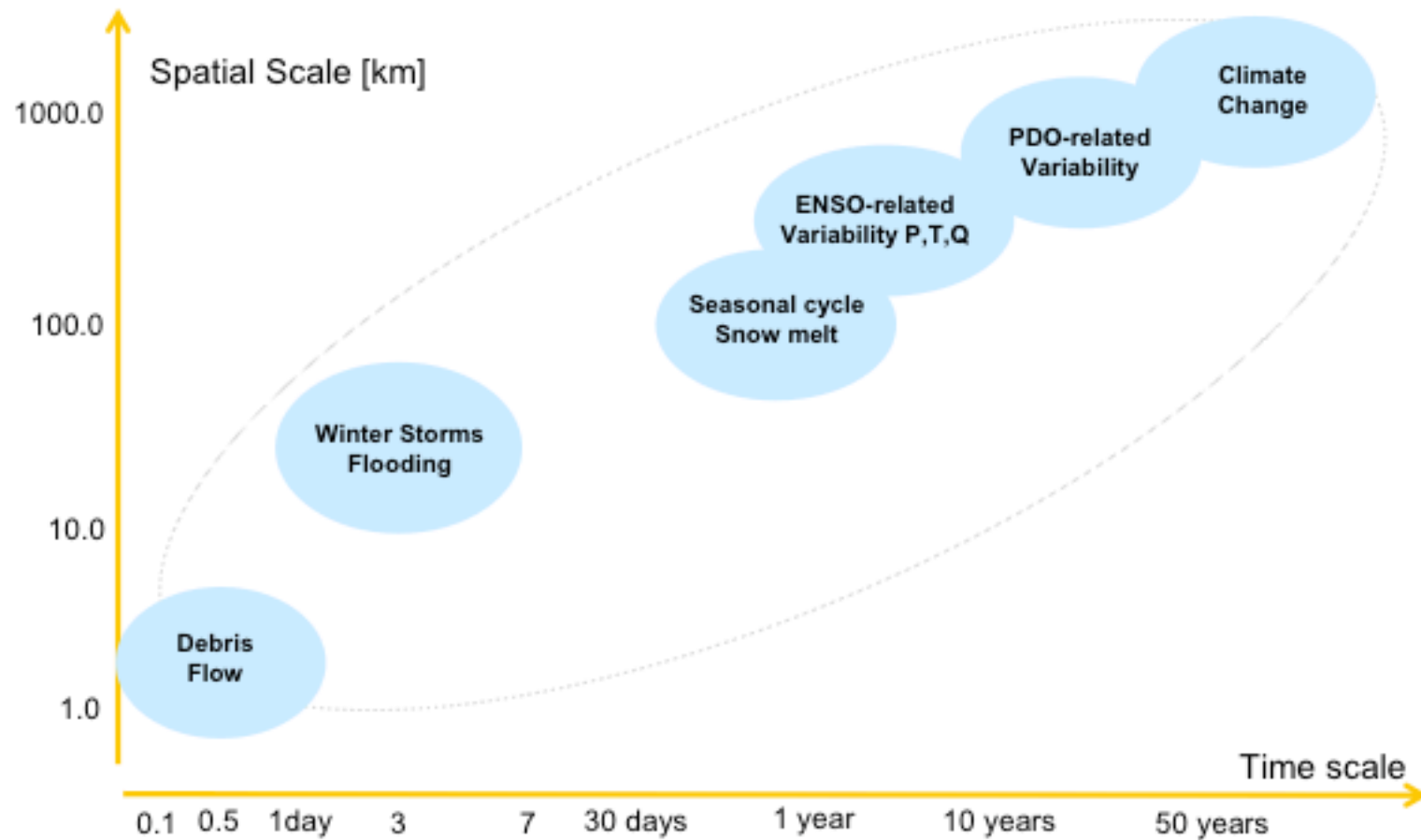
La cuenca hidrográfica



Escalas espaciales y temporales

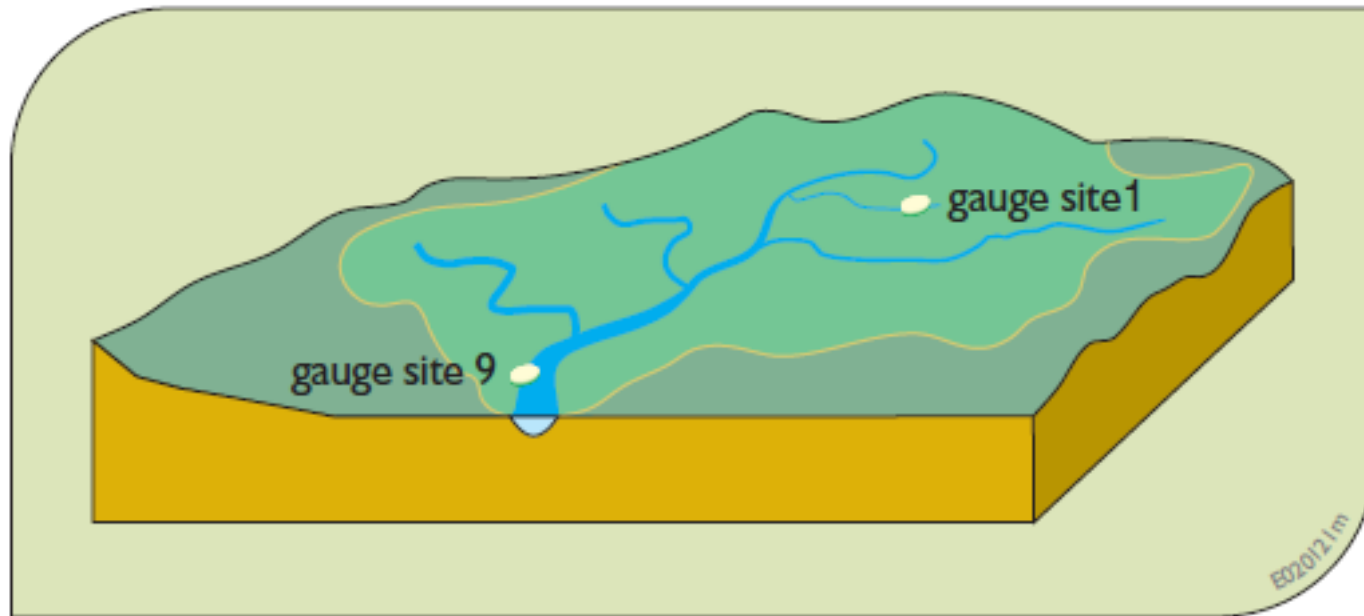


Escalas espaciales y temporales



Estimación de caudales

- Cuencas con información fluviométrica: Análisis de estadísticas de caudales



- Cuencas sin información fluviométrica
 - Transposición de caudales con cuenca homologable
 - Fórmulas precipitación-escorrentía
 - Modelos hidrológicos

Estimación de caudales

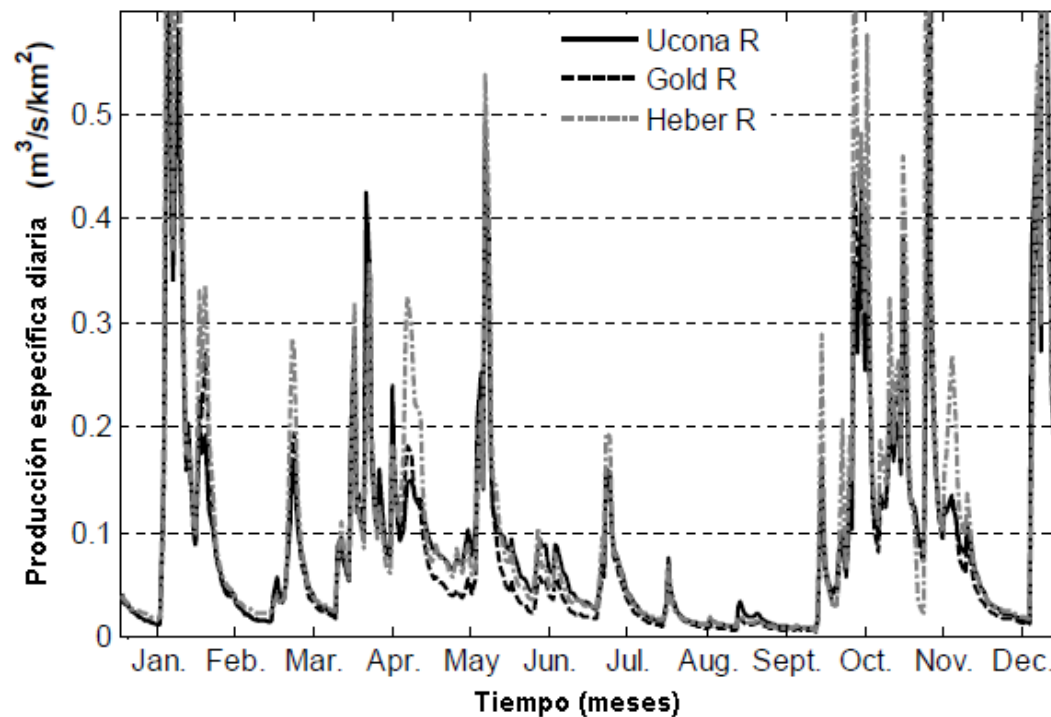
- Transposición de caudales con cuenca homologable

$$\frac{1}{P_1} \frac{Q_1}{A_1} = \frac{1}{P_2} \frac{Q_2}{A_2}$$

Q: Caudal medio en un periodo de tiempo determinado (mes o año).

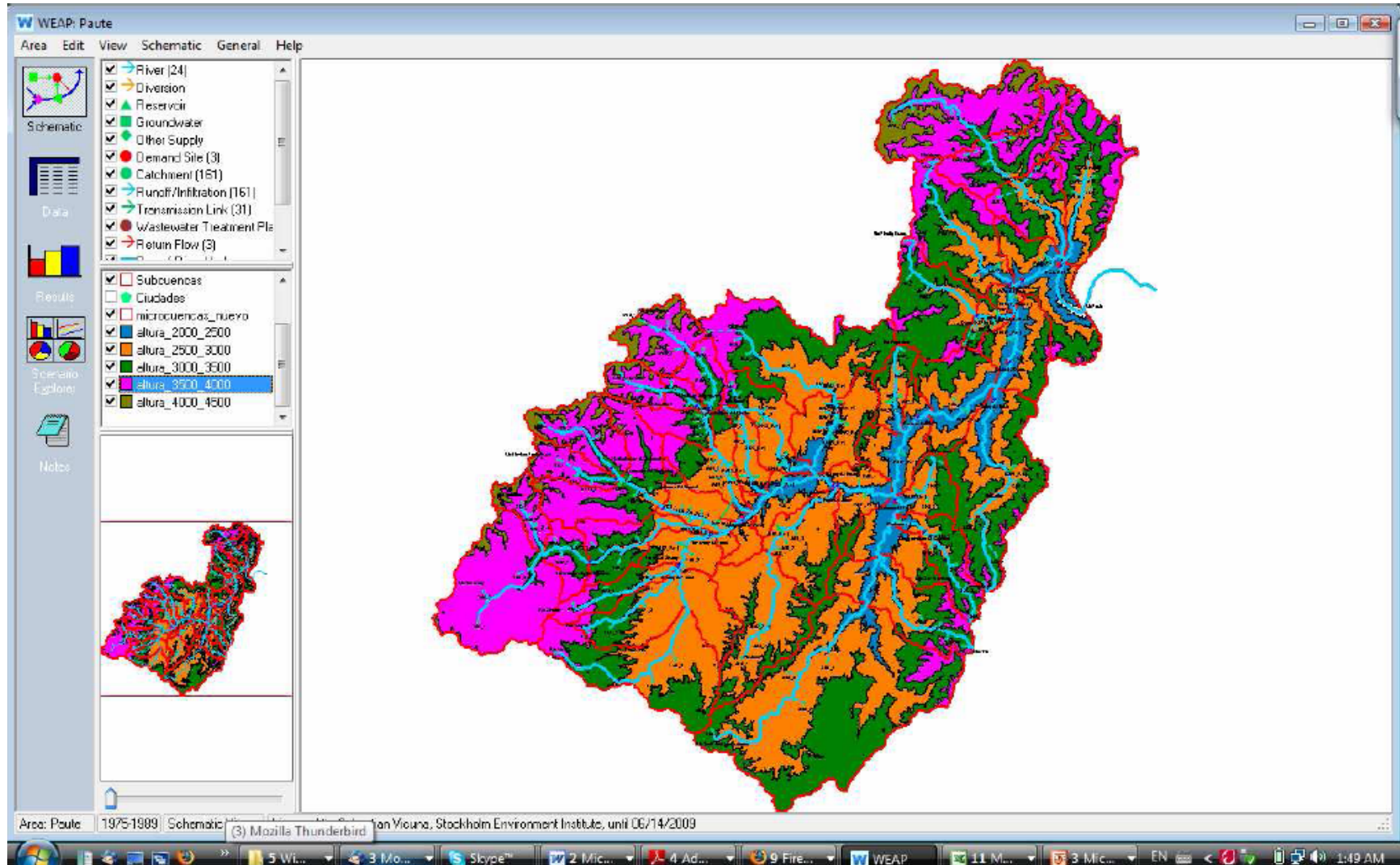
A: Área de la cuenca.

P: Precipitación media en el periodo o índice de precipitación para el periodo



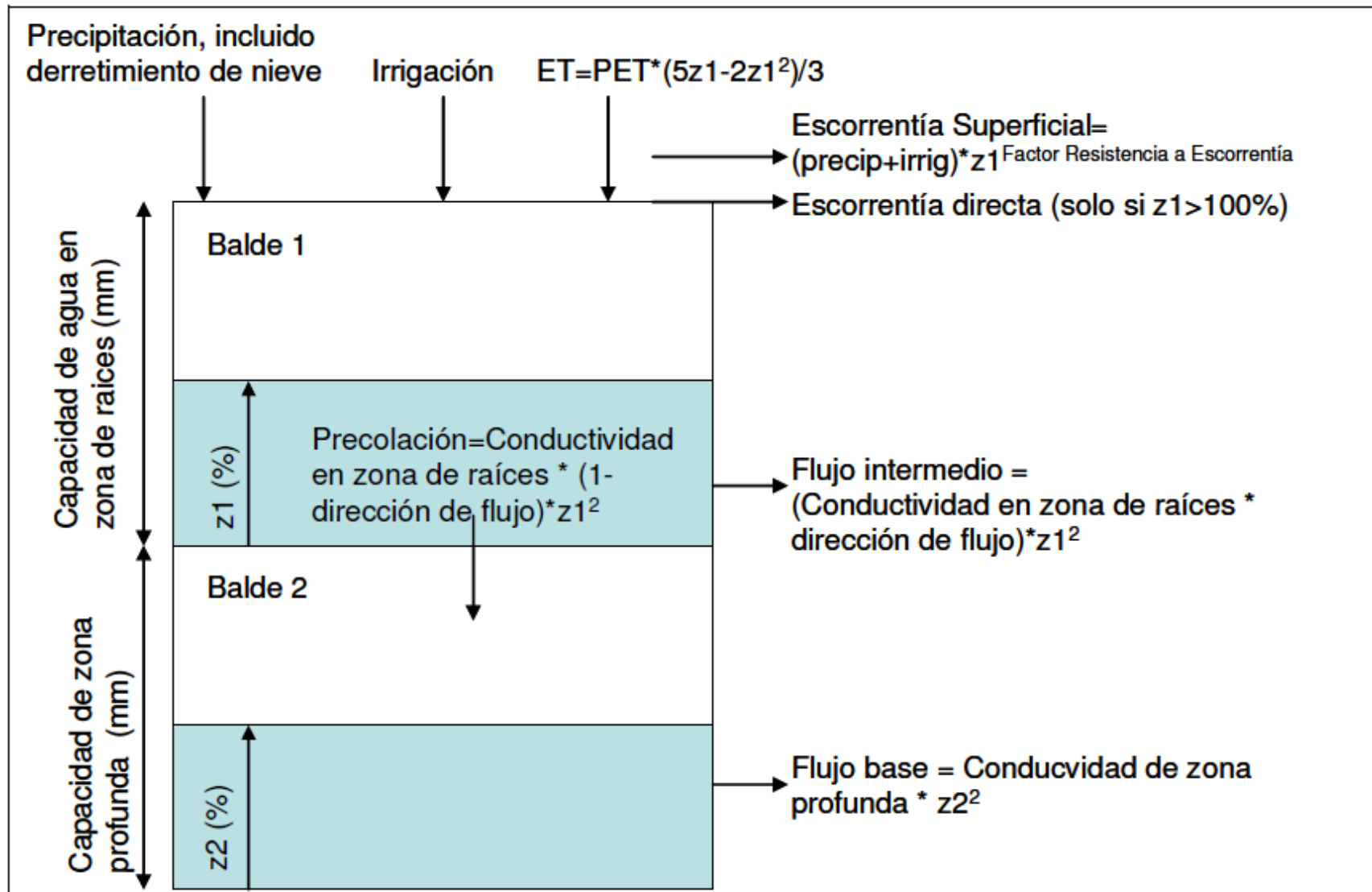
Estimación de caudales

- Modelos Hidrológicos (Ejemplo: WEAP)



Estimación de caudales

- Modelos Hidrológicos (Ejemplo: WEAP)



Estimación de caudales

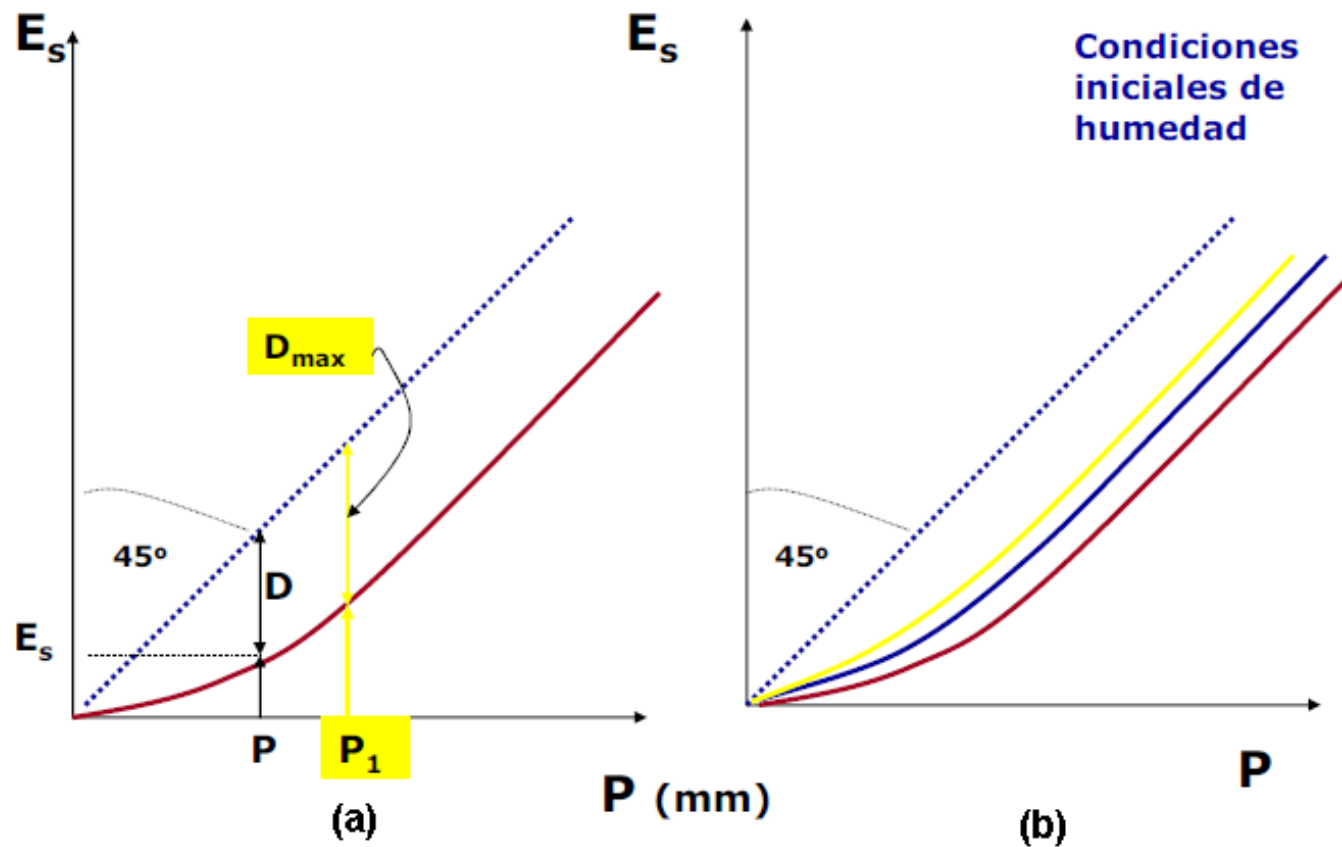
- Modelos Precipitación-Escorrentía

$$E_s = P - D$$

E_s : Escorrentía superficial

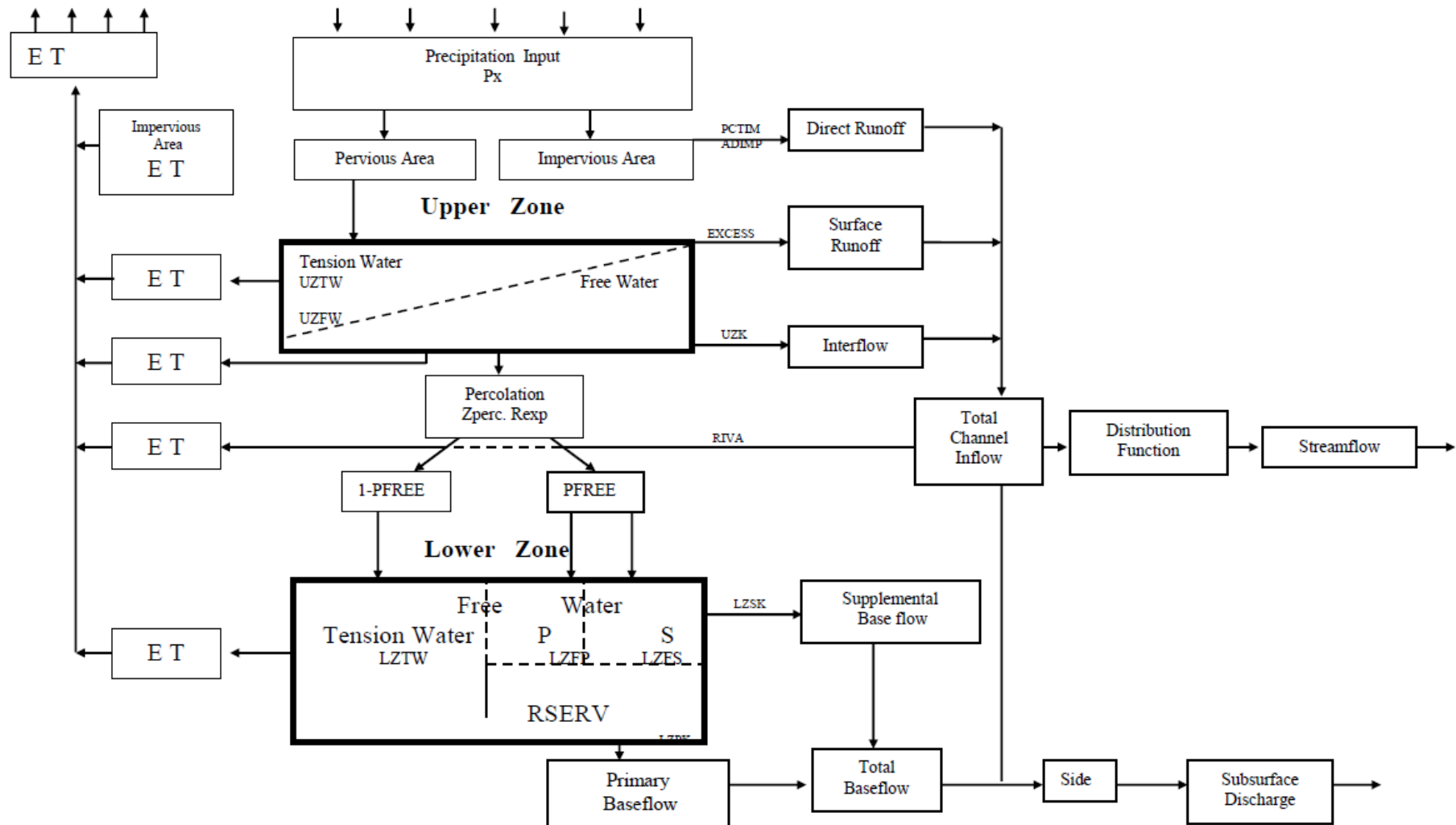
P : Precipitación

D : Déficit de escorrentía



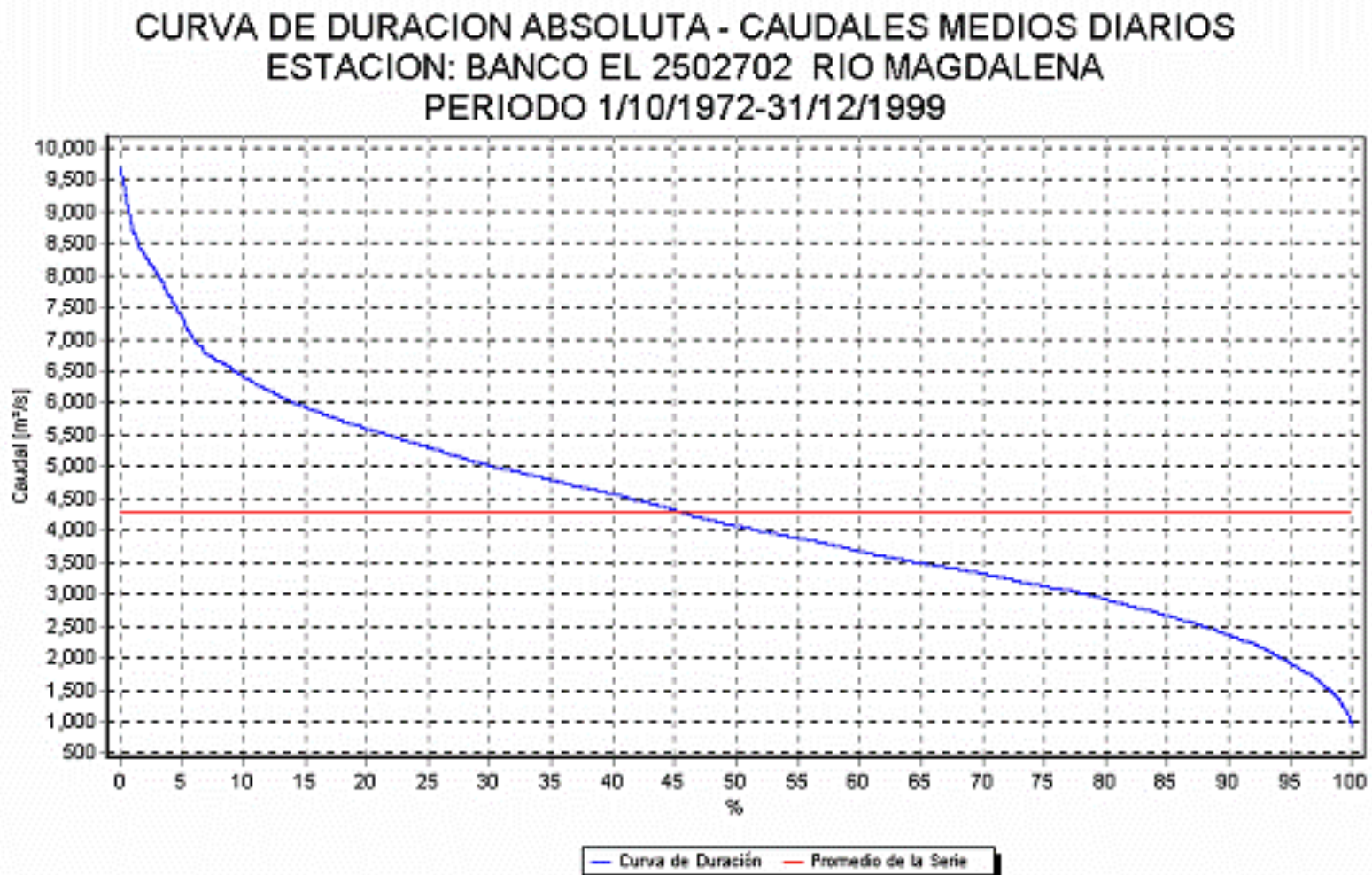
Estimación de caudales

- Modelos Hidrológicos (Ejemplo: Sacramento)



Análisis de series de tiempo de

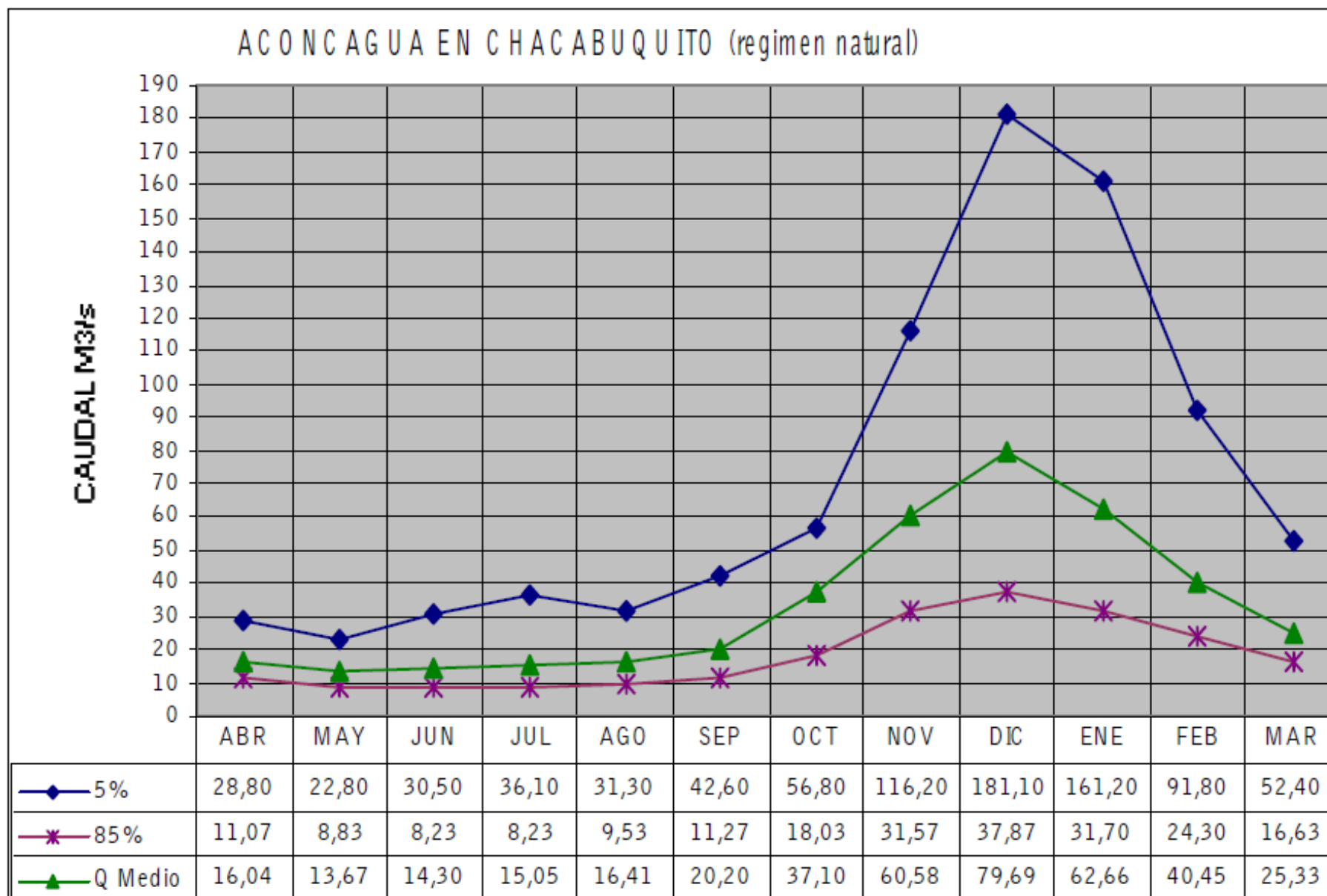
- Análisis de estadísticas de caudales
- Curva de duración



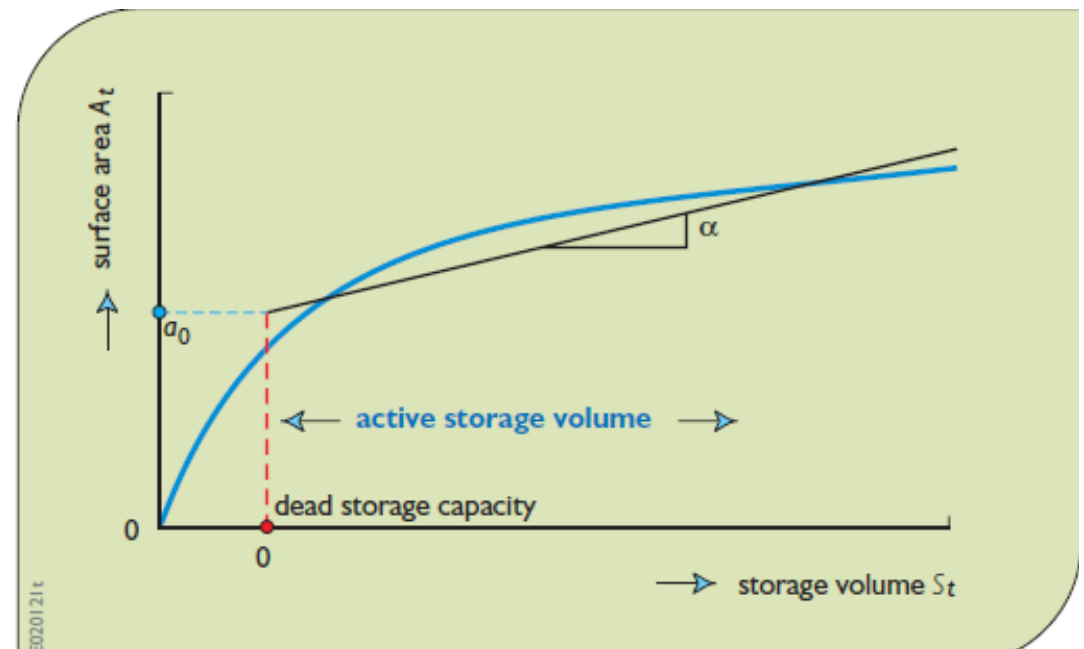
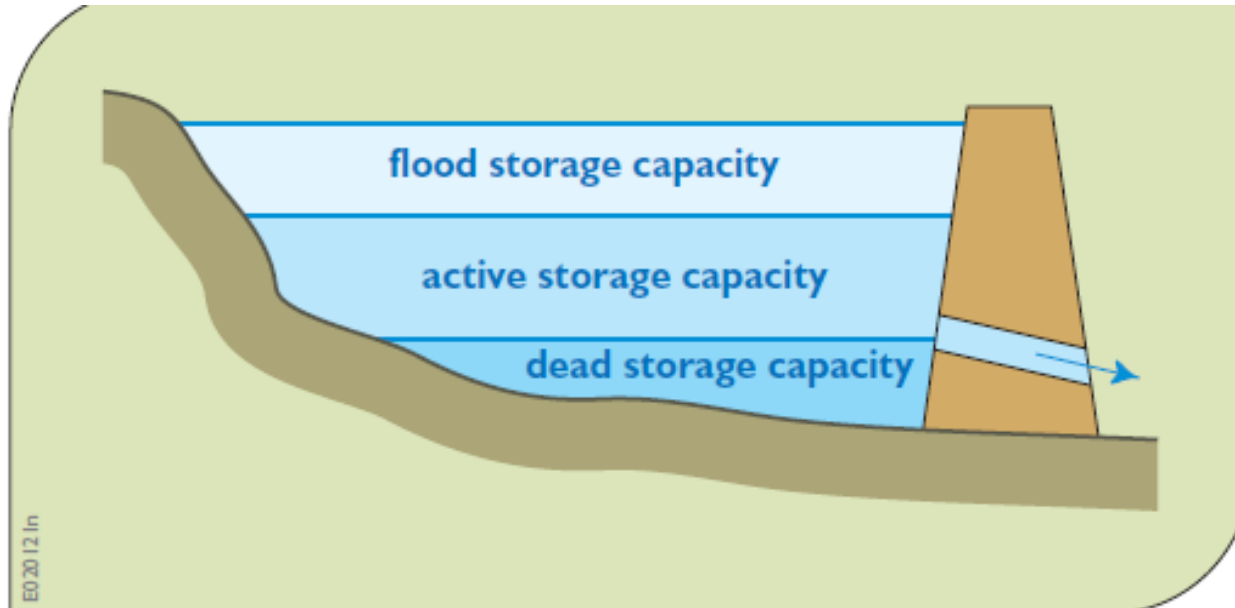
Gráfica No. 3

Análisis de series de tiempo de

- Análisis de estadísticas de caudales
- Curva de variación estacional



Embalses

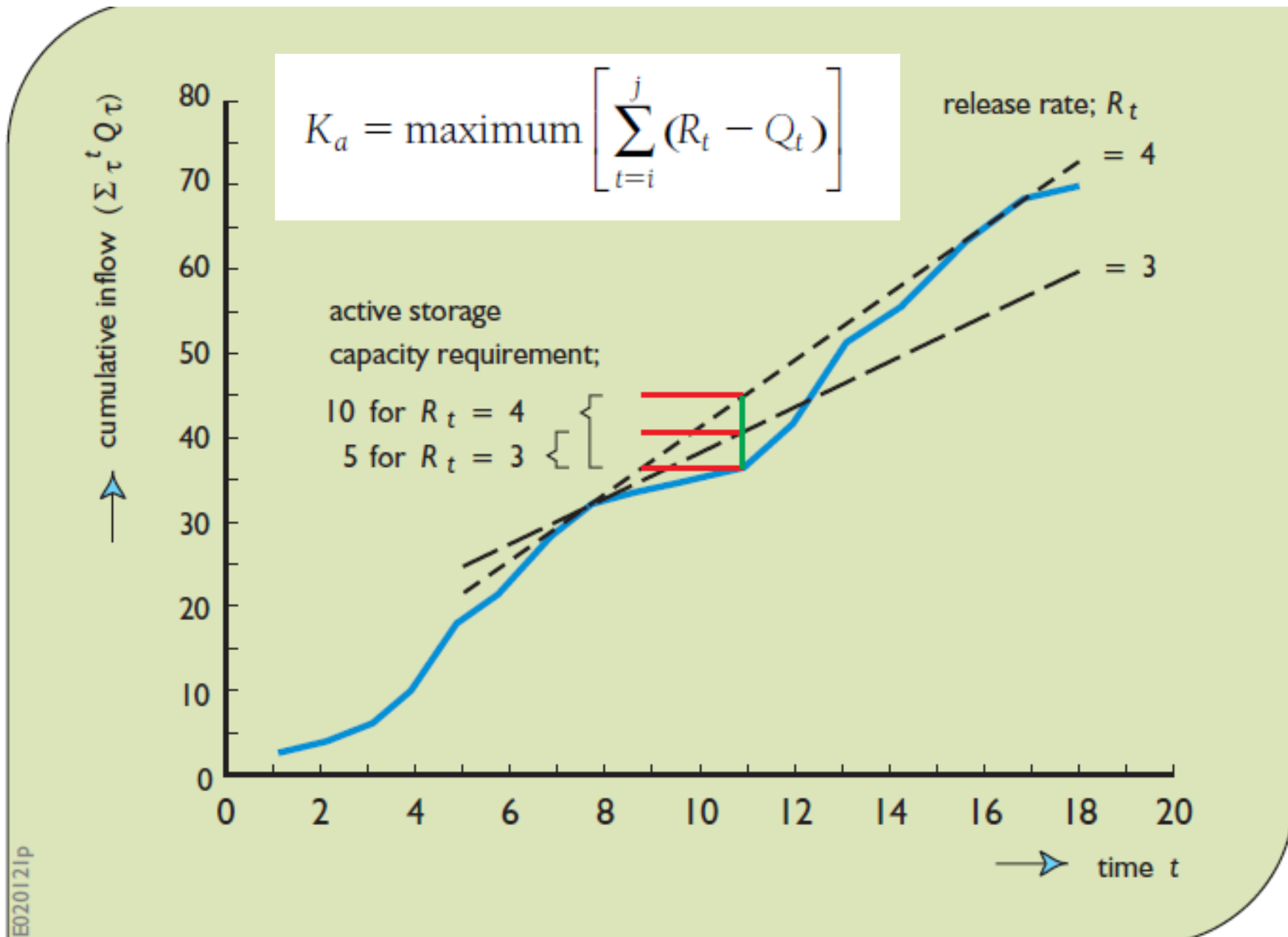


Embalses: Capacidad

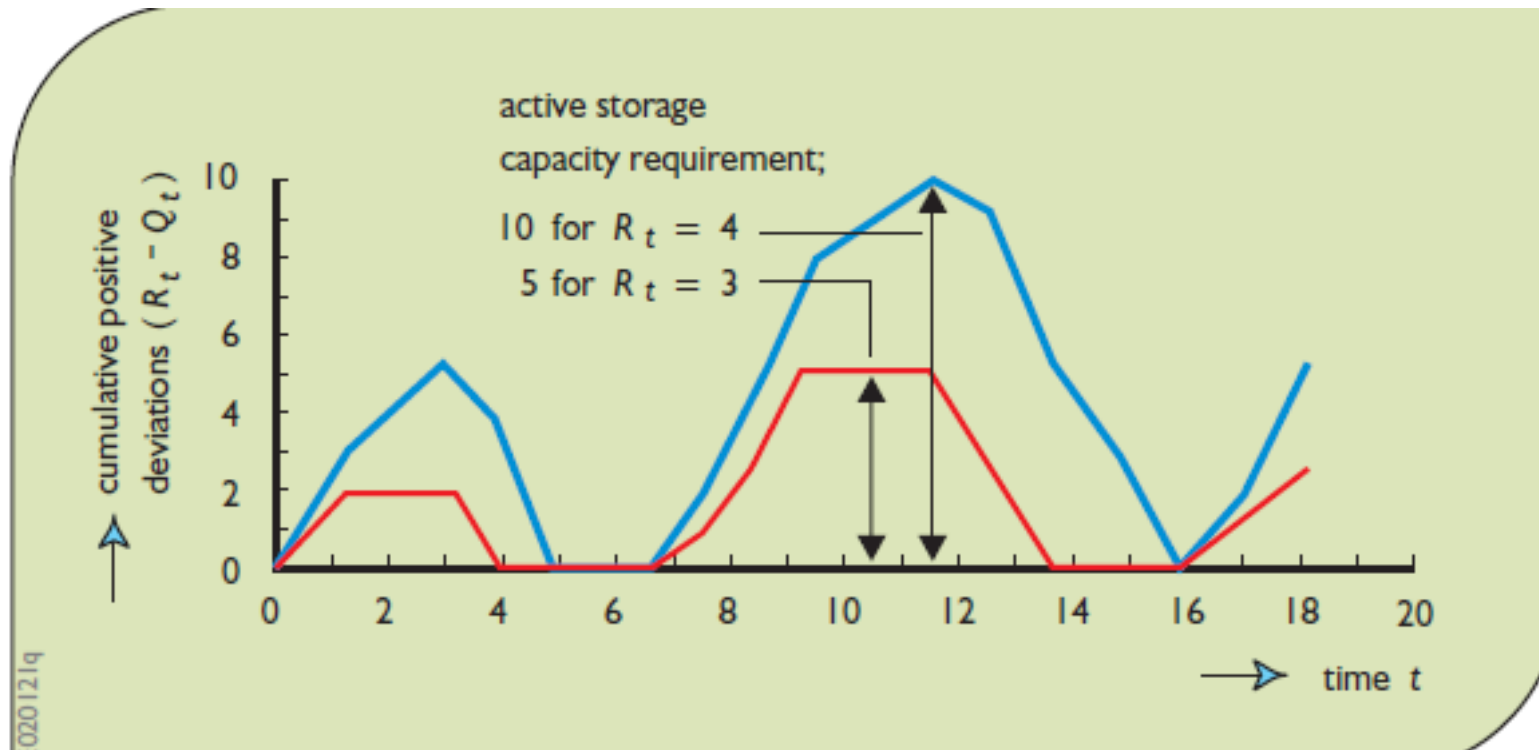
- Análisis simplificado: para análisis preliminares y de factibilidad
- Análisis secuencial detallado: incluyen uso de modelos de simulación y optimización. Requeridos usualmente en la etapa de diseño.
- Análisis de entrega firme (firm yield)

Entrega firme se define como la tasa de extracción media anual que dejaría al embalse en su nivel mínimo sólo una vez durante la sequía crítica de registro

Embalses: Curva de masa acumulada



Embalses: Capacidad



Embalses: Impactos ambientales

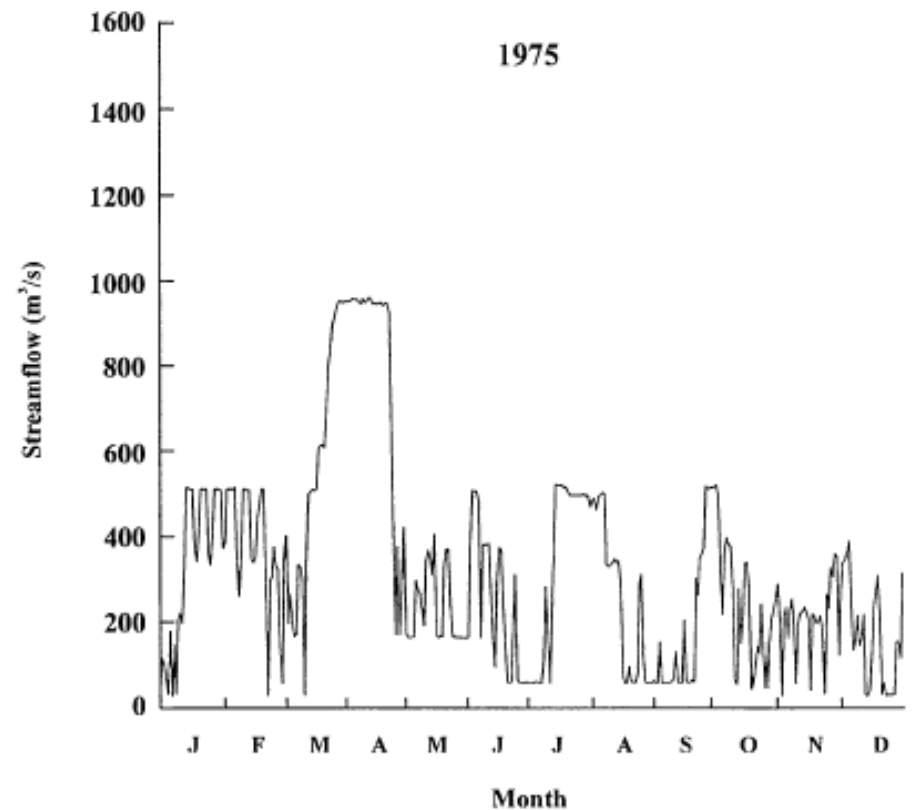
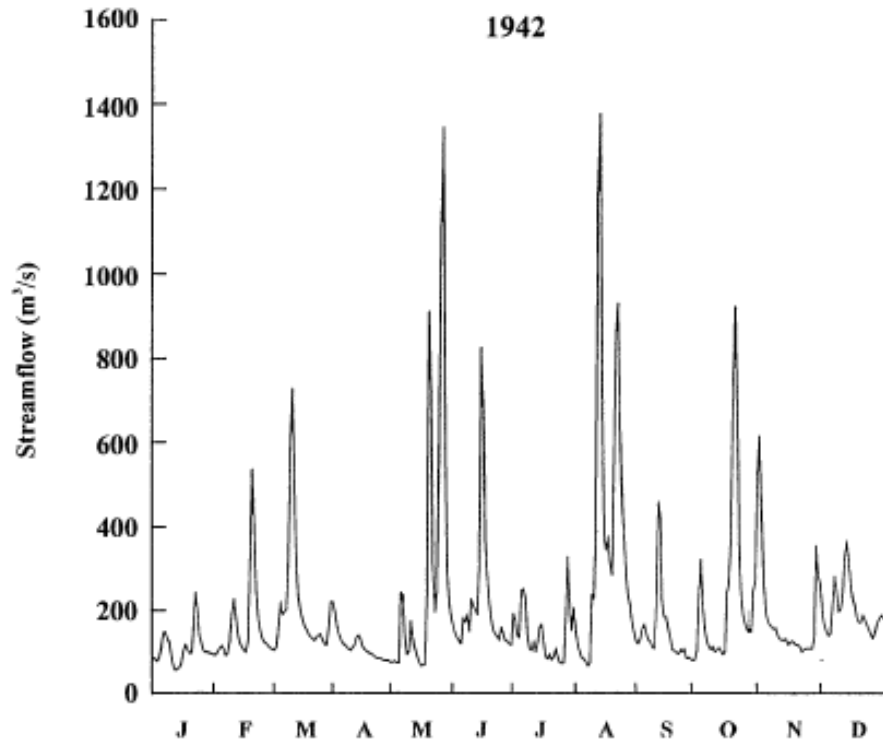
- Cambio de sistema lótico (río) a léntico (lago)
- Cambios en calidad del agua (tiempo de retención hidráulico, aportes de nutrientes por área inundada, estratificación)
- Cambios en el régimen hidrológico aguas abajo del embalse

Usos aguas abajo del retorno de aguas al cauce



Alteración hidrológica

Ejemplo: Río Roanoke (Carolina del Norte) antes y después del inicio de operaciones de embalse hidroeléctrico (Richter et al. 1996)



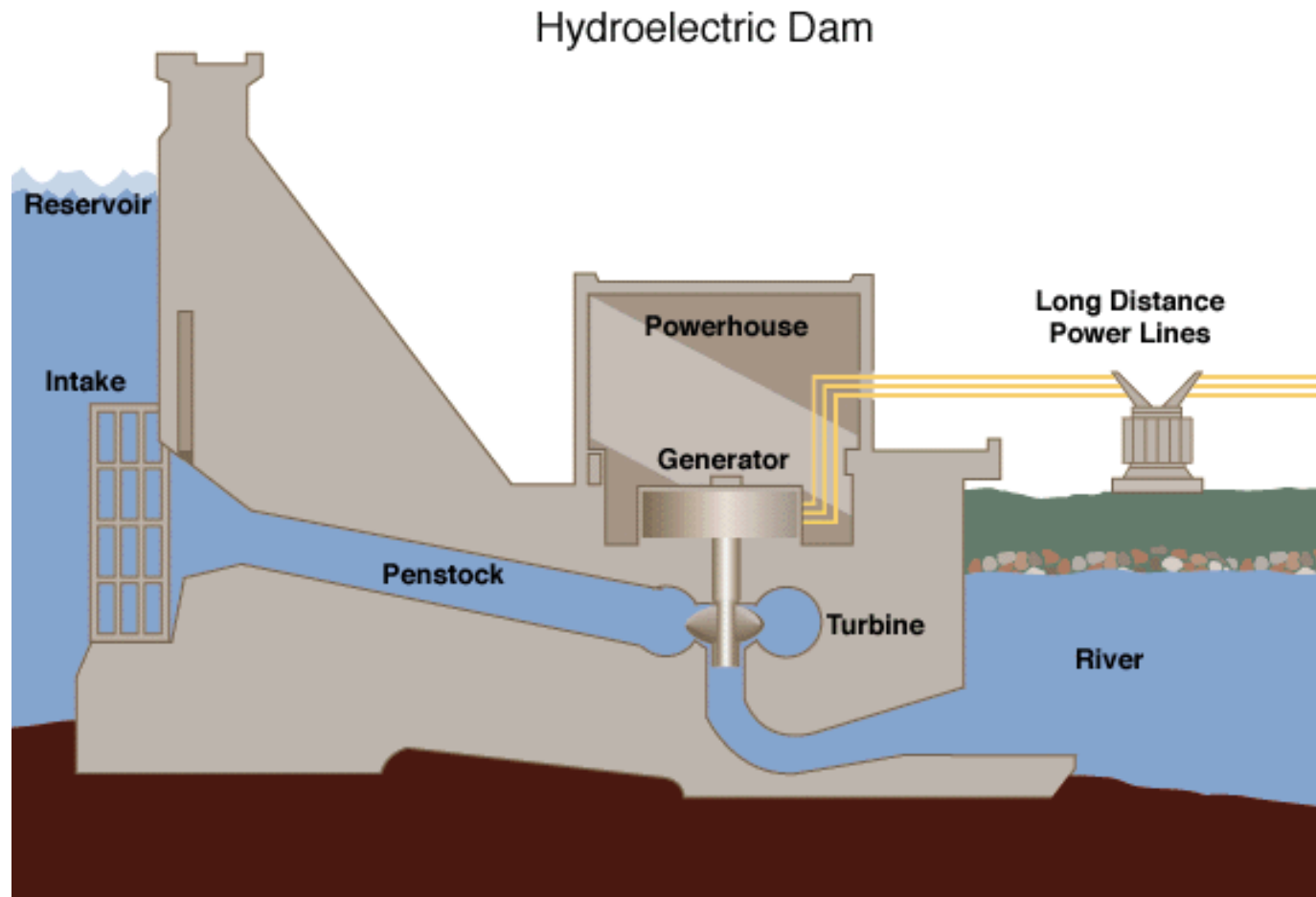
Enfoques alternativos

- Caudales mínimos
 - Métodos hidrológicos
 - Métodos hidráulicos
 - Métodos basados en habitat
- Modelos de población de peces
- Rango de variación de la alteración hidrológica

Influencia de caudales sobre el ecosistema (Richter et al. 2006)

- Flujo base
 - Provee espacio para habitat
 - Mantiene temperatura y niveles de oxígeno
 - Permite a los peces moverse a áreas de alimentación de desove
- Pulsos de caudales altos
 - Determinan la geomorfología del cauce
 - Determinan el tamaño del sustrato de fondo
 - Airean huevos en gravas de desove
- Caudales altos estacionales
 - Proveen señales para migración y desove
 - Proveen área de protección para peces jóvenes
 - Proveen nuevos espacios de alimentación y desove

Sección transversal de un sistema hidroeléctrico de embalse



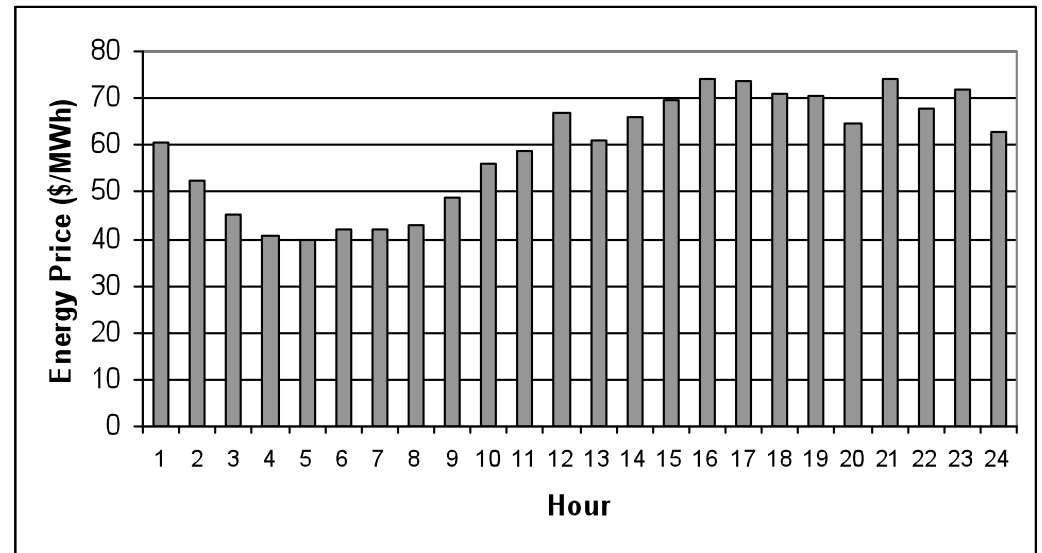
(<http://www.tva.gov/power/hydroart/loo.htm>)

¿Cómo opera una central hidroeléctrica?

- Caudales de generación que maximizan el valor de la energía generada bajo restricciones de infraestructura física y de índole regulatoria.



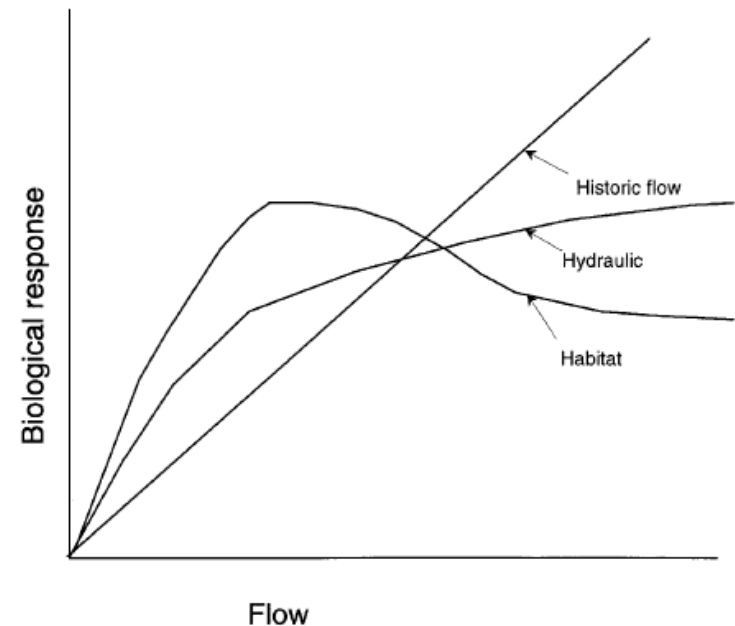
En general, los caudales de generación siguen el patrón de demanda (precio) de la energía



(California, verano 2005)

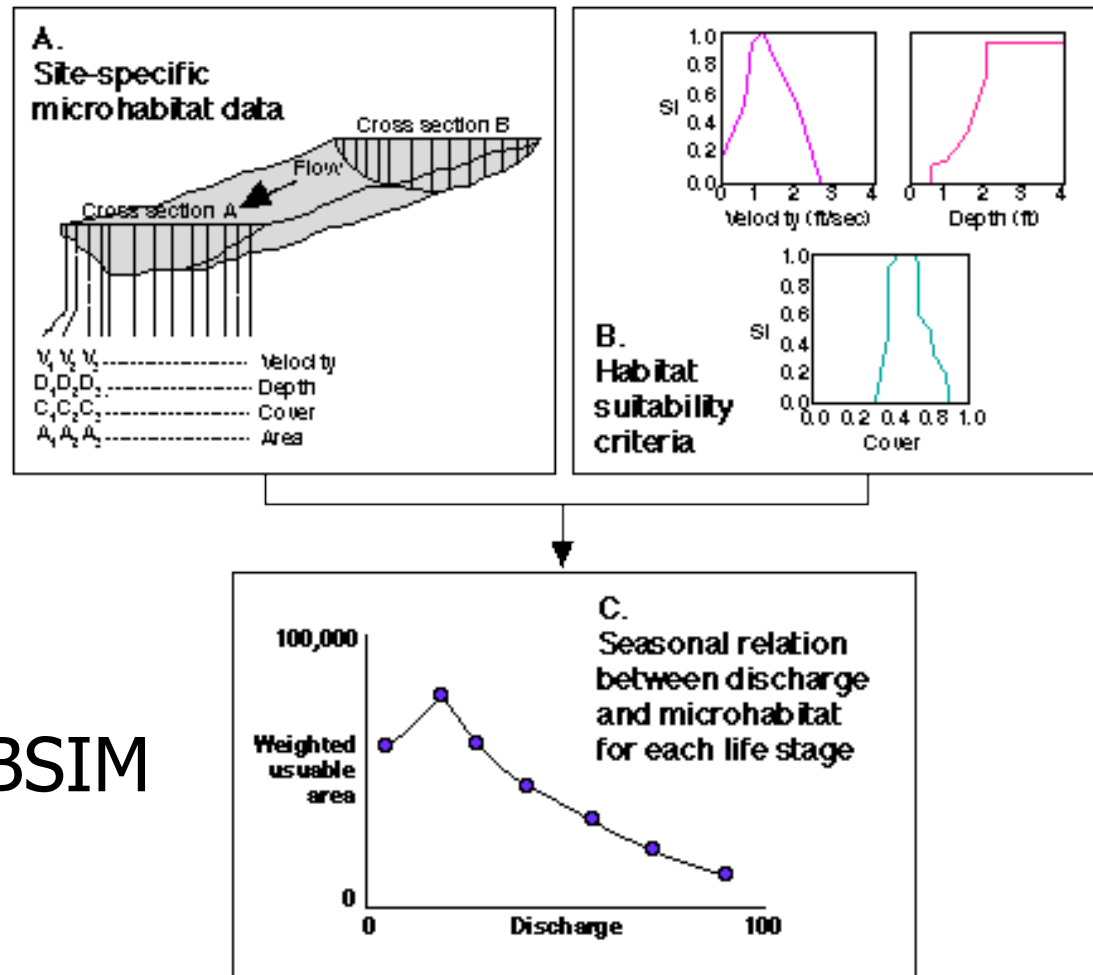
Métodos para Caudales mínimos

- Caudal histórico: basado en registros históricos. Establece una probabilidad de excedencia.
- Hidráulico: Incluye la forma del cauce (p.ej. perímetro mojado)
- Habitat: Incorpora necesidades de habitat para especies objetivo (p.ej. Instream Flow Incremental Methodology)



(Jowet, 1997)

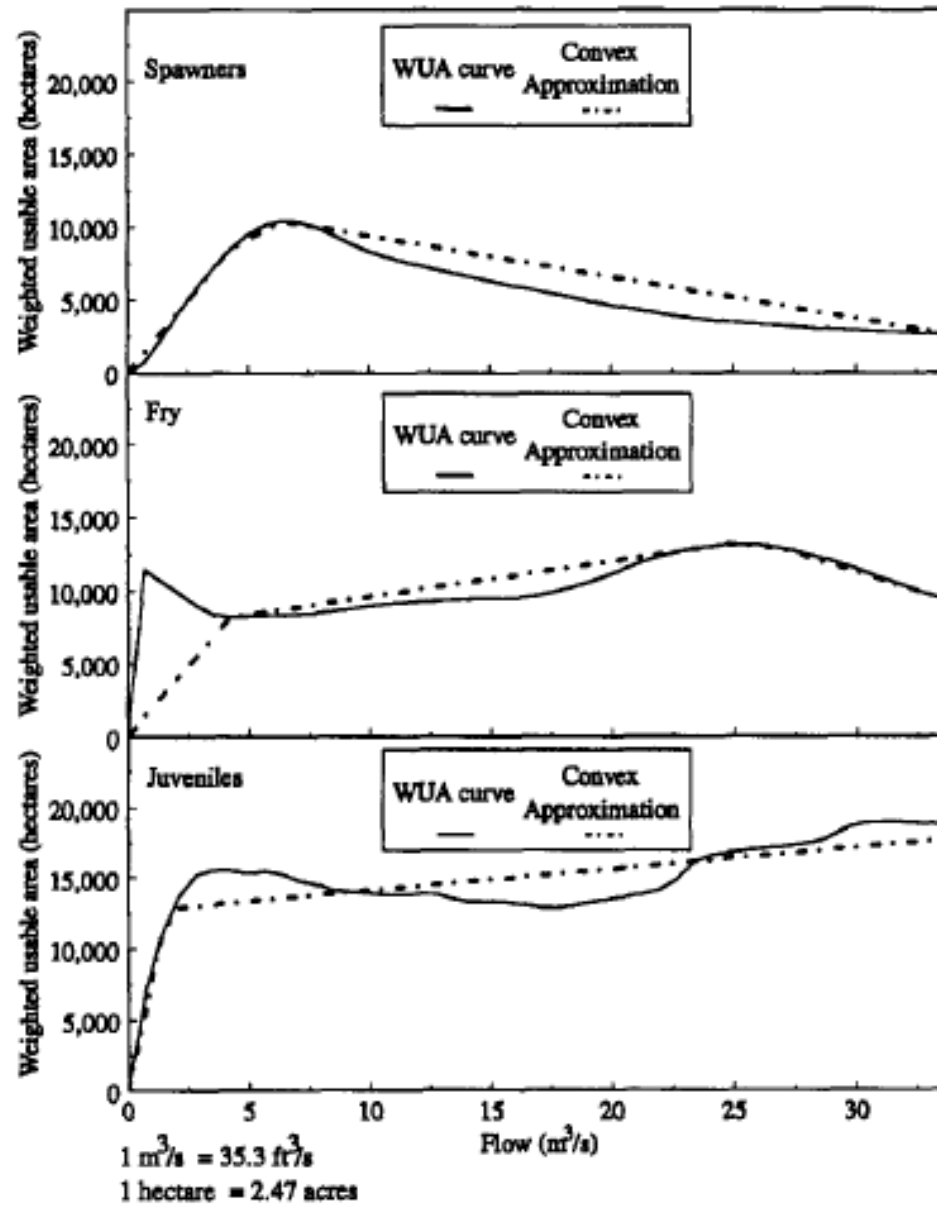
Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)



PHABSIM

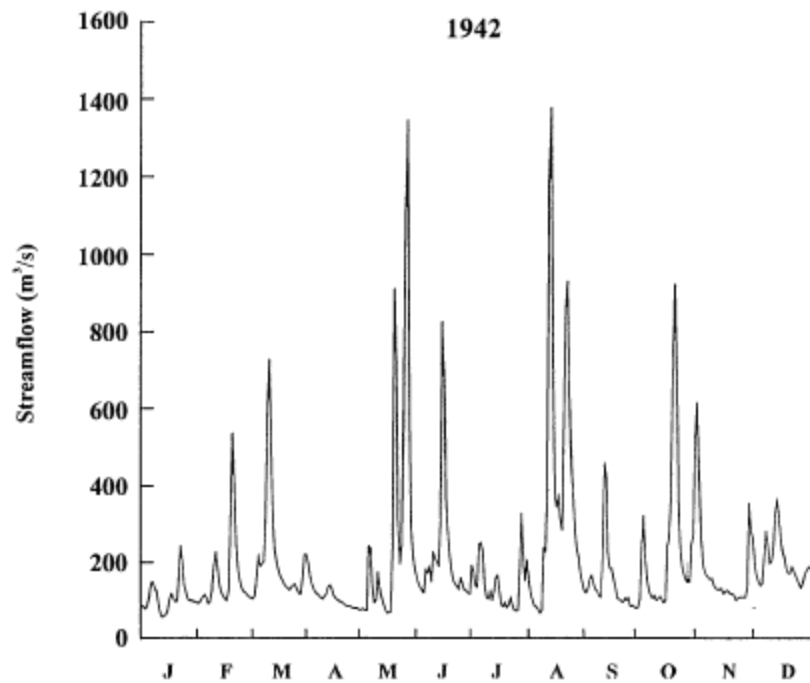
(<http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/ifim/5phases.asp>)

IFIM: Curvas de habitabilidad

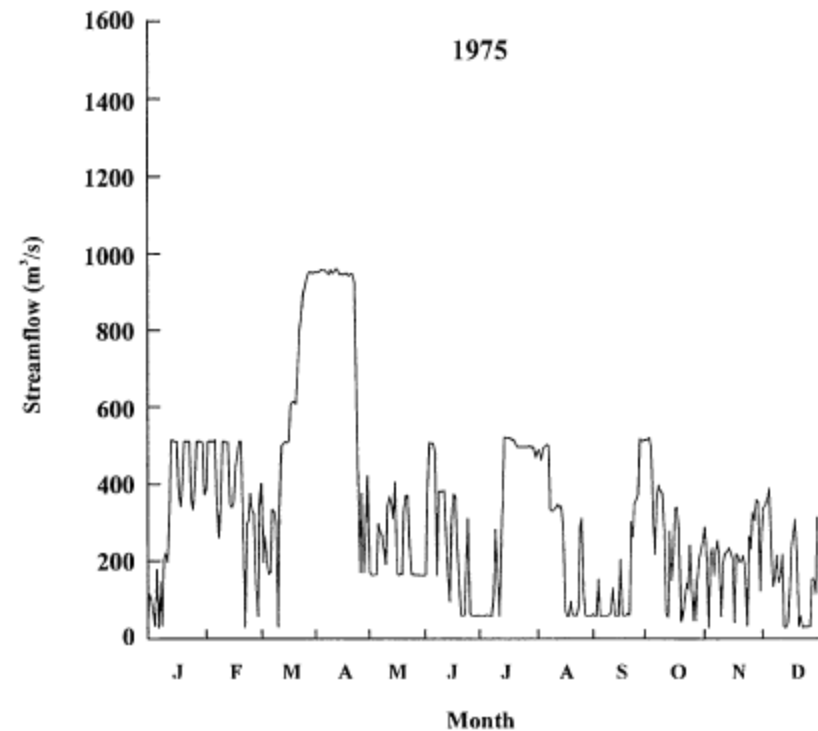


(Cardwell et al. 1996)

Indicators of Hydrologic Alteration



Example: Roanoke River before and after hydropower reservoir operations (Richter et al. 1996)



Operaciones de corto plazo

Hydropeaking

- Efectos directos e indirectos (Scruton et al. 2005)
 - Directos: mortalidad o abandono de habitat
 - Indirectos: Desplazamiento aguas abajo, aumento del estrés fisiológico
- Efectos sobre peces dependen de varios factores (Moog 1993; Halleraker et al. 2003)
 - Tasa, magnitud, secuencia, duración y frecuencia de la alteración de caudal
 - Estación (temperatura del agua)
 - Especie de peces, etapa de desarrollo, comportamiento
 - Morfología del cauce y sedimento

Efectos del “hydropeaking” (Moog, 1993)

- Dependenden del signo (+ o -) del cambio
- Aumento de caudal
 - Barrido de huevos y fry
 - Cambios de habitat debido a erosión y cambios en el sedimento
- Disminución de caudal
 - Limitaciones físicas (varamiento y muerte)
 - Reducción de la disponibilidad de habitat
 - Depósito de finos afecta a los huevos de peces y fry

Efectos sobre la densidad de biomasa de invertebrados (Moog, 1993)

