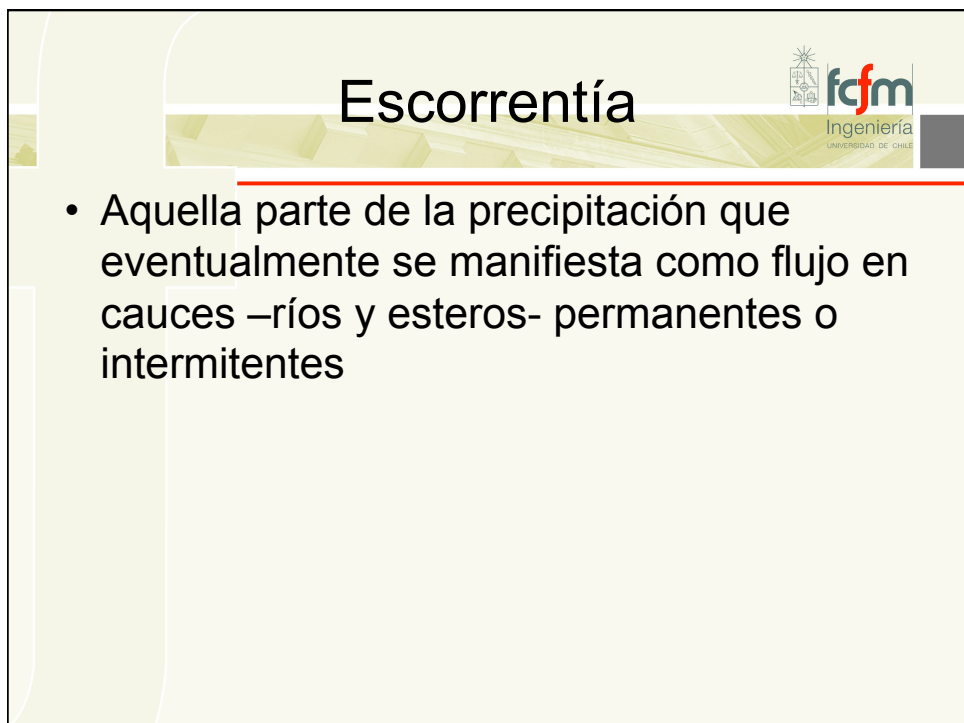




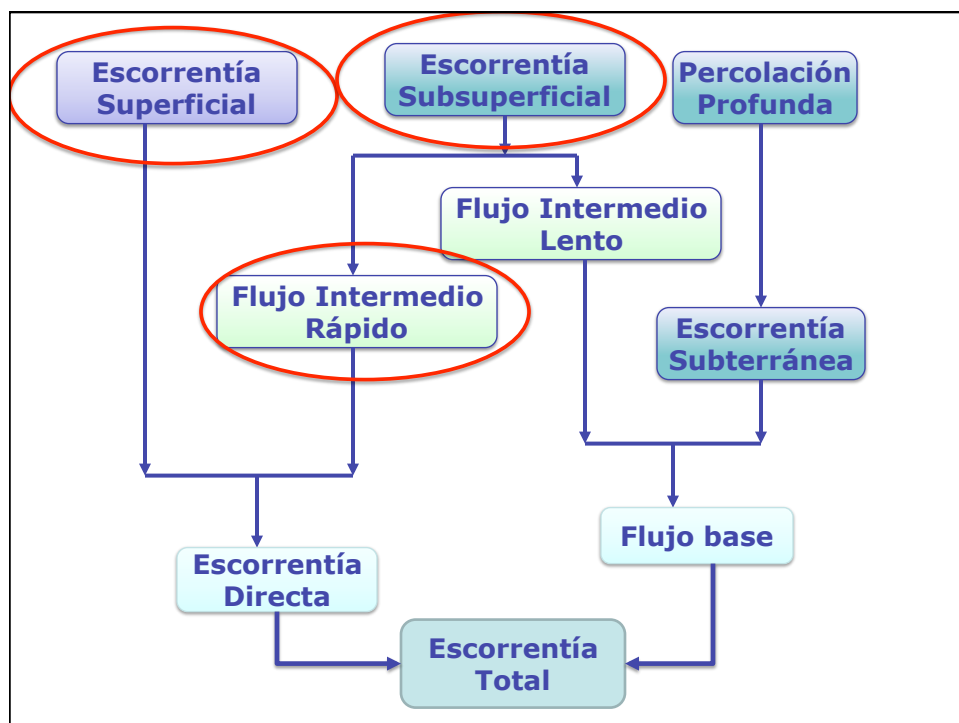
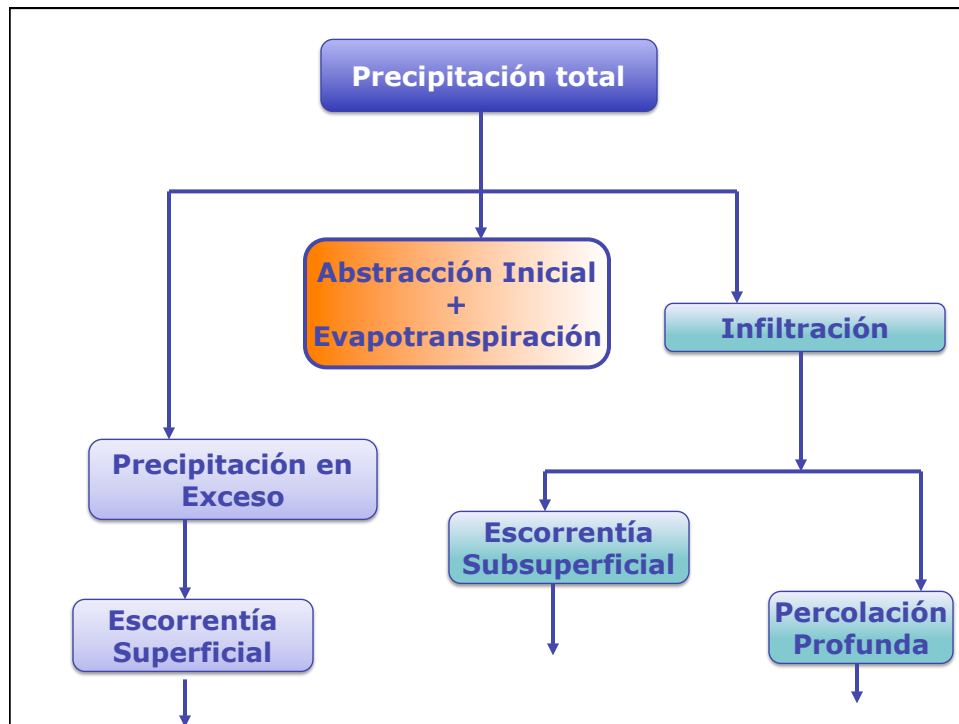
Escorrentía

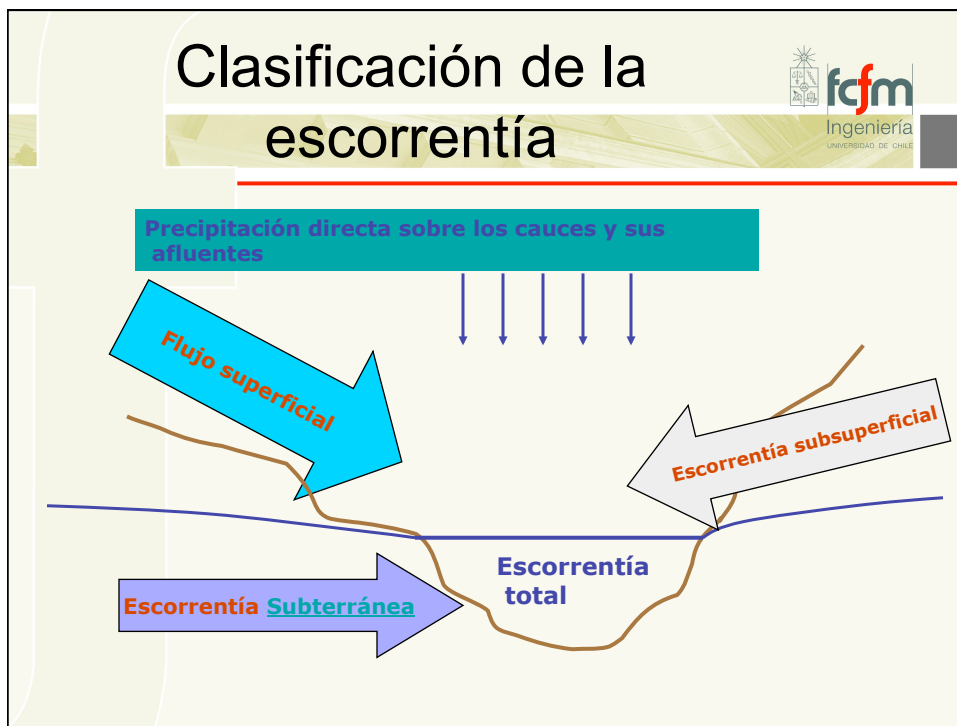
James McPhee
Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile



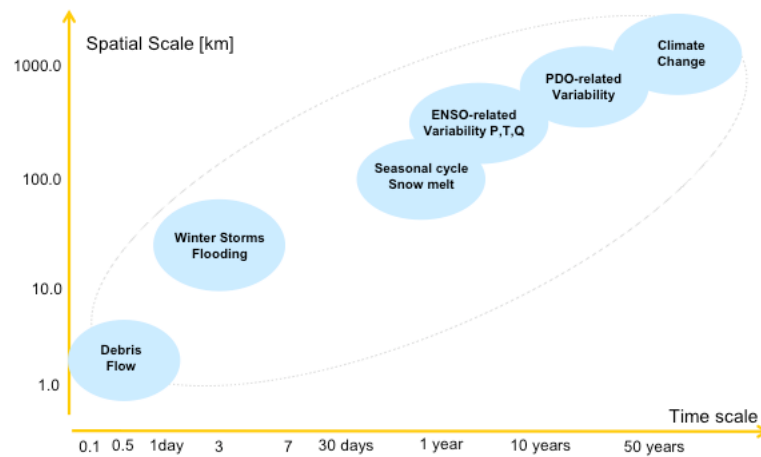
Escorrentía

- Aquella parte de la precipitación que eventualmente se manifiesta como flujo en cauces –ríos y esteros- permanentes o intermitentes





Escalas involucradas



Definiciones



- Flujo **superficial**: Lámina de agua que escurre superficialmente antes de incorporarse a un cauce
- Flujo **subsuperficial** o **intermedio**: flujo en los primeros horizontes de suelo, no alcanza a incorporarse al flujo subterráneo; distribución geológica es factor importante
- Flujo **subterráneo**: proviene de percolación profunda; desfase temporal significativo
- Escorrentía total: **escorrentía directa + flujo base**

f. Superficial + f. Intermedio
rápido + precip.sobre cauces

f. Subterráneo + f. Intermedio
lento

Definiciones



- Precipitación en exceso: contribuye *directamente* a la escorrentía superficial

$$\checkmark P_{\text{exceso}} = P_{\text{total}} - \text{Abstracción inicial} - \text{Evaporación} - \text{Infiltración}$$
- Precipitación efectiva: contribuye a la *escorrentía directa*

- En condiciones extremas, la escorrentía puede causar daños significativos
 - Erosión de suelos y riberas
 - Transporte de nutrientes y contaminantes
 - Impactos sobre infraestructura
 - Inundaciones y depósitos de sedimento en zonas habitadas

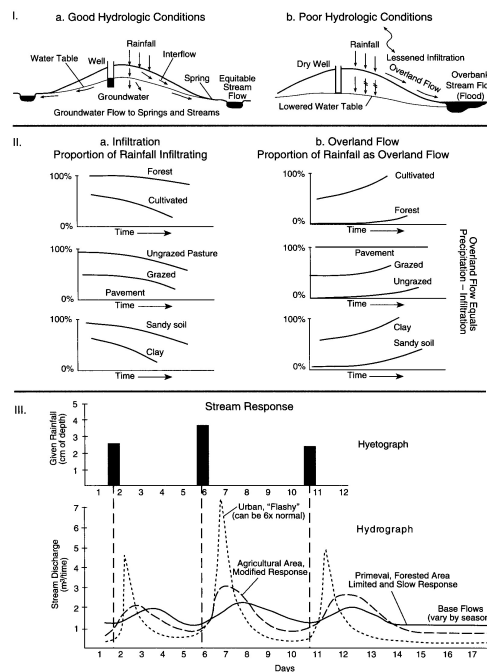
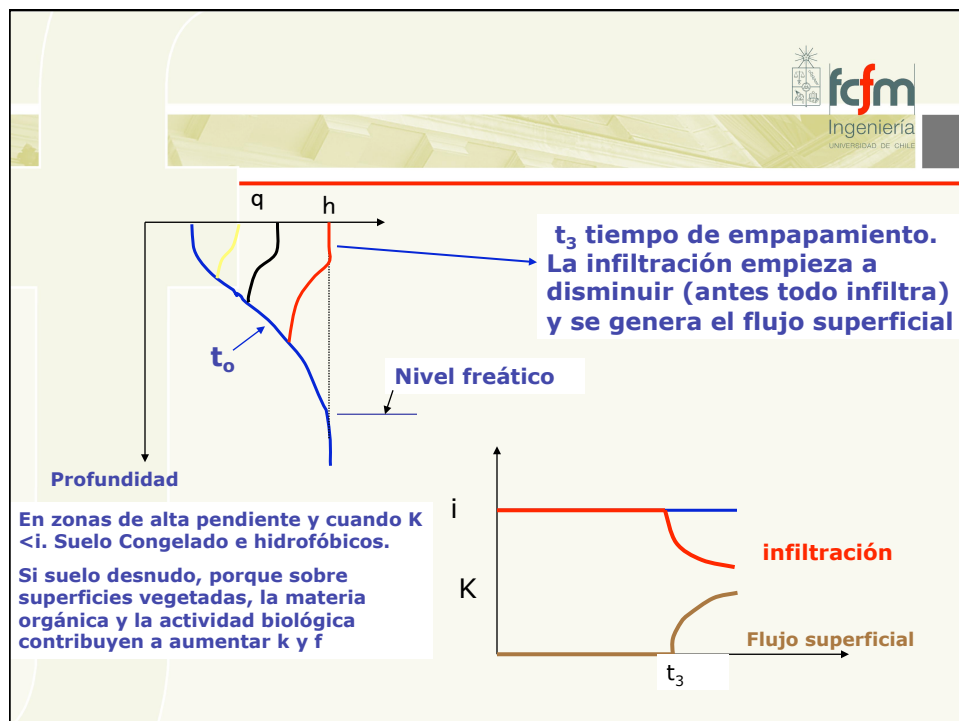


FIGURE 5.1 Good vs. poor hydrologic conditions and their effects on runoff.

Mecanismos de generación de escorrentía



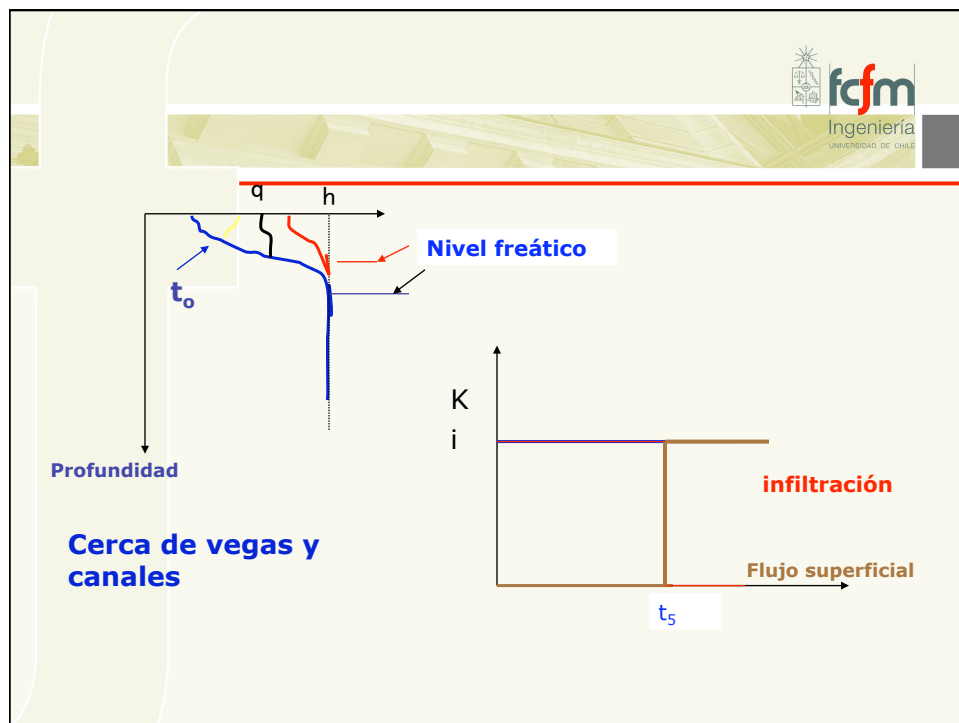
- Modelo Hortoniano: potencial para generación de flujo superficial existe cuando la tasa de aplicación de agua excede la capacidad de infiltración del suelo

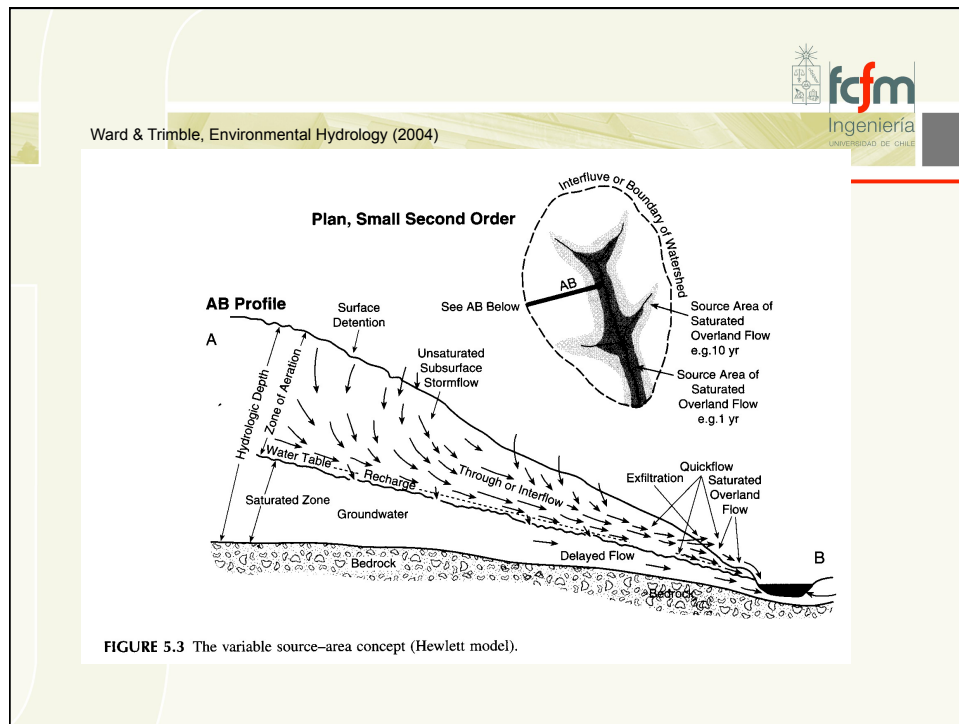


Mecanismos de generación de escorrentía



- Modelo Hewlett: surge a partir de la observación de que los cauces presentan escorrentía directa sin que necesariamente se observe flujo superficial





Factores que afectan la generación de escorrentía

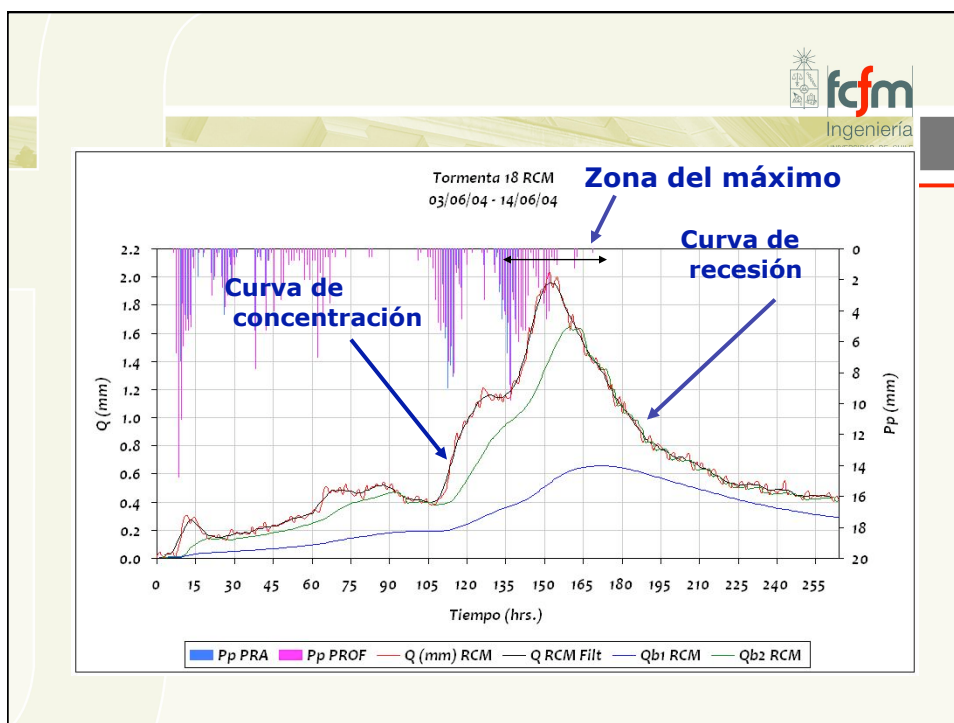
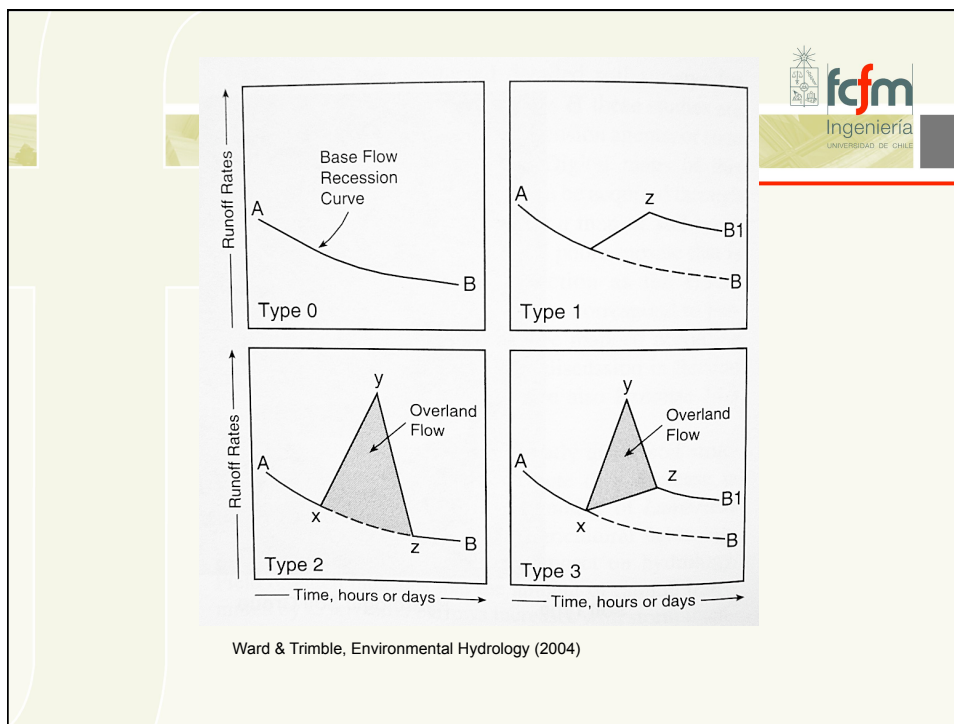
fcfm Ingeniería UNIVERSIDAD DE CHILE

- Factores climáticos
 - Precipitación: forma (líquida, sólida), tipo (frontal, ciclónica, convectiva), intensidad, duración, distribución temporal y espacial
 - Evaporación: temperatura, humedad, vientos, presión atmosférica
 - Transpiración: temperatura, radiación solar, vientos, humedad aire y suelo, tipos de vegetación

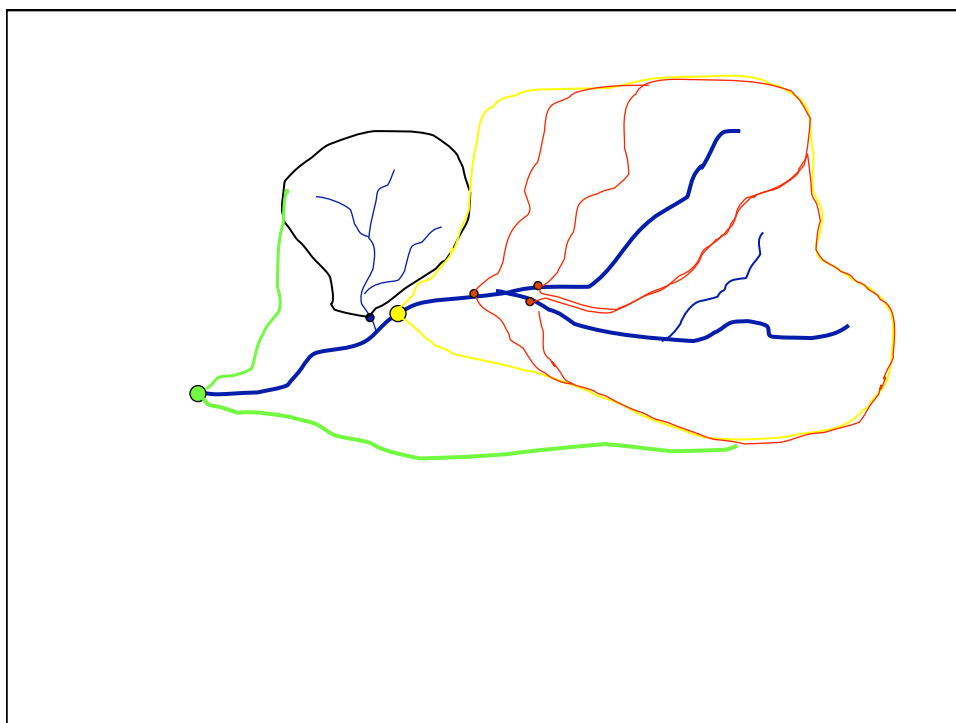
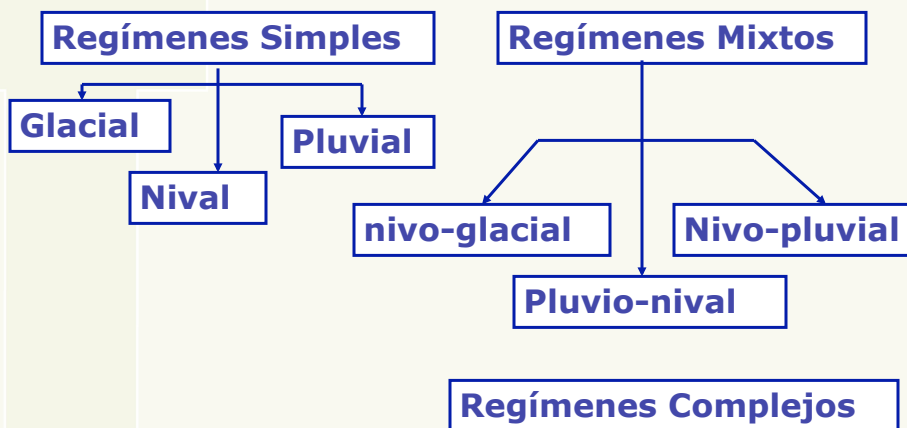
- Factores fisiográficos
 - Geométricos cuenca: tamaño, forma, red de drenaje
 - Físicos cuenca: uso del suelo, tipos de suelo, condiciones de infiltración, geología, topografía
 - Cauces: tamaño y forma secciones transversales, pendiente, rugosidad, longitud de tributarios, remansos y torrentes

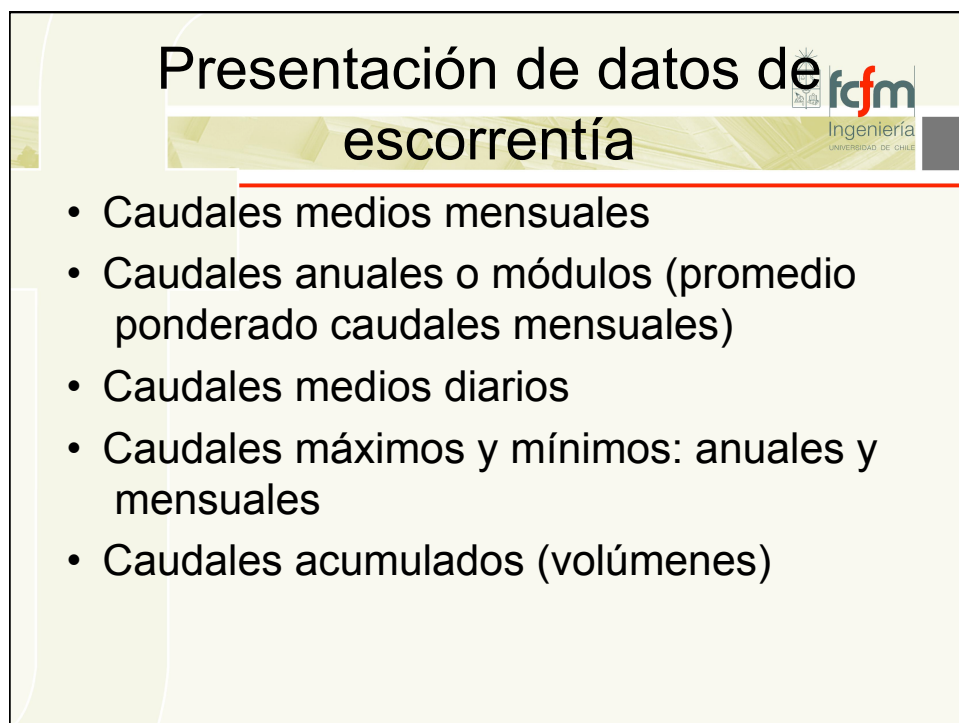
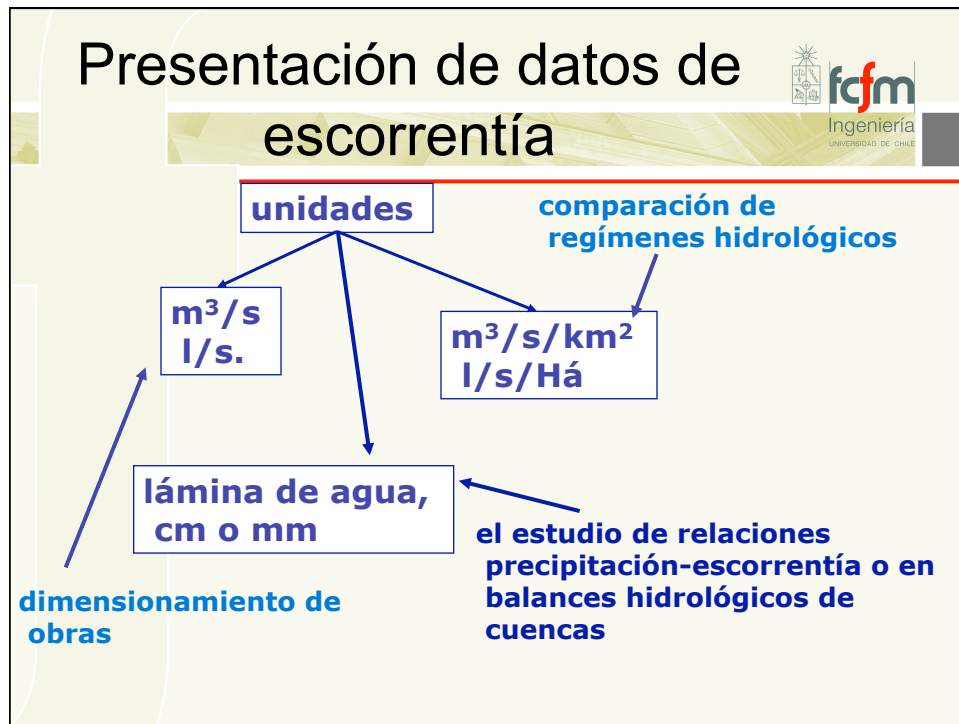
Características de la escorrentía: el hidrograma

- Hidrograma es una representación gráfica de la interacción de numerosos mecanismos altamente complejos, que determinan la *respuesta* de una cuenca frente a un *evento* de precipitación
- Esquemáticamente, la forma en que un curso de agua puede responder a la precipitación son las siguientes:



Regímenes de gastos en un río

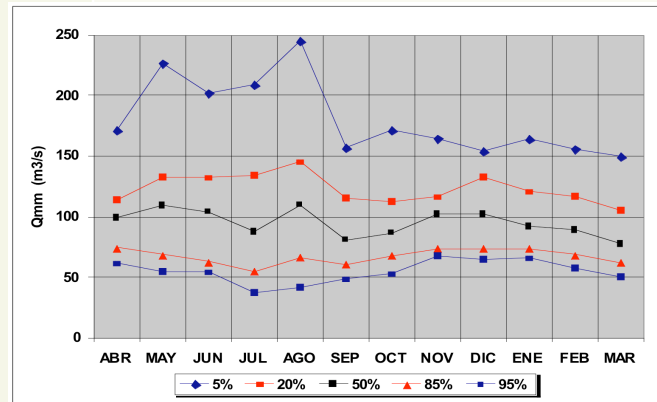




Caudales medios mensuales



- Tablas o gráficos cronológicos
- Curvas de variación estacional



Curvas de gastos clasificados o CURVAS DE DURACIÓN



- Son distribuciones de frecuencia acumuladas que indican el porcentaje de tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos
 - Gastos medios diarios
 - Gastos medios mensuales
 - Gastos medios semanales
 - ... en general cualquier período de tiempo

Curvas de duración



- Seguridad de abastecimiento de agua en un intervalo de tiempo
- Frecuencia de interrupciones de servicio de obras de infraestructura por efecto de caudales altos
- Capacidad de dilución de ríos o esteros

Curvas de duración



- Método del año calendario
 - Ordenar caudales de acuerdo a su magnitud (orden decreciente)
 - Calcular porcentaje de tiempo durante el cual cada valor fue igualado o excedido (probabilidad de excedencia)

$$p_{exc} = \frac{n_{orden}}{N_{total} + 1}$$

Curvas de duración



- Método del período total
 - Agrupar caudales en *clases* de acuerdo a su magnitud
 - Acumular totales para cada año y calcular probabilidad de excedencia

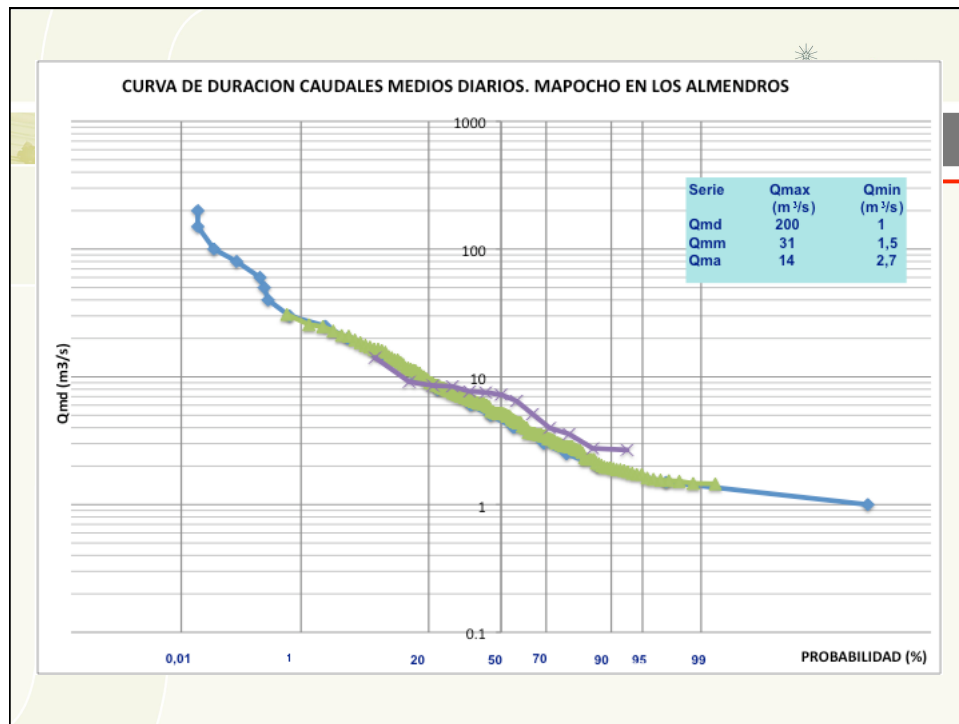
Q_0 (m ³ /s)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Total	Total Días con $Q=Q_0$	P_{exc} %
<10		2			2	1460	100,0
[10-15)	4	3			7	1458	99,9
[15-20)	3	2		4	9	1451	99,4
[20-30)	1	3	4	3	11	1442	98,8
[30-50)	7	1	5	2	15	1431	98,0



- Todos los años con registros completos se pueden utilizar para preparar curvas de duración a pesar de que esos años no sean consecutivos
- Los años con registros incompletos deben ser excluidos
- los años que se utilicen deben corresponder a condiciones similares en la cuenca en lo que se refiere a almacenamiento artificial, extracciones o cualquier otra influencia humana

LÍMITES DE CLASES PARA ELABORAR UNA CURVA DE DURACION				
RANGO DE GASTOS MEDIOS DIARIOS				
1 cido	2 cidos	3 cidos	4 cidos	5 cidos
10	10	10	10	10
11	12	15	15	15
12	14	20	20	20
13	17	25	30	30
14	20	30	40	50
15	25	40	50	70
16	30	50	70	100
18	35	60	100	150
20	40	80	150	etc.
22	45	100	etc.	
24	50	150		
26	60	etc.		
28	70			
30	80			
33	100			
36	120			
40	etc.			
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
90				
100				

- El método del año calendario da valores menores para los caudales altos y valores mayores para los caudales bajos que el método del período total.

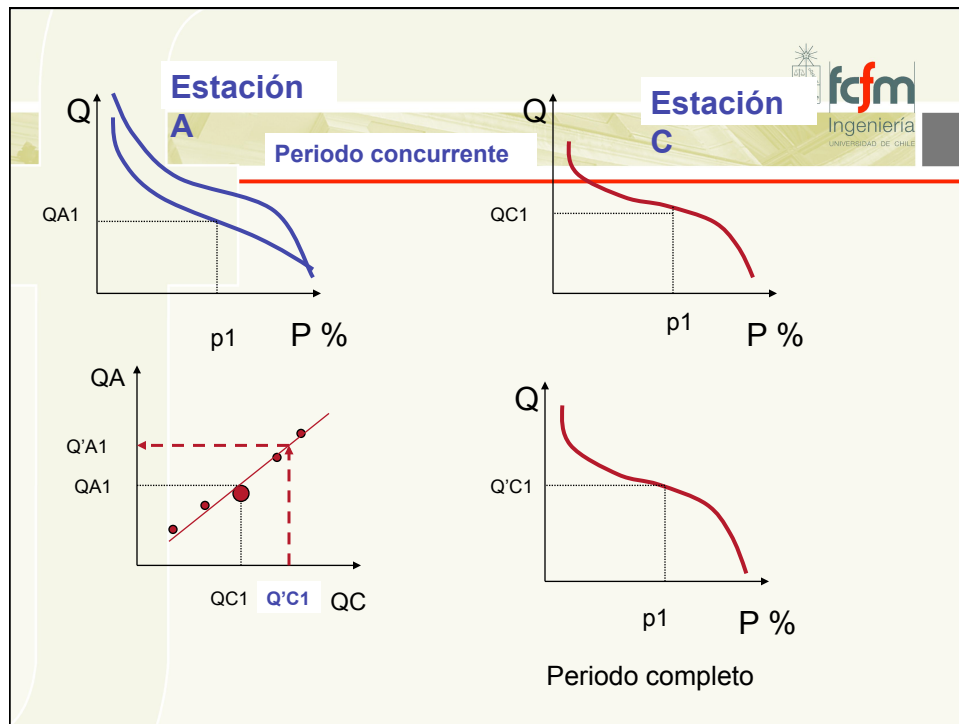


Extensión de período



- Obtención de curvas de duración representativas de períodos largos a partir de períodos cortos



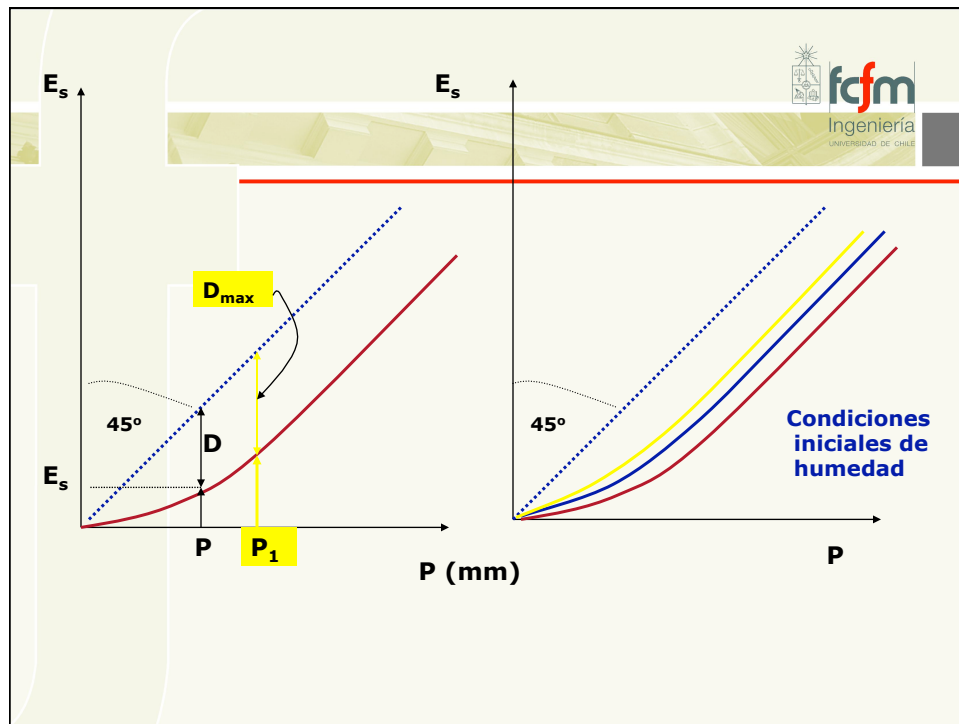


Estimación de caudales de escorrentía

- Déficit de escorrentía

$$E_s = P - D$$

- D representa diversas formas de retención del agua en la cuenca



Método Curva Número

- Soil Conservation Service
- Pérdidas por infiltración se combinan con almacenamiento superficial

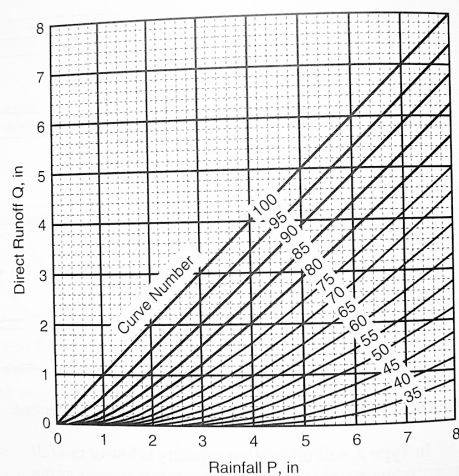
$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

$$I_a = 0.2S$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

EN
PULGADAS!



Relación entre precipitación y escorrentía

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación		72	81	88	91
	con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres		68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,		45	66	77	83
	cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
	óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial ³ :					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89



AGUA SUPERFICIAL 155

Uso de la tierra	Grupo hidrológico de suelo					
	B			C		
	%	CN	Producto	%	CN	Producto
Residencial (30% impermeable)	20	72	1,440	20	81	1,620
Residencial (65% impermeable)	6	85	510	6	90	540
Carreteras	9	98	882	9	98	882
Terreno abierto: Buena cubierta	4	61	244	4	74	296
Aceptable cubierta	4	69	276	4	79	316
Parqueaderos	7	98	686	7	98	686
	50		4,038	50		4,340

CLASE A: Suelos con alta capacidad de infiltración.
Arenas, gravas y loess profundos.

CLASE B: Suelos con capacidad de infiltración moderada. Loess poco profundos, marga arenosa

CLASE C: Suelos con capacidad de infiltración bajas.
Marga arcillosa, marga arenosa poco profunda, suelos de bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.

CLASE D: Suelos con muy baja capacidad de infiltración o en los que el nivel freático está cerca de la superficie.
Suelos que aumentan de volumen cuando están mojados, arcillas plásticas pesadas y algunos suelos salinos.

Métodos estimación de caudales

- Relaciones precipitación-escorrentía
 - Empíricas: Grunsky, Peñuelas, Coutagne, Turc
 - Generales
- Modelos de simulación hidrológica

Fórmulas empíricas: Escorrentía total anual

- Grunsky (EEUU principios s.XX)

$$E_s = 0.4P^2 \quad (\text{m}); \quad P > 1.25 \text{ (m)}$$

- Si $P > 1.25$ m, todo escurre
- $D_{max} = 625$ mm

Fórmulas empíricas: Escorrentía total anual

- Peñuelas (Chile años 30)

$$E_s = 0.5P^2 \quad (\text{m}); \quad P > 1.0 \text{ (m)}$$

- Si $P > 1.0$ m, todo escurre
- $D_{\max} = 500$ mm

Fórmulas empíricas: Escorrentía total anual

- Coutagne (Francia)

$$D = P - \lambda P^2$$

$$E_s = P - D = \lambda P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{(0.8 + 0.14T)}$$

Temperatura media anual en °C

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$$

$$P < 1/8\lambda \rightarrow D = P$$

$$P > 1/2\lambda \rightarrow D = 0,2 + 0,035 T$$

Fórmulas empíricas: Escorrentía total anual



■ Turc

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P/L)^2}} \quad (\text{mm})$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

$$E_s = P - D$$

Relaciones generales



■ Volumen de escorrentía depende de:

- Precipitación
- Evapotranspiración
- Condiciones iniciales de humedad
- etc.

Relaciones Generales



$$I_{CI} = IPA = aI_p^{t-1} + bI_p^{t-2} + cI_p^{t-3}$$

Indice precipitación
anterior

$$E_s \equiv f(I_p, I_{ET}, I_{CI})$$

Indice saturación

Temperatura o
evaporación

$$I_p \equiv aP_1^{t1} + bP_2^{t2} + cP_3^{t3} + \dots + nP_n^{tn}$$

Métodos basados en estadísticas fluviométricas

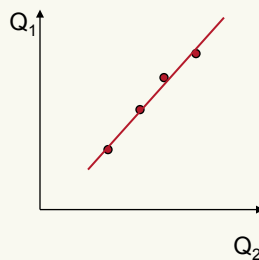


■ Transposición de caudales

$$Q_1/A_1 = Q_2/A_2$$

$$Q_1/(P_1 A_1) = Q_2/(P_2 A_2)$$

■ Correlaciones



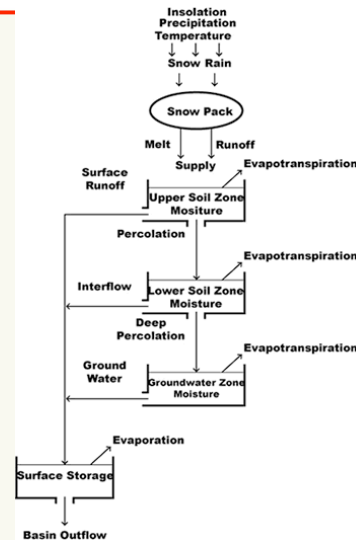
Régimen
fluviométrico
similar

Registros
concurrentes

Modelos de simulación hidrológica



- Modelo conceptual
- Representación matemática
- Calibración
- Validación
- Análisis de sensibilidad



Resumen



- Infiltración
 - Clave para mantener un *buen estado hidrológico*
 - Combinación de fuerzas de atracción eléctricas y gravitacional
 - Difícil de modelar
 - Incertidumbre respecto a procesos
 - Incertidumbre debido a variabilidad de características del suelo
 - Métodos de estimación han mejorado por avance en capacidad computacional

Resumen



- Escorrentía
 - Factores climatológicos, geomorfológicos y biológicos
 - Precipitación es el mayor forzante
 - Influencia escala espacial y temporal en valores
 - Mecanismo de generación no completamente explicado
 - Hidrogramas fuente de información valiosa respecto a la hidrología de una cuenca



Diploma de Postítulo: Hidrogeología Aplicada a la Minería y Medio Ambiente