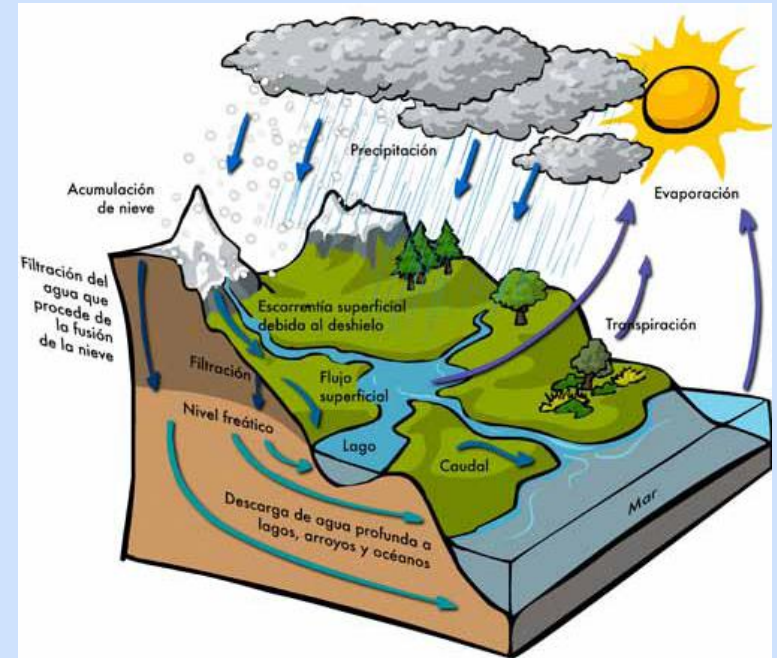


RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL



Edición 2024

Agustín Menta

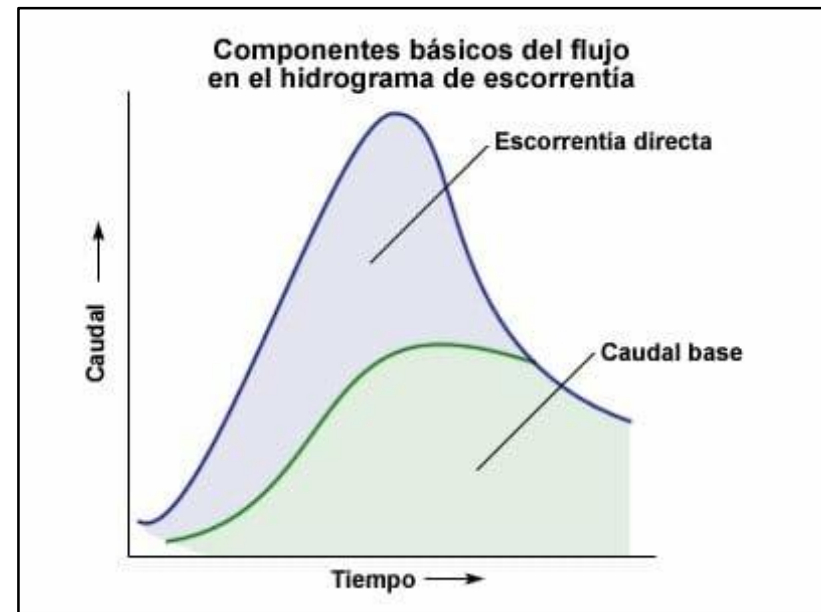
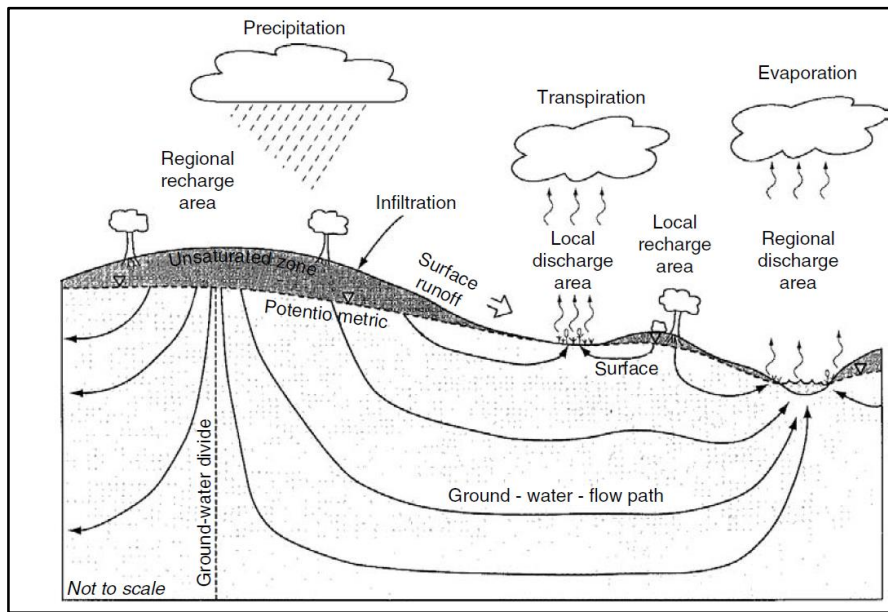
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

amenta@fing.edu.uy

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Objetivos

- ❖ Componentes de un yetograma y de un hidrograma
- ❖ Relación Agua Subterránea-Superficial
- ❖ Separación flujo base a partir de hidrogramas



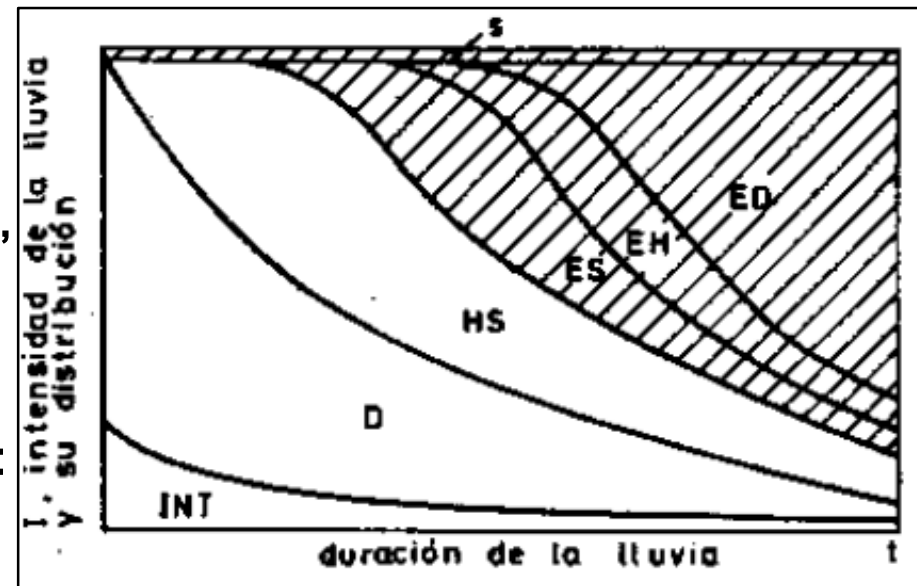
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Distribución de la cantidad de agua precipitada-Yetograma

Componentes del Yetograma

- S: Agua que cae directamente sobre el cuerpo de agua
 - ED: Escorrentía superficial directa
 - EH: Escorrentía hipodérmica
 - ES: Escorrentía subterránea
 - HS: fracción de lluvia retenida en el suelo y luego se evapora
 - D: Detención, agua en charcos, balsas, Etc. y no llega al río.
 - INT: intercepción del dosel vegetal
- Lo que se mide en la estación de aforo es:

S+ED+EH+ES

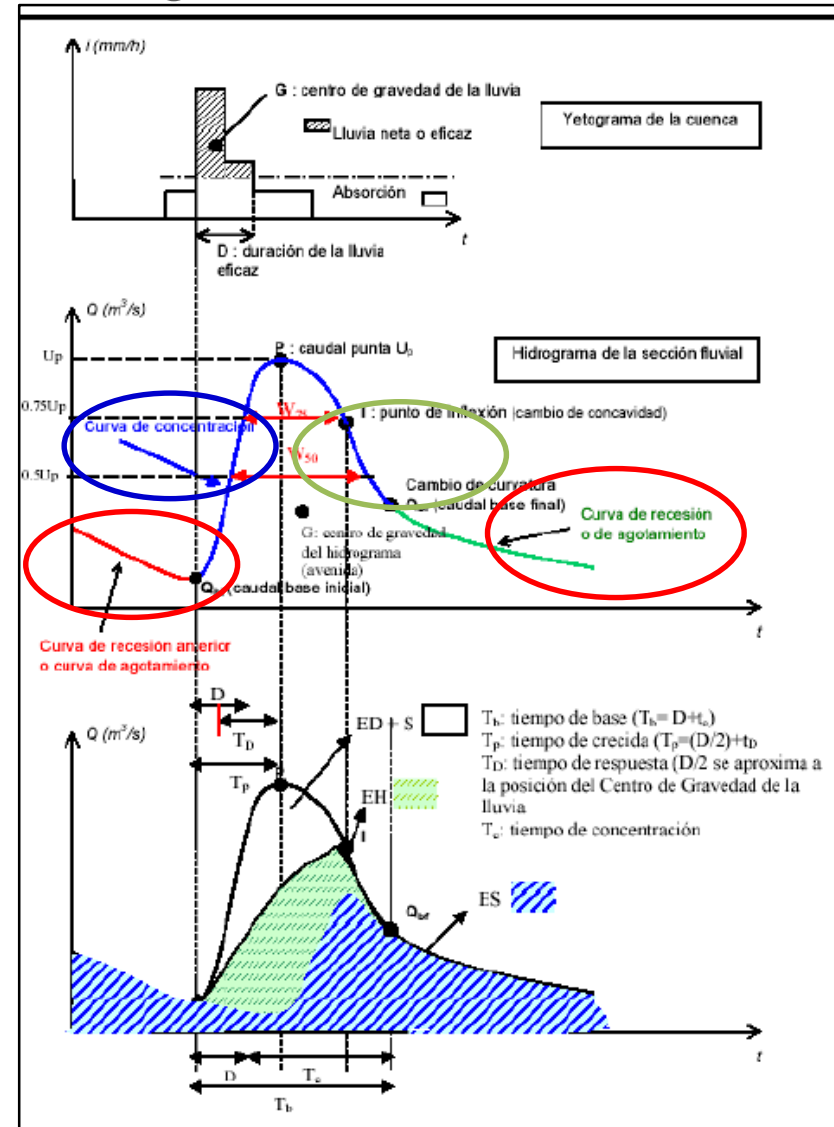


Extraído de Custodio y Llamas (1983)

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Distribución de los caudales-Hidrograma

- Curva de concentración: Crecida debido a la ES fundamentalmente hasta la punta.
- Curva de descenso: Disminución de la ES hasta que cesa por completo.
- Curva de agotamiento: Caudal debido al aporte subterráneo.



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

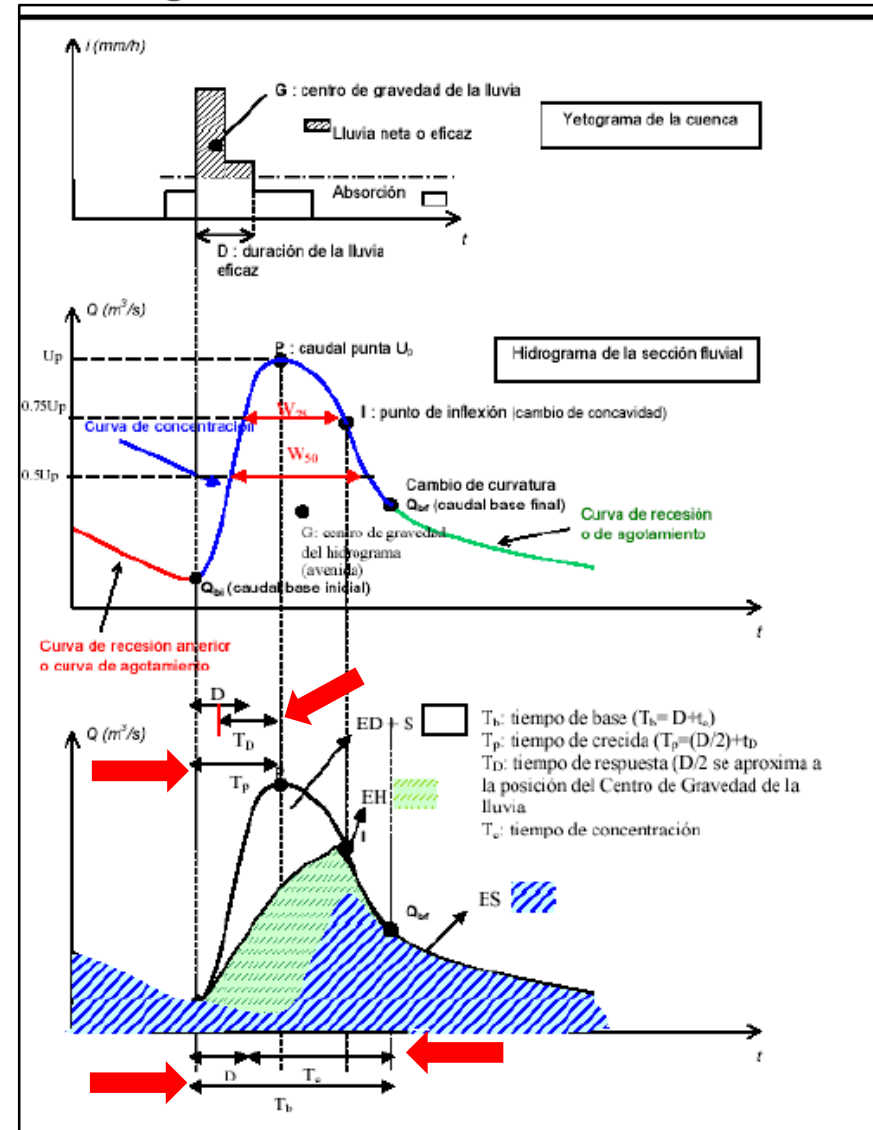
Distribución de los caudales-Hidrograma

Tiempo de crecida (T_p): desde el comienzo del ascenso hasta la punta.

Tiempo de respuesta (T_D): desde el centro de gravedad del yetograma hasta la punta (retraso de la escorrentía).

Tiempo base (T_b): Entre comienzo de la crecida hasta el final de la escorrentía superficial.

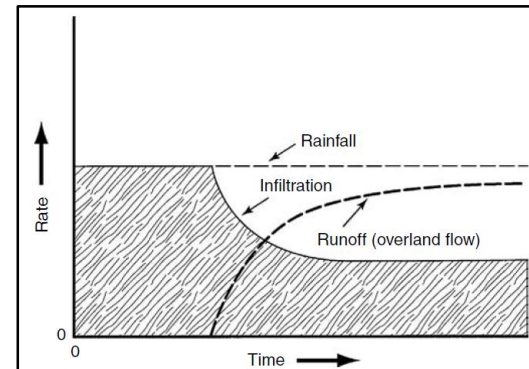
Tiempo de concentración (T_c): lo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia caída en el punto más alejado de la cuenca



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

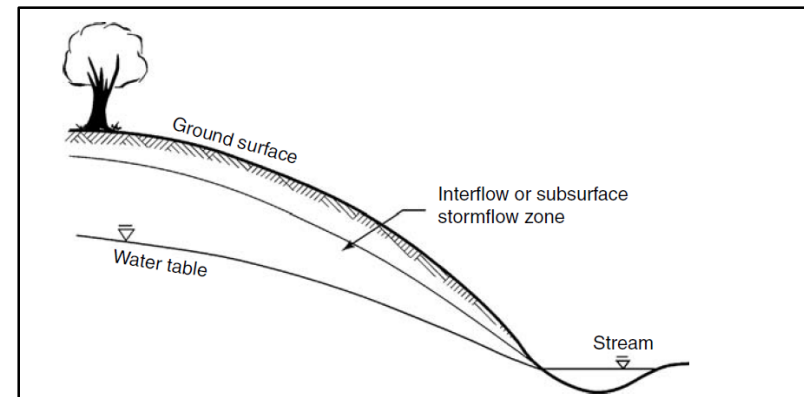
Distribución de la cantidad de agua precipitada-Yetograma

- ED: Escorrentía superficial directa



- EH: Escorrentía hipodérmica

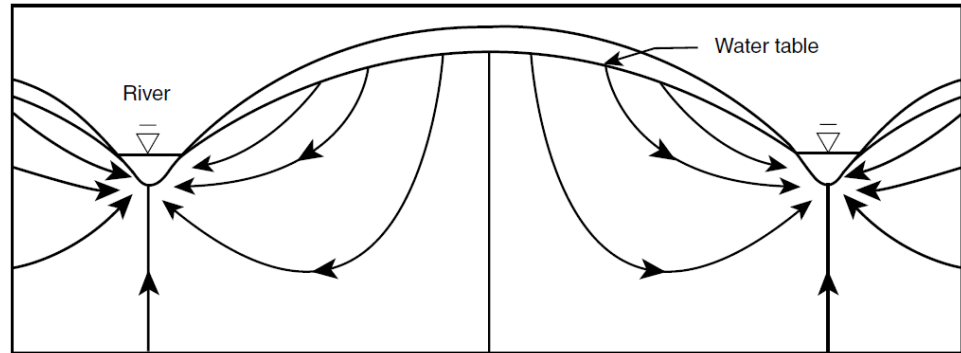
Básicamente por diferencias de conductividad y elevada pendiente



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Distribución de la cantidad de agua precipitada-Yetograma

- ES: Escorrentía subterránea



Lo que se mide en la estación de aforo es:

S+ED+EH+ES

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Manantial (flujo concentrado) o Zona no concentrado (flujo diseminado).

Manantial: Punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo.

Fuente de Vaucluse Francia (8-150 m³/s)



Flujo diseminado: Zona saturada que intercepta la superficie del terreno y descarga mediante un flujo no concentrado.

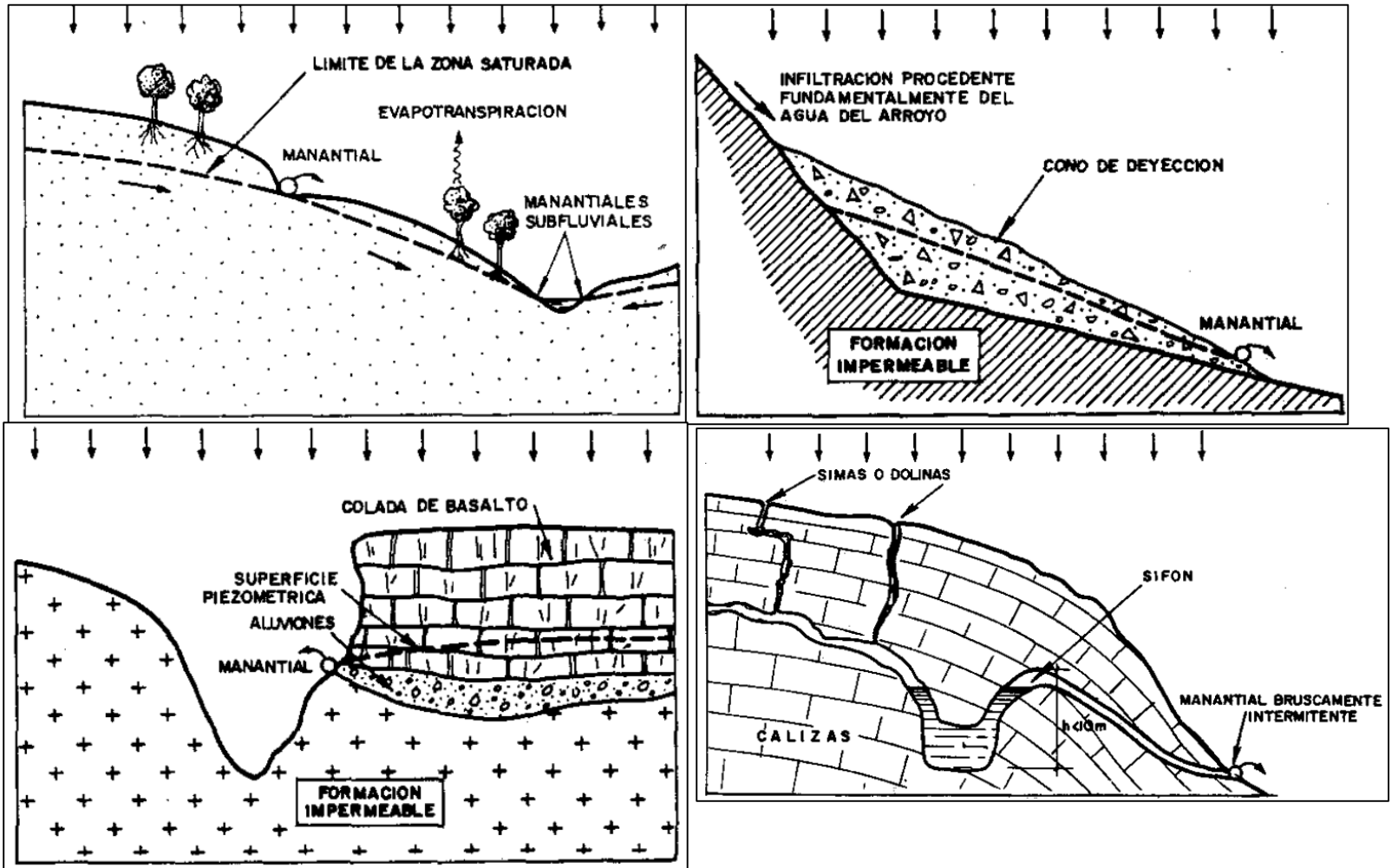
- Directo a río o lago
- Evaporación
- Evapotranspiración (plantas freatofitas)



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

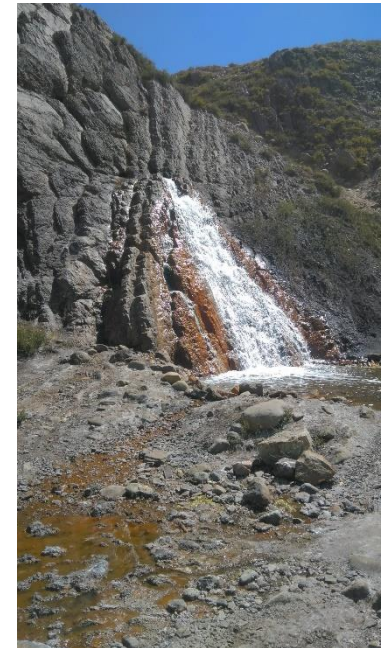
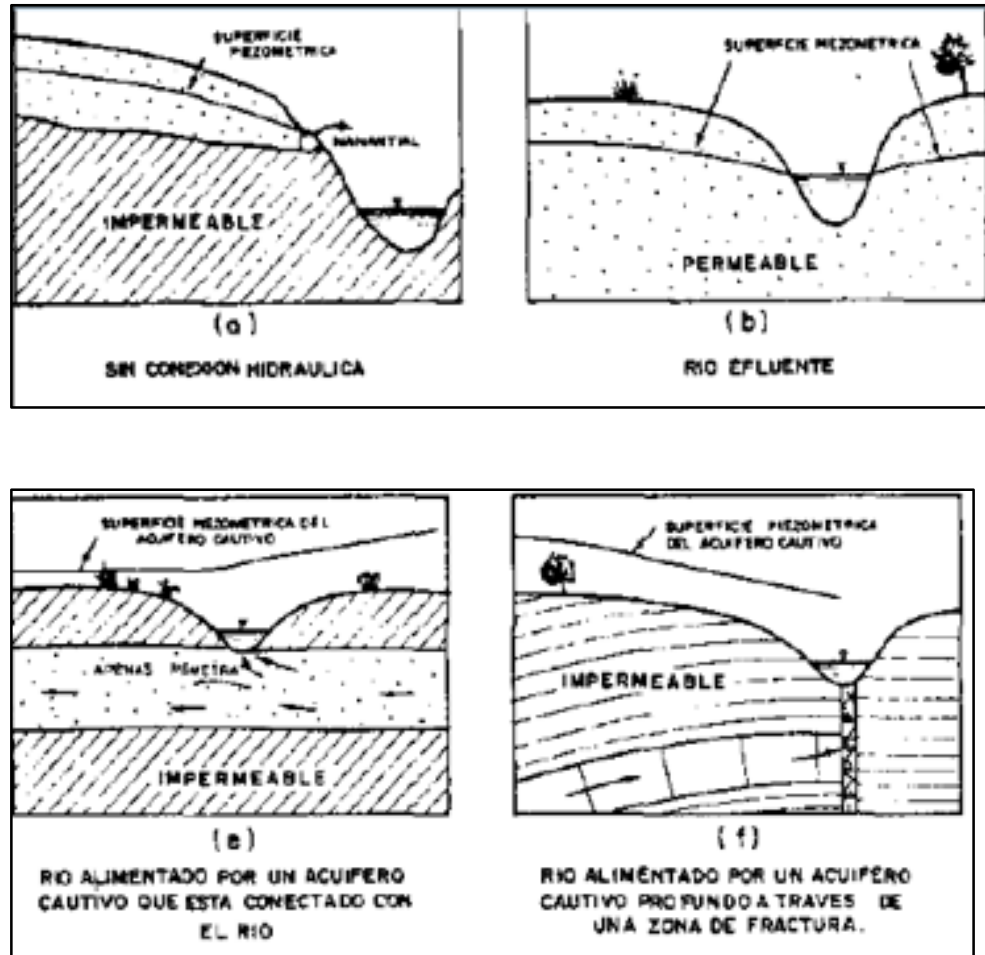
Descarga Agua Subterránea en superficie

Como manantial (flujo concentrado)



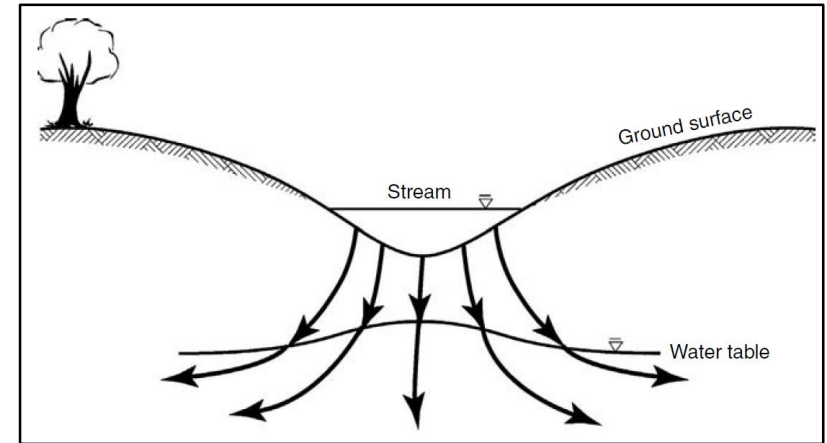
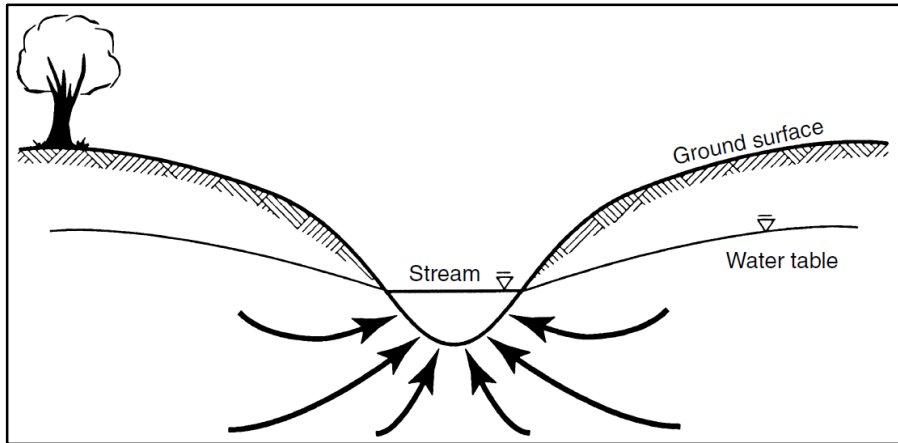
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

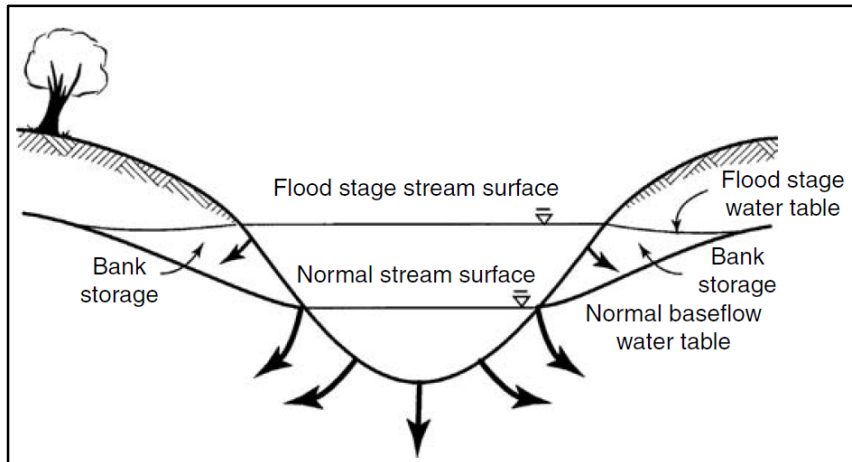


Termas del Plomo
2800 m.s.n.m

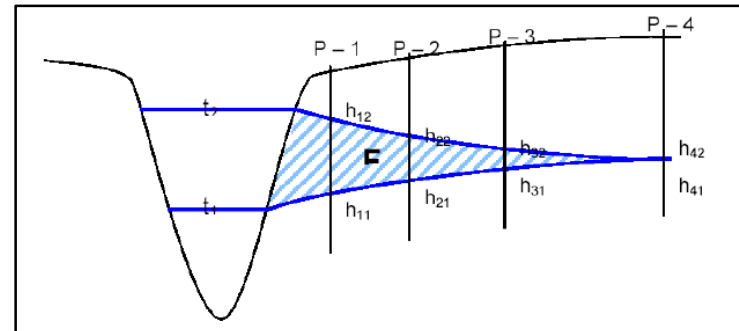
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL



Durante Evento de crecida:



Efecto de ribera



Relación Agua Subterránea-Superficial NO es constante en el tiempo

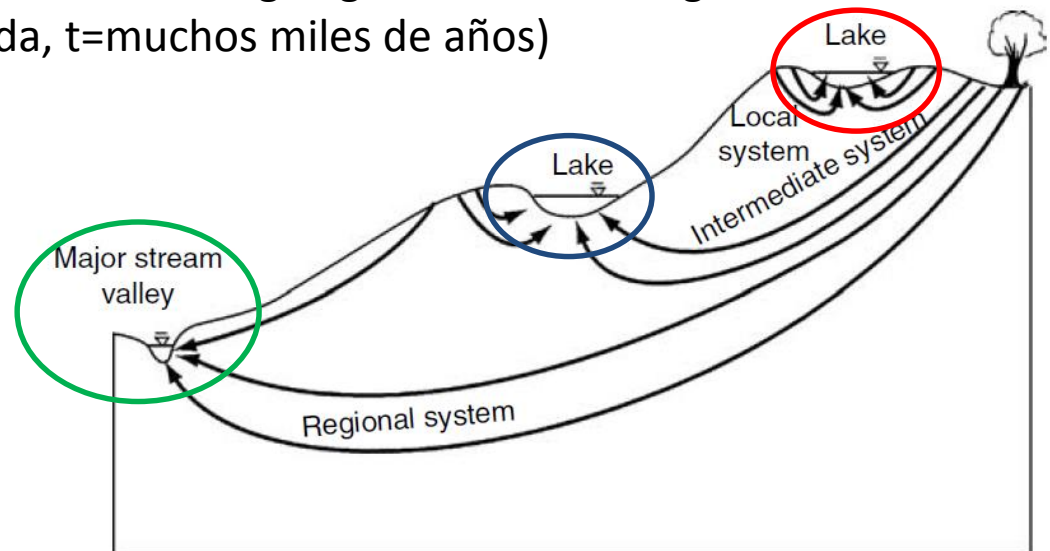
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

El agua subterránea ocurre en un rango muy amplio de profundidad. Desde cerca de la superficie hasta miles de metros de profundidad

Freeze y Cherry (1979) estimaron que los tiempos de residencia pueden variar desde un par de semanas hasta más de 10000 años (Edad Pleistoceno).

Toth (1962) introdujo el concepto de sistemas de flujo. Definió:

- **Sistemas locales** (descarga ocurre cerca de recarga, agua poco evolucionada iónicamente, t =pocos meses a años)
- **Sistemas intermedios** (descarga ocurre de unos pocos cientos a miles de m, t =décadas)
- **Sistemas regionales** (cientos de km, descargan generalmente en grandes ríos o lagos, agua muy evolucionada, t =muchos miles de años)



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

El tiempo de tránsito del agua subterránea permite identificar y distinguir los impactos de la contaminación antropogénica y geológica y es necesaria para comprender la dinámica del flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes.

Por lo tanto:

- **Proporciona información importante para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación**
- **Puede ayudar a mejorar la seguridad hídrica y puede utilizarse para gestionar los recursos hídricos**

Resumido de Mahlkecht et al., 2017).

AÑO	LOCALIDAD	TECNICA UTILIZADA	RANGO DE EDADES	REFERENCIA
1989	Cuautla Yautepec	14C y 3H	Moderna a 15,200	Vázquez-Sánchez et al, 1989
1989	Cuernavaca	14C	Moderna	Jaimes-Palomera et al, 1989
1992	Valle de San Luis Potosi	14C	3,600 - 16,000	Carrillo-Rivera et al, 1992
1997	Comarca Lagunera	14C	10,000 - 30,000	Brouste et al, 1997
2002	Ciudad de México	14C	3300 - 6,000	Edmunds et al, 2002
2002	Alto Rio Laja	14C	2,000 - 13,800	Mahlkecht et al, 2002
2006	Silao Romita	3H, CFC, 14C	50 - 1,000	Horst, 2006
2006	San Miguel de Allende	CFC	7 - 490	Mahlkecht et al, 2006a
2006	La Independencia	14C	500 - 13,800	Mahlkecht et al, 2006b
2008	Silao Romita	3H, CFC, 14C	50 - 300	Horst et al, 2008
2008	Ciudad de Chihuahua	CFC, 14C	97 - 9,000	Mahlkecht et al, 2008
2009	La Independencia	14C	10,000 - 35,000	Ortega-Guerrero, 2009
2010	Valle de Toluca	14C	3,300 - 9,300	Hancox et al, 2010
2014	Ciudad de México	14C	14,237	Morales-Casique et al, 2014
2016	La Paz	14C, CFC	Moderna a 4,700	Tamez-Meléndez et al, 2016
2016	Actopan, Veracruz	14C, 3H/3He, CFC,	Moderna a 11,000	Pérez-Quezadas et al, 2016
2017	Guadalajara	14C, 3H, CFC,	Moderna a 26,800	Mahlkecht et al, 2017

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

La curva de descenso se compone de las tres componentes:

- ED, Escorrentía Directa
- EH, Escorrentía Hipodérmica
- ES, Escorrentía Subterránea

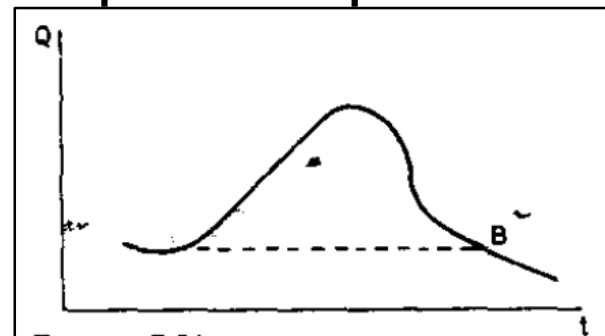
La primera en agotarse es la ED, luego EH y por último la ES.

En la práctica resulta **imposible dibujar exactamente las curvas de separación** entre estas tres componentes.

Sin embargo, existen algunos procedimientos para su separación:

- Método Simplista

Trazar una paralela al eje de abscisas por el punto de subida. Separación grosera



Extraído de Custodio y Llamas (1983)

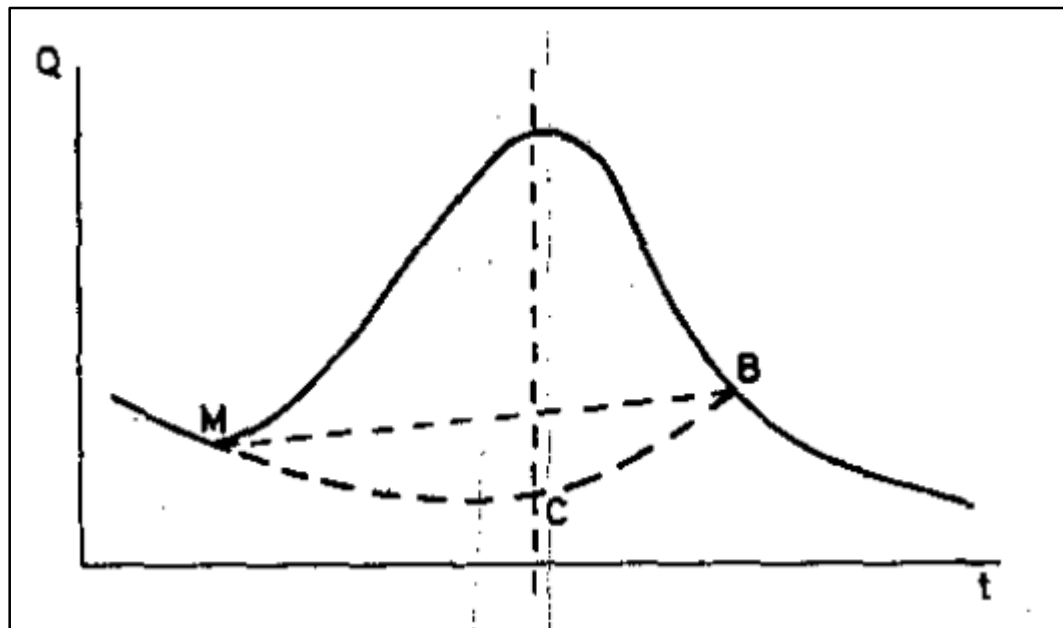
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

- Método con recta

Considerar el punto B de máxima curvatura y unir M con B mediante recta o mediante una curva MCB. Esta curva es aproximada y no sigue una ley.



Extraído de Custodio y Llamas (1983)

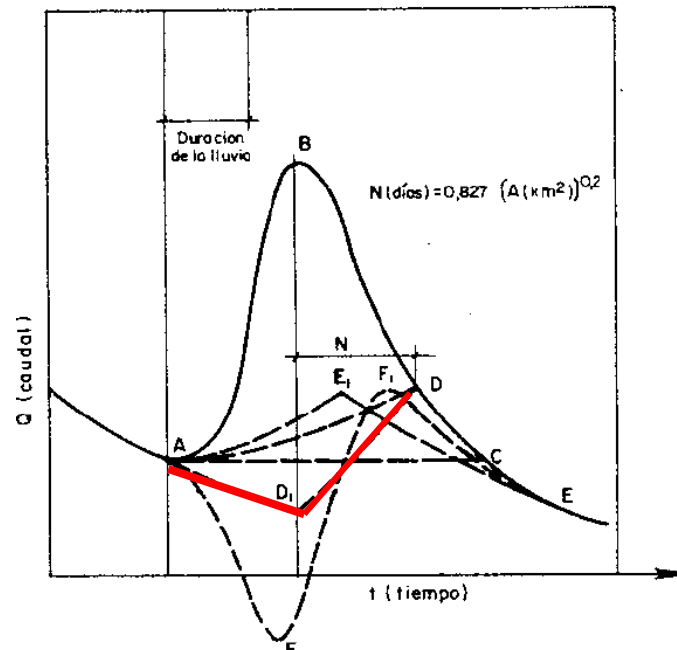
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

- Método Linsley et al., (1958)

Continuar la curva de agotamiento hasta D1 y luego unirla con D que se encuentra N días luego de la cresta. $N = 0.827 A^{0.2}$ A área cuenca (km²) o mediante comparación de varios hidrogramas (este último es mas aconsejable)



Extraído de Custodio y Llamas (1983)

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

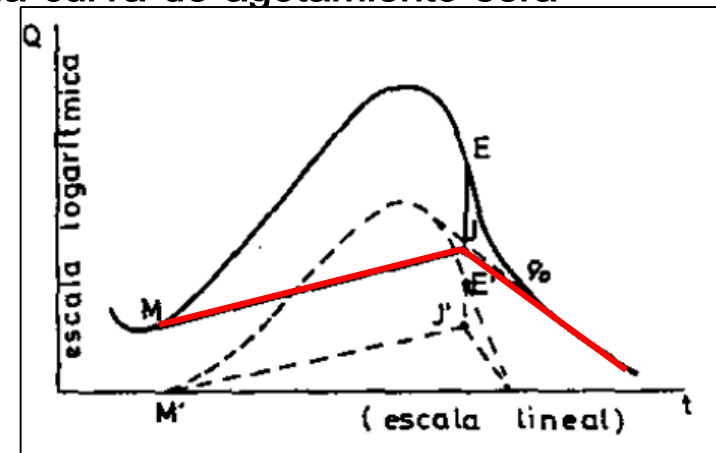
Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

• Método Barnes (1940)

Es el método mas aceptado

- Representando el hidrograma en escala logarítmica, la curva de agotamiento será una recta de pendiente $-\alpha$.
- Se extiende la recta hasta que corta con la vertical desde el punto de inflexión E, se obtiene J.
- Uniendo J con M se logra desglosar la ES.
- Realizando el mismo procedimiento a la resta de la superior y la inferior se puede desglosar la EH y ES .



Extraído de Custodio y Llamas (1983)

El mejor período para realizar estos estudios son los de **extenso Estiaje** o en los que la **escorrentía directa ha salida de la cuenca** y se aconseja graficar Q vs t para evaluar si se alinean a una recta. Otra metodología es ver la relación Q_{n+1}/Q_n y evaluar si se mantienen constantes

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

• Método Químico

Se puede aplicar a cada ion por separado o todos en conjunto siempre que no ocurran procesos de precipitación. se pueden emplear 2H , 3H , ^{18}O , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-

Los mejores iones a emplear son los conservativos por ejemplo el ion Cl

$$C_t Q_t = C_s Q_s + C_D Q_D, \quad Q_s = Q_t \frac{C_t - C_D}{C_s - C_D}$$

Donde:

- C_t concentración iónica de la escorrentía total
- Q_t caudal de la escorrentía total
- C_s concentración iónica de la escorrentía subterránea
- Q_s caudal de la escorrentía subterránea
- C_d concentración iónica de la escorrentía superficial o directa
- Q_d caudal de la escorrentía superficial o directa

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Modelos Matemáticos de descarga

La liberación del agua subterránea sigue la ley exponencial de la forma:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

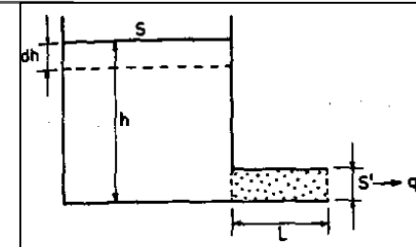
La expresión se obtiene aplicando Ley de Darcy. α describe el decaimiento del flujo en el cauce luego de un evento de recarga.

Las características de recesión del cauce o del flujo subterráneo son muy útiles para estimar:

- Aporte de agua
- Interacción acuífero-cauce
- Ford y Williams (1989) plantean que α define o deriva de las propiedades del acuífero como la transmisividad y almacenamiento. α grande significa drenaje elevado y bajo almacenamiento.

A partir de esta expresión se puede calcular el volumen almacenado por encima del nivel de drenaje:

$$V = \int_0^{\infty} q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{q_0}{\alpha}$$



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Separación de las componentes del Hidrograma

Modelos Matemáticos de descarga y separación de flujo base

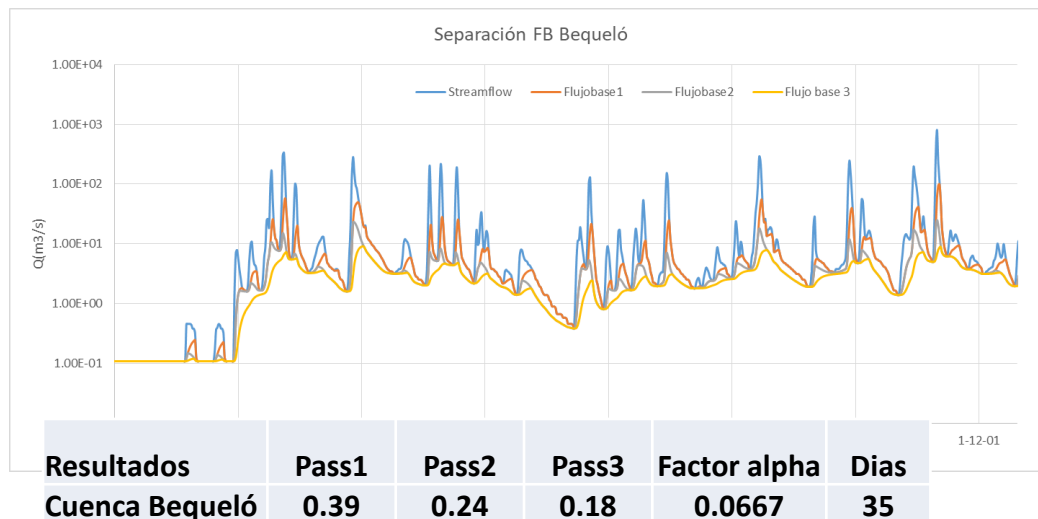
Realizar la separación del flujo base de cada evento de manera manual puede resultar tedioso e inclusive imposible.

Existen filtros automáticos que permiten realizar la separación del flujo base y estimar los caudales base de aporte o constante de recesión

Ejemplo: Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiah, R., & Bernhardt, G. (1995).

Automated base flow separation and recession analysis techniques.

Groundwater, 33(6), 1010-1019.



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

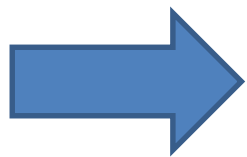
Separación de las componentes del Hidrograma

Separación Escorrentía Directa-Escorrentía Subterránea

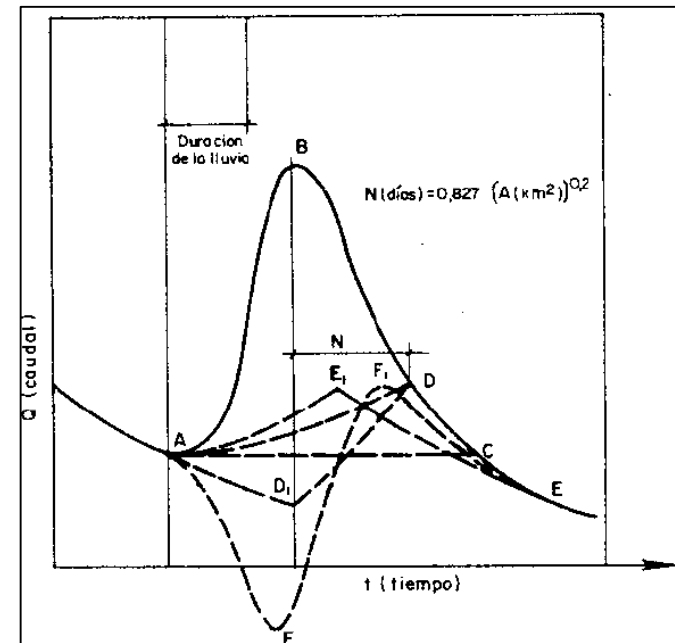
IMPORTANTE!!

Tener en cuenta los factores que dan forma al hidrograma:

- Climáticos
- Fisiográficos
- Tener en cuenta que pueden existir trasvases temporarios o permanentes



Modelo Conceptual



Extraído de Custodio y Llamas (1983)

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Conexión Flujo subterráneo-Superficial depende de:

- ❖ Permeabilidad de las formaciones geológicas en relación con el cauce del río
- ❖ Relación de niveles piezométricos del acuífero y niveles del río.

Antes de realizar los cálculos más o menos complejos, es muy conveniente no sólo saber la situación de los principales **acuíferos de la cuenca** que se estudia en **relación con el cauce del río**, sino también conocer al menos de modo aproximado, **la forma de la superficie piezométrica de cada acuífero**. (Custodio y Llamas, 1983)

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

En áreas donde hay grandes demandas de agua para riego, industria y grandes ciudades, represamiento de arroyos y bombeo intensivo de agua subterránea.



Se altera la interacción agua subterránea-agua superficial.

Por ejemplo la represa:

- Laminar los niveles de crecida afecta cuando los ríos son influentes. Importancia en zonas áridas.
- Aguas arriba eleva los niveles freáticos, lo que hace que algunos cauces perdedores se conviertan en ganadores;
- Aguas abajo hace descender los niveles freáticos, lo que hace que los cauces puedan llegar a desaparecer.

El bombeo intensivo

- Causa que algunos pequeños cauces desaparezcan debido a la reducción del nivel freático.
- Cuando un cauce ganador desaparece, **puede introducir contaminantes superficiales en el sistema de agua subterránea.**

Riego Intensivo

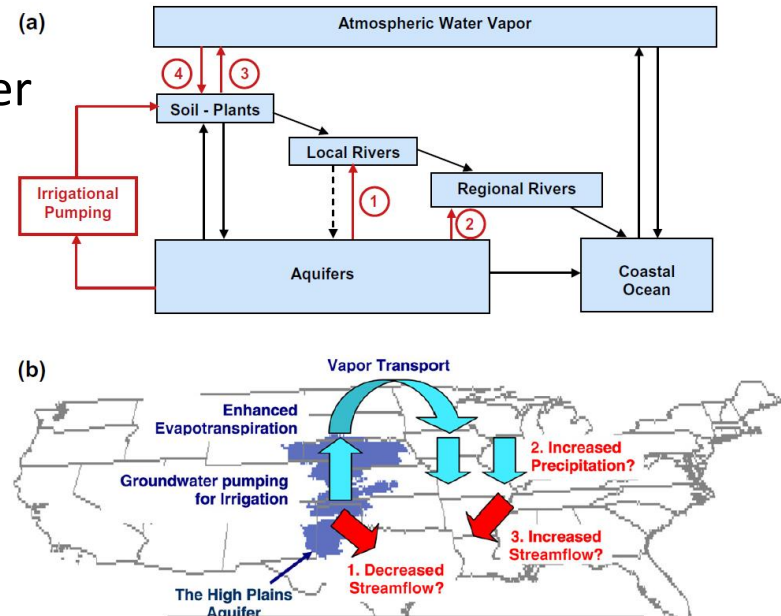
- Excedentes de riego, aumentan los niveles considerablemente

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio (Kustu (2010)): Large-scale water cycle perturbation due to irrigation pumping in the US High Plains: A synthesis of observed streamflow changes. **Escala Regional**

- **Análisis estadístico de datos desde 1940-1980.**
- **En este acuífero se ha generado una reducción de 330 km³ en el almacenamiento del acuífero (8.5% del total).**
- **Zona muy productiva y el acuífero de las grandes planicies es una de las principales fuentes de suministro para riego (85%). Hay aproximadamente 170000 perforaciones.**
- **Se han generado descensos de 30 m en promedio en algunas zonas del acuífero.**

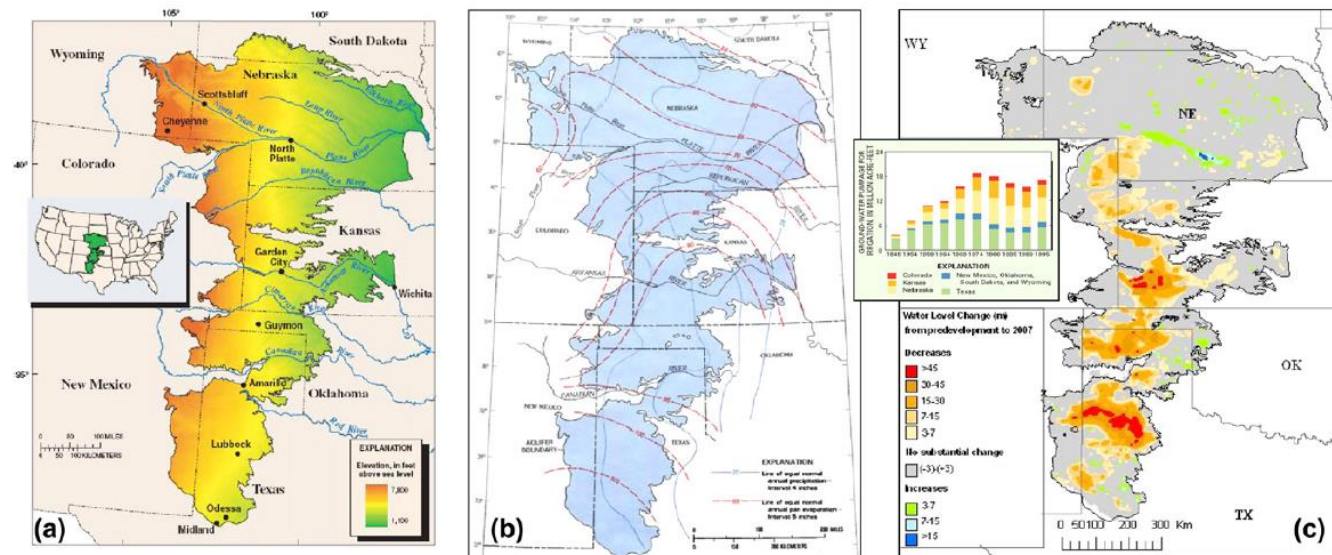


RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio (Kustu (2010)): Large-scale water cycle perturbation due to irrigation pumping in the US High Plains: A synthesis of observed streamflow changes. **Escala Regional**

- Acuífero sedimentario, libre con $k=0.3$ m/d. Espesor saturado de 0-300 m, en promedio 60m. Recarga variable según la zona (0.6 -150 mm/año).
- Volumen útil de 4050 km³
- Para el análisis se usó el test Mann Kendall (enfoque basado en aleatoriedad frente a tendencias en las series temporales de datos).

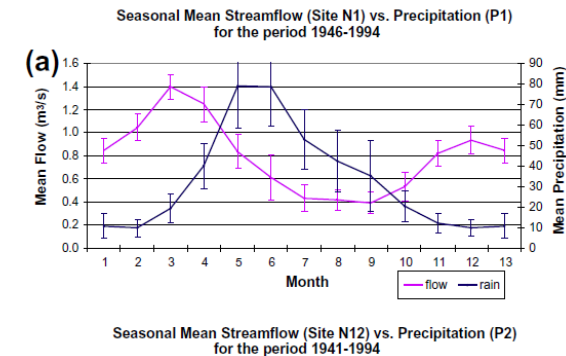


RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio (Kustu (2010)): Large-scale water cycle perturbation due to irrigation pumping in the US High Plains: A synthesis of observed streamflow changes. **Escala Regional**

- **Determinaron la relación Agua subterránea-Cauces mediante:**
 - ❖ Relación entre los ciclos estacionales de caudales y lluvias locales.
 - ❖ Niveles en el acuífero y caudales a nivel estacional.
 - ❖ Persistencia temporal de los caudales.
 - ❖ Relación de niveles en el acuífero respecto al piso del cauce.



➔ **Mayor dependencia en el norte respecto al sur**

- Observaron menores caudales en los cauces debido al detrimento de los niveles en el acuífero debido a la explotación intensiva. No se observó correlación con la lluvia.
- Análisis de descenso de caudales fue mas significativo en el norte respecto al sur

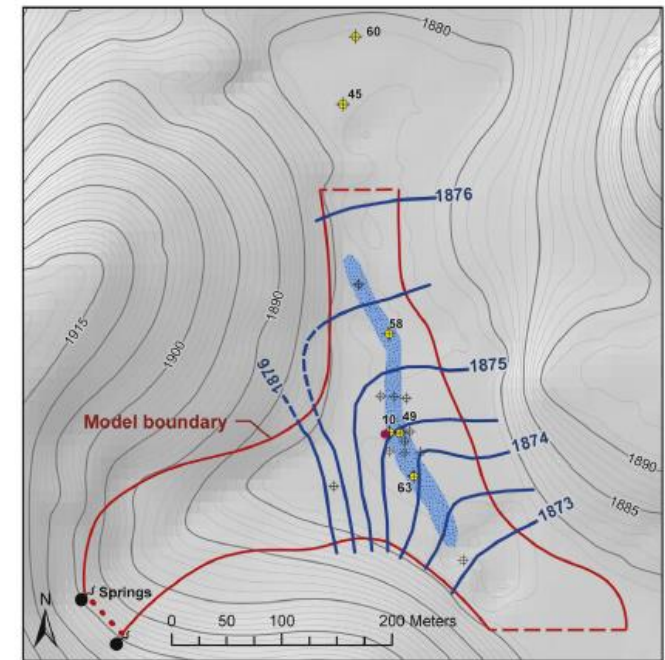
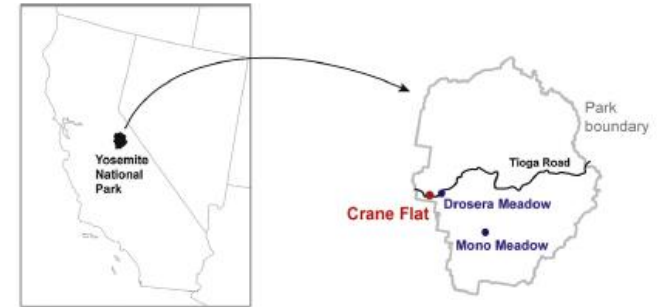
Concluyen que al enfocarse en patrones regionales, este estudio sirvió como una síntesis del agotamiento del flujo inducido por la explotación de las aguas subterráneas a gran escala y a largo plazo.

RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio (Cooper (2015)): Efectos del bombeo de agua subterránea en la sustentabilidad de un humedal en el Parque Nacional Yosemite, California. USA. Escala Intermedia

- Perforación de 122m de profundidad que bombea 8 m³/h. Mayor volumen se extrae de la porción superior de la perforación y en los meses de veranos debido a los visitantes del parque.
- Se realizaron piezómetros en el entorno del humedal y de la perforación.
- Se realizó modelación en estacionario y transitorio.

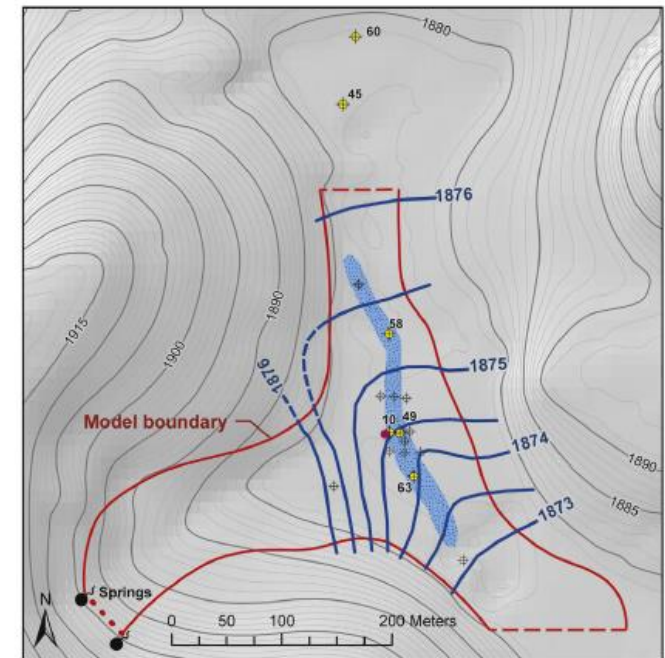
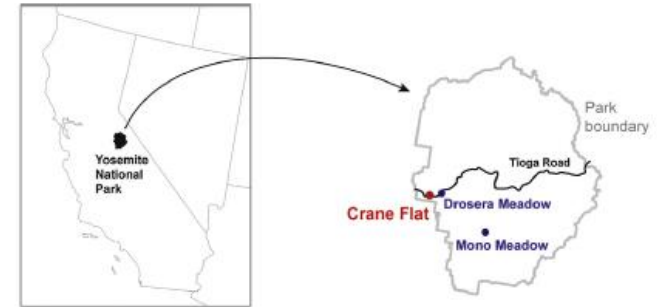


RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio (Cooper (2015)): Efectos del bombeo de agua subterránea en la sustentabilidad de un humedal en el Parque Nacional Yosemite, California. USA.

- Se observó que el bombeo afectó directamente a la vegetación debido a que permitió la invasión de plantas en la zona de humedales así como la oxidación de la turba que cubre la zona.
- En años secos los niveles en el humedal descendieron por debajo de los niveles de referencia respecto a los sitios de comparación. En años húmedos no generó gran incidencia.
- Transformó el sitio de generador de materia orgánica en un perdedor de material orgánico debido a la oxidación, erosión y deslizamientos.
- Definieron momentos apropiados de bombeo en función de la condiciones climáticas de la temporada previa **➡ GESTIÓN Y MANEJO**



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Se recomienda realizar la lectura de Llamas (1988)

Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geology and Water Sciences*, 11(3), 241-251.

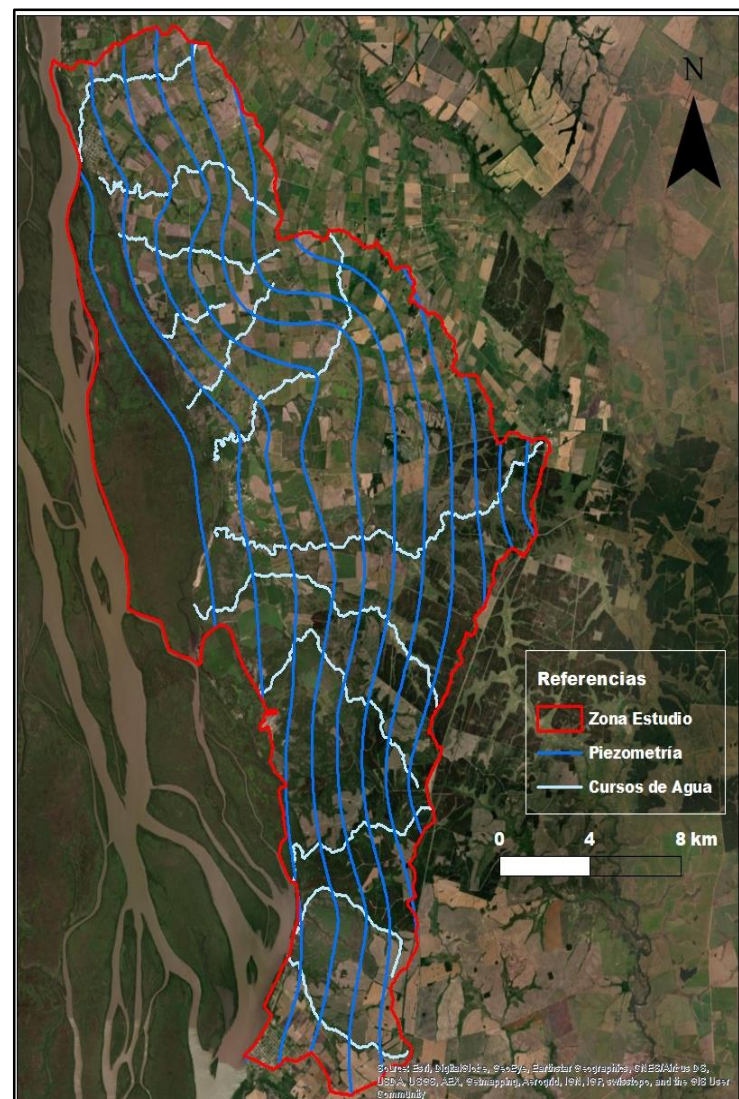
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio: Parque Nacional Esteros de Farrapos.

Etapa de conformación del modelo conceptual

- Descripción cuencas superficiales de aporte.
- Relevamiento piezométrico de perforaciones y conformación de mapa piezométrico.
- Descripción geológica del sitio.
- Muestreo hidroquímico e isotópico.



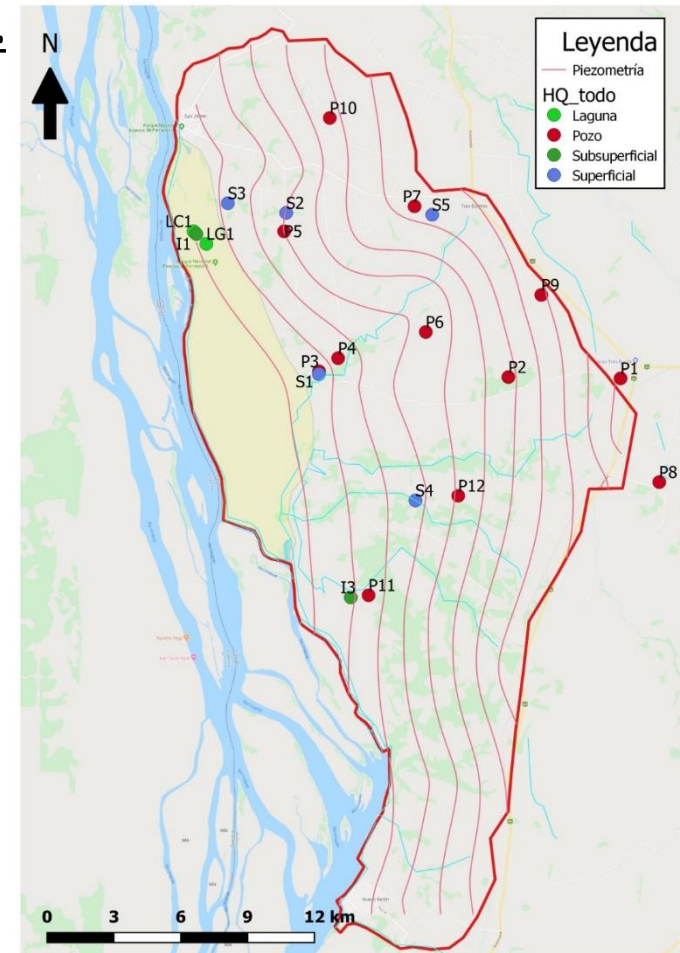
RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Descarga Agua Subterránea en superficie

Caso de estudio: Parque Nacional Esteros de Farrapos.

Etapa de conformación del modelo conceptual

- Muestreo en función de líneas de flujo buscando **evolución de la composición química.**
- Muestreo a lo largo del cauce.
- ❖ Composición iónica del cauce se parece a la del agua subterránea hacia aguas abajo del cauce.
- ❖ El flujo en el medio subterráneo tiene dirección de flujo de E-W y descarga en cauces.
- ❖ Definición del tipo y calidad del agua.



RELACIÓN AGUA SUBTERRÁNEA-SUPERFICIAL

Bibliografía

- ❖ Barnes, B. S. (1940). Discussion of analysis of runoff characteristics. Trans. ASCE, 105, 106.
- ❖ Cooper, D. J., Wolf, E. C., Ronayne, M. J., & Roche, J. W. (2015). Effects of groundwater pumping on the sustainability of a mountain wetland complex, Yosemite National Park, California. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 87-105.
- ❖ Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrogeología subterránea. Ed. *Omega*, 2.
- ❖ Delleur, J. W. (Ed.). (2006). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.
- ❖ Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- ❖ Linsley, R. K., M. Kohler and J. L. H. Paulus. 1949. Applied Hydrology. Ed. McGraw-Hill. United States of America. 680 p.
- ❖ Linsley, R. K., & Kohler, M. A. (1958). *Hydrology for engineers* (No. 627 L5).
- ❖ Llamas, M. R. (1988). Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geology and Water Sciences*, 11(3), 241-251.
- ❖ Tóth, J. 1962. A theory of groundwater motion in small basins in Central Alberta, Canada. J. Geophys. Res. 67, 4375–4387.