

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 1 de 11 hojas

Unidad 1

1 La Hidrósfera:

La hidrosfera es la capa de agua que rodea la Tierra. El agua circula continuamente de unos lugares a otros, cambiando su estado físico, en una sucesión cíclica de procesos que constituyen el denominado ciclo hidrológico, el cual es la causa fundamental de la constante transformación de la superficie terrestre. La energía necesaria para que se puedan realizar esos cambios de estado del agua y el ciclo hidrológico procede del Sol. También influye en este ciclo la gravedad que es la encargada de generar el movimiento del agua desde las cotas más altas hacia el mar.

En resumen la hidrósfera es una cubierta dinámica, con continuos movimientos y cambios de estado, que regula el clima, participa en el modelado del relieve y hace posible la vida sobre la Tierra. La hidrosfera es también responsable de riesgos geológicos externos como inundaciones, muchos deslizamientos del terreno y algunas subsidencias del terreno.

La hidrosfera se formó por la condensación y solidificación del vapor de agua conteniendo en la atmósfera primitiva. El agua cubre casi las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra. La mayoría (97%) es agua salada que forma mares y océanos y, una pequeña parte (3%), se encuentra en la atmósfera y sobre los continentes, generalmente en forma de agua dulce. Esta última parte se encuentra de mayor a menor cantidad de agua:

hielo > agua subterránea > lagos, embalses, pantanos, ríos > atmósfera > biosfera (seres vivos).

Entre las características de la hidrosfera se destaca la composición mineral, salinidad, contenido en oxígeno, variación de la temperatura con la profundidad y densidad.

1.1 El ciclo hidrológico

El concepto de ciclo hidrológico involucra el movimiento o transferencia de las masas de agua desde un lugar a otro y desde un estado a otro. El movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente al sol que proporciona la energía suficiente para elevar el agua del suelo o de un cuerpo de agua superficial, al evaporarla. Otro factor de importancia es la fuerza de la gravedad, que permite que el agua condensada precipite y que una vez caída sobre la superficie, escurra hacia las zonas más deprimidas (Custodio & Llamas, 1996).

El ciclo del agua se inicia cuando una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y se originan las precipitaciones en forma de lluvia o nieve. Se debe tener presente que no toda la lluvia alcanza la superficie de la tierra, ya que una parte se vuelve a evaporar inmediatamente durante su caída y otra es retenida o interceptada por

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 2 de 11 hojas

la vegetación o por las superficies de edificios, carreteras, etc., y vuelve a la atmósfera en forma de vapor. De aquella agua que alcanza la superficie del terreno, una parte es retenida en pequeñas depresiones (charcos y aguadas) y en gran proporción retorna casi inmediatamente a la atmósfera por evaporación. Otra parte circula sobre la superficie y se concentra en pequeñas arroyadas y líneas de drenaje, que se reúnen en arroyos y luego en los ríos, constituyendo el agua de escurrimiento superficial, que tiene como destino final un lago o el mar, desde donde será evaporada o bien, se infiltrará en el terreno por donde circula.

Por último, hay una tercera parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno, conocida como infiltración, que se realiza a través de canales, fisuras y poros del suelo, a los que va llenando progresivamente. Un cierto volumen del agua infiltrada no desciende hasta la zona saturada o del agua subterránea propiamente dicha, sino que es retenida en los que se conoce como zona no saturada o zona de humedad del suelo, desde donde vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas.

Establecer la cantidad que corresponde a una u otra es tarea muy difícil, por lo que es común que siempre se aplique el término de evapotranspiración para el conjunto del fenómeno (Fetter, 1988).

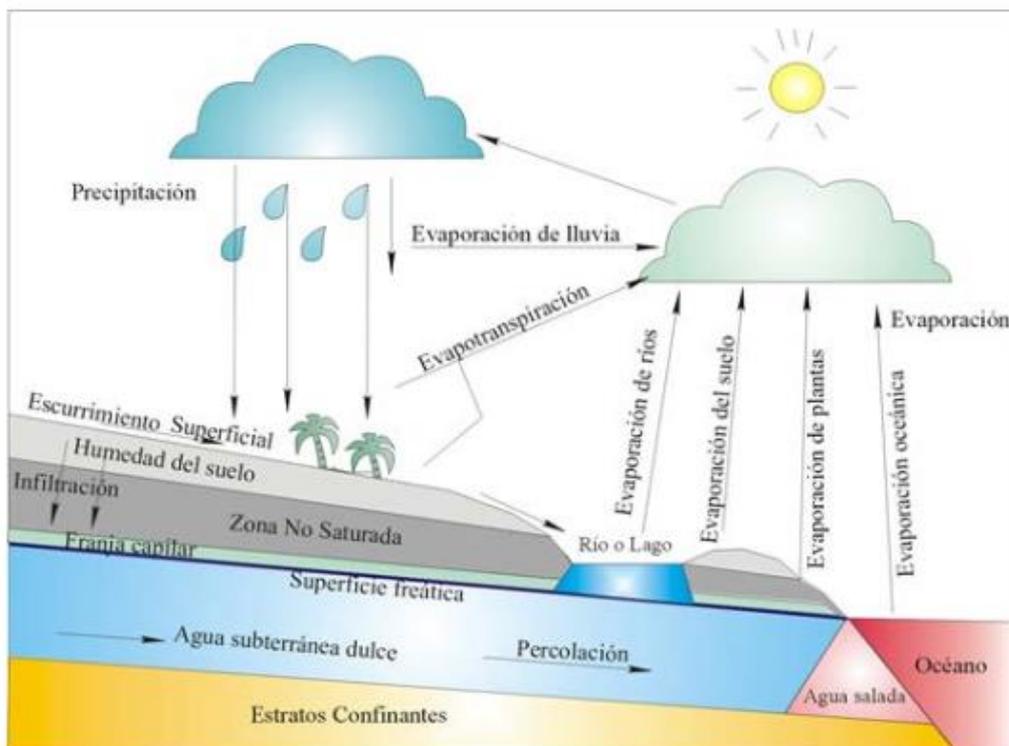


Figura 1.2: Esquema del ciclo hidrológico en la tierra (Fetter, 1988)

El movimiento del agua a través de un terreno se caracteriza por su relativa lentitud y su origen se debe fundamentalmente a la acción gravitatoria. En la zona no saturada, existen otras fuerzas (especialmente la tensión superficial) que originan muchas veces la presencia de una faja más o menos continua llamada faja capilar, desde donde el agua

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 3 de 11 hojas

puede retornar a la superficie a través de la evaporación, transpiración o ambos fenómenos a la vez. Otras veces el agua subterránea alimenta directamente a los cauces fluviales, origina manantiales, o entrega sus caudales directamente al mar.

Excepto en las cuencas endorreicas de las zonas áridas o semiáridas (como las existentes en el Altiplano Sudamericano), la mayor parte de las aguas del escurrimiento fluvial y subterráneo terminan, más tarde o más temprano en el mar, por lo que se debe considerar a los océanos como la fase final del ciclo hidrológico, ya que de ellos vuelve a evaporarse y se re-inicia nuevamente todo el proceso.

El ciclo hidrológico es un mecanismo en que una partícula de agua evaporada desde el océano vuelve a éste luego de pasar por las etapas de precipitación y escurrimiento fluvial y subterráneo, caracterizándose por que este movimiento puede tener una marcada irregularidad en el espacio y en el tiempo, además de las interrupciones que pueden suceder en cualquiera de las etapas del ciclo global.

1.2 Distribución del Agua en la Tierra.

Un esquema de la distribución se puede observar en la Fig.1.2

97% salada (océanos y mares)

3% dulce (hielo > agua subterránea > lagos-embalses, pantanos, ríos > atmósfera > biosfera).

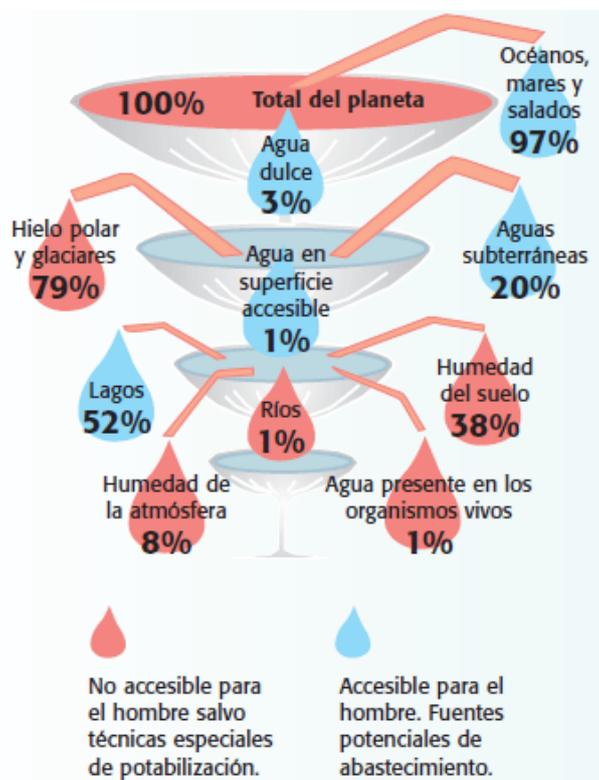


Figura 1.2: Distribución del agua en el Planeta

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 4 de 11 hojas

1.3 Balance Hídrico

(extraído de Balance Hídrico y Recarga de Acuífero de C. Schuldz y R. García)

La ecuación del balance global es la ecuación de la continuidad, basada en el principio de Lavoisier de que “nada se crea, nada se destruye, todo se transforma”, y se puede expresar:

$$I - E = \pm \Delta V$$

Donde:

I: Ingresos

E: Egresos

ΔV : Variación del almacenamiento

Esta ecuación puede ser aplicada a una región o unidad de estudio cualquiera y en un tiempo cualquiera. Sin embargo, cuando la unidad de tiempo es grande se debe considerar que las variaciones en el volumen almacenado son despreciables y, en ese caso, las entradas son iguales a las salidas. Este balance puede ser analizado con más detalle si se recuerda que tanto el escurrimiento superficial, el flujo subterráneo y la evapotranspiración dependen de una única fuente primaria: las precipitaciones. De esta manera la fórmula del balance global se puede expresar como:

$$P = Es + ET + In \quad \text{o también} \quad P - Es - ET - In = 0$$

Donde:

P: Precipitación

Es: Escorrentía Superficial

ET: Evapotranspiración

In: Infiltración

Como es de suponer, en el ciclo hidrológico se puede considerar a todas las fases que forman parte de él (Fig. 1.3) comenzando desde cualquier punto o lugar; sin embargo lo más intuitivo es comenzar con la "materia prima" del mismo que es la Precipitación y a partir de allí, considerar qué caminos puede seguir el agua que cae en forma de lluvias. Estos caminos pueden ser:

a) Evaporación: Una vez que el agua de lluvia alcanzó la superficie terrestre; una parte se evapora desde la superficie del suelo o bien directamente desde el follaje de los árboles. A este último fenómeno se le denomina interceptación, y en lluvias de corta duración sobre zonas boscosas éstas pueden devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber alcanzado el suelo.

b) Infiltración: El agua que se infiltra puede, a su vez, seguir varios caminos:

- i. Evaporación: El agua se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación que se desarrolle sobre el suelo en cuestión.
- ii. Transpiración: Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo; quedando una parte retenida para el aprovechamiento de las especies

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 5 de 11 hojas

- vegetales, mientras que la mayor parte es transpirada.
- iii. Esgurrimiento Subsuperficial o Hipodérmico: Corresponde a aquella parte del agua infiltrada que tras un corto recorrido lateral y antes de llegar a la superficie freática, vuelve nuevamente a la superficie.
 - iv. Si no es evaporada ni atrapada por las raíces de las plantas, la fuerza de la gravedad continuará actuando sobre las moléculas de agua haciendo que éstas continúen migrando hacia abajo, hasta alcanzar la superficie freática. Allí, aún puede ser una parte atrapada por las raíces de las plantas freatófitas, de raíces muy profundas y que a diferencia de otras plantas, buscan agua del medio saturado.
 - v. Finalmente, el agua restante da lugar al Esgurrimiento Subterráneo.

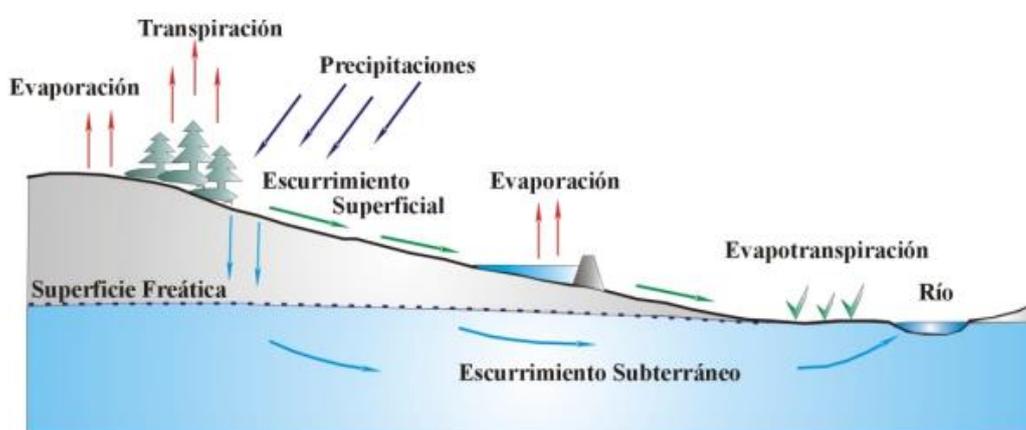


Figura 1.3: Fases del ciclo hidrológico subterráneo (extraído de Schuldz y García).

- c) Esgurrimiento Superficial: El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre libremente por la superficie terrestre bajo la influencia de la gravedad. Esta agua a su vez puede seguir los siguientes caminos:
- i. Parte es evaporada desde la superficie del curso fluvial, lagos y embalses.
 - ii. Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo en lagos o embalses. Esta parte se conoce con el nombre de Esgurrimiento Superficial Diferido.
 - iii. Finalmente una parte es el Esgurrimiento Superficial Rápido que sigue su camino a un nivel de base local y, finalmente, al mar.

Se conoce con el nombre de Esgurrimiento Directo a aquella porción que llega a los cauces de agua superficiales en un periodo de tiempo corto tras la precipitación que le dio origen. Normalmente, engloba el Esgurrimiento Superficial y el Esgurrimiento Subsuperficial. Son imposibles de distinguir ya que una gran parte de lo que parece Esgurrimiento Superficial (por el aumento de los caudales que sigue a las precipitaciones) ha estado infiltrada subsuperficialmente.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 6 de 11 hojas

Se denomina Esgurrimiento Básico al volumen de agua que alimenta los cauces superficiales durante la época de estiaje (durante los periodos sin precipitaciones). Este concepto engloba al Esgurrimiento Subterráneo y al Esgurrimiento Superficial Diferido. Se sabe con mayor o menor grado de certeza cual son los posibles caminos que pueden seguir el agua evaporada, el agua del esgurrimiento superficial y el agua infiltrada. Para completar la visión general del ciclo del agua es necesario conocer como es el largo camino que sigue el agua subterránea en el subsuelo. El agua que ha alcanzado la zona saturada, circulará por el medio (rocas porosas, fisuradas o sedimentos) siguiendo los gradientes hidráulicos regionales; es decir la pendiente hidráulica (el término involucra el concepto de que el agua se mueve desde una zona de mayor nivel energético hacia otra de menor valor). Este camino, desde su ingreso hasta su salida puede ser de unos cuantos metros, cientos y aún miles de metros o kilómetros, durante un periodo que puede variar desde unos meses hasta miles de años. Esta salida al exterior puede ser:

- i. Artificialmente, a través de pozos u otras obras de captación.
- ii. Naturalmente, a través de un manantial.
- iii. Naturalmente, a través de los procesos de evapotranspiración, por las plantas freatofitas o por que la superficie freática se encuentra muy cerca de la superficie del terreno.
- iv. Naturalmente, luego de entregar sus aguas a un curso fluvial.
- v. Naturalmente, entregando sus aguas al mar, lago, salar, etc.

De todas estas formas en que el agua subterránea puede manifestarse nuevamente hacia el exterior, las dos más importantes son las aportaciones hacia los cursos fluviales y hacia el mar. Así, en el primer caso, las aguas subterráneas pueden dar origen a Esgurrimiento Fluvial cuando existe un comportamiento efluente de un curso fluvial, es decir que recibe aportes del agua subterránea (Fig. 1.4). En el segundo caso, en las zonas costeras, la afluencia de agua subterránea juega un papel preponderante en el equilibrio de la interfase agua dulce - agua salada de las regiones costeras.

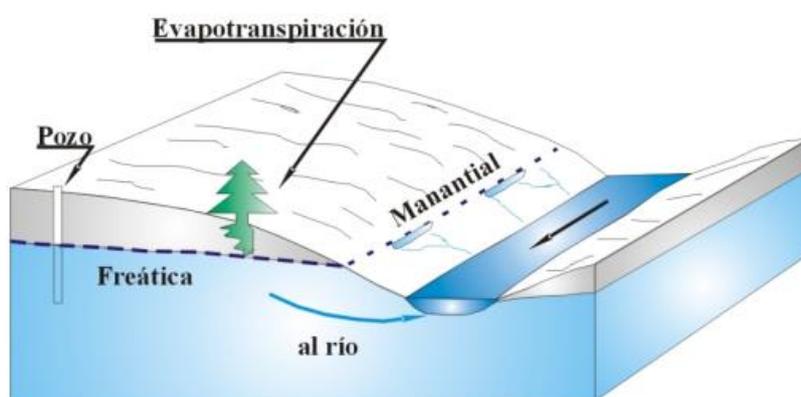


Figura 1.4: Esquema teórico de descargas de aguas subterráneas (extraído de Schuldz y García)

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 7 de 11 hojas

2 Ciencias del Agua

2.1 Hidrología

La hidrología es una rama de las ciencias de la Tierra que estudia el agua, su ocurrencia, distribución, circulación, y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares. Por otra parte, el estudio de las aguas subterráneas corresponde a la hidrogeología.

Por el contrario, se denomina hidrografía al estudio de todas las masas de agua de la Tierra y, en sentido más estricto, a la medida, recopilación y representación de los datos relativos al fondo del océano, las costas, las mareas y las corrientes, de manera que se puedan plasmar sobre una carta hidrográfica. No obstante esta diferencia, los términos se utilizarán casi como sinónimos, ya que la parte de la hidrografía que interesa aquí es aquella que crea relieve, por lo tanto, la que está en contacto con la superficie terrestre, y por eso mismo la que es objeto de un análisis hidrológico.

2.2 Hidrogeología

La hidrogeología o hidrología subterránea es, según Mijailov, la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación. Es, por tanto, una de las ramas más complejas de la geología. Basta ver el índice del libro Hidrología subterránea de E. Custodio y M. R. Llamas, obra cumbre de la hidrogeología en castellano, publicado por primera vez en 1974 y plenamente vigente en la actualidad, para confirmar su complejidad.

Históricamente la utilización del agua subterránea está ligada a la evolución de las sociedades en los albores de la humanidad, ya que se necesitaban dotes de observación e interpretación de la naturaleza para encontrar agua con la que sobrevivir. La combinación de necesidad de disponer de fácil acceso al agua subterránea y el ingenio humano le llevó a captar manantiales y desarrollar métodos de construcción de pozos y galerías. En Persia aparecieron los qanats —un tipo de galerías o minas de agua— en el 1000 a. C.; con la ruta de la Seda esta técnica llegó hasta China. Por otra parte, los celtas y los griegos utilizaban determinados manantiales como lugares sagrados pero fueron los romanos quienes desarrollaron las técnicas de captación de aguas y creación de infraestructuras (acueductos, embalses) que, a su vez mejoraron los árabes. Sin embargo, no es hasta 1836 cuando se establece la hidrogeología moderna como ciencia, con la publicación por parte del francés Henry Darcy del libro *Les fontaines publiques de la ville de Dijon* donde establecía la ley matemática —Ley de Darcy— que rige el

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 8 de 11 hojas

flujo subterráneo y supone la piedra angular de esta ciencia.

2.3 Usos e Importancia del Agua Subterránea

Los recursos hídricos mundiales disponibles y la densidad demográfica mundial está irregularmente repartida en las diferentes regiones del mundo.

La siguiente infografía (Fig. 2.1), realizada con el informe "Solutions for the Global Water Crisis" de Citi GPS, detalla además el volumen mundial de agua y de población de cada región, siendo Asia el país que más población concentra (un 60 %) y contiene el 36 % del agua dulce mundial.

En el otro extremo, Australia, que concentra un 1% de la densidad demográfica mundial, tiene el 5 % de los recursos hídricos mundiales disponibles.

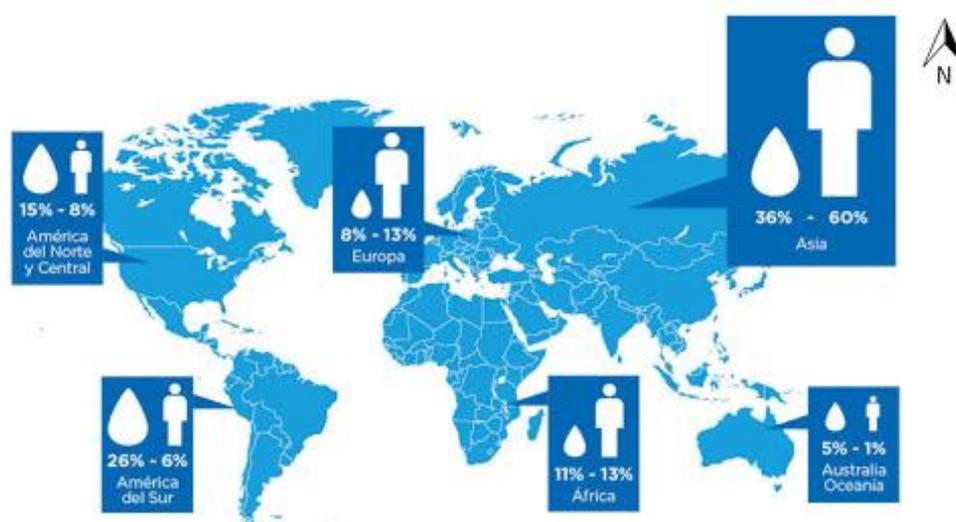


Figura 2.1: Recursos Hídricos y Población mundial

El principal problema con el agua a nivel mundial es el acceso al agua potable, Los problemas de acceso al agua potable causan más de 3.350 millones de casos anuales de enfermedades. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 80% de la enfermedades más comunes en las regiones en desarrollo (diarreas, fiebres, dengue, malaria, etc...) están relacionadas con la calidad del agua. A la hora de valorar el acceso al agua como una variable de salud, tan importante es tener en cuenta la cantidad como la calidad. Con el proceso de desarrollo, el aumento y la creciente concentración de la población, los vertidos contaminantes industriales, urbanos y agrícolas están creando ya situaciones peligrosas (al menos localmente) para la higiene y la salud humana.

En la última década ha habido mejoras en el uso de los recursos hídricos, según las Naciones Unidas (<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>) de los 5200 millones de personas en el mundo, el 71% tenía agua potable administrada de manera

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 9 de 11 hojas

segura en el año 2015, pero todavía hay alrededor de 844 millones de personas carecían aún de agua potable básica y unos 4 mil millones de personas que viven bajo la escasez de agua al menos un mes al año. Varias regiones también están agotando sus recursos de agua dulce en un ritmo muy rápido y algunos países experimentan niveles extremadamente altos de estrés hídrico.

La presión por el aumento de la población y del consumo por habitante está haciendo que se sobre exploten los ecosistemas de los cuales se extraen. En la región de Oriente Medio, por ejemplo, la sobre explotación de los acuíferos, y del lago Tiberías, está poniendo en serio peligro la capacidad de renovación de dichos ecosistemas. La deficiente calidad del agua (contaminación) ha llegado incluso a provocar un problema de escasez y de aumento de enfermedades en zonas del planeta en la que el agua dulce es abundante.

Tampoco el cambio climático es ajeno a esta situación, según el Foro Mundial del Agua, el aumento de la temperatura global del planeta está provocando una mayor evaporación, lo que a su vez lleva a un incremento de las lluvias, pero de carácter torrencial y violento, es decir, poco beneficiosas y peligrosas.

También las sequías se hacen más largas y afectan, cada vez más, a zonas no habituadas a la falta de precipitaciones. Este el caso, por ejemplo, de la grave sequía que sufrió Centro América, una sequía que asoló el istmo durante el año 2001 y que ha destruyó en algunas zonas entre el 40% y el 100% de los cultivos de maíz, frijol, arroz y sorgo. El hambre afecta ya, a finales de 2002, a 1,6 millones de personas en Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua, según los datos del Programa Mundial de Alimentos (PMA) de Naciones Unidas. A mediados de 2003, la sequía de tres años que sufre Etiopía ha vuelto a activar todas las alarmas

2.3.1 Usos del agua subterránea

En muchas áreas el agua subterránea es la única posibilidad de contar con el recurso hídrico, pues a menudo se constituye en la única fuente de abastecimiento disponible. Suele ser una inversión importante.

Tiene ventajas y desventajas que se analizarán

Las ventajas son:

➤ **Calidad Constante.**

Una de estas ventajas es la gran constancia de sus propiedades físico-químicas en el tiempo. Salvo excepciones (como el fenómeno artificialmente inducido de intrusión salina), las aguas subterráneas tienen una composición química prácticamente constante en el tiempo. Esto no debe significar que se descuide su monitoreo o control periódico.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 10 de 11 hojas

➤ **Utilizable con un mínimo tratamiento.**

Otra cualidad importantísima es que en su estado natural las aguas subterráneas presentan una composición química que las hace utilizables sin tratamiento previo en, prácticamente, todos los usos a los que se les destina. Puede que algunas aguas subterráneas estén excedidas en algunos compuestos, pero son la excepción.

➤ **Temperatura estable.**

La constancia en su temperatura es una propiedad destacable pues para algunos de sus usos es una ventaja y en general la temperatura de un agua subterránea es muy cercana a la temperatura promedio anual de la zona donde se capta.

➤ **Saludable.**

En general suele estar exenta de gérmenes patógenos. Hay situaciones excepcionales de contaminación biológica pero es debida a una incorrecta localización del pozo.

➤ **Ausencia de masa biótica.**

Para ciertos usos es una ventaja importante la ausencia casi total de masa biótica que pudiera requerir de pesticidas y similares en el caso de aplicarla al regadío agrícola.

➤ **Sin sólidos.**

Una ventaja interesante es que el agua subterránea captada correctamente está exenta de partículas como arenas las que causarían serios problemas en bombas, conductos y artefacto.

➤ **Estabilidad de caudales.**

Si bien las sequías afectan los recursos subterráneos haciendo descender los niveles, por el gran tamaño de los reservorios tienen una gran inercia en su respuesta. En una sequía un cauce superficial o un embalse pueden secarse completamente. Un pozo no, en la inmensa mayoría de los casos.

Desventajas del uso de aguas subterráneas:

➤ **Inversión importante**

Los costos si el pozo es profundo son importantes, al igual que todo el equipamiento necesario.

➤ **Baja percepción como recurso natural**

Es la principal desventaja que tiene el agua subterránea, por lo cual al ser un recurso que no se puede ver la gente no tiene noción qué existe y cómo se va contaminando. Un acuífero contaminado es un recurso hídrico prácticamente perdido, dada la baja posibilidad de recuperación natural.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 1	Hoja Nº 11 de 11 hojas

https://www.youtube.com/watch?v=bcGGERr_xwg

3 Bibliografía

Castany, G. 1975. Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Custodio, E y M.R Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda Edición Corregida. Editorial Omega. España.

Fetter, C.W. 1988. Applied Hydrogeology. Second Edition. Macmillan.

Schuldz, C.J. y García; R., 2015. Aguas Subterráneas. Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Chileno. Universidad Nacional de La Pampa. Universidad Nacional de Salta.