

EXISTENCIA Y ORIGEN DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento

Profesor C. Espinoza

Semestre Otoño 2005

INDICE

1.	INTRODUCCION.....	1
2.	ORIGEN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	2
3.	ALIMENTACION DE LAS NAPAS SUBTERRANEAS	5
3.1	Infiltración Natural.....	5
3.2	Infiltración de las Corrientes Superficiales.....	7
3.3	Recarga Proveniente de Regadíos	8
3.4	Alimentación Artificial	9
3.5	Condiciones Determinantes de la Recarga	11
4.	INFLUENCIA DE FACTORES METEOROLOGICOS SOBRE LAS NAPAS SUBTERRANEAS	14
5.	VENTAJAS DE LAS CAPTACIONES SUBTERRANEAS	15
6.	RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN CHILE	17
6.1	Aspectos Generales	17
6.2	Distribución Geográfica	17
6.2.1	Provincia Altiplánica.....	17
6.2.2	Provincia Andina Vertiente Pacífico.....	17
6.2.3	Provincia de Cuencas Costeras.....	19
6.3	Cuantificación de Recursos Subterráneos	19
6.3.1	Provincia altiplánica.....	19
6.3.2	Provincia andina vertiente pacífico:	19
6.3.3	Provincia de cuencas costeras.....	20
6.4	Calidad de las Aguas Subterráneas	21
6.5	Zonas Favorables para la Existencia de Aguas Subterráneas	22
6.5.1	Grupo 1	23
6.5.2	Grupo 2	23
6.5.3	Grupo 3	23
6.5.4	Grupo 4	24
6.5.5	Grupo 5	24
6.5.6	Grupo 6	24

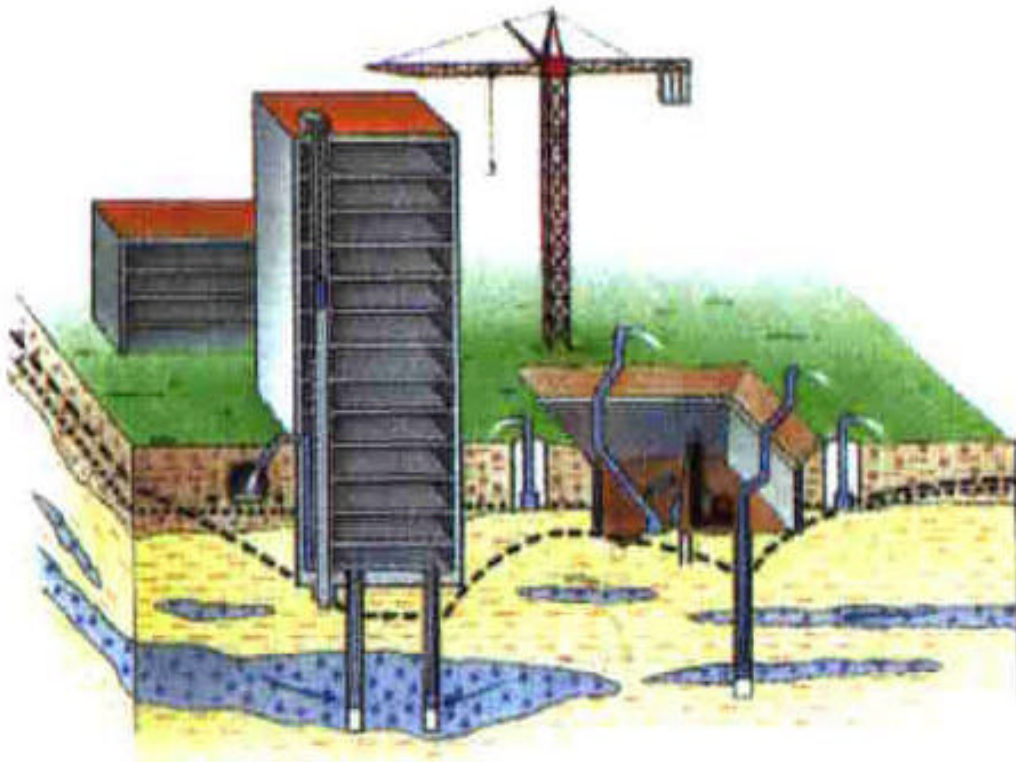
1. INTRODUCCION

Se llaman aguas subterráneas a las existentes entre los intersticios del terreno, bajo su superficie. La aparente falta de regularidad en la aparición de afloramientos de aguas subterráneas y la dificultad de su previsión, unido a la enorme importancia que en algunas regiones ha representado su existencia para la vida de los pueblos, han dado siempre un carácter curiosamente misterioso a los estudios que se les han dedicado desde la antigüedad más remota.

La apertura de pozos para captar el agua de subsuelo es realmente una de las prácticas más antiguas del hombre. La literatura de las más antiguas culturas abunda en descripciones, a veces pintorescamente detalladas, de las técnicas constructivas o de las operaciones mágicas relacionadas con los alumbramientos de aguas. De ellos son verdaderamente notables los *kanats* persas y egipcios, galerías de enorme longitud excavadas en areniscas, en donde la escasez de medios de perforación y transporte estaba a menudo suplida por el ingenio de su constructores.

A pesar de la antigüedad de estos conocimientos prácticos sobre el alumbramiento de aguas subterráneas mediante pozos, el verdadero desarrollo de las técnicas científicas de explotación y captación de ellas ha tenido lugar, en los últimos sesenta años. Las modernas técnicas de sondeo, el empleo de equipos de bombeo modernos (ver por ejemplo la Figura 1.1), especialmente la bomba vertical sumergida, accionada por motores eléctricos, han sido los factores determinantes del marcado incremento reciente del uso de las aguas subterráneas, sobre todo en aquellos países de un desarrollo industrial elevado.

Figura 1.1
Reducción de Nivel Freático con Pozos de Bombeo

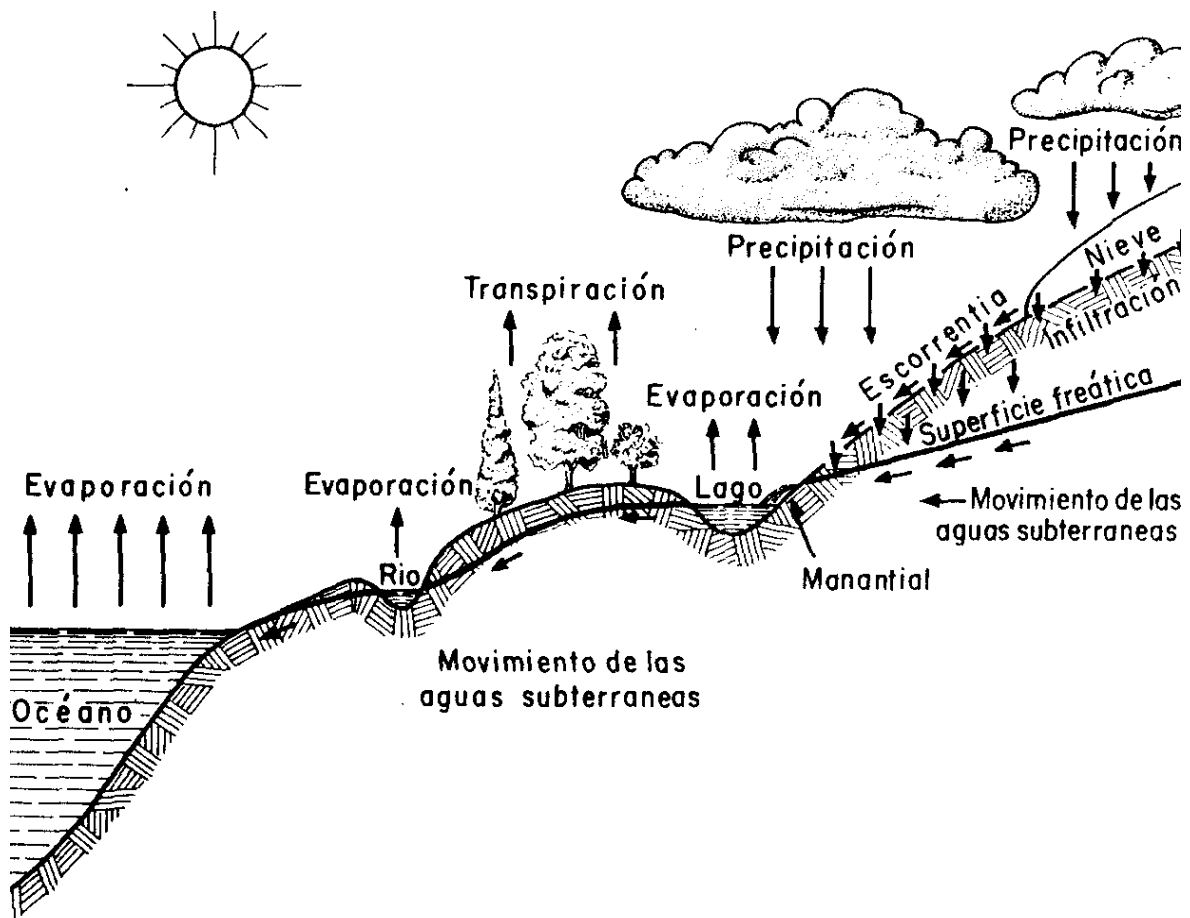


2. ORIGEN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El origen de las aguas subterráneas es uno de los problemas que más han preocupado al hombre desde los tiempos más remotos. La teoría de la infiltración, que supone que todas las aguas subterráneas provienen bien de infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirecta de ríos o lagos, no ha sido aceptada universalmente, sino desde tiempos relativamente recientes (ver Figura 2.1). Por un explicable error colectivo, que duró decenas de siglos, los pensadores de la antigüedad aceptaban como axiomático que las precipitaciones atmosféricas no eran suficientes para mantener los grandes caudales subterráneos que emergían espontáneamente o eran alumbrados por la mano del hombre en algunos puntos de la superficie terrestre. Y, lógicamente, se lanzaban a inventar las teorías más ingeniosas, variadas y pintorescas para explicar su origen.

No se conservan datos sobre el pensamiento de las civilizaciones orientales antiguas en relación con los orígenes de las aguas subterráneas. Sólo a partir de los antiguos griegos se conocen sus teorías al respecto. Es sorprendente la falta de experimentación que acompaña a las teorías antiguas, algunas de ellas realmente inteligentes e imaginativas, pero que hubieran sido fácilmente abandonadas mediante alguna simple medición o experimentación directa.

Figura 2.1
Ciclo Hidrológico



Entre las teorías más conocidas están las siguientes:

(a) Infiltración del agua marina

Platón (427-347 a. de J.C.) habla de una gran caverna adonde vuelve el agua del océano a través de los conductos subterráneos, aunque no nos aclara mediante qué mecanismo. Aristóteles (384-322 a. de J.C.), aunque discípulo de Platón, modificó algo su teoría en el sentido de que en los pasajes subterráneos donde se infiltraba el agua del mar en la tierra se desprendía vapor de agua que contribuía a la mayor parte del agua de los manantiales. Esta parece ser una teoría intermedia entre la filtración del agua marina y la teoría de la condensación. Tales de Mileto (640-546 a. de J.C.) nos dice que el agua del mar era empujada por el viento, filtrada por la tierra, donde de nuevo emergía como agua dulce. Lucrecio (94?-55 a. de J.C.) habla del agua del mar infiltrándose en la tierra, donde deja su “amargor” o salinidad, saliendo al exterior en forma de manantiales.

(b) Condensación del agua marina

Un paso más en la teoría de Aristóteles y nos encontramos con que el agua de mar se evapora en grandes cavernas subterráneas, se condensa en su parte superior como agua dulce que sale a la superficie en forma de manantiales. Parece que incluso Descartes (1596-1650) y Nicolás Papín propugnaron esta idea. Es ingeniosa esta inversión del ciclo natural del agua, ya que explica a la vez la pérdida de salinidad del agua marina y el hecho de que las fuentes de agua dulce se encuentren a nivel superior al del mar.

(c) Condensación del vapor de agua en el aire.

Esta teoría propugna que el vapor de agua que contiene el aire se condensa en las rocas y da origen de nuevo a los manantiales. No cabe duda de que esta teoría es parcialmente correcta, aunque, en general, las cantidades de agua así condensadas son una minúscula parte de la aportación que reciben manantiales y pozos. Como es bien sabido, en algunas zonas de la tierra, y un ejemplo de ello son algunas de las islas Canarias, prosperan cultivos de regadío con esta fuente de humedad en zonas de precipitación muy escasa o incluso nula. El “picón” de muchas de las islas Canarias (España), cuyo suelo es de origen volcánico, parece constituir un medio ideal en el que el vapor de agua del aire se condensa en sus intersticios, y permite cultivos en zonas de precipitación directa insignificante.

(d) Teoría de la infiltración de las precipitaciones.

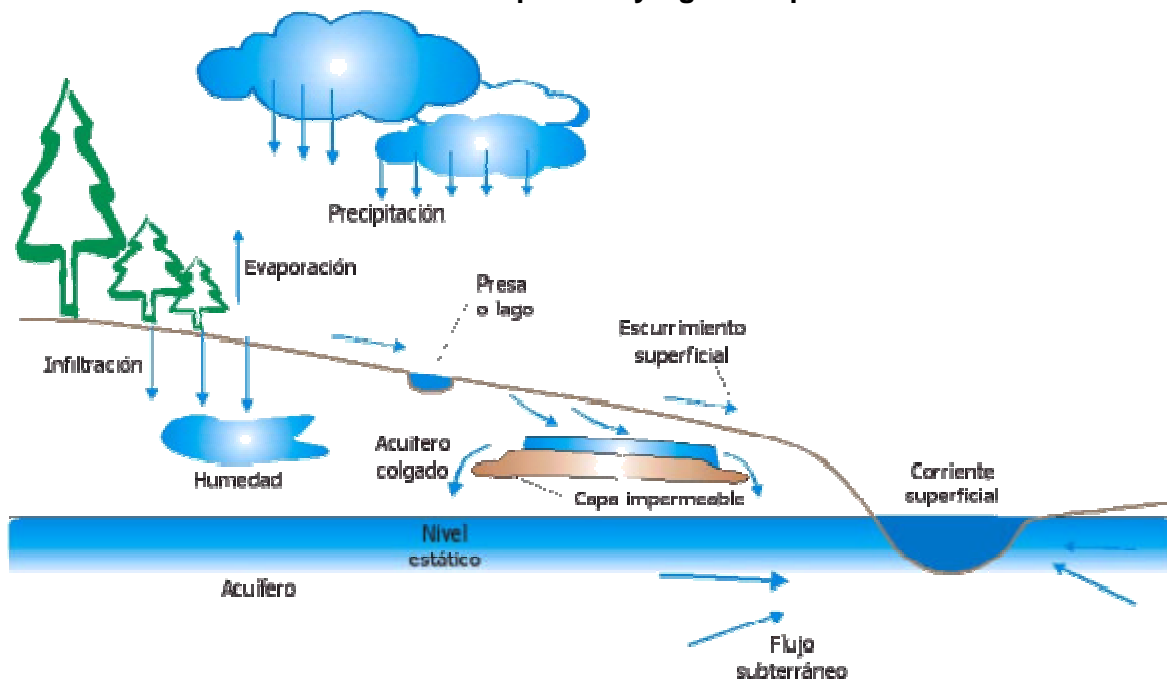
Ya los romanos empezaron a pensar que las precipitaciones en forma de nieve y agua eran suficientes para alimentar los depósitos y manantiales de agua subterránea. Marco Vitrubio (15 a. de J.C.) comenzó a propugnar esta teoría y a entrever la existencia del ciclo hidrológico como se contempla actualmente. En cambio, Lucio Anneo Séneca (4 a. de J.C.-65 d. de J.C.) vuelve a la teoría aristotélica concluyendo que el agua de lluvia no es suficiente para alimentar las fuentes subterráneas.

La teoría de la infiltración es, desde el siglo XVI, la única firme y universalmente aceptada en la actualidad. Bernard Palissy (1509-1589), filósofo francés, parece ser el primero en establecer las teorías modernas sobre el origen de las aguas subterráneas. La comprobación de la teoría mediante medidas experimentales directas parece haber sido debida a Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684), que midieron la precipitación en la cuenca del Sena durante los años 1668 a 1670 y observaron que la escorrentía de la cuenca era solamente un

sexto de la precipitación total, deduciendo, por tanto, que casi la totalidad del resto alimentaba los depósitos y fuentes subterráneos.

Esta teoría ha sido satisfactoriamente demostrada comparando y analizando grandes series de datos de la penetración del agua de lluvia y de nieve a través del terreno, las pérdidas por infiltración en ríos y lagos, el aumento de nivel freático, como consecuencia de las lluvias y las corrientes de infiltración de los ríos, la pendiente de las superficies freáticas desde las zonas de infiltración a los puntos de afloramiento, la relación de la cantidad de agua extraída de un área determinada a la precipitación media anual y a la permeabilidad de los materiales del terreno, así como las variaciones de los afloramientos de aguas subterráneas en relación con las variaciones de las precipitaciones.

Figura 2.2
Infiltración de Precipitación y Aguas Superficiales



3. ALIMENTACION DE LAS NAPAS SUBTERRANEAS

3.1 Infiltración Natural

La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, a saber la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias. La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las napas subterráneas, se ve influenciada por dos tipos de condiciones; las que dicen relación con las precipitaciones, que constituyen la fuente misma de origen del agua, y las que dicen relación con las condiciones del terreno, que son las responsables de las mayores o menores facilidades existentes para la infiltración y que determinan finalmente la proporción de las precipitaciones que pueden llegar a constituir una recarga de las napas subterráneas. En este segundo tipo deben incluirse además las condiciones geológicas del subsuelo que son las que fijan la existencia y potencia de rellenos permeables, es decir, determinan la capacidad del subsuelo para recibir y regular el agua proveniente de las infiltraciones.

De acuerdo con los conocimientos que se tienen del ciclo hidrológico, las precipitaciones que caen sobre la tierra siguen distintos caminos, los que en rasgos muy generales pueden resumirse en: una parte no alcanza a llegar al suelo siendo retenida por el follaje de la vegetación, esta parte que recibe el nombre de intercepción, es devuelta nuevamente a la atmósfera por evaporación. La parte que llega al suelo se mueve a través de la superficie de éste en un proceso designado como infiltración. Si la intensidad de las precipitaciones sobrepasan la capacidad de infiltración del terreno, se produce un movimiento de agua por su superficie, conocido con el nombre de escurrimiento superficial, cuyo caudal en cada instante es igual a la diferencia entre la intensidad de la precipitación y la capacidad de infiltración del suelo.

Del agua infiltrada en el terreno, una parte vuelve por capilaridad a la superficie donde se evapora, o bien es extraída por las raíces de las plantas y utilizada en su proceso de transpiración.

Del resto del agua infiltrada una parte queda destinada a completar la “capacidad de retención” del suelo en la zona no saturada e incluso su capacidad capilar ubicada inmediatamente sobre el nivel de saturación, mientras el saldo continúa su descenso por acción de la gravedad pasando a constituir lo que ya hemos designado como la recarga de las napas subterráneas.

En la naturaleza estos procesos no se presentan aislados unos de otros, sino que normalmente tienen lugar en forma simultánea y aún más, entrelazada, siendo el caso, por ejemplo, que parte del agua infiltrada puede constituirse en escurrimiento superficial a través de afloramientos y vertientes, o bien el caso inverso, que es de gran importancia práctica, en que se tienen recargas apreciables de las napas subterráneas a través de la infiltración en su lecho de corrientes superficiales.

La proporción que corresponde en definitiva a cada uno de estos caminos del total de agua caída es muy variable de acuerdo con las condiciones climáticas, topográficas y geológicas del lugar, siendo sumamente difícil poder precisarlas con exactitud debido a la complejidad de todos los factores que intervienen en los procesos.

Para un mismo lugar, la infiltración hacia las napas subterráneas depende fundamentalmente de la distribución de las precipitaciones. Ella es muy diferente si una misma altura de lluvia cae concentrada en un lapso muy corto de tiempo o bien distribuida en un período más o menos

largo. Por ejemplo, una misma lluvia en la temporada de verano producirá una mayor recarga de las napas si cae en forma persistente durante un cierto período de tiempo con una intensidad similar a la capacidad de infiltración del terreno; si cae distribuida en lluvias ocasionales durante un período de largo, producirá un gran beneficio para la agricultura, pero muy poca o ninguna infiltración subterránea; por otra parte, si se presenta como aguaceros concentrados en tiempos cortos, la mayor parte escurrirá superficialmente siendo la infiltración mínima. En general, las precipitaciones producen una mayor recarga de las napas subterráneas cuando tienen lugar en invierno más bien que en verano.

La recarga de la zona de saturación debida a la aportación de las precipitaciones atmosféricas puede descomponerse en tres etapas, que son:

- (a) infiltración del agua desde la superficie al terreno que yace inmediatamente bajo ella,
- (b) movimiento descendente del agua a través de la zona de aireación o no saturada
- (c) entrada del agua en la zona de saturación, donde pasa a formar parte de las propiamente llamadas aguas subterráneas.

Evidentemente, una parte del agua que entra en la zona de aireación vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal, perdiéndose así su incorporación a la zona de saturación.

La infiltración se produce, como hemos dicho antes, por la acción combinada de las fuerzas de gravedad y de atracción molecular. Cuando la humedad del suelo es reducida y una gota de agua de lluvia toca la superficie del terreno, las fuerzas moleculares de éste la atraen y hacen que se absorba rápidamente. En este proceso, el propio peso de la gota de agua tiene una importancia totalmente secundaria. Cuando la superficie del terreno va humedeciéndose más y más, el proceso de atracción molecular va perdiendo intensidad y la infiltración tiene lugar debido, cada vez más, a la atracción gravitatoria. Así como en la primera fase la permeabilidad del terreno era secundaria en comparación con el desequilibrio de humedad del suelo, en esta segunda es la permeabilidad la que fundamentalmente determina la velocidad de penetración del agua.

El manto de evaporación o de terreno vegetal es de importancia fundamental para la plantas, ya que está en el embalse de donde éstas extraen el agua para su sustento. Esta agua almacenada está mantenida en posición por las fuerzas de atracción molecular, que le impiden su descenso a zonas más profundas. No obstante, las raíces de las plantas tienen capacidad para extraer el agua necesaria para su vida. Durante la época del crecimiento de las plantas, el contenido de humedad de este almacén formado por el terreno vegetal se vacía a causa de la constante succión realizada por ellas y se vuelve a llenar periódicamente por efecto de las lluvias o de los riegos. En consecuencia, el manto de evaporación o de terreno vegetal constituye un obstáculo para la recarga de la zona de saturación. Es como un embalse superior que debe llenarse antes de que el agua pase a los embalses subterráneos inferiores de la zona de saturación.

Cuando el suelo vegetal en un punto determinado está saturado, cualquier nueva adición de agua que reciba su superficie descenderá por gravedad desde el manto de evaporación, ya sea directamente a la zona de saturación o al manto intermedio de la zona de aireación. Puesto que este manto intermedio no está afectado apreciablemente ni por la evaporación superficial ni por la absorción de las raíces de las plantas, normalmente retiene toda el agua que puede contener por efecto de las fuerzas de atracción molecular. Sin embargo, la mayor parte del agua tiende a descender más aún obedeciendo a las fuerzas de gravedad.

Evidentemente, también puede parte del agua atravesar el manto de evaporación superficial, incluso aun cuando exista una falta considerable de humedad en alguno de sus puntos, a través de conductos tales como los creados por las raíces podridas de las plantas o por los agujeros hechos por gusanos o animales de mayor tamaño. Por otra parte, el terreno vegetal puede también estar temporalmente empapado en un grado superior a lo que se considera el límite de su retención específica y, desde luego, hasta el punto de su saturación completa.

Puesto que el subsuelo en muchos puntos es menos permeable que el propio suelo vegetal, es posible que en momentos de abundante infiltración se retarde la filtración, descendente y se cree en el mismo suelo vegetal una zona de saturación superior temporal. Estas zonas de saturación someras y temporales se encuentran en muchos sitios durante épocas de lluvias prolongadas y fuertes o en la época del deshielo, especialmente a principios de primavera. Después van quedándose exhaustas, ya sea por filtración vertical o por infiltración hacia otras corrientes de agua e incluso, durante la estación de crecimiento vegetal, por efecto de la absorción de las raíces. Aunque estos mantos desaparecen rápidamente, especialmente cuando empieza el ciclo de crecimiento vegetal, la mayor parte de la recarga de la zona de saturación permanente, que yace bajo ellos, se realiza generalmente durante la existencia de estas masas de agua temporalmente colgadas.

En climas fríos, en donde el terreno se hiela hasta profundidades de un metro o más, este terreno helado resulta muy impermeable. En la primavera, conforme el terreno se va deshelando, desde la superficie hacia abajo, el terreno deshelado va progresivamente saturándose con el agua de las lluvias y las procedentes del propio deshielo. Cuando desaparece la última parte del terreno helado, esta agua colgada generalmente desciende rápidamente y puede incluso, en el curso de unos pocos días, dar origen a la principal aportación de agua subterránea a los mantos inferiores durante todo el año.

La manera precisa según la cual el agua desciende a la zona de saturación no está todavía completamente explicada, aunque los recientes estudios realizados por un gran número de investigadores han contribuido grandemente a la solución de este problema. Cuando ocurren estos procesos de recarga rápida que acabamos de explicar, el agua indudablemente llena la red de intersticios y desciende como lo haría en un tubo capilar bajo una presión hidráulica suficiente. Sin embargo, después de que los mayores caudales de recarga han pasado a través de ellos, dejan tras sí películas de agua que se adhieren a las paredes de los intersticios, especialmente a las que presentan formas angulosas. También queda agua en los intersticios o grupos de intersticios que quedan llenos cuando las columnas capilares se han roto bajo ellos a causa de las irregularidades en el sistema de intersticios interconectados. Toda esta agua está mantenida en su posición, desde luego, por atracción molecular, pero una considerable parte de ella sólo se mantiene temporalmente. Se ha podido comprobar que el descenso continúa durante largo tiempo con una intensidad decreciente.

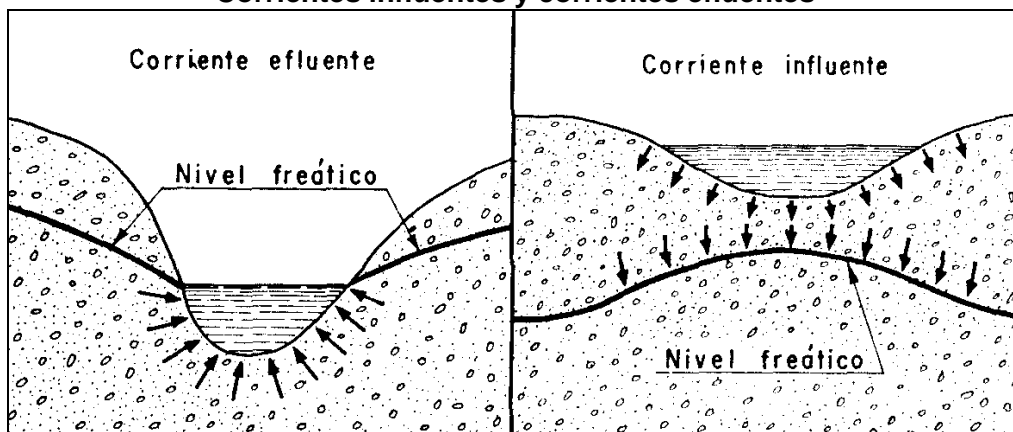
3.2 Infiltración de las Corrientes Superficiales

Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes. En las primeras, el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde la corriente superficial a la zona de saturación. Por el contrario, una corriente se llama efluente si su nivel está por debajo del nivel freático y, por tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de la laderas. En algunas regiones relativamente lluviosas, casi todas las corrientes de agua de flujo perenne o casi perenne son efluentes. En estas regiones, la recarga tiene lugar en las zonas existentes entre dos ríos o arroyos, de manera que las corrientes sirven como canales de drenaje natural que

descargan el exceso de caudal de los almacenes subterráneos de agua. La recarga tiene lugar principalmente por la penetración vertical de la lluvia y del agua de las nieves en la inmediata vecindad de su punto de precipitación. Sin embargo, cuando la intensidad de precipitación de lluvia o nieve es superior a la velocidad con que puede infiltrarse el agua a través de la superficie del terreno, este exceso de precipitación correrá sobre la superficie en la dirección de su máxima pendiente.

Al principio de una lluvia, la esorrentía se presenta en forma de una lámina fina irregular de agua, pero muy pronto el agua superficial se concentra a lo largo de las vaguadas o depresiones y forma las corrientes intermitentes que llevan el agua al sistema de corrientes perennes. De esta forma, las partes bajas de las vaguadas y de los canales de estas corrientes superficiales temporales transportan el agua durante un período de tiempo más largo y con mayor carga hidráulica que la que se produciría solamente por la precipitación y, por tanto, en ellas se produce una infiltración mayor que la media, siendo especialmente eficaces en cuanto se refiere a la recarga de los depósitos de aguas subterráneas inferiores. Es éste un aspecto importante de la cuestión, que muy a menudo se ha pasado por alto por aquellos que sostienen que la recarga directa de lluvia o nieve es despreciable o nula.

Figura 3.1
Corrientes influentes y corrientes efluentes



Existen otras zonas en que la mayor cantidad de precipitación de lluvia y nieve cae sobre las montañas, mientras que los valles, muchos de los cuales constituyen llanuras desérticas, son generalmente muy áridos. En esta región, la mayor parte de las corrientes nace en las montañas, donde son alimentadas por manantiales y la fusión de las nieves y se hacen, por tanto, influentes cuando pueden ya dejar los cañones montañosos y fluir sobre las pendientes aluviales de gravas permeables creadas por ellas mismas.

3.3 Recarga Proveniente de Regadíos

Es interesante considerar que por efecto de regadío aplicado a los terrenos de cultivo, se produce en ellos una infiltración de una cierta parte del agua aplicada que pasa a constituir una nueva fuente de alimentación para las napas subterráneas. Del total del agua que se aplica en riegos en una zona, una parte normalmente importante se gasta en lo que se designa como “consumo evapotranspirativo” o “tasa neta” (agua transpirada por la planta y retenida en su tejido durante su crecimiento, más la evaporada desde la superficie del terreno), otra parte escurre superficialmente mientras que el saldo resultante se infiltra hacia las capas del subsuelo constituyendo la recarga ya referida de las napas.

De acuerdo con algunos estudios realizados puede estimarse en una primera aproximación que esta recarga bien puede representar en términos medios alrededor de un 20% a un 30% del agua aplicada, y en algunos casos aún más.

3.4 Alimentación Artificial

Otro factor de recarga que en algunos casos puede aplicarse con éxito es la “recarga artificial”. Consiste esencialmente en facilitar la infiltración de agua superficial hacia el subsuelo en los lugares apropiados para el objeto. Aún cuando el aprovechamiento de los volúmenes infiltrados como recursos de agua subterránea en secciones ubicadas más hacia aguas abajo no puede ser completo, esta recarga se justifica si los volúmenes infiltrados no pueden tener otro aprovechamiento perdiéndose en caso contrario por escurrimiento hacia el mar. Esta recarga se puede realizar mediante pozos, por zanjas o bien por lagunas de infiltración. Indudablemente que las áreas de infiltración pueden colmatarse si el agua de que se dispone no es muy clara, problema que debe ser tenido en cuenta muy especialmente en cada caso particular. Las tasas de recarga deben determinarse por lo general por experimentación directa en el terreno.

La recarga del tipo superficial, que se realiza por medio de canales, fosos o bien zonas de inundación, se prefiere normalmente debido a su menor costo de instalación y también por su mayor facilidad de operación y menores gastos de explotación.

La recarga del tipo profundo, que se realiza por medio de pozos profundos y galerías, se emplea cuando la napa por alimentar se encuentra separada de la superficie del terreno por una o varias capas continuas poco permeables y también cuando no es posible aplicar sistemas superficiales como por ejemplo es el caso de zonas urbanas.

Para abastecimiento de agua potable y desde un punto de vista económico, se producen grandes economías al utilizar este tipo de abastecimiento dado que normalmente se elimina la necesidad de plantas de tratamiento. La realimentación produce también economías en los equipos de elevación y en los gastos de energía que dichos equipos requieren.

Para el caso de la recarga del tipo superficial el mecanismo bajo el cual ella se realiza incluye las siguientes tres fases que se indican a continuación:

a) Infiltración

Corresponde a la adsorción del agua por las capas más superficiales del terreno. Es una condición fundamental para el éxito de una instalación de recarga superficial el contar con una buena capacidad de infiltración. Las formaciones superficiales pueden recubrirse de una delgada capa de suelos muy finos la que debe ser eliminada periódicamente. La tasa de infiltración se ve afectada también por la calidad química del agua; se ha verificado que las aguas duras con alto contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} se infiltran más rápidamente que aquellas con contenido elevado de Na^+ .

Un problema importante es el planteado por los sedimentos en suspensión que puede contener el agua. Según experiencias norteamericanas un m^3 de grava puede absorber alrededor de 200 kg de sedimentos sin que su capacidad filtrante se vea reducida considerablemente; las arenas se colmatan sin embargo mucho más rápidamente. Los materiales en suspensión se depositan mucho más fácilmente en aguas quietas que en aguas corrientes. Se ha constatado también que suelos cubiertos por una vegetación adecuada (por ejemplo pasto Bermuda) se colmatan menos que los suelos desnudos.

Aún en ausencia de materiales en suspensión, la tasa de infiltración sufre una reducción paulatinamente en el tiempo debido principalmente al desarrollo de microorganismos en medio anaeróbico. Si cesa la sumersión por una temporada el suelo recupera su capacidad de infiltración.

En algunos casos ha resultado económicamente más conveniente reemplazar la capa superficial, natural o artificial, antes que pretender eliminar los sedimentos infiltrados.

b) Percolación

Al comienzo del proceso de recarga, la velocidad de percolación sufre las mismas variaciones que la velocidad de infiltración. Finalmente, sin embargo, la velocidad de percolación puede alcanzar un valor igual a la permeabilidad vertical del terreno.

c) Filtración

El escurrimiento se describe por las leyes normales de la hidrodinámica: ley de Darcy y ecuación de la continuidad. Desde un punto de vista físico químico los medios porosos se comportan como depuradores muy eficaces. Algunas decenas o a lo más algunas centenas de metros de filtración bastan para eliminar completamente microorganismos. Es necesario para esto que las aguas de recarga se encuentren suficientemente oxigenadas ya que en caso contrario las aguas captadas pueden resultar muy agresivas.

Se ha constatado que aguas con contenidos elevados de materia orgánica o iones intercambiables, especialmente Na^+ y H^+ , han provocado rápidamente la colmatación de un acuífero.

Finalmente, siempre en relación con la recarga de tipo superficial, caben señalar algunos de los procedimientos que suelen utilizar para reducir los efectos de la colmatación superficial:

- Tratamiento previo de las aguas mediante cloro, oxigenación, sulfato de cobre, para la destrucción de la materia orgánica.
- Decantación previa de los materiales en suspensión.
- Mantención de condiciones aeróbicas mediante la aplicación de espesores delgados de agua, submersión alternada, aereadores en cascada, etc.
- Mantención de cubierta vegetal.

La recarga de tipo profundo se ha practicado en mucho menor escala por razones de colmatación muy rápida que ha afectado a muchas instalaciones. Las causas que se señalan para esto son múltiples: obstrucción de rejillas por sedimentos en suspensión, formación de una capa biológica en torno a las rejillas de pozos, arrastre de aire, incrustación por precipitación de sales, etc.

Los remedios que se han utilizado también son variados: tratamiento de los pozos por ácidos, bombeo, cloración, filtración previa de las aguas, grandes aberturas de rejillas, inyección de agua por el fondo de los pozos para evitar formación de burbujas de aire, etc.

3.5 Condiciones Determinantes de la Recarga

Las condiciones que determinan la velocidad y caudal de la recarga de aguas subterráneas pueden ser de dos categorías: aquellas relacionadas con la precipitación, como verdadera fuente de abastecimiento, y aquellas relacionadas con la facilidad de entrada del agua en el terreno, las cuales determinan la proporción de agua de lluvia o nieve que alcanza los depósitos subterráneos.

La precipitación varía grandemente en cantidad de unos sitios a otros y es también notablemente variable con el tiempo en cualquier sitio determinado. La recarga de agua subterránea varía mucho también de un sitio a otro y de unas épocas a otras, no sólo porque las condiciones de entrada son también variables, sino también porque, incluso con las mismas condiciones de toma, la relación de la recarga a la precipitación varía grandemente con la cantidad y distribución de las precipitaciones y según tengan lugar como lluvia o como nieve.

En general, la proporción de precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero sólo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas pueden todas ellas ser absorbidas por el terreno. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha son precisamente las que tienen utilidad en la recarga del almacén de aguas subterráneas. En la mayor parte de las zonas lluviosas de los Estados Unidos, una tercera parte de la precipitación llega al depósito subterráneo; pero en las regiones semiáridas, la recarga puede ser solamente un porcentaje muy pequeño de la precipitación y en grandes llanuras muy áridas la cantidad que constituye la recarga puede ser extraordinariamente pequeña o nula completamente.

La cantidad de recarga en cada área determinada depende grandemente de la distribución de la precipitación. Una cantidad dada de precipitación durante la época de crecimiento vegetal producirá la máxima recarga si tiene lugar en un período de lluvia persistente de intensidad tal que se infiltre con la misma rapidez que va cayendo. Si, por el contrario, cae distribuida en lluvias intermitentes a lo largo de un período de tiempo considerable, puede ser más beneficiosa para las cosechas, pero de esta agua muy poca o ninguna cantidad puede atravesar el terreno vegetal para llegar a la zona de saturación. Por otra parte, si la precipitación tiene lugar en forma de aguacero de gran intensidad y corta duración, solamente una pequeña parte puede infiltrarse en el suelo y todavía otra menor puede alcanzar las zonas de saturación, ya que la mayor parte del agua correrá en forma de escorrentía directa hacia corrientes superficiales. En regiones áridas, la poca precipitación existente tiene tendencia a producirse en aguaceros muy rápidos, pero éstos producen avenidas en las torrenteras que, como dijimos antes, son las entradas más fáciles del agua hacia las zonas inferiores. Durante la estación en que la vegetación está en hibernación, alcanza la zona de saturación una parte mucho mayor del agua debido a las precipitaciones. Al principio del otoño existe en general una falta de agua en el terreno vegetal, que las primeras lluvias van saturando, de arriba abajo. Las lluvias siguientes, cada vez en mayor grado, encuentran facilidad creciente para infiltrarse y pasar al almacén de la zona de saturación.

En los climas fríos, durante el invierno, la capa superficial del terreno se hace impermeable a causa de las heladas y la recarga es prácticamente nula. Al empezar el deshielo, en primavera, es cuando la recarga superficial se hace sentir con mayor intensidad. Si el terreno superficial está helado y además cubierto con una capa de nieve que lo aísla térmicamente del ambiente, las posibilidades de recarga dependen mucho de las condiciones climatológicas de la zona durante la época del deshielo. Si la fusión de la nieve es muy rápida y tiene lugar principalmente antes de que el terreno se haya deshelado, el agua producida por ella se perderá para la

recarga subterránea en forma de escorrentía superficial. Si es lenta, es prácticamente simultánea con el deshielo del terreno y la infiltración y recarga serán entonces máximas.

Hay otras condiciones que afectan fundamentalmente la recarga. Una de ellas es el tipo de cultivo del terreno. Las zonas de bosque y los prados producen mejor recarga que las arables, incluso para el mismo tipo de terreno. En las primeras, el agua está más limpia y no taponan los intersticios de penetración. Por otra parte, las raíces muertas constituyen canales que tienden también a favorecer la recarga.

Otra característica evidentemente decisiva en la recarga subterránea es la topografía del terreno. En zonas con grandes pendientes, la escorrentía es máxima y, por tanto, la infiltración es mínima. Las grandes llanuras de materiales sedimentarios permeables constituyen a este respecto las zonas de infiltración más eficaces.

La extensión de la cuenca receptora tiene también influencia decisiva en la cantidad de agua infiltrada en ella. La recarga aumentará si la cuenca directa de precipitación está aumentada con las aportaciones de corriente superficiales que recogen e infiltran las aguas recogidas en las montañas, en las cuales la intensidad de precipitación suele ser mayor.

A título de ejemplo, ya que no es posible establecer normas simplistas en el coeficiente de infiltración, que está sujeto, como hemos visto, a la influencia de factores muy diversos y complejos, insertamos a continuación una tabla de distribución del agua de lluvia, en función de las condiciones del terreno.

La intensidad de la recarga debida a las corrientes superficiales influentes depende grandemente del estado del lecho de las corrientes. Aunque el terreno por el que transcurre un río sea muy permeable, la infiltración puede ser reducida, a causa de que el lecho se haya impermeabilizado por arrastres de limos arcillosos o por deposiciones calizas que cementen los materiales del fondo. Cuando el río está sujeto a crecidas fuertes, éstas suelen lavar los depósitos impermeables y aumentar la capacidad de infiltración del lecho del río. Los embalses de regulación tienden a anular este efecto beneficioso de lavado, al suprimir las grandes avenidas. Por otra parte, los embalses son favorables a la infiltración en cuanto decantan el agua de elementos arcillosos finos, de modo que las deposiciones impermeables limosas aguas abajo pueden ser más reducidas.

Tabla 3.1
Distribución del Agua Lluvia en Distintos Terrenos

Naturaleza del Terreno	Evaporación %	Escorrentía %	Infiltración %
1. Terreno arcilloso horizontal, sin intercalaciones de bancos permeables.	75	22	3
2. Terreno arcilloso silíceo con algo de caliza (tierra de labor) horizontal.	50	5	45
3. El mismo caso 1, pero con pendiente del terreno.	53	45	2
4. El mismo caso 2, pero con pendiente del terreno.	45	20	35
5. Terrenos a base de areniscas compactas y poco fisuradas.	50	20	30
6. Terrenos de areniscas deleznable con fisuras.	35	5	60
7. Terrenos calizos horizontales y poco fisurados.	65	15	20
8. Terrenos calizos horizontales, pero muy fisurados.	45	5	50
9. Terrenos dolomíticos triturados (gravas miloníticas),	20	0	80
10. Terrenos calizos fisurados y en pendiente pronunciada.	25	5	70
11. Terrenos graníticos y gneísicos, no descompuestos en su superficie.	60	30	10
12. Terrenos graníticos descompuestos en su superficie, pero sin zona semidescompuesta.	50	15	35
13. Terrenos graníticos, descompuestos en su superficie y con zona inferior semidescompuesta.	20	5	75
14. Terrenos pizarrosos no descompuestos.	50	25	25
15. Terrenos pizarrosos, descompuestos o con predominio de pizarras arcillosas.	50	40	10
16. Cuarcitas agrietadas o pizarras muy duras, también agrietadas.	40	5	56
17. Rocas volcánicas con oquedades o calizas (moladas) muy detríticas y poco compactas.	30	0	70
18. Aluviones dominando el cascajo en la superficie del terreno y con poca arcilla.	37	5	65

4. INFLUENCIA DE FACTORES METEOROLOGICOS SOBRE LAS NAPAS SUBTERRANEAS

Tres factores, la temperatura, la presión atmosférica y las mareas, pueden tener influencia sobre las napas subterráneas.

La temperatura puede hacer sentir su efecto sobre napas libres a través de la variación en el contenido de agua del suelo no saturado situado inmediatamente por encima de su nivel freático. Dado que las variaciones de la temperatura exterior se propagan muy lentamente al interior de los terrenos, este efecto prácticamente carece de importancia salvo en caso de estudios de muy larga duración. Cabe señalar por ejemplo que las oscilaciones diurnas de temperatura en general no se detectan más allá de 1 m de profundidad bajo la superficie del terreno.

Las variaciones de la presión atmosférica repercuten muy rápidamente sobre los niveles de agua que se encuentran en pozos y sondajes en napas artesianas.

Un aumento de la presión atmosférica produce los siguientes efectos sobre una napa confinada o artesiana:

- Se transmite en forma total y directamente sobre los espejos de agua que puedan existir en pozos y sondajes.
- Se transmite, a través de la capa impermeable que limita superiormente la napa, a los materiales permeables que constituyen el acuífero y al agua contenida en él. Parte del aumento de presión es tomado por los materiales permeables y parte por el agua.

La superposición de estos dos efectos hace bajar el nivel de agua que se observa en un pozo en una cantidad menor que el correspondiente aumento de presión debido a que si bien el agua contenida en el acuífero también aumenta de presión, lo hace en una cantidad menor.

Este efecto puede tener características espectaculares en pozos artesianos en los cuales el nivel piezométrico se encuentre muy poco sobre la superficie del terreno. En estos casos el caudal surgente que entrega el pozo puede variar a lo largo del día siguiendo las variaciones de presión, en algunos momentos puede incluso llegar a detenerse la surgencia.

El efecto de los cambios de presión no se hace sentir sobre napas libres debido a que ellas en todos sus puntos se encuentran sometidas a la presión atmosférica, no produciéndose por lo tanto movimientos diferenciales entre el agua contenida en el acuífero y la que se encuentra en pozos y sondajes. Las mareas ejercen influencia sobre los niveles piezométricos de napas artesianas ubicadas próximas a la costa. Esta influencia es tanto más fuerte cuanto más importante sean las mareas en cada zona. Los niveles piezométricos en estos casos siguen las variaciones de las mareas, produciéndose los niveles mínimos en la bajamar y los máximos en la alta mar.

5. VENTAJAS DE LAS CAPTACIONES SUBTERRANEAS

Las principales ventajas de las captaciones de aguas subterráneas por pozos, según sus distintos tipos de uso, pueden resumirse en los siguientes puntos:

a) Utilización de agua potable

- Exige pequeñas inversiones iniciales en comparación con las de plantas de filtros para tratamiento de aguas superficiales (gran importancia cuando los capitales son escasos).
- Los problemas de abastecimiento en grandes ciudades pueden ir solucionándose paulatinamente junto con el crecimiento del consumo sin necesidad de abordar grandes soluciones para un futuro a largo plazo.
- Las captaciones pueden ubicarse muy próximas al consumo con lo que se economiza en aducciones.
- Por lo general no necesita tratamiento especial. Basta con una pequeña cloración antes de entregar al consumo.
- Permite solucionar problemas de abastecimiento en forma muy rápida dado el corto tiempo que en general se requiere para la construcción de este tipo de obras.
- En muchas zonas es el único recurso económicamente disponible.

b) Utilización de industrias

- Permite disponer de una fuente propia que la libera de depender, para la seguridad y suficiencia del abastecimiento, de otra fuente mucho más sujeta a variaciones con es la red de agua potable (si existe).
- Permite obtener agua de calidad para procesos industriales.
- Permite ubicar la captación dentro del mismo recinto de la industria.
- Para muchas industrias resulta ser el único recurso disponible.

c) Utilización en agricultura

- Permite solucionar problemas locales de regadío sin tener que esperar para acogerse a las grandes soluciones propiciadas por el estado.
- Las captaciones pueden ubicarse muy próximas al consumo sin que se requieran por lo tanto grandes obras tanto de aducción como de distribución interna.
- Permiten disponer del agua justo en el momento que se requiera.
- Utilizada como complemento de recursos superficiales existentes puede ser de gran valor,

aún cuando sólo se haga funcionar eventualmente (incidencia fundamental sobre seguridad de riego).

- Los recursos de agua subterránea se ven poco afectados por años secos individuales (gran capacidad de regulación).
- Permite reducir las dotaciones por hectárea ya que se tienen menos pérdidas en la conducción y se hacen regadíos más cuidadosos. Estas economías de agua pueden ser del orden de 30%.
- En muchas zonas constituye el único recurso económicamente disponible.
- Constituye una posibilidad para los agricultores para aumentar individualmente sus recursos de agua ya que los recursos fáciles y económicamente utilizables en forma particular, están en su mayoría agotados.

6. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN CHILE

6.1 Aspectos Generales

Las formaciones acuíferas conocidas en el país corresponden básicamente a sedimentos cuaternarios no consolidados de origen fluvial, fluvio-glacial, aluvial, aluvional, laháricos y otros, que rellenan los valles delimitados por formaciones impermeables terciarias, mesozoicas y paleozoicas. Son acuíferos en general libres o semiconfinados con niveles estáticos poco profundos (menores que 50 metros), y de características granulométricas muy heterogéneas aún cuando predominan acuíferos de productividad elevada.

6.2 Distribución Geográfica

Siguiendo la división planteada en el Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) se puede distinguir en el territorio nacional continental 3 provincias hidrogeológicas: altiplánica, andina vertiente pacífico y cuencas costeras, las que se indican en la Figura 6.1.

6.2.1 Provincia Altiplánica

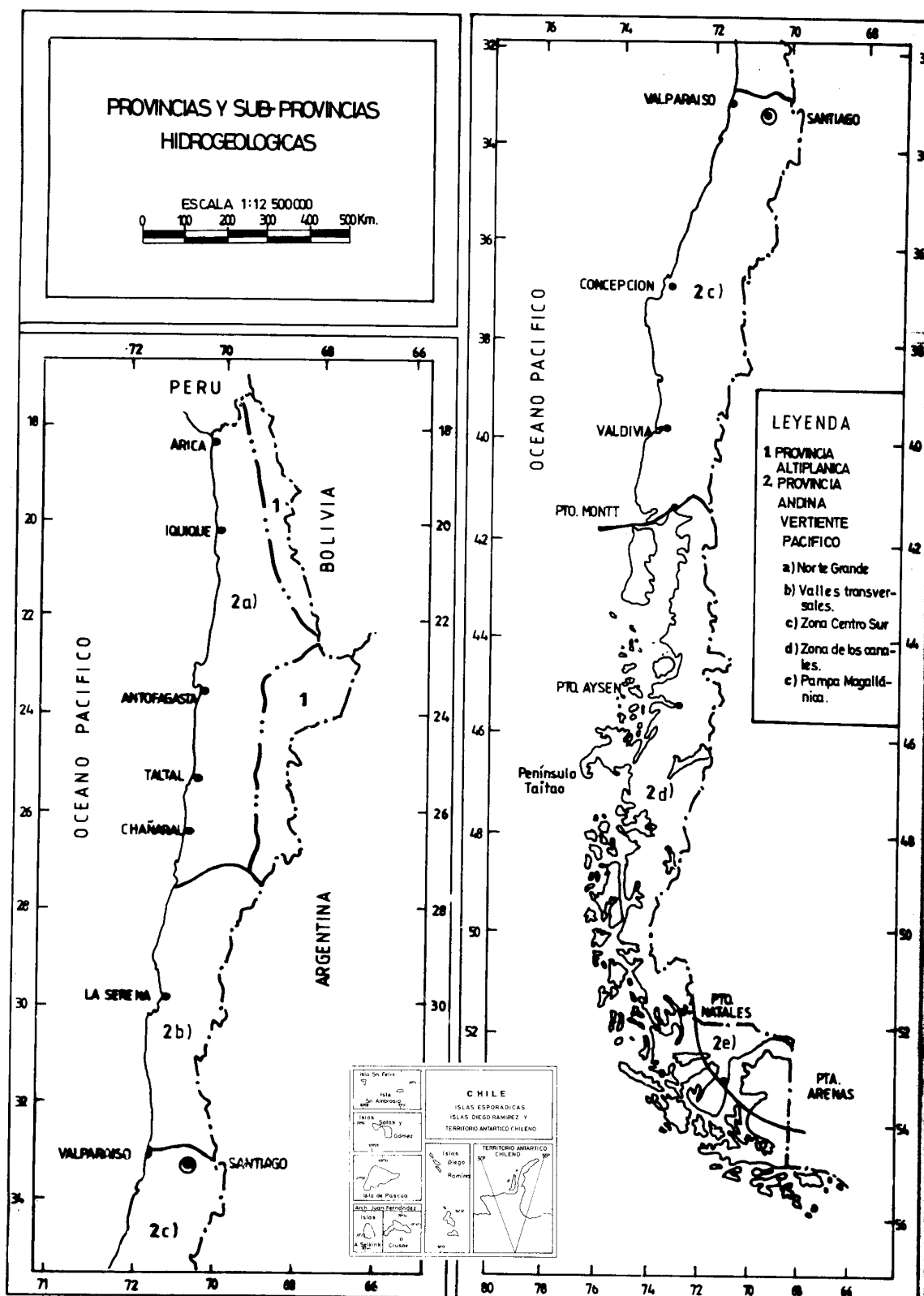
La **provincia altiplánica** considera dos tipos de acuíferos. Los primeros se desarrollan en formaciones cuaternarias – terciarias de rocas volcánicas de permeabilidad secundaria que permiten la infiltración del recurso en las cuencas superiores. Los segundos se ubican en sectores bajos y son acuíferos de sedimentos no consolidados de tipo fluvial, aluvial o lacustre. Normalmente en estas últimas zonas se presentan salares. Los acuíferos no consolidados tienen en general una elevada productividad y calidad de agua aceptable mientras no alcanzan las zonas con salares, y revisten gran interés para el abastecimiento de demandas domésticas y mineras.

6.2.2 Provincia Andina Vertiente Pacífico

La **provincia andina vertiente pacífico** está dividida en cinco subprovincias:

- a) Subprovincia Norte Grande: incluye acuíferos formados por rellenos cuaternarios adyacentes a los escasos cauces superficiales de la zona; el gran sistema acuífero de la Pampa del Tamarugal, un extenso y potente relleno aluvional terciario y cuaternario; y el sector del Desierto de Atacama, con sistemas acuíferos aluvionales de características poco favorables para su explotación por su escasa recarga.
- b) Subprovincia Valles Transversales: en este sector los acuíferos están constituidos por rellenos cuaternarios fluviales adyacentes a los cauces de los ríos, proviniendo su alimentación de la infiltración de los recursos superficiales. En general, son acuíferos libres de elevada productividad.
- c) Subprovincia Central – Sur: ubicada entre los 33° S y 42° S, esta zona está ligada a la unidad fisiográfica de la Depresión Intermedia, no restringida por los cauces de los ríos. Las napas se alimentan de distintas fuentes, y el material constitutivo corresponde a rellenos cuaternarios no consolidados, provenientes de acarreo fluviales y fluvio-glaciales. En general son acuíferos libres, aunque existen situaciones de confinamiento debido a la existencia de estratos impermeables arcillosos y/o volcánicos.

Figura 6.1
Provincias y SubProvincias Hidrogeológicas



- d) Subprovincia Zona de los Canales: ubicada entre los 42° S y 56° S, se caracteriza por la poca cantidad de recursos subterráneos debido al afloramiento de rocas metamórficas y plutónicas impermeables y carentes de permeabilidad secundaria. Sólo existen pequeñas acumulaciones de depósitos glacio-fluviales cuaternarios de buenas condiciones.
- e) Subprovincia Pampa Magallánica: en esta zona existen depósitos fluvio – glaciales y fluviales en capas permeables de poca potencia. Se han explotado acuíferos surgentes formados por areniscas terciarias en torno al Estrecho de Magallanes y Tierra del Fuego.

6.2.3 Provincia de Cuencas Costeras

La **provincia de cuencas costeras** incluye aquellas de vertientes pacífico sin respaldo andino, nacientes en la Cordillera de la Costa. Está dividida en dos subprovincias: Costeras Arreicas y Costeras Exorreicas. La primera incluye aquellas en el Norte Grande que no presentan ningún tipo de escurrimiento por la ausencia de recursos hídricos; la segunda corresponde a los acuíferos frente a los valles transversales y al sector centro - sur del país, libres, de productividad baja o mediana, de espesor inferior a 100 m, y su uso está limitado por la intrusión salina en las napas.

6.3 Cuantificación de Recursos Subterráneos

Los recursos subterráneos se han cuantificado a través de las recargas a la napa producto de infiltraciones de precipitaciones, de ríos, de riego a través de canales, desde embalses, etc., y flujos propios del agua subterránea. Los siguientes son los volúmenes y flujos más relevantes:

6.3.1 Provincia altiplánica

No existen mediciones en estos acuíferos, aunque se ha demostrado su existencia pero no se ha podido lograr su extracción eficiente.

6.3.2 Provincia andina vertiente pacífico:

❖ Subprovincia Norte Grande:

- Pampa del Tamarugal: cuenta con recargas de 1 [m³/s], las cuales provienen de las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca y Juan de Morales;
- Cuenca del Loa: cuenta con 1,28 [m³/s] de aportes provenientes de la ribera oriental del río, los cuales luego sirven como aportes al río aguas abajo, alcanzando valores de 0,92 [m³/s] en el tramo Yalquincha-Chintoraste;
- Salar de Atacama: recibe una recarga permanente desde los sectores Norte y Este, proveniente de la Cordillera de Los Andes. Además recibe unos 0,250 [m³/s] de excedentes de riego y aguas no utilizadas del río San Pedro. Se estima que en los acuíferos se almacenan 230 m³ por cada kilómetro de ancho con una recarga de 1,9 [m³/s].

❖ Subprovincia Valles Transversales:

- Cuenca del Copiapó: recibe una recarga de 2,25 [m³/s], provenientes en un 80% del mismo río, un 18% a entradas subterráneas y un 2% a infiltraciones del embalse Lautaro;

- Cuenca del Elqui: dentro del sector se distinguen 6 sectores hidrogeológicos, que suman un almacenamiento total de 134,7 millones de m^3 , con caudales subterráneos que llegan hasta los 0,24 $[\text{m}^3/\text{s}]$.
- Cuenca del Limarí: muy relacionado con los embalses en superficie, existen embalses subterráneos que contendrían 62 millones de m^3 .

❖ Subprovincia Central - Sur:

- Cuenca del Aconcagua: cuenta con 21,2 millones de m^3 almacenados, recargado principalmente desde el río Aconcagua y otros cauces;
- Cuenca del río Maipo: existen numerosos caudales en las distintas zonas homogéneas que se han definido en el valle, pero muy pequeños cada uno para ser individualizados; destaca el caudal de 5,578 $[\text{m}^3/\text{s}]$ en la sección principal de los ríos Maipo y Mapocho, el cual va paulatinamente aflorando al sur - poniente de Santiago.
- Cuenca del Rapel: existen numerosas zonas hidrogeológicas, por donde escurren caudales significativos, destacándose las recargas en el río Cachapoal (1,6 $[\text{m}^3/\text{s}]$ en algunas secciones particulares);
- Cuenca del Mataquito: existen altos caudales en las secciones de los ríos Teno (hasta 3,55 $[\text{m}^3/\text{s}]$) y Lontué (hasta 8,2 $[\text{m}^3/\text{s}]$);
- Cuenca del Maule: se ha calculado que ingresa un caudal de 4,078 $[\text{m}^3/\text{s}]$ desde ríos como el Claro, Maule y Longaví, entre otros.

❖ Subprovincia Zona de los Canales: existen en la Península Brunswick recargas de origen nival y pluvial e infiltración de esteros y quebradas que ascienden a cerca de 4,5 $[\text{m}^3/\text{s}]$ y 2,2 $[\text{m}^3/\text{s}]$, con un 50% y 85% de probabilidad de excedencia respectivamente.

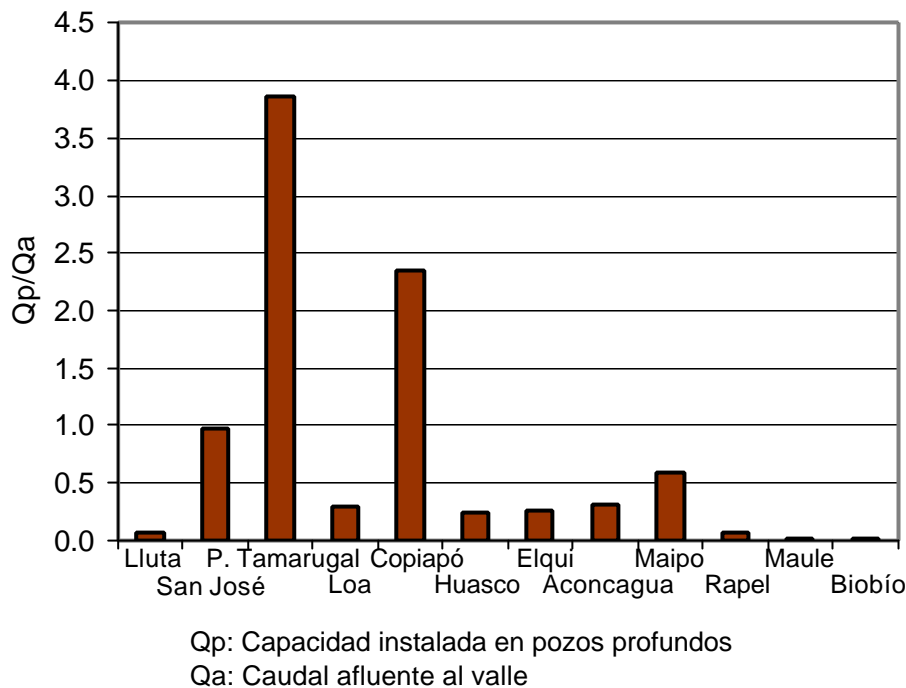
❖ Subprovincia Pampa Magallánica: en los distintos sectores de Tierra del Fuego existen recargas, entre 4,9 $[\text{m}^3/\text{s}]$ al oriente de ésta y 1,6 $[\text{m}^3/\text{s}]$ al poniente (ambas con un 50% de probabilidad de excedencia).

6.3.3 Provincia de cuencas costeras

- Cuencas costeras entre ríos Biobío y Carampangue: se han calculado flujos que suman cerca de 3,1 $[\text{m}^3/\text{s}]$;
- Cuencas costeras entre Río Aconcagua y Maipo: se destaca el Estero Casablanca que presenta un promedio anual de 0,76 $[\text{m}^3/\text{s}]$.

Las aguas subterráneas, por la importancia que tienen esencialmente las regiones I a III del norte del país, donde no se puede contar con los recursos superficiales por su mala calidad, están siendo sobreexplotados en algunas cuencas, a un nivel mayor que sus recargas naturales. Tal como se puede ver en la Figura 6.2, estas situaciones son críticas en la Pampa del Tamarugal y la cuenca del Río Copiapó, además de otros lugares no ilustrados como el Valle de Azapa, en la cuenca del río Lluta y la subcuenca de Chacabuco-Polpaico en la cuenca del Maipo, donde los caudales extraídos de pozos superan a la recarga afluente. No obstante, el resto del país da signos de una evidente subexplotación.

Figura 6.2
Uso de Agua Subterránea



6.4 Calidad de las Aguas Subterráneas

En términos generales se puede señalar que la importante interacción que existe entre las aguas superficiales y subterráneas, tiene como consecuencia que la calidad de esta última sigue de cerca las tendencias de las aguas superficiales que la recargan, aunque normalmente con niveles de sólidos disueltos superiores.

En forma similar a lo que se observa en las aguas superficiales, el contenido de sales es fuertemente creciente hacia el norte del país, manteniendo valores muy bajos al sur de Santiago. La existencia de niveles más elevados en la XII región se debe a la explotación en esa zona de acuíferos surgentes asociados a areniscas terciarias que se ubican a gran profundidad.

Las aguas del Norte Grande presentan una importante heterogeneidad espacial. Ello es un reflejo de las características geológicas de la zona, de la importancia de los procesos evaporativos y de la escasa o nula recarga de muchos acuíferos lo que permite una interacción agua roca muy prolongada.

Desde la perspectiva del uso de las aguas subterráneas para fines domésticos, entre las regiones IV y X, especial atención tienen el hierro y manganeso, por tener altas concentraciones de origen natural.

Con respecto a las aguas subterráneas, la calidad de los recursos se ha determinado a nivel de provincias y subprovincias. La Tabla 6.1 indica los niveles de concentración de sólidos disueltos totales (SDT). Según esta tabla, la calidad del agua sufre de gran deterioro en el Norte del país, por efecto de la salinidad y la aridez de la zona.

Tabla 6.1
Calidad de las Aguas Subterráneas en principales Acuíferos

Provincia Hidrogeológica	Subprovincia	Calidad del Agua [mg/l SDT]	Observaciones
Altiplánica	-	aprox. 500	En general buena, excepto en sus terminales (salares)
Andina Vertiente Pacífico	Norte Grande (18° - 19° S)	600 - 2.400	Desde buena a regular
	Norte Grande (19° - 22° S)	2.000 - 10.000	En deterioro en dirección NE-SW, alcanzando los salares
	Norte Grande (22° - 27° S)	800 - 2.000	Desde buena a regular
	Valles Transversales	< 500 - 2000	Buena en la cabecera de los ríos, y en gradual deterioro hacia el sector costero
	Central - Sur	< 500	Excelente
	Zona de los Canales	-	Buena calidad para uso doméstico
	Pampa Magallánica	< 700	Buena calidad para fines domésticos y bebida para el ganado
Cuencas Costeras	Costeras Arreicas	-	No hay recursos
	Costeras Exorreicas	500 - 1.000	Regular por intrusión salina, solo para uso doméstico

Fuente: basado en DGA, "Mapa Hidrogeológico de Chile, texto explicativo, escala 1:2.500.000", 1986

6.5 Zonas Favorables para la Existencia de Aguas Subterráneas

Con relación a la capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas, los terrenos pueden clasificarse en las siguientes tres categorías:

- Acuíferos:** formaciones de gran porosidad y permeabilidad capaces de almacenar y transmitir agua en forma apreciable (ejemplo: arena).
- Acuífugos:** formaciones de muy baja porosidad y muy baja permeabilidad, las cuales, en consecuencia, no almacenan ni transmiten aguas (ejemplo: rocas graníticas).
- Acuífijos:** formaciones de alta porosidad y baja permeabilidad, susceptibles de almacenar grandes cantidades de agua, pero de muy difícil extracción por los métodos corrientes de explotación (ejemplo: arcillas).

La gran mayoría de los acuíferos están contenidos en rellenos sedimentarios cuya permeabilidad o porosidad original no ha sido afectada por procesos posteriores que tiendan a cerrar los poros (cementación, compactación y metamorfismo). Un pequeño porcentaje de acuíferos aparece ligado a fracturas en rocas de cualquier tipo, cavidades de disolución en rocas calcáreas o bien aberturas producidas por escape de gas en lavas.

En general, los sedimentos precuaternarios se muestran impermeables y densos por lo que son de una importancia muy secundaria en relación con aguas subterráneas. Desde este punto de vista, las rocas pueden clasificarse en seis grandes grupos según el período geológico durante el cual se originaron y también según su capacidad para configurar acuíferos. Estos grupos se indican en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2
Rocas Representativas de Sedimentos Acuíferos

Período Geológico	Grupo	Rocas Representativas
Paleozoico y Prepaleozoico	1	Sedimentos metamorfoseados: pizarras, filitas, micacitas y gneisses.
Mesozoico	2	Volcanita, sedimentos continentales, sedimentos marinos, macizos intrusivos menores y sedimentos metamorfoseados.
	3	Rocas graníticas.
Terciario	4	Sedimentos marinos y continentales.
	5	Volcanitas.
Cuaternario	6	Sedimentos continentales; sedimentos marinos en playas o terrenos contiguos a la costa actual.

6.5.1 Grupo 1: Rocas Paleozoico y Prepaleozoico

Corresponde a las rocas designadas como zócalo fundamental por su antigüedad. Por la forma en que estas rocas se quiebran, se conocen con el nombre de piedra laja. Normalmente son duras e impermeables y densas, no presentan fracturas abiertas al paso del agua. Como acuífero son totalmente nulos (se observan con gran desarrollo en la Cordillera de la Costa al sur de Concepción).

6.5.2 Grupo 2: Rocas Mesozoico I

Configurados por una gran diversidad de tipos de rocas predominando las volcanitas que aparecen como potentes espesores de lavas y piroclásticas del tipo de tobas y brechas. Se encuentran también sedimentos de origen lacustre e importantes espesores de calizas.

Las rocas del Mesozoico están fuertemente afectadas por procesos tectónicos presentándose a menudo recorridas por numerosas zonas de fracturamiento. Estas grietas o fracturas muchas veces se prolongan hasta la superficie donde, bajo condiciones favorables de relieve y precipitación, pueden constituir áreas de recarga subterránea. Estas condiciones se presentan en muchos sectores andinos. Su importancia como caudal es, sin embargo, relativamente pequeña. Da origen a vertientes (parte de la alimentación de la cuenca de Batuco podría provenir de este tipo de infiltración en la vertiente oriental de los cerros de la Cordillera de la Costa en este sector).

6.5.3 Grupo 3: Rocas Mesozoico II

Rocas graníticas, principalmente de grano grueso y colores claros, duras y densas cuando frescas y francamente impermeables. Pueden considerarse como acuífugos típicos. Cubren amplias extensiones de la Cordillera de la Costa (Batolito de la Costa), y en la Cordillera de los Andes de presentan, además de afloramientos esporádicos, extensamente al sur del río Imperial aproximadamente (Batolito Andino).

El Batolito de la Costa, al contrario del Andino, muestra corrientemente, y de preferencia en la zona más contigua a la costa, fracturamiento que permiten una pequeña circulación de agua subterránea. Esta es de muy pequeña magnitud y sólo puede ser aprovechada mediante norias para pequeños abastos familiares (caso de los balnearios cercanos a la ciudad de Santiago). Las rocas graníticas, atacadas por procesos de meteorización, originan materiales de textura

arenosa conocidos con el nombre de “maicillo”, que al contar con recursos de agua, pueden dar origen a napas de relativa importancia (cuenca de Casablanca, Yali al sur oeste de Melipilla, El Salto en Viña del Mar).

6.5.4 Grupo 4: Sedimentos Terciario I

Estos sedimentos se presentan relativamente mal consolidados y presentan en consecuencia alguna permeabilidad. Este grupo de rocas tiene un cierto interés potencial para el aprovechamiento de aguas subterráneas.

Los sedimentos del tipo continental se presentan esporádicamente al interior de la Cordillera Andina, son esencialmente del tipo lacustre. Los sedimentos marinos ocupan fajas contiguas a la costa actual, presentándose en forma de areniscas y conglomerados relativamente poco consolidados con abundante contenido fosilífero. (se encuentra especialmente en la costa en torno a la desembocadura del río Rapel y en toda la zona de Arauco).

6.5.5 Grupo 5: Sedimentos Terciario II

Las volcanitas terciarias se continuarían en los materiales volcánicos originados por la actividad tectónica del cuaternario inferior, que con menos intensidad se continúa hasta el presente. Son fundamentalmente andesitas basálticas de colores oscuros y pueden presentarse en forma de lavas densas e impermeables como también altamente porosas por el escape de gases durante la época de su formación. Se ubican casi totalmente dentro de la Cordillera Andina, por lo que tienen un interés relativamente pequeño en cuanto a captaciones subterráneas. Muchos lagos y lagunas de la región Andina han sido formados por cordones de lava modernos y muy permeables que presentan filtraciones abundantes (laguna de la Invernada en la provincia de Talca, con filtraciones variables entre 10 y 20 m³/s).

6.5.6 Grupo 6: Sedimentos Cuaternario

Los sedimentos cuaternarios continentales contienen casi el total de los recursos de aguas subterráneas cuyo aprovechamiento resulta comercial en nuestro país. De acuerdo a sus condiciones de origen, pueden distinguirse los siguientes tipos: sedimentos fluviales, glaciales y asociados a glaciares cuaternarios. Por su relación con el agua subterránea, los dos primeros son especialmente importantes.

a) Sedimentos fluviales:

Son aquellos que resultan del transporte de depósito por aguas de ríos con escurrimiento permanente, aun cuando la mayor parte de los depósitos se produce durante creces en que el río desborda su cauce e inunda amplias extensiones de los terrenos más bajos adyacentes. El tamaño de este tipo de sedimentos depende de la velocidad del agua, lo que explica la graduación granulométrica existente a lo largo del perfil longitudinal de un río (materiales gruesos y muy permeables en el inferior). Las condiciones determinantes para el depósito de estos sedimentos han variado a lo largo de la historia geológica cuaternaria de cada río, por lo que pueden ubicarse con sondajes, capas de sedimentos gruesos y permeables en las desembocaduras actuales o bien intercalaciones arcillosas e impermeables en sus cursos medio y superior. Lo mismo vale para las secciones transversales correspondientes a ríos de valles anchos; el caudal del río puede haber sufrido grandes desplazamientos y, dado que aquí se encuentran normalmente los depósitos más gruesos, a veces las mejores napas subterráneas se localizan en ubicaciones alejadas de los lechos actuales.

Del río Aconcagua al norte, los ríos presentan valles estrechos que no han permitido nunca grandes desplazamientos de sus cauces, por lo que las mejores posibilidades de captación subterránea se encuentran próximas a los lechos actuales. Los ríos Maipo y Rapel, con sus afluentes, han tenido desplazamientos notables en su recorrido por el valle Central. El relleno de estos cauces antiguos queda normalmente ligado con áreas de recarga, por lo que presenta muchas veces mejores posibilidades que la zona próxima a los cauces actuales. El relleno antiguo hacia la zona de la costa, entre los ríos antes referidos, ha sido generalmente sollevado a niveles más altos que las áreas de recarga más importantes, por fenómenos tectónicos, de manera que no muestra posibilidades promisorias de aguas subterráneas.

Desde Curicó hacia el sur, se repiten en distancias relativamente cortas, ríos importantes. Aunque priman aquí los depósitos glaciarios y asociados con ellos, son escasas las áreas dentro del valle Central que no muestran en alguna profundidad depósitos fluviales permeables.

b) Sedimentos glaciarios o glaciales:

Los materiales depositados directamente por los glaciares, morrenas, son típicamente heterogéneos y de mala clasificación; es decir, francamente impermeables. Hasta la latitud al sur de Santiago, no hay evidencias de acumulación por el hielo en el relleno del valle central, sin embargo, hacia el sur del país, se hacen cada vez más marcados los rasgos de una acumulación de este tipo, hasta que hacia la zona de Puerto Montt constituyen el relleno predominante en la superficie del valle Central.

Se estima que de Aconcagua al sur las épocas glaciares cuaternarias fueron a lo menos tres, de las cuales la última fue comparativamente la de menor magnitud y alcanzó con sus sedimentos solamente los primeros contrafuertes andinos entre Santiago y Valdivia. Al sur de Valdivia habría alcanzado hasta la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa.

c) Sedimentos glaciofluviales: (asociados a glaciares cuaternarios).

Cada época glaciaria queda separada de la siguiente por un período interglacial o de notable retroceso de los hielos hacia el interior de la Cordillera Andina que, según se cree, fue generalmente de mayor duración que la misma época glaciaria precedente. Durante los períodos interglaciales se produjo una intensa acción del agua proveniente en grandes cantidades del derretimiento del hielo y también de precipitaciones. Los sedimentos depositados bajo este tipo de régimen se denominan glaciofluviales. Existen en muchas regiones, gruesos espesores de sedimentos fluviales, que en realidad, pertenecen más bien al tipo aquí considerado por provenir de materiales originalmente glaciarios, en especial de la última época glaciaria. Pueden esperarse en ellos buenos rendimientos de aguas subterráneas.

De gran extensión son los sedimentos lacustres (glaciolacustres) constituidos por limos arcillosos, los que alcanzan cada vez más desarrollo a medida que se avanza hacia la zona de Puerto Montt y Chiloé. Se ubican cronológicamente por debajo de los depósitos glaciarios más modernos y pueden observarse claramente de Talca al sur (parecen existir en el territorio chileno dos grandes cuencas lacustres, una ubicada desde Osorno a Puerto Montt y posiblemente gran parte de Chiloé y otra desde la región del lago Villarrica hasta cerca de Talca). Estos sedimentos lacustres son de naturaleza muy impermeable.

d) Otros depósitos sedimentarios cuaternarios

- Conos de rodados y depósitos fluviales torrenciales: semejantes a los típicamente fluviales aunque no tan redondeados, clasificación inferior, menor porosidad y menor permeabilidad.
- Depósitos eólicos: desde el punto de vista del agua subterránea sólo tienen importancia las dunas (acumulaciones arenosas originadas por el viento). Las dunas costeras son altamente permeables y, por lo tanto, son atractivas desde el punto de vista de captaciones subterráneas, siempre que cuenten con recarga abundante.
- Escombros de falda: son producto de la meteorización de las rocas. Estos materiales son de una importancia muy secundaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Baeza, H. Escurrimientos en Medios Permeables. Universidad de Chile, 1976

Benítez, A.. Captación de Aguas Subterráneas. Dossat. 1972.

Dirección General de Aguas. Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. 1986.

Fetter, C.W. Applied Hydrogeology. Prentice Hall. 1988.

Karzulovic K., Juan. Antecedentes de introducción : evaluación de recursos de aguas subterráneas. 1979.