



**Ministerio del Ambiente
y de los Recursos
Naturales Renovables**



LAS AGUAS SUBTERRANEAS. SU AMBITO Y ESTUDIO

DENTRO DE LAS CIENCIAS NATURALES

ANTECEDENTES HISTORICOS

La subsistencia del hombre y el desarrollo de la civilización humana han estado siempre ligados a la presencia del agua en el medio físico, en ocasiones obrando como elemento restrictivo y otras siendo el factor impulsador del progreso. El hombre primitivo que habitó las cavernas usó el agua que drenaba de las rocas y suelos por su mayor grado de pureza respecto a otras fuentes, fácil disponibilidad, sin reflexionar -y si lo hizo, no quedaron evidencias-, sobre aspectos atinentes al agua que luego serían objeto del interés filosófico y cuyas interrogantes se plantearon los hombres como resultado del mismo desarrollo, del incremento poblacional, de la necesidad creciente del mismo y del interés científico de la humanidad por mejorar el conocimiento sobre el ambiente natural. A pesar del esplendor que alcanzaron algunas ramas científicas en las antiguas culturas tales como la astronomía, matemáticas y la filosofía, es sorprendente considerar que muchas enmarcadas dentro de las ciencias naturales se rezagaron a tal grado, que sólo hasta hace 200 años muchas ideas y conceptos relativos a ellas, permanecieron inmersos en el mayor oscurantismo y la errónea concepción.

Indiscutiblemente que las ideas de los grandes filósofos griegos antiguos como Platón y otros, que influenciaron la mentalidad humana por cerca de dos milenios y los cuales sustentaban que las ciencias y la filosofía, debían transitar sendas separadas y desligadas de la observación, la experimentación y las aplicaciones prácticas, contribuyó al lento progreso del conocimiento científico.

Las aguas subterráneas por su carácter y forma de ocurrencia, representaron una motivación que ayudó a despertar el interés científico-filosófico de las civilizaciones primitivas para tratar de explicar lo que hoy conocemos formalmente, aunque no de un modo riguroso en toda su extensión, como "el Ciclo Hidrológico". Muchas de las interpretaciones que se dieron entonces sobre el origen y almacenamiento de las aguas subterráneas, nos parecerían a la luz del presente estado del conocimiento, muy vagas y fantásticas.

Aquellos pensadores griegos eran impresionados por las magnitudes de los caudales de los ríos respecto a las cantidades de agua de las lluvias, y pensaban que los primeros debían tener un suministro adicional desde el mar y los océanos, a los cuales suponían conectados directa ó indirectamente; si esto era cierto, ellos no llegaron a entender en que forma el agua del mar perdía su salinidad, al pasar de uno a otro ambiente y que mecanismos controlaban su ascenso hasta las montañas.

Thales (640-546 A.C.) llamado el primer científico, suponía que el agua se derivaba de las rocas, desde donde era expelida por acción del viento; Platón (427-347 A.C.) creía que existía una gran caverna dentro del planeta conectada con el océano a través de conductos que suplía el escurrimiento de los ríos y, Aristóteles (382-322 A.C.) discípulo de Platón, pensaba que el agua se almacenaba después de infiltrarse a partir de la lluvia, en un

sistema esponjoso complejo existente en el subsuelo que poseía aberturas, siendo expulsada a través de ellas y, dando origen a las fuentes.

Seneca (4-65 A.C.) era de la misma opinión de Aristóteles, pero negaba la realidad a importancia de la infiltración. Dos científicos Alemanes Kircher (1602-1680) y Kepler (1571-1630) el último más conocido por sus leyes de astronomía, fueron altamente influenciados por las ideas de Seneca y Aristóteles. Kepler llegó a convencerse de que la tierra se comportaba como un "animal" que digería el agua, siendo las descargas de las fuentes un producto de su "metabolismo". A finales del renacimiento (1600) eran muy pocos los científicos que tenían el convencimiento de que:

- a) Mecanismos tales como la acción del viento, oleaje y capilaridad que pueden ciertamente elevar el agua contra la fuerza gravitacional, son incapaces de levantar grandes cantidades de agua, desde el interior de la tierra ó desde el mar, hasta las tierras continentales.
- b) La tierra no posee una red interna de conductos ó cavernas.
- c) El agua del mar no pierde todas sus sales por infiltración, a través de los aluviones costeros.
- d) Las cantidades de agua de la lluvia, son suficientes como para suplir el escurrimiento de los ríos y las fuentes.
- e) La infiltración del agua en los suelos y aluviones es efectiva y se produce en grandes cantidades.

De esta época data la primera descripción racional del Ciclo Hidrológico, dada por el grande pensador renacentista que fué Leonardo Da Vinci.

Entre 1668-1670 Perroult y Mariotte realizaron mediciones de la lluvia, escurrimiento e infiltración en la cuenca del río Sena, obteniendo de un sómero balance hidrológico, que el escurrimiento era $1/6$ de la precipitación total anual de la cuenca, tal experiencia y la más tardía de Halley (1656-1742), el famoso astrónomo Inglés, quién midió la evaporación en el Mediterráneo concluyendo que los mares y océanos eran una fuente adecuada para suplir el escurrimiento de los ríos y otras corrientes superficiales, sentaron las bases que confirmaron la circulación del agua en el planeta, tal como la conocemos actualmente.

Hace poco más de un siglo Poiseuille analizó teóricamente el flujo a través de conductos capilares y Darcy (1803-1858) determinó experimentalmente, la ley que establece el movimiento del agua subterránea en un medio poroso; desde entonces los estudios de éstas se diversifican hacia muy diversos tópicos como veremos a continuación.

DEFINICION DE LA MATERIA

Posiblemente dentro de las ciencias de la tierra, no existe una especialidad para la cual se hayan dado más denominaciones a veces tan ambiguas, cómo para aquella que se ocupa del estudio del origen, características, ocurrencia, movimiento, exploración y extracción de las aguas almacenadas en los medios porosos y rocas de la litósfera.

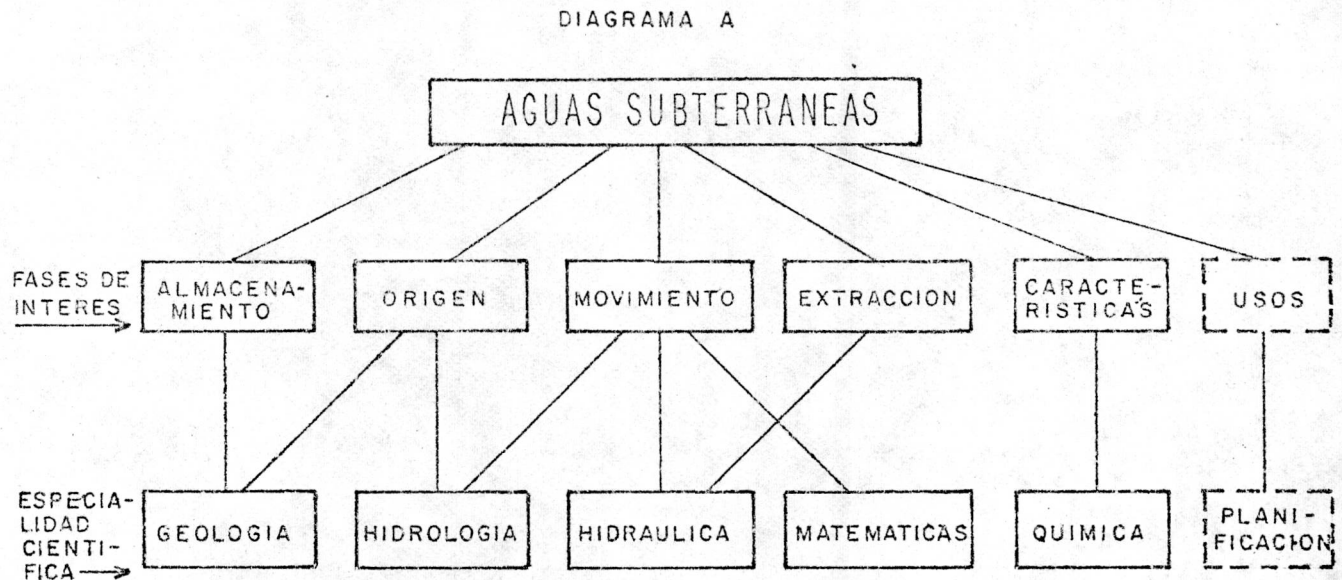
La palabra "hidrogeología" se ha empleado para destacar un mayor énfasis de los aspectos geológicos del ambiente, sobre procesos que tienen estrecha relación con la hidrología de las aguas subterráneas, mientras que las de "geohidrología" tiene una aceptación con trapuesta a la anterior; inicialmente, la primera fué usada por Lamark y Powell para definir el estudio de aquellas formas resultantes de la denudación y erosión hídrica. Lucas en 1879, al igual que Mead, dieron al término geohidrología la misma concepción actual, aunque este último, consideraba a las aguas subterráneas como un "agente geológico cuya mayor comprensión, podía orientar y contribuir a lograr un mejor conocimiento del origen y desarrollo de los sistemas de drenaje". Meinzer dividió la hidrología en dos ramas principales: la hidrología superficial que trata de las aguas de escorrentía, e hidrología subterránea ó geohidrología; sin embargo, muchos geólogos americanos han usado el último término, para abarcar una gama de estudios de muy diversa índole, que tratan tanto de la hidrología superficial como de las aguas subterráneas, siempre con una marcada orientación geológica.

Tal dificultad en la interpretación de esta especialidad para técnicos trabajando en campos afines, se deriva probablemente de la dificultad de separar a uno del otro, aunque es aparente que muchos fenómenos geológicos pueden ser mejor comprendidos, si se entienden los factores hidrogeológicos involucrados en los mismos, mientras que es imposible estudiar las aguas subterráneas en una región, si no se posee un adecuado conocimiento del ambiente geológico. Bajo esta idea, es entonces comprensible que siendo las aguas subterráneas una fase importante del ciclo hidrológico, ellas sean analizadas en base a un criterio hidrológico, sin dejar de tomar en cuenta las características de los medios de almacenamiento (geología) tratando de discernir, cómo se interrelacionan con otros fenómenos naturales y cómo su estudio, puede ser aprovechado ventajosamente para comprender mejor la naturaleza.

MATERIAS COMPLEMENTARIAS Y AUXILIARES

El estudio de las aguas subterráneas requiere de la participación de diversas ramas científicas, siendo a veces difícil establecer donde está la frontera entre unas y otras. Así, es razonable de comprender que el avance vertiginoso en los últimos 100 años en este campo, ha sido el resultado del esfuerzo mancomunado y la cooperación de ingenieros hidráulicos, agrónomos, geólogos, químicos, hidrólogos y otros especialistas en ciencia de la tierra.

El diagrama A muestra una relación no secuencial de cómo las más relevantes especialidades científicas, contribuyen con su aporte a la comprensión de una ó varias fases asociadas al estudio de las aguas subterráneas.



METODOS DE ESTUDIO Y CARACTER DE LA MATERIA

Siendo los estudios de Aguas Subterráneas el resultado de aplicar racionalmente principios de diversas especialidades técnicas, es natural que se siga el método científico de investigación al establecer leyes válidas para explicar y comprender procesos o mecanismos relativos a su comportamiento. El método puede ser sintetizado en la siguiente forma: A través de un conjunto sistemático de observaciones, se formula una regla empírica, después por abstracción e inducción, se llega al establecimiento de una hipótesis o postulado. Deduciendo consecuencias de la teoría, es factible lograr nuevas observaciones e interpretaciones, las cuales son útiles para juzgar su probabilidad o para rechazar la teoría empírica original si ella no resiste la confirmación mediante la experimentación. La clasificación de hechos y la subsiguiente prueba estadística que confirme la realidad de la hipótesis bajo diversas condiciones, conduce al establecimiento de la ley científica.

Considerando la secuencia evolutiva de la investigación del flujo subterráneo, puede aclararse mejor lo antes establecido. Darcy (1835), formuló una regla empírica como resultado del problema práctico de diseñar un filtro de arena para un sistema de abastecimiento para la ciudad de Dyon; Pennick (1905), mediante inducción y experimentación usando el principio anterior, definió al patrón del flujo subterráneo en los bordes de un canal de drenaje, lo cual sustentado por razonamientos teóricos de Hubber (1940) quien además analizó el contenido físico de la ley de Darcy, estableció la teoría de que, el agua subterránea se

mueve en la dirección en que disminuye el potencial del campo de flujo y que la configuración del mismo estaba definida por la ecuación de Laplace.

Nuevas observaciones complementadas por la experimentación en el campo y los laboratorios, han conducido a la descripción física y matemática de nuevos y más complicados modelos de flujo subterráneo (Muskat 1937, Poluvarinova - Kochina (1938-1940), Edelwen 1962, Toih 1962) y, recientemente nuevos modelos empíricos se han postulado, referentes a la circulación del flujo subterráneo a macroescala dentro de áreas continentales (Mayboom 1962).

Estos modelos, en adición a la reconocida importancia de las aguas subterráneas dentro del ciclo hidrológico, han conducido finalmente a los balances hídricos de cuencas y regiones, usando técnicas más sofisticadas y modernas tales como la evaluación con satélites, uso de modelos analógicos y matemáticos, etc. Este solo aspecto, forma parte de un conjunto de hechos interrelacionados, algunos resultantes paralelamente del desarrollo de uno o varios entre sí, cuya consideración ha llevado a configurar el marco científico en que se funda la investigación del flujo de las aguas subterráneas, lo cual actualmente no se limita a considerar su ocurrencia en la tierra sino a otros planetas del sistema solar, como se ha confirmado de la importancia de los datos últimamente recabados por sondas automáticas, en la Luna y Marte especialmente.

Basándonos en el carácter interrelacionado de los hechos y procesos que caracterizan el origen, características y el movimiento de las aguas subterráneas, es que concibe a la especialidad que se ocupa de su estudio -principio aplicable a otras ciencias naturales-, como de carácter materialista, en contraposición al concepto metafísico, que considera a la naturaleza como un conjunto aislado de objetos cuya interrelación es solo de carácter fortuito.

El primero acepta que la naturaleza es un conjunto simplemente conexo, donde los objetos y fenómenos están orgánicamente entrelazados dependiendo unos de los otros, donde las relaciones causas-efectos están intimamente ligados, es por ello que los estudios de aguas subterráneas ayudan a comprender mejor otros fenómenos del medio ligados a su acción y efectos, en tal sentido se cumple así con una función social -la de comprender mejor la naturaleza-, al contribuir al progreso del conocimiento de las ciencias naturales.

NATURALEZA DE LOS ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRANEAS

Salvo excepciones los estudios de aguas subterráneas, tratan de unos o pocos aspectos referentes a las fases antes descritas y el grado de detalle depende de su naturaleza, la disponibilidad de información y los requerimientos exigidos; así aún cuando en algunos trabajos, se ha pretendido cubrir el mayor espectro de temas, es natural que la mayoría de los estudios solo contemplen aspectos específicos y en general especializados.

Los trabajos más completos se refieren a los balances hídricos de cuencas, particularmente en zonas áridas y semiáridas, donde debido a la naturaleza del medio geológico-climático, carácter de las aguas y explosivo desarrollo agrícola-industrial, la más prominente alternativa es la del uso de las aguas subterráneas.

Aún cuando no existen normas establecidas para dar continuidad y lograr la realización de un estudio de Aguas Subterráneas, hay requerimientos que se hacen indispensables para acometerlo satisfactoriamente.

El primero y principal, es el de tener una clara concepción del medio geológico y los ambientes espaciales que les sirven de reservorio, no limitándose a comprender solamente los procesos tal como se manifiestan en el presente, sino a discernir sobre la significancia y mecanismos preactuales que los determinaron. En muchas áreas del mundo, así como en Venezuela, los ambientes que exhiben actualmente excelentes perspectivas para el desarrollo con aguas subterráneas, deben tal particularidad, a que procesos de erosión y de transporte fluvio-glaciáricos durante el cuaternario, acumularon en zonas piemontinas y de transición topográfica, enormes volúmenes de sedimentos que han servido de medios potenciales de almacenamiento de agua, también en zonas depresivas y restringidas como lagos y cuencas cerradas la denudación y aporte de materiales gruesos debido a la actividad fluvial, produjeran gruesos depósitos con características texturales apropiadas para almacenamiento ó finalmente, como resultado de la dinámica evolutiva de los sistemas de drenaje y a la acción de diferentes agentes de transporte, han podido resultar canales antiguos de relleno (paleocanales) y depósitos eólicos que una vez sepultados en el subsuelo, como resultado de más recientes procesos de sedimentación, dieron origen a excelentes acuíferos.

Así la paleoclimatología, paleobotánica, hidrogeoquímica, geología histórica y la geomorfología, son potentes auxiliares para interpretar tales mecanismos, en el proceso de investigación de las aguas subterráneas.

El conocimiento geológico debe ser sin embargo, complementado y aumentado mediante observaciones directas y/o indirectas relativas a la hidrología.

Entre las primeras se encuentran las mediciones en pozos y piezómetros que llevan a establecer las variaciones temporales y espaciales de los niveles del agua en el subsuelo, a la determinación de las propiedades texturales e hidráulicas de los materiales, a definir áreas de recarga naturales y fluctuaciones de niveles, lo cual sea útil para programar una explotación racional.

Tales labores implican que el profesional debe tener un contacto permanente con el campo dentro de las actividades de explotación, exploración, evaluación del recurso y programación de actividades conexas; pero su labor no termina aquí. -Las labores de oficina y laboratorio son la continuidad de todas las faenas del campo.

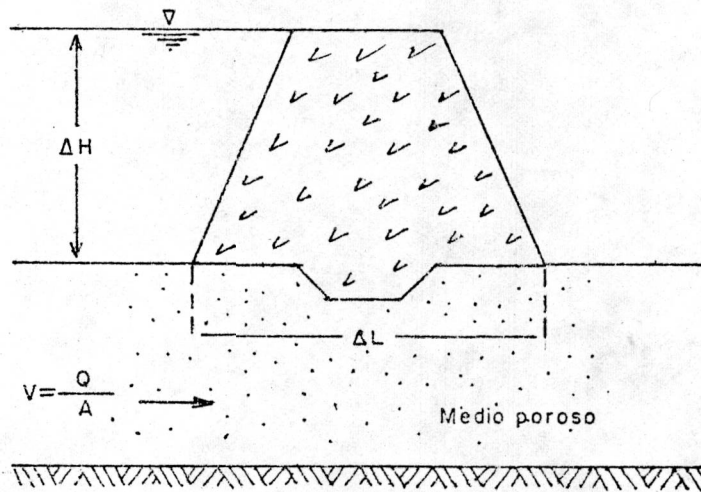
En los últimos años por ejemplo, se ha hecho muy generalizado el uso del modelaje y la simulación y esto ha alcanzado a las aguas subterráneas; existiendo modelos tan simples como el de un filtro de arena en un permeámetro, hasta complejos modelos matemáticos aplicables al balance hidrológico de cuencas.

Los resultados de experimentos ciertamente, no son una prueba convincente de que los procesos en el laboratorio puedan ocurrir en forma análoga a como se suceden en la naturaleza, pero ellos estimulan efectivamente la imaginación y en el caso de las aguas subterráneas, han probado ser útiles para ayudar a comprender mejor muchos fenómenos y mecanisms

mos, particularmente relacionados con el régimen y tipo de flujo.

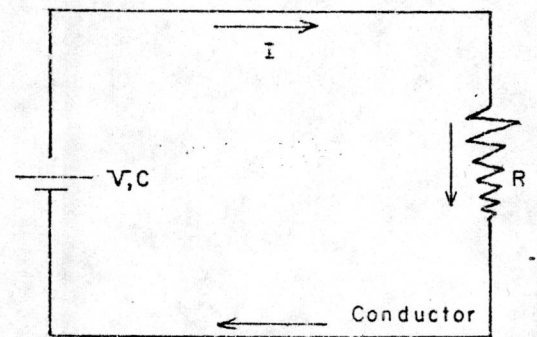
Los modelos hidráulicos a escala reducida y los analógicos, son de particular interés y de más amplio uso en la simulación del flujo de aguas subterráneas; los últimos se basan en que dos fenómenos físicos aparentemente no interrelacionados, se comportan análogamente si las ecuaciones diferenciales que definen ambos procesos, son idénticos. El flujo térmico, la conducción de energía eléctrica a través de un conductor y el flujo de las aguas subterráneas en medios porosos, son procesos definidos matemáticamente, por una expresión similar.

Así el uso de modelos de este tipo para estudiar un mecanismo, ha aportado conocimientos para comprender a otros similares. El análisis del flujo subterráneo se ha beneficiado de los estudios y modelos de transferencia de calor y de la corriente eléctrica; en relación a esta última, es interesante destacar la similitud entre las ecuaciones que definen las leyes de Darcy y OHM cuando se consideran los siguientes sistemas físicos:



(SISTEMA A)

$$\text{LEY DE DARCY: } V = -K \frac{\Delta H}{\Delta L}$$



(SISTEMA B)

$$\text{LEY DE OHM: } I = \left(\frac{1}{R} \right) V$$

donde: (Dimensionalmente)

Descarga específica $[L/T] \approx$ intensidad de la corriente eléctrica (AMP) $(V \approx I)$

Conductividad hidráulica $[L/T] \approx$ Conductancia eléctrica (mhos) $\left[K \approx \frac{1}{R} = C \right]$

Gradiente hidráulico $[L/L] \approx$ Diferencia de voltaje (volts)

Almacenamiento $[L^3] \approx$ Capacitancia eléctrica μF

$$\left[\frac{\Delta H}{\Delta L} \approx V \right]$$

SECUENCIA DE ACTIVIDADES. EJEMPLO DE UN BALANCE HIDRICO

No es factible establecer una "ruta crítica" para la ejecución de un estudio completo de aguas subterráneas, mientras que no siempre los objetivos pueden ser fijados con antelación, la información y calidad de los datos no es siempre la aceptable y la naturaleza del estudio puede contemplar la ejecución de distintos tópicos, algunos secuenciales otros independientes en su programación. Las seis fases contemplando las labores especificadas a continuación, son las seguidas frecuentemente por los grupos interdisciplinarios que tienen que establecer un balance hídrico de una cuenca orientándose el aprovechamiento hacia el uso de las aguas subterráneas y debe entenderse, que han de ser flexibles como todas las normas de trabajo en los estudios de ciencias de la tierra.

1. La primera fase consiste en definir el marco geológico regional y local, basado en la observación y mediciones superficiales y subsuperficiales (topografía, fotogrametría, geofísica). Determinación en el laboratorio ó por observación de las propiedades de los medios de almacenamiento. (textura, porosidad, permeabilidad, grado de fracturamiento de las rocas, isotropía, homogeneidad, estructuras geológicas, etc.). Realización de perforaciones exploratorias y muestreos preliminares de aguas. Establecimiento del régimen climático de la región ó cuenca (evaporación, precipitación, escurrimiento, temperaturas, vientos, etc.). Esta fase permite definir la probabilidad de descartar una fuente ya sea superficial ó subterránea como la alternativa de aprovechamiento, en consecuencia pueden lograrse ideas preliminares de la ocurrencia y distribución especial y temporal del recurso en los diferentes medios.
2. Si el uso de aguas subterráneas es la alternativa elegida, se procede a establecer cualitativamente el sistema ó campo de flujo mediante mediciones directas en pozos y piezómetros, confirmando los resultados obtenidos en la primera fase respecto al carácter de los materiales. Ampliación de detalles sobre hidrogeoquímica. En esta fase, deben definirse los bordes ó límites del campo de flujo, (en el caso de una cuenca cerrada, coinciden con los puntos de más alto potencial).
3. En esta fase se realiza la construcción del sistema de flujo con toda la información recabada de las fases anteriores (mapas isopiecos, hidrogeoquímicos, isopacos, isometría, fluctuaciones de nivel, variaciones texturales y granulométricos de los medios de almacenamiento).
4. Interpretación y cuantificación de los mecanismos que caracterizan al sistema de flujo; calidad de las aguas, así como de su interrelación con otros procesos que condicionan su origen, ocurrencia, desplazamiento etc.
5. Establecimiento del balance hídrico de la cuenca usando e implementando edicionalmente si es posible, modelos físicos y/o matemáticos que permitan una vez calibrados, hacer diagnósticos de la respuesta del sistema físico (cuenca) ante variados alternativos de explotación de las aguas subterráneas.

6. Hacer esquemas racionales del aprovechamiento (planificación del uso de las aguas subterráneas) a cortos y largos plazos, con el propósito de que su uso no sea conflictivo entre los usuarios y, detrimental para la preservación del ambiente (contaminación de las aguas subterráneas, fluctuaciones anormales de la zona saturada etc.)[—] ello en base a los resultados obtenidos en la fase 5.
- El hidrólogo puede estar involucrado en todas estas fases por lo tanto, la necesidad básica de que él pueda "entenderse" con otros técnicos, para quienes las aguas subterráneas, no dejan de ser menos importantes.

DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES EN VENEZUELA

Referencias personales del Ingeniero Blohm inspector de las construcciones, hechas en subscrito (1968) indican que el primer pozo perforado y operado con bombeo en el país, se ejecutó en los valles de Aragua en una Granja del entonces gobernante Juan V. Gómez (1926). *

Datación de perforaciones relacionadas con el suministro a poblaciones indican que fué en Lagunillas, Estado Zulia, donde se ejecutaron los primeros pozos y fueron realizados por las primeras compañías petroleras que se establecieron en la zona. En diversas localidades del país los pobladores usaron y lo hacen aún, aljibes, pozos excavados y entibados rústicamente para extraer aguas del subsuelo.

Las labores y actividades emprendidas por el MAC en 1930 señalan el inicio de la explotación de las aguas subterráneas y su uso se orientó hacia el suministro de granjas, haciendas y hatos ganaderos. El uso de este recurso con fines de riego es de tiempo muy reciente en el país, siendo en las últimas dos décadas cuando se intensifica como resultado de los programas de la reforma agraria, las asignaciones acordadas por nuestros gobiernos al aprovechamiento de estas fuentes han sido sin embargo, ínfimos en comparación a los dispuestos para el aprovechamiento de las aguas superficiales.

Las primeras estadísticas a nivel nacional recopiladas por el MAC después de 30 años de actividades fueron dadas recientemente; durante el período 1963-1965 de un total de 1.150 pozos perforados, el 75% resultaron exitosos, con una inversión de 12,5 millones de bolívares.

El gráfico Nº 1-a, ilustra para las últimas tres décadas la evolución de las inversiones en las fases de exploración, explotación y construcción de pozos en el país, indicándose la orientación de uso a distintas actividades: industrias, granjas, suministro de poblaciones, riego, etc.

* El gobernante en aptitud mística y sobrecogido de admiración al observar la descarga del pozo, procedió a bendecirlo, reflexionando ingenua pero acertadamente, sobre su papel como salvador de la agricultura y el desarrollo del valle.

Tanto los diagramas de crecimiento poblacional (3,3% anual) como la extrapolación de las curvas anteriores se han indicado hasta 1980 para ilustrar la evolución y activo desarrollo de las aguas subterráneas especialmente a partir de 1968, mientras que la tendencia de las inversiones en los años anteriores fué casi uniforme, resaltando las asignaciones previstas según el V plan de la nación, que se estima sea de 342 millones de bolívares para este renglón.

GRAFICO 1a
CRECIMIENTO POBLACIONAL Y DISTRIBUCION DE LAS INVERSIONES
DE AGUAS SUBTERRANEAS EN VENEZUELA

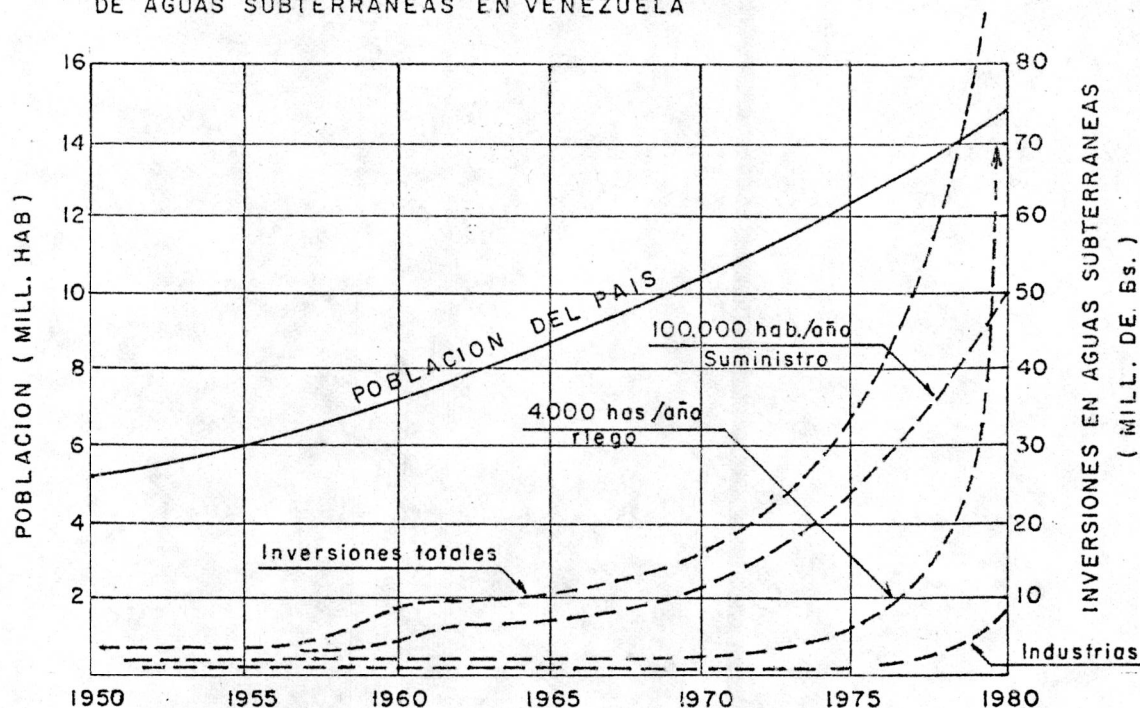
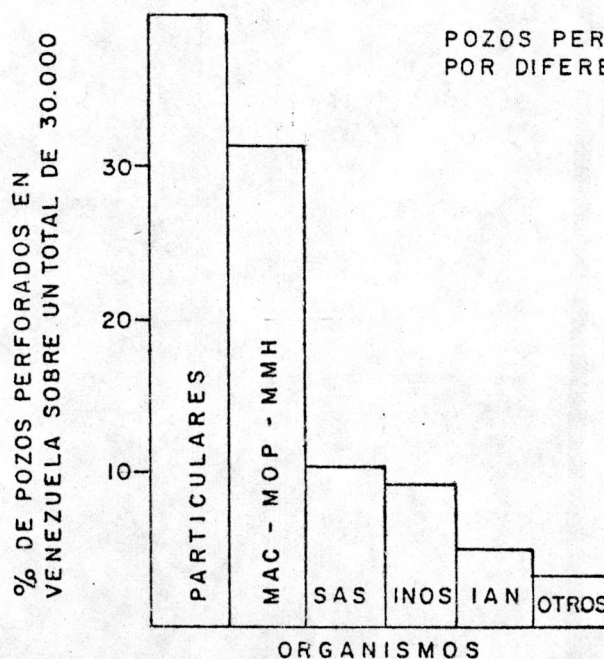


GRAFICO 1b
POZOS PERFORADOS EN VENEZUELA
POR DIFERENTES ORGANISMOS



Un alto porcentaje como se ilustra, ha correspondido al suministro de poblaciones especialmente de tipo rurales, seguido del uso con fines de riego, aunque la tendencia futura debe ser dar alta prioridad a este último, en vista de que las áreas con aprovechamiento de Aguas Subterráneas (Quibor, Estado Lara, altos llanos occidentales, sistema de Guárico, etc.) tienen el más alto porcentaje de la productividad agrícola del país, además de ser esto presionado por la creciente demanda, causada por el incremento poblacional.

En la actualidad se tiene una incorporación del servicio con aguas subterráneas de 100.000 hab/año, aunque esta tendencia debe estabilizarse en el futuro, debido a la completación del suministro para la mayoría de las poblaciones rurales con menos de 5.000 habitantes.

En el gráfico 1-b, se muestra la cantidad correspondiente de pozos perforados en el país por los diferentes organismos públicos y privados que se estima sea de 30.000 de los cuales 15.000 poseen datos estadísticos completos llevados por el MMH. La alternativa de usar datos de perforaciones en áreas petroleras así como el acondicionamiento de pozos no productores de petróleo para la extracción de aguas del subsuelo, ha sido una reciente alternativa que permitirá conocer mejor estos ambientes y extender el aprovechamiento de estas aguas. También las de carácter termominerales representan para el país un recurso potencial de grandes perspectivas, como alternativa energética futura. Así, el ámbito e importancia de las aguas subterráneas en Venezuela, tiene un amplio espectro por sus usos y aplicaciones y además un enorme interés económico, práctico y científico.

EL TECNICO Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Parece paradójico que en aquellas áreas donde hay mayores dificultades para proveer del recurso agua y que precisen de la extracción desde el subsuelo a veces de costos elevados, sean actualmente centros de desarrollo agrícola. Basta observarse los ejemplos de Israel, tierras del Oeste de USA y en Venezuela los valles de Quibor y del río Tocuyo, para comprender el papel que han desempeñado las aguas subterráneas en el desarrollo. Una razón obvia de tal situación es sin duda, originada por el hecho de que los suelos en las regiones de climas secos en el mundo, son los de mejor calidad edáfica, mientras que la lluvia y la escorrentía poco prolíficas en estos medios, no han alcanzado a degradarlos o a remover activamente sus nutrientes. Pero, no es más disciplinado en el uso del agua y con una mayor tradición por el riego, el hombre que debe depender de un recurso de difícil "adquisición", siempre que los beneficios compensen sus inversiones y esfuerzos?, esto al menos es cierto en Venezuela, para las regiones donde existe ó han comenzado a aprovecharse las aguas subterráneas, tales como los llanos del sur del Guárico, altos llanos occidentales y Quibor.

Tardamente, aunque quizás a tiempo, muchos técnicos en cargos prominentes relacionados con el riego en el país, han llegado afortunadamente a comprender esta realidad aunque numerosos embalses ejecutados con este propósito así como sistemas de riego, estén ubicados donde no deberían estar al menos en el presente. Tales reflexiones llevan a reconocer la necesidad, de que los técnicos y planificadores del uso del recurso agua, tengan una clara concepción de cuando, donde y porqué, deben usarse las aguas subterráneas, las superficiales

ó ya sea su uso conjunto si así se justifica técnica y económicamente. La razón es que, de una errónea planificación, pueden resultar atrasos de proyectos que incidirían negativamente en el desarrollo futuro ó pueden aparecer efectos detrimentales del uso inarmónico de uno y otro tipo de fuentes, como es el caso de elevaciones del nivel del agua subterránea en zonas de riego, debido a la construcción de embalses.

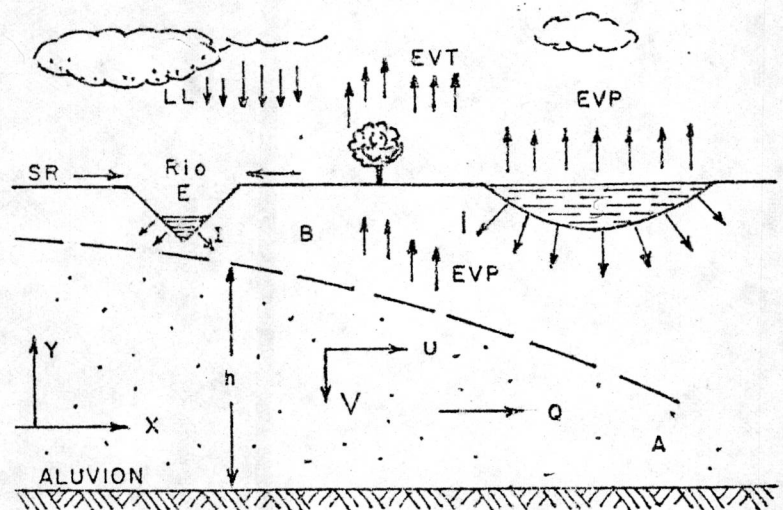
Cuando se trabaja con el agua, debe usarse la continuidad del ciclo hidrológico como hipótesis fundamental, analizando cómo se manifiesta esta continuidad, cómo influencia a otros fenómenos dentro del medio físico y qué utilidad práctica y científica, puede lograrse de su mejor conocimiento.

Es muy importante además no ser "conformista" con las explicaciones cualitativas de hechos que ameriten un análisis más cuidadoso en beneficio de la satisfacción de comprender rigurosamente un proceso. Cuando por ejemplo se pregunta, Porqué el flujo subterráneo a través del lecho rocoso del diagrama B, es nulo?. Algunas personas irreflexiblemente pueden responder: "porque el lecho rocoso es impermeable" (?).

Veamos que podemos deducir, de un razonamiento más analítico.

Procesos del ciclo hidrológico
ilustrados en el Diagrama B

- LL - lluvia,
- S - almacenaje superficial
- EVT - Evapotranspiración
- EVP - Evaporación
- A - Almacenamiento subterráneo
- Q - Flujo subterráneo
- B - almacenamiento de humedad en la zona de aereación del suelo
- SR - Escorrentía superficial
- E - Escorrentía superficial en los canales
- I - Infiltración



(DIAGRAMA B)

Sabemos que la ecuación de continuidad que gobierna el flujo de un fluido incompresible, en un medio homogéneo isotrópico, bajo una condición bidimensional es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Pero, según la Ley de Darcy, la velocidad $-u-$ en la dirección del eje X es proporcional al gradiente hidráulico ($-\delta h / \delta x$)

$$u = -K \frac{\delta h}{\delta x} \quad (2)$$

diferenciando (2) respecto a X :

$$\frac{\delta u}{\delta x} = -K \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} \quad (3)$$

obteniéndose de (1) y (3) para la componente vertical de la velocidad:

$$v = - \int_0^h \frac{\delta u}{\delta x} dy = K \int_0^h \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} dy = K \left[\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} y \right]_0^h = k h \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} \quad (4)$$

cuando $h = 0$, (en el tope del lecho rocoso) entonces $v = 0$

Quiere decir que, en el lecho rocoso no se produce infiltración y éste se comporta como contorno inferior del campo de flujo*. Esta manera de responder es más lógica y racional y es la deseable de imitarse, por parte de los estudiosos de las aguas subterráneas.

* La variación del gradiente hidráulico $\delta^2 h / \delta x^2$ y/o la permeabilidad $-k-$ pueden alcanzar valores muy bajos, pero nunca llegan a ser nulos realmente.

BIBLIOGRAFIA

1. Ground Water - O. Meinzer. 1942. Dover Edit.
2. Ground Water - Tolman C. 1937. New York. Mc. Graw - Hill Book.
3. Hydrogeology. P. Meyboom GSC. 1967. Edition. Report N° 24.
4. Hydrogeology - S. Davis, R. De wiest. 1966. Willey Edition.
5. MAC - Compilación estadística de las perforaciones realizadas en el
MAC - Tomos I y II.
6. What is Simulation? Hydrocomp Newsietter Aug 15, 1972.
7. Referencias personales: Ingenieros: José Martín Hernández.
Luis Ramos y Andrés Silva