



XVIII Congreso Peruano de Geología

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA CABECERA DE LA CUENCA DEL RÍO AZÁNGARO - PUNO.

Baclimer Quispe¹, Josemanuel Caprio² & Danitza Machaca³.

¹ Universidad Nacional del Altiplano - Puno. Av. Sesquicentenario N° 1150 – Puno, Perú. (baclimer@gmail.com)

² Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima, Perú (jcarpiof@puc.edu.pe)

³ Universidad Nacional del Altiplano - Puno. Av. Sesquicentenario N° 1150 – Puno, Perú (dmachaca15@gmail.com)

1. Introducción.



Figura 1; Mapa de ubicación.

El área de investigación (ver Gráfico 1) abarca de la margen derecha del río Crucero dentro de las provincias de Azángaro, Carabaya San Antonio de Putina y Sandia del departamento de Puno, hidrográficamente se ubica en la naciente de la cuenca del río Azángaro, la que vierte sus aguas en la región hidrográfica del Titicaca, emplazada en la cordillera Orienta.

Las aguas subterráneas normalmente evidencian su existencia mediante manantiales, las cuales son importante evaluar sus características hidrogeológicas e hidráulicas; de la sub cuenca Alto Azángaro, predominan las rocas del paleozoico, rocas de poca o baja a escasa porosidad, clasificándolas como acuitardos, sin embargo,

existen surgencia de manantiales, de composición química predominante (CaHCO₃). Para la caracterización hidroquímica se muestreo 22 manantiales, evaluando los parámetros físico-química in situ; además se elaboró el mapa de litopermeabilidades que nos permitieron determinar la caracterización hidrogeológica del sector, los límites de las unidades hidrogeológicas se establecen sobre la base de la configuración geológica y geomorfológica, además de su distribución espacial (INGEMMET 2015)

2. Contexto geológico.

La geología consta principalmente de una secuencia de rocas del Paleozoico, que van desde el Ordoviciano inferior hasta el Holoceno, desde la más antigua Formación Sandia, Formación Ananea, Grupo Ambo, Grupo Tarma, Grupo Copacabana, Grupo Mitu del Permo-Triásico, a la vez influenciadas por un fuerte plutonismo que data desde el Permo-Triásico, diferenciándose granodioritas, monzogranitos y granitos; la secuencia continua en las unidades del Cenozoico con los basaltos de la Formación Cayconi, las ignimbritas Picotani, la Formación Arco Aja y hasta los más recientes los depósitos lacustrinos, glaciar fluvial, glaciar, aluviales, etc.

3. Caracterización Hidrogeológica.

De acuerdo con la definición de acuífero, los parámetros que permiten evaluar la condición hidrogeológica de las formaciones geológicas son: su capacidad de almacenamiento y su capacidad de que el agua circule a través de ellas (fuente). Desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeológico, se clasifican a las rocas en: **Acuíferos**, rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas. **Acuitardos**, rocas que

almacenan agua y la transmiten lentamente. **Acuicludos**, rocas con una capacidad de almacenamiento, pero prácticamente nula capacidad de transmisión. **Acuífugos**, rocas que ni almacenan ni transmiten agua. (P. Martínez et al; 2006).

Paleozoico la secuencia empieza con: La **Formación Sandia** (ver Fotografía 1), está constituida de una secuencia interestratificada con pizarras y cuarcitas, aflora en La Rinconada y al norte del poblado Oriental, la composición

litológica de estas rocas permiten almacenar agua, se saturan, pero no tienen una buena transmisibilidad, sin embargo, por la presencia de algunas estructuras como fallas y pliegues que presentan los manantiales, se evidenciaron 3 surgencias con flujo local, con agua que posiblemente provengan de los nevados la bella durmiente y Cerro Rinconada, estas características se le atribuyen a los acuicludos.

La **Formación Ananea** consiste en una gruesa serie de esquistos epimetamórficos que constituye todas las



Fotografía 1, Manantial 23.

estribaciones occidentales de la línea de altas cumbres de los nevados que forman la Cordillera Oriental (Chavez A. et al 1996), estas rocas afloran al este de Crucero en la parte alta del área de investigación, está conformada por niveles de lutitas las cuales son impermeables, son rocas porosas pero

Cuadro 1: Clasificación Hidrogeológica

FORMACIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	MATERIAL	ρ (%)	k	CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA	
Paleozoico	Formación Sandia	Cuarcitas	*1 a 10	* 10^{-5} a 1	Acuicludo metamórfico	
		pizarras	*30 a 50	* 10^{-4} a 1		
	Formación Ananea	Pizarras laminares y foliadas con intercalaciones de cuarcitas	Pizarras	*30 a 50	* 10^{-4} a 1	Acuicludo metamórfico
			Lutitas	*0 a 10, 15	* $3.89 \cdot 10^{-14}$	
			cuarcitas	*1 a 10	* 10^{-5} a 1	
	Grupo Ambo	Areniscas intercaladas con limoarcillitas negras pizarras y limolitas	Areniscas	*5 a 20	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2	Acuitardo Sedimentario
			limoarcillitas	*34	* $6 \cdot 10^{-3}$	
			limolitas	*21 a 41	* $8.64 \cdot 10^{-5}$ a $12.096 \cdot 10^{-4}$	
	Grupo Tarma	Areniscas, limoarcillitas y calizas grises	Areniscas	*5 a 20	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2	Acuífero Fisurado Sedimentario
			limoarcillitas	*34	* $6 \cdot 10^{-3}$	
			Calizas	*1 a 10, 0 a 40	* 10^{-2} a 10	
	Grupo Copacabana	Calizas y areniscas intercaladas con lutitas.	Calizas	*1 a 10, 0 a 40	* 10^{-2} a 10	Acuífero Fisurado Kárstico
Areniscas			*5 a 20	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2		
lutitas			*0 a 10, 15	* $3.89 \cdot 10^{-14}$		
Perm-Triásico	Grupo Mitu	Brechas	*1 a 20	*0.20 a 8.64	Acuífero Fisurado Volcánico	
		lavas	*5 a 20	*0.2782 a 0.3153		
		Tobas	* $9.6 \cdot 10^{-3}$	*40		
		Areniscas	*5 a 20	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2		
Cenozoico	Formación Cayconi	Basaltos	basaltos	*5 a 20	*0.2782 a 0.3153	Acuífero Fisurado Volcánico
	Formación Picotani	Limolitas, dolomitas, arenisca de grano fino con nódulos arenoso y conglomerados.	Limolitas	*21 a 41	* $8.64 \cdot 10^{-5}$ a $12.096 \cdot 10^{-4}$	Acuitardo Volcánico
			Dolomitas	*1 a 10, 0 a 40	* 10^{-2} a 10	
			Arenisca	*5 a 20	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2	
			Conglomerado	*5 a 25	* 10^{-4} a 1	
	Formación Arco Aja	Conglomerados de gravas de clastos subredondeados a subangulosos matriz arcillosa, intercalados con areniscas limosas y limoarcillitas rojizas	Arcillas	*45 a 60, 34 a 60	* 10^{-6} a 10^{-4} , 10^{-7} a 10^{-3}	Acuitardo Sedimentario
			Arenisca	* 10^{-5} a 1, 10^{-2} a 10^2	*5 a 20	
			Limoarcillita	*34	* $6 \cdot 10^{-3}$	
			Gravas	*25 a 40, 24 a 36	* 10^2 a 10^6 , 100 a 10^5	
	depósito cuaternario	Depósitos aluviales, fluviales y morenitos. Consisten en sedimentos sueltos de granulometría variada (bloques, gravas, arena, limos y arcillas)	Graba	*25 a 40, 24 a 36	* 10^2 a 10^6 , 100 a 10^5	Acuífero Poroso no Consolidado
Arena			*30 a 40, 31 a 46	*30 a 40, 31 a 46		
Limo			*20 a 50, 34 a 61	* 10^{-3} a 10		
intrusivos	Santa Ana	Microdiorita	Microdiorita	*1 a 10	* 10^{-5} a 1, $6.9 \cdot 10^{-4}$ a $2.6 \cdot 10$	Acuitardo Intrusivo
	Aricoma	Granodiorita	Granodiorita	*1 a 10	* 10^{-5} a 1, $6.9 \cdot 10^{-4}$ a $2.6 \cdot 10$	Acuitardo Intrusivo
	Limbani	Granodiorita	Granodiorita	*1 a 10	* 10^{-5} a 1, $6.9 \cdot 10^{-4}$ a $2.6 \cdot 10$	Acuitardo Intrusivo

no permeables y se clasifica como Acuífudo; sin embargo, se pudo inventariar 14 manantiales de bajos caudales, puntuales por fracturamiento y posiblemente procedente del deshielo.

El **Grupo Ambo**, aflora al NE y NO del poblado de Crucero, estas rocas consisten en una secuencia de areniscas gris oscuras intercaladas con limoarcillitas negras pizarras y limolitas rojas. (Chavez A. et al 1996), donde se inventario 3 manantiales de bajo caudal, esto nos permite afirmar que estas rocas son poco permeables debido a sus niveles de lutitas y areniscas soldadas, razón por la cual se le considera acuitardo.

El **Grupo Tarma** aflora al sur de Ananea y al norte de Crucero, presenta una secuencia de areniscas, limoarcillitas y calizas grises, en este grupo se evidencio 3 manantiales polisurgentes de buen caudal (0.2 a 1.0 l/s), las rocas que la componen son porosas y permeables, reuniendo buenas condiciones para considerarlo acuífero.

El **Grupo Copacabana** está compuesto por Calizas bioclásticas, areniscas intercaladas con lutitas negras que se presentan blanquecinas debido a la meteorización y destacan morfológicamente entre las unidades lo cual hace fácil su reconocimiento a distancia. (Douglas, 1914). Ubicado desde el NO a NE de Crucero, se inventarió 6 manantiales de caudal que va desde 0.5 a 2.0 l/s, este grupo al tener las calizas fracturadas y con disolución, se le clasifica como acuífero.

El **Grupo Mitu** del pérmico – triásico, (ver Fotografía 2), aflora a la margen izquierda del área de investigación, está compuesta por rocas volcánica. La unidad consiste de

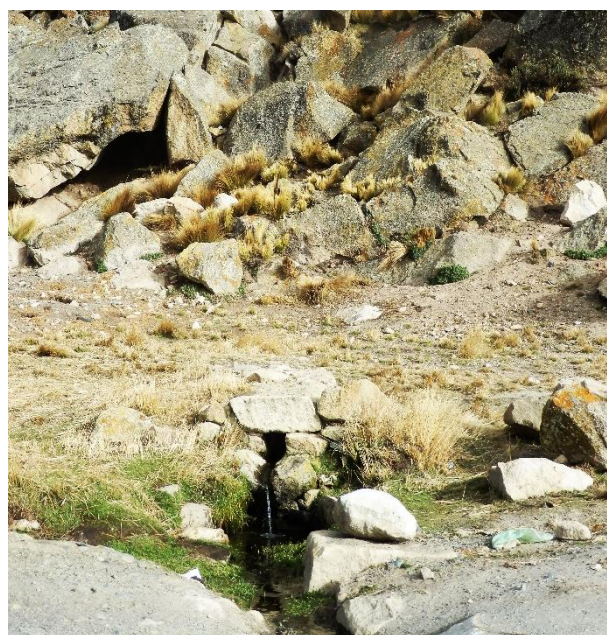


Fotografía 2, Manantial 81.

brechas y rocas volcanoclasticas. (De la Cruz J. 1996), se inventarió 4 manantiales de caudales permanentes que va de 0.2 a 1.0 l/s, junto con su intenso fracturamiento se clasifica como acuífero.

En el **Cenozoico** encontramos las unidades: La **Formación Cayconi** es una secuencia de rocas volcánicas basálticas de color gris oscuro. (Laubacher, G. et al. 1988) ubicado al NO de Crucero, presenta una textura porfirítica con fenocristales de plagioclasas, olivino, piroxenos y minerales opacos en una matriz de laminillas deplagioclasas con olivino, y agregados de minerales opacos (diminutos) y vidrio vesicular, esta formación se le caracteriza como Acuífero.

La **Formación Picotani** (ver Fotografías 3 y 4), respectivamente, son unidades de piroclastos de color blanquecino y relativamente bien soldadas sin pómez y en un grado de vesicularidad homogénea (Chavez A. et al 1996). Aflora al Oeste del centro poblado Desvió Cruce, se inventariaron 2 manantiales, los que brotan justamente de fracturas, esta formación según sus características litológicas se le clasifica como acuitardo.



Fotografía 3, Manantial 57

La **Formación Arco Aja** en la quebrada del mismo nombre, compuesta por arcillas gris azuladas con restos de plantas y algunos bancos de gravas, los espesores del banco varían de 15 cm a más de 1 m. (Fornari et al., 1981), estas rocas contienen conglomerados con matriz arcillosa intercalado con lodolitas, las cuales almacenan agua, pero no dejan fluir las aguas a través de ella, clasificándolo como Acuitardo.

Por último, se presenta los depósitos de mayor extensión en el área de investigación, cubriendo algunas de las unidades mencionadas anteriormente. relleno de las quebradas, valles y altiplanicies estos materiales de depósito como depósitos aluviales, lacustrinos, fluvio-glaciares y glaciares, en general son materiales no consolidados con una permeabilidad y porosidad elevada, las cuales se les clasifican como acuíferos porosos no consolidados.

acuífero poroso no consolidado (APNC-al/flg), 2 manantiales surgen en el Acuífero fisurado kárstico, los

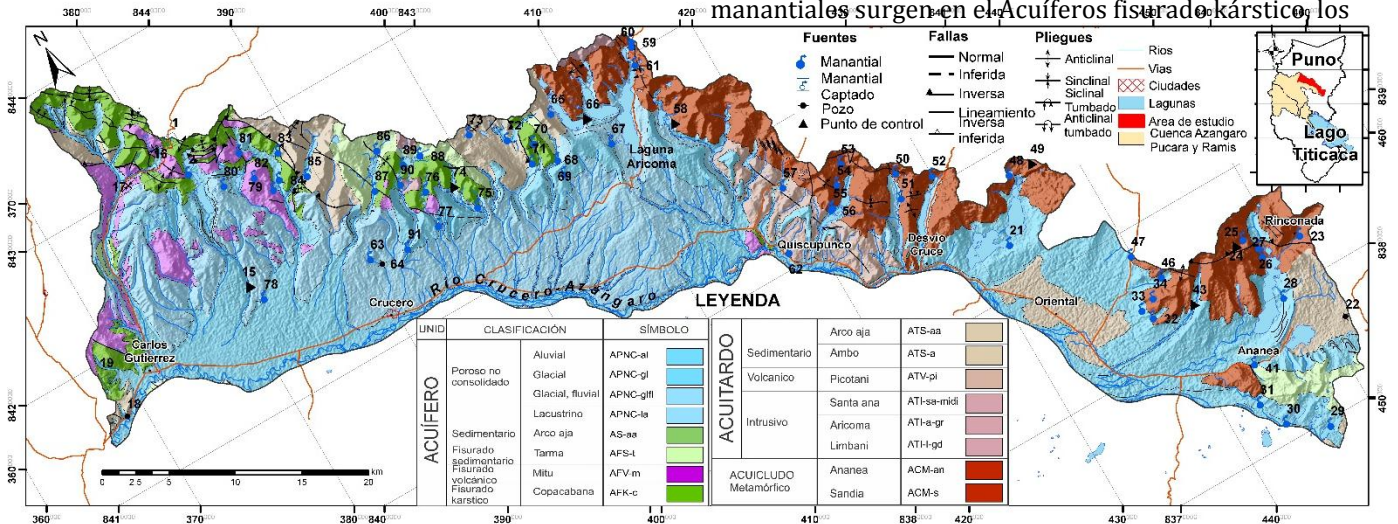


Figura 2. Mapa Hidrogeológico.

En el caso de los **Intrusivos** en la zona de estudio se presenta pequeños afloramientos cerca de la laguna Aricoma y por la localidad de Patambuco afloran en forma de diques las cuales por su extensión y su composición litológica granito, granodiorita y monzogranito se les considera acuitardo.

Para el análisis de porosidad y conductividad hidráulica (ver cuadro 1) de las rocas en el presente trabajo se han tomado en cuenta los valores estimados por Sanders (1988). Donde P (%), porosidad y k, conductividad hidráulica.

Dentro del área de estudio se han identificado 4 tipos de acuíferos:

- Acuíferos porosos no consolidados
- Acuíferos fisurados sedimentario
- Acuífero fisurado volcánico
- Acuífero fisurado kárstico

También se ha identificado tres tipos de acuitardos las cuales son:

- Acuitardo sedimentario
- Acuitardo volcánico
- Acuitardo intrusivo

Se identificó un:

- Acuicludo metamórfico

De acuerdo a la caracterización hidrogeológica (ver cuadro 1) se elaboró el Mapa Hidrogeológico (ver Figura 1), donde se puede identificar las unidades hidrogeológicas mencionadas, destacando el Acuífero poroso no consolidado por su gran extensión.

4. Hidroquímica.

Se realizó análisis químico de las fuentes utilizando el diagrama de Piper (ver Gráfico 1), donde se identificó 4 grupos de facies predominantes:

Bicarbonatadas cálcicas dentro de este grupo tenemos 9 manantiales, esta composición indicaría que estas aguas son de corto recorrido, a este grupo de familias identificamos 4 sistemas de flujo. 5 manantiales afloran en

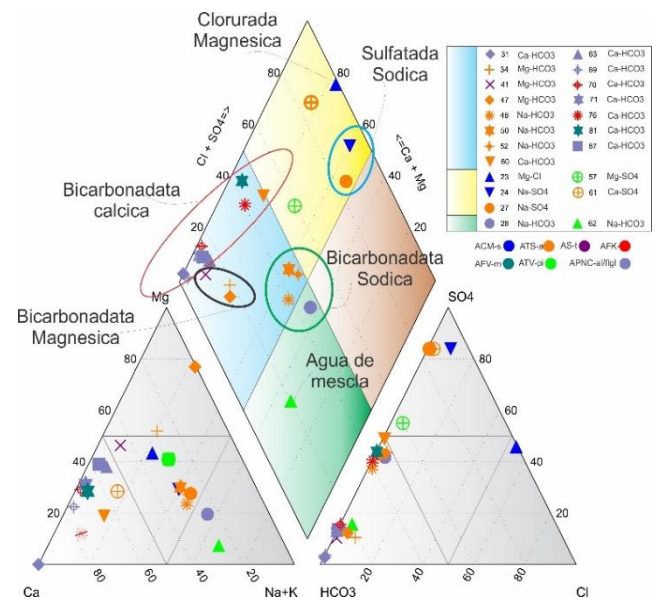


Gráfico 1. Diagrama de Piper.

otros dos manantiales, uno corresponde al acuífero fisurado volcánico Mitu y el último al acuicludo metamórfico Ananea.

Bicarbonatada Sódica. En este grupo se ubican 4 manantiales; 3 de estos surgen en el Acuicludo metamórfico Ananea, y el otro manantial aflora en el Acuífero poroso no consolidado su composición química se debe al intenso fracturamiento.

Bicarbonatada magnésica. Tiene 3 manantiales, 2 de ellos afloran en el Acuicludo Metamórfico Ananea y el otro en el Acuífero sedimentario Tarma su composición química se debe al intenso fracturamiento y a la roca por donde circula el agua.

Sulfatada sódica. Presenta 2 manantiales, 1 aflora en el Acuicludo Metamórfico Ananea y el otro en el Acuicludo metamórfico Sandía a causa de la FeS₂ alojadas en las fracturas más por presencia de SO₄ y Na en el recorrido del agua.

En el gráfico 1: Diagrama de Piper se puede ver que cuatro manantiales no pertenecen a algún grupo, debido a que; el

manantial (62) Fotografía 4, es de agua de mezcla, proveniente desde la cabecera que consta de rocas



Fotografía 4; Manantial 62.

metamórficas (Pizarras de la formación Ananea) y pasa por rocas volcánicas donde aflora en el acuitardo volcánico Picotani, mientras el manantial (57) surge aledaño a una falla de dirección N-S donde tiene contacto con panizos de la falla y otorgándole su predominancia en $MgSO_4$ del mismo acuitardo, el manantial (61) aflora en el Acuícludo Metamórfico Ananea cerca al Plutón de Aricoma, el que alteraría su composición química la cual esta fracturada puntualmente y a la vez en contacto con material cuaternario el cual le otorgaría la presencia de

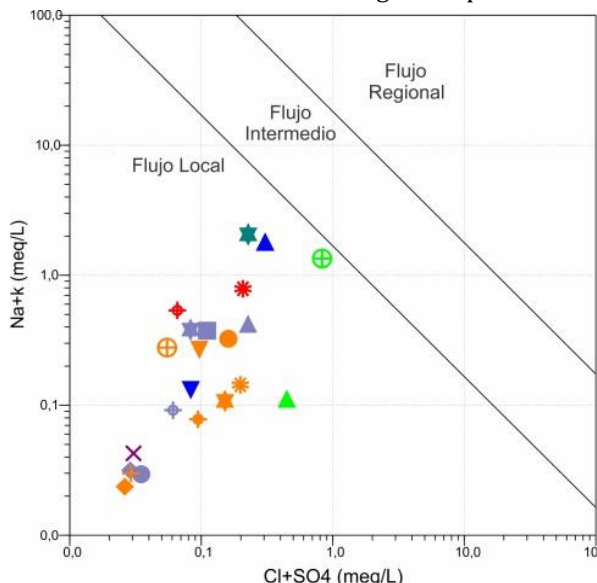


Gráfico 2, Diagrama de Scatter

Na y K, por último, el manantial (23) es de composición Clorurada magnésica, el manantial proveniente de una labor minera abandonada que drena agua, se ubica en el acuícludo metamórfico Sandía, donde el material de circulación del agua es lento de material semipermeable

lo cual hace mayor su tiempo de residencia en el subsuelo de ahí su composición química Mg-Cl.

Con el fin de corroborar estas afirmaciones se desarrolló el diagrama de Scatter (ver Gráfico 2) en el cual se aprecia que las fuentes son de flujo local, de esta manera acentuando la hipótesis de la presencia de estas aguas es principalmente por interacción del agua y roca, provenientes de precipitaciones y de deshielo.

CONCLUSIONES.

- Se ha identificado 2 acuíferos, El acuífero poroso no consolidados que considera materiales aluviales, glaciares, y fluvio-glaciares; y el acuífero fisurado donde se despliegan tres clases, el acuífero fisurado sedimentario Tarma, el volcánico Mitu y el fisurado kárstico Copacabana.
- Se identificó 4 grupos de facies hidroquímicas predominantes: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatada sódica, bicarbonatada magnésica y sulfatada sódica, debido a la interacción agua-roca.
- El manantial 23 tiene mayor tiempo de residencia en el subsuelo, es de composición clorurada magnésica ya que está en contacto con pizarras y rocas carbonatadas de característica impermeable donde la circulación del agua es lenta.
- Mediante los diagramas Scatter (ver Gráfico 2), se determinó que los manantiales presentan una composición química de corto recorrido o flujo Local.

Agradecimientos

Mis agradecimientos sinceros al *INGEMMET* por haber facilitado los datos lo cual hicieron posible esta publicación, además a los ingenieros Josemanuel Carpio, Danitza Machaca, Fluquer Peña, Jose Luis Moreno, Elmer Condori por el apoyo incondicional.

REFERENCIAS.

- Custodio, E., & Llamas, M. (1996). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*.
- INGEMMET. (1996), *Boletín N° 079-Geología-Cuadrangulo de Macusani (29v)*, *Boletín N° 084 Limbani (29x)*, *Boletín N° 066 Putina (30x)* y *La Rinconada (30y)*.
- Peña, F.; Sánchez, M. & Pari, W. (2010) *-Hidrogeología de la cuenca del río Ica*. INGEMMET, Boletín fN° 3, Serie H: Hidrogeología, 349 p.
- Sanders, L. (1998). *Manual of Field Hydrogeology*.
- Zekâi Sen, (2014). *Practical and Applied Hydrogeology*.