

Infiltración

Profs. Ings. Ricardo Mejía R. y Rodrigo Cano G.

El agua lluvia después de haber tenido las pérdidas por evaporación, transpiración y absorción por la cobertura vegetal, llega a la superficie del suelo en donde se reparte en dos fracciones: la escorrentía superficial y la infiltración.

La infiltración representa la cantidad de agua que penetra en el suelo y el subsuelo. Se diferencia de la percolación, que es el movimiento del agua dentro del suelo.

La infiltración la toma el ingeniero hidráulico como una pérdida, pero para el agricultor es una ganancia. Este proceso provee el agua para casi todas las plantas y gran parte de la vida animal; suministra el agua subterránea a los pozos y a la mayoría de las corrientes en los períodos secos; reduce las inundaciones y la erosión del suelo. Es quizás el proceso más importante en el ciclo del agua y además el más difícil de estimar, porque no se puede hacer por medición directa.

FACTORES QUE AFECTAN LA INFILTRACION

La infiltración es un fenómeno que depende de las propiedades del suelo y el fluido infiltrado. El fluido infiltrado siempre es agua, luego nos interesa conocer cómo varía la infiltración con el cambio en las propiedades físicas del agua.

Los poros del suelo por donde fluye el agua infiltrada son en general de diámetro pequeño; además, la capa de agua que produce la lluvia sobre el terreno es de poco espesor, y la presión hidrostática creada por ésta es baja. La combinación de estos factores hace que el flujo del agua infiltrada sea generalmente laminar. Un aumento en la temperatura del agua produce disminución en su viscosidad y aumento en la velocidad de infiltración del agua. En las zonas tropicales la temperatura del suelo varía muy poco a lo largo del año, y la temperatura del agua en contacto con éste variará poco. Lo anterior hace que las propiedades físicas del fluido en las zonas tropicales no afecten apreciablemente la infiltración.

Además de las propiedades del agua, la infiltración es afectada por los siguientes factores: estado de la superficie, transmisión del suelo, humedad del suelo, cobertura vegetal y características del medio permeable.

Transmisión del suelo.

Se llama capacidad de infiltración de un suelo, la rata máxima a que se puede infiltrar el agua en éste. La capacidad de infiltración presenta un valor máximo al comienzo de la lluvia y disminuye con el tiempo hasta alcanzar un valor mínimo constante. El valor máximo inicial depende de la humedad previamente existente en el suelo. La capacidad de infiltración se expresa en pulgadas/hora o milímetros/hora.

Cuando la intensidad de lluvia es menor o igual a la capacidad de infiltración, la infiltración es igual a la intensidad de lluvia.

En suelos formados por capas con capacidades de infiltración diferente, la capacidad de infiltración del suelo para períodos largos de lluvia, es igual a la de la capa con mínima capacidad de infiltración.

Estado de la superficie.

El estado de la superficie del suelo afecta apreciablemente la infiltración. En suelos descubiertos, con poca vegetación, el suelo recibe el impacto directo de las gotas de lluvia. La acción prolongada de la lluvia produce compactación de la superficie, y suelos permeables pueden convertirse en suelos de muy baja permeabilidad.

El tráfico continuado de hombres, animales o vehículos también produce compactación de la superficie con disminución en la capacidad de infiltración.

Humedad del suelo.

En suelos inicialmente muy secos, la primera porción de agua que llega al suelo crea un alto "potencial capilar". Este potencial sumado a la acción de la gravedad, hace que cuando la humedad del suelo es muy baja la infiltración sea muy alta. Al aumentar la humedad se satisface gradualmente el "potencial capilar" y la capacidad de infiltración disminuye.

Cuando el suelo contiene coloides, éstos se hinchan en presencia de la humedad y disminuyen los espacios disponibles para la circulación del agua, lo cual produce disminución en la capacidad de infiltración.

Cobertura vegetal.

La cobertura vegetal protege el suelo de la compactación debido al impacto de la lluvia, también forma una capa superficial de materia orgánica en descomposición que atrae muchos insectos y gusanos, los cuales perforan el suelo haciéndolo más permeable. Las raíces de las plantas, al descomponerse, dejan espacios vacíos que aumentan la permeabilidad

del suelo. La cobertura vegetal aumenta la resistencia al movimiento del agua superficial, con lo cual se aumenta el tiempo de permanencia del agua sobre la superficie y el volumen total de agua infiltrada.

Características del medio permeable.

Una de las características más importantes del medio permeable (en este caso el suelo), es el tamaño de los poros y su distribución. En suelos arenosos el volumen total de poros y su distribución varía poco con la presencia del agua, pero en suelos limosos y arcillosos esta variación es apreciable. Los suelos limosos y arcillosos se encogen apreciablemente al secarse, en esta forma el tamaño de los poros aumenta y la capacidad de infiltración al comienzo de la lluvia es muy alta. En presencia del agua las partículas que forman el suelo se hinchan y disminuyen los poros. Esta es una de las causas para que la capacidad de infiltración sea muy alta al comienzo de la lluvia, y disminuya rápidamente.

MEDIDAS DE INFILTRACION

Existen dos maneras de determinar la capacidad de infiltración de un suelo. Una es el análisis de hidrógrafas de escorrentía producidas por lluvias naturales en la hoya que se va a estudiar. El otro es el uso de infiltrómetros con aplicación de agua artificial en pequeñas muestras de terreno.

El análisis de hidrógrafas conlleva la medición de la precipitación y la escorrentía lo que en la práctica tiene errores, algunas veces de gran magnitud, especialmente por la variación y distribución de la precipitación.

Infiltrómetros. Los infiltrómetros son de dos clases: a) simuladores de lluvia, en los cuales el agua se aplica en una forma e intensidad semejante a la lluvia natural, y b) de inundación, aquellos en los cuales la rata de entrada está determinada directamente, como la rata a la cual se le debe añadir agua para mantener un nivel constante.

En los simuladores de lluvia, el tamaño de las gotas y la energía del impacto se tratan de hacer similares a la lluvia natural. Se usan modelos que suelen ser de unos 2×4 mts. con boquillas especiales para producir intensidades desde 40 hasta 140 mm. por hora; las gotas alcanzan alturas de unos 2 mts., por lo cual no alcanzan la velocidad final de la lluvia natural que es la equivalente a una caída de unos 6 mts. Sin embargo se produce suficiente erosión, que la asemeja al fenómeno natural.

Los del tipo de inundación, consisten de dos anillos concéntricos (Fig. 1) o un tubo. El primero tiene diámetros que varían de 9 a 36 pulgadas, se entierra un poco en la superficie del terreno y se le aplica

agua en ambos compartimientos a fin de mantenerlos al mismo nivel. El anillo exterior tiene por fin prevenir que el agua del anillo inferior se esparza en una área mayor al penetrar en el suelo. En el tubo simple, éste se entierra a una profundidad igual a la que se espera que penetrará el agua durante el experimento, por lo cual no habrá ningún esparcimiento. La capacidad de infiltración, se mide del agua que se debe añadir para mantener el nivel constante.

Por medio de estos estudios con infiltrómetros, Horton dedujo la rata de infiltración dada por:

$$f = f_{\infty} + (f - f_{\infty})e^{-t/\tau_w}$$

para $0 \leq t \leq t_r$ y para $i > f$

cuando la lluvia ha cesado, es decir, $t > t_r$.

$$f = f_0 - (f_0 - f_{tr})e^{-(t-t_r)/\tau_d} \quad \text{Véase Fig. 2.}$$

En donde los cuatro parámetros que deben conocerse o estimarse para usar estas funciones son:

- 1º f_0 , la capacidad de infiltración del suelo completamente seco, en una función del tipo de suelo únicamente.
- 2º f_{∞} , la capacidad de infiltración última bajo precipitación continua, es función del tipo de suelo únicamente, siempre que el nivel freático esté lo suficientemente profundo para que no sea afectado (aproximadamente 10 mts.).
- 3º τ_w , la constante del tiempo en el proceso de humedecerse, es una función del tipo del suelo y la humedad inicial.
- 4º τ_d , la constante del tiempo en el proceso de secado, es función del tipo de suelo, humedad del suelo en $t = t_r$ y de rata de evapotranspiración.

Análisis de Hidrógrafas

El análisis de hidrógrafas producidas por lluvias naturales es un buen método para encontrar la rata de infiltración; sin embargo se requiere que la hoya sea relativamente pequeña (menos de 2 hectáreas) y que las lluvias sean de gran intensidad.

En el método del análisis de hidrógrafas se hacen los siguientes pasos:

- 1º De la hietógrafa se saca la curva de la precipitación acumulada en milímetros P.
- 2º De la hidrógrafa de escorrentía directa (ya se ha substraído el flujo base) se averiguan los volúmenes parciales de escorrentía en un intervalo de 15 minutos si es posible, si no de 30 minutos; estos volúmenes en metros cúbicos se dividen por el área de la hoya en metros cuadrados, obteniéndose así la altura de escorrentía, con la cual

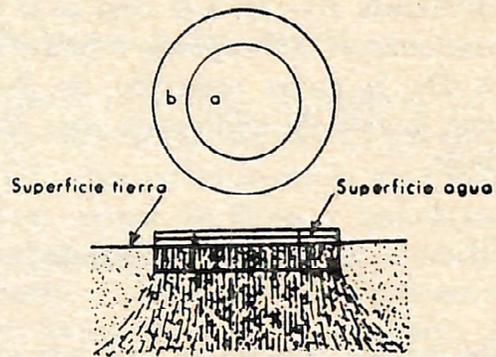


Fig. 1

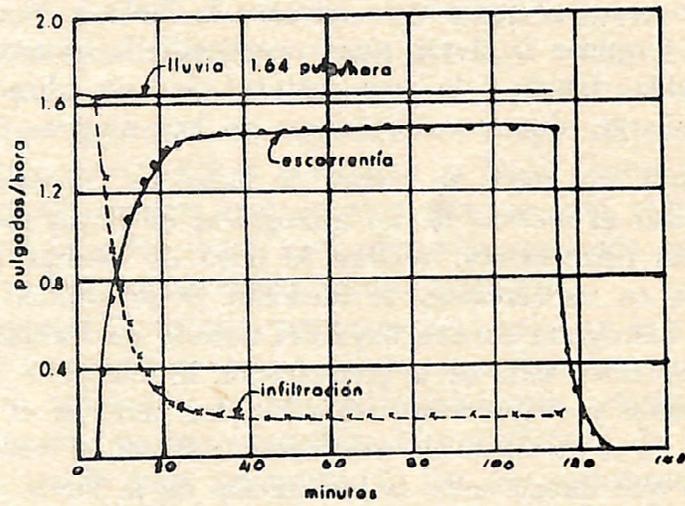


Fig. 2

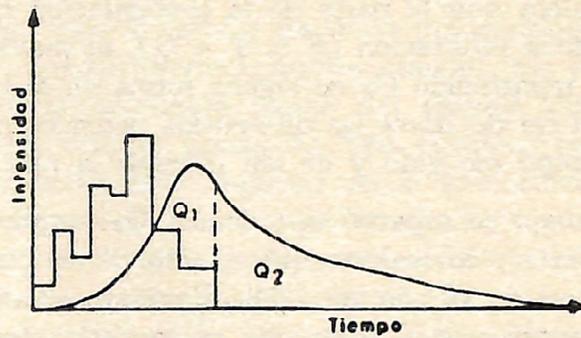


Fig. 3

se puede conseguir la curva acumulada de escorrentía en milímetros: Q .

- 3º Se obtiene la diferencia $P - Q$, a la cual se le pueden hacer correcciones de detenciones e intercepciones (véase manual de Hidrología de Chow). De la curva corregida de $P - Q$ (usualmente una recta), se obtiene la rata de infiltración para el intervalo de tiempo escogido, es decir,

$$\frac{(P - Q)_2 - P - Q)_1}{t_2 - t_1} = \text{infiltración en mm/hr.}$$

La base de este método consiste en que por ser hoyas muy pequeñas, la escorrentía prácticamente empieza y termina en el momento en que la lluvia empieza y termina.

En el caso de hoyas más grandes (10 a 40 kms.²), hay una diferencia de tiempo entre el instante de iniciarse la lluvia y la escorrentía, y a su vez, al terminar la lluvia sigue ocurriendo la escorrentía en una forma apreciable, debido a la gran cantidad de agua almacenada en el canal. Sin embargo, durante este tiempo no hay ninguna infiltración.

En la parte que sigue, se tratará de hacer las correcciones necesarias para utilizar el método de las hidrógrafas en hoyas más grandes y utilizando estas correcciones, analizar la hoya de Piedras Blancas (20,5 kms.²), situada en las cercanías de Medellín. Si se estudia una lluvia y su respectiva hidrógrafa en una hoya del tamaño de Piedras Blancas, se tiene que el volumen total de la precipitación P , una parte es la infiltración, intercepción y evapotranspiración F ; otra parte es el volumen Q_1 que ha salido en el momento de terminarse la lluvia, el resto de la escorrentía Q_2 (la que queda entre la finalización de la lluvia y la terminación de la escorrentía directa), Fig. 3; es de suponerse que se ha acumulado principalmente durante el tiempo que duró la lluvia y que se encuentra en los canales de desagüe de la hoya.

Si se considera que la parte de la precipitación que no sale en la escorrentía, es toda infiltración ($F = P - Q$), se puede hacer el análisis de hidrógrafas, repartiendo Q_2 en alguna forma en el tiempo que ocurre la lluvia, con el fin de hacer las diferencias parciales de $P - Q$ para el intervalo de tiempo escogido y de ahí calcular la rata de infiltración.

En este trabajo se repartió el volumen Q_2 proporcionalmente a los valores de la lluvia y los valores que se obtuvieron para algunas lluvias que se escogieron en el año de 1959, dieron resultados bastante aceptables. Naturalmente que el valor que se encuentra por este método es el correspondiente a un valor cercano a f_{∞} , pues como se ve en la Fig. 2, la capacidad de infiltración máxima f_0 , rebaja muy rápidamente (aproximadamente 10 minutos) al valor mínimo, y puesto que aquí utilizamos

intervalos de tiempo mayores (20 ó 30 minutos), ya la infiltración ha rebajado considerablemente de estos valores máximos.

Interpretación de los resultados obtenidos

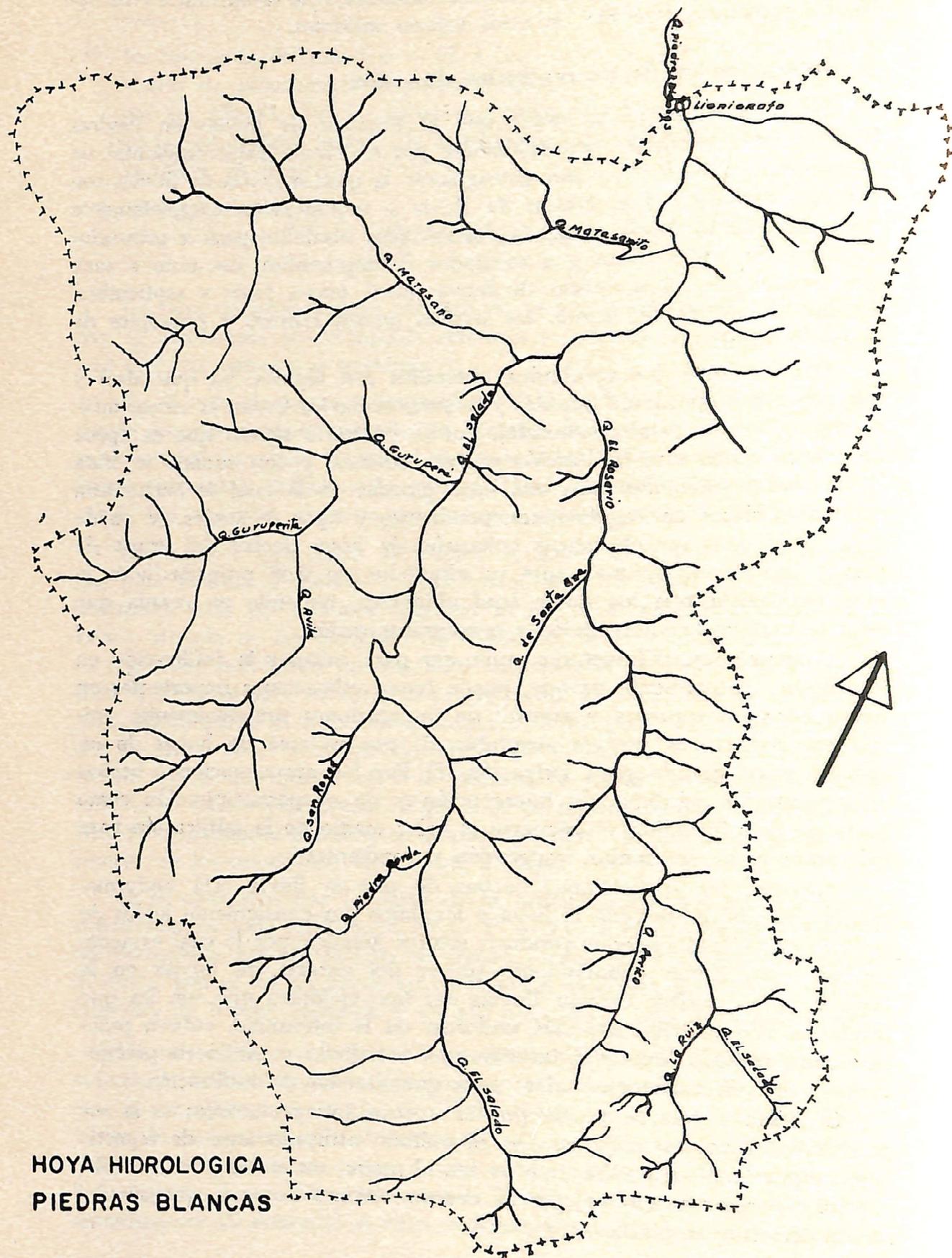
Es interesante hacer notar que el régimen de lluvias en Piedras Blancas está dominado principalmente por el Frente Intercontinental de Convergencia (F. I. C.) y por consiguiente la gran mayoría de lluvias son del tipo ciclónico. Las épocas de lluvia y sequía están completamente marcadas por el desplazamiento del sol. (Por Medellín pasa a principios de abril, de sur a norte y a mediados de septiembre, de norte a sur); por consiguiente, son épocas de lluvia: abril, mayo, junio y septiembre, octubre y noviembre, siendo las sequías peores febrero y principios de marzo y agosto.

Por lo tanto, los resultados obtenidos son lógicos, ya que abril y mayo que son épocas de grandes y frecuentes lluvias tienen la menor infiltración (el suelo estaba saturado), por el contrario agosto que es época de sequía, tiene una infiltración mayor. Además, y aun cuando se trata de un valor promedio para una hoya grande, en la cual se encuentran diferentes clases de vegetaciones, pendientes y tipos de suelos, se puede decir que estas características colocarían la hoya dentro del grupo de mayor infiltración mínima que es alrededor de 0,45 pulgadas/hora lo cual concuerda con los datos aquí obtenidos, teniendo en cuenta que aquí se incluye la intercepción y evapotranspiración.

Conclusiones: El método propuesto para calcular la infiltración en una hoya relativamente grande, puede tener aplicaciones importantes en los diseños de represas y control de inundaciones principalmente; quizás en irrigaciones no sea aceptable: 1) por tratarse de hoyas de un tamaño muy grande para irrigación. 2) Por las aproximaciones hechas al suponer las pérdidas de intercepción y de evapotranspiración como parte de la infiltración y obtenerse el valor medio de la infiltración para diferentes tipos de: suelos, vegetación y pendientes.

Además, las suposiciones hechas de que la lluvia está uniformemente distribuída en toda la hoya y los datos por consiguiente leídos de un solo pluviógrafo pueden producir errores grandes, por lo cual es aconsejable tener algún conocimiento previo del sistema de lluvias en la hoya y en lo posible utilizar lluvias del tipo ciclónico que son las que producen una distribución más uniforme en la intensidad, cubren prácticamente toda la hoya del tamaño aquí estudiado y producen precipitaciones lo suficientemente altas para que excedan la infiltración.

Otro factor que se puede prestar a otras interpretaciones es la repartición del volumen Q_2 en Q_1 ; el método utilizado aquí de repartición proporcional es posible que no sea el mejor, sin embargo es sencillo y para las aproximaciones que se desean obtener creemos que sea lo suficientemente aceptable.



HOYA HIDROLOGICA
PIEDRAS BLANCAS

CALCULO DE LA INFILTRACION EN LA HOYA PIEDRAS BLANCAS

Abril 22 de 1959

Hora	P	y	q	q _{corr.}	ΔQ_1	Q ₁	Q ₁	P-Q ₁	P-Q ₁ -Q ₂	f
	m. ms.	mts.	m ³ /seg.	m ³ /seg.	m ³	m ³	m. m ³ .	m. ms.	m. ms.	m. m./h.
3:00	0.0	0.30	0.615	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3:30	8.0	0.60	3.370	2.755	2.480	2.480	0.12	7.88	7.64	15.28
3:45	12.0	0.658	4.384	3.769	2.940	5.420	0.26	11.74	11.38	14.96
4:00	16.0	0.60	3.370	2.755	2.940	8.360	0.41	15.59	15.11	14.92
4:30		0.47	1.740	1.125	3.490	11.850	0.58			
5:00		0.41	1.240	0.625	1.570	13.420	0.65			
5:30		0.59	1.100	0.485	1.000	14.420	0.70			
6:00		0.37	0.975	0.360	760	15.180	0.76			
6:30		0.35	0.860	0.245	544	15.724	0.77			
7:30		0.34	0.805	0.190	391	16.115	0.78			
9:00		0.335	0.780	0.165	319	16.434	0.80			
		0.325	0.730	0.115	756	17.190	0.84			
12:00		0.318	0.696	0.081	1.060	18.250	0.89			

$$Q_2 = 0.89 - 0.41 = 0.48 \text{ m.ms.}$$

$$\text{Area de la Hoya} = 20.55 \text{ Kms}^2$$

CALCULO DE INFILTRACION EN LA HOYA PIEDRAS BLANCAS

Mayo 6 de 1959

Hora	P	Y	q	q corr.	ΔQ_1	Q_1	Q_1	Q_1	$P-Q_1$	$P-Q_1-Q_2$	f
	m. ms.	mts.	m ³ /seg.	m ³ /seg.	m ³	m ³	m. ms.	m. ms.	m. ms.	m. ms.	m. m./h.
Mayo 6											
19:00	0.0	0.40	1.170	0	0	0	0	0	0.0	0.0	
19:30	10.0	0.40	1.170	0	0	0	0	0	10.0	7.95	15.90
20:00	20.0	0.40	1.170	0	0	0	0	0	20.0	15.90	15.90
20:30	30.0	0.575	3.050	1.880	1.692	1.692	0.08	29.92	23.78	15.76	
21:00		0.75	6.340	5.170	6.345	8.037	0.39				
22:00		1.00	14.000	12.830	32.400	40.437	1.96				
23:00		0.70	5.200	4.030	30.300	70.737	3.45				
24:00		0.60	3.370	2.20	11.210	81.497	3.99				
Mayo 7											
2:00		0.52	2.270	1.10	11.880	93.927	4.62				
4:00		0.51	2.150	0.98	7.490	101.417	4.94				
6:00		0.50	2.040	0.87	6.660	108.077	5.26				
		0.483	1.890	0.72	5.720	113.797					
10:00		0.47	1.740	0.57	4.640	118.437	5.77				
12:00		0.46	1.650	0.48	3.780	122.217	5.95				
14:00		0.45	1.560	0.39	3.130	125.347	6.10				
16:00		0.44	1.480	0.31	2.520	127.867	6.22				

$$Q_2 = 6.22 - 0.08 = 6.14 \text{ m.ms.}$$

CALCULO DE LA INFILTRACION EN LA HOYA PIEDRAS BLANCAS

Agosto 27 de 1959

Hora	P	y	q	q corr.	ΔQ_1	Q_1	Q_1	$P-Q_1$	$P-Q_1-Q_2$	f
	m. ms.	mts.	m ³ /seg.	m ³ /seg.	m ³	m ³	m. ms.	m. ms.	m. ms.	m. m./h.
15:30	0.0	0.34	0.805	0	0	0	0	0.0	0.0	
16:00	10.0	0.34	0.805	0	0	0	0	10.0	8.95	17.90
16:25	18.0	0.34	0.805	0	0	0	0	18.0	16.10	17.20
17:00		0.34	0.805	0	0	0	0			
18:00		0.69	4.990	4.502	8.110	8.110	0.39			
19:00		0.50	2.040	1.552	10.900	19.010	0.93			
20:00		0.43	1.400	0.912	4.440	23.450	1.14			
21:00		0.415	1.260	0.772	3.030	26.480	1.29			
22:00		0.408	1.226	0.738	2.720	29.200	1.42			
23:00		0.397	1.149	0.661	2.520	31.720	1.54			
24:00		0.39	1.100	0.295	1.720	33.440	1.63			
1:00		0.38	1.030	0.225	936	34.376	1.67			
2:00		0.373	0.991	0.186	740	35.116	1.71			
4:00		0.370	0.975	0.170	1.280	36.396	1.77			
6:00		0.36	0.915	0.110	1.008	37.404	1.82			
8:00		0.355	0.888	0.083	695	38.099	1.85			
10:00		0.352	0.871	0.066	536	38.635	1.88			
12:00		0.35	0.860	0.056	454	39.089	1.90			

Agosto 28

$$Q_2 = 1.90 - 0 = 1.90 \text{ m.ms.}$$

BIBLIOGRAFIA

Handbook of Applied Hydrology. Chow.
Hydrology. Wisler - Bratter.

Hydrology for Engineers. Linsley - Kholer - Paulhus.
Traité pratique des eaux souterraines. Castany.
Registros Hidrológicos de las Empresas Públicas de Medellín.