
RELACION AGUA SUELO PLANTA (2). INFILTRACIÓN

SERIE DIDACTICA Nº2 CATEDRA
DE RIEGO Y DRENAJE. FCA
UNCA

Assan Marcelo M.
Gorosito Stella M.
massan@agrarias.unca.edu.ar

Contenido

GUIA Didáctica TEÓRICO - PRÁCTICA	2
TEMA: INFILTRACIÓN.....	2
Introducción	2
Movimiento del agua en el suelo	2
Conductividad Hidráulica.....	3
Concepto de infiltración	4
Factores que influyen en la infiltración	5
Movimiento del agua en el suelo durante el proceso de infiltración	6
Situación en suelos saturados e insaturados	7
Velocidad de infiltración e infiltración básica	8
Método para determinar la velocidad de infiltración	9
Procedimiento para efectuar el ensayo de medición de la velocidad de infiltración	10
Determinación por método gráfico:.....	12
Determinación por método analítico:	13
Obtención de la velocidad de infiltración e infiltración instantánea:	13
Ecuación de Kostiakov	14
Uso práctico en riego.....	15
Relaciones entre modelos matemáticos	16
Infiltración: Problemas de aplicación	17
Fuentes consultadas:.....	18
En internet:.....	18

GUIA Didáctica TEÓRICO - PRÁCTICA

TEMA: INFILTRACIÓN

Introducción

Representa la infiltración, un proceso del ciclo hidrológico de máximo interés en diferentes disciplinas de la ciencia. Así en sentido amplio puede ser vista como negativamente en obras civiles. En hidrología se puede considerar una pérdida o la alimentación de acuíferos, también como fenómeno de regulación de cauces reduciendo las inundaciones y la erosión del suelo, y en la agricultura representa el agua de la que se proveen casi todas las plantas cultivadas sea por lluvia o riego.

A continuación se abordará el concepto de infiltración del agua al suelo, con enfoque en el riego. Se expondrán sintéticamente las características físicas del proceso, y los factores que ejercen influencia en su variación; también se describirá la forma práctica de medir a campo y modelos empíricos para su cuantificación.

En primer lugar para entender este proceso, se describirá brevemente el movimiento de agua en el suelo.

Movimiento del agua en el suelo

Hay diferentes tipos de movimiento del agua en un suelo, siendo desde el punto de vista del riego y drenaje, el proceso de infiltración uno de los más importantes.

Una vez que el agua infiltra en el suelo debido a la lluvia o al riego, hay una “redistribución” en el perfil que no solo es vertical, sino que se redirecciona en forma bi y tridimensional como respuesta a los gradientes de potencial hídrico que se producen. Por ejemplo en riego por surco, se observa que el agua se redistribuye en el camellón, ocurriendo este movimiento en forma transversal al curso del agua, esto ocurre también en la profundidad.

Otro movimiento muy importante en el suelo es el ocasionado por el cambio del estado del agua: una vez que se produce la entrega de energía por parte del sol y si están dadas las condiciones, se produce evaporación cambiando el agua de estado líquido a

gaseoso, moviéndose hacia la superficie. También existe el proceso de transpiración de las plantas dado a través de los estomas cuando las condiciones son propicias y que también representa el cambio de estado del agua de líquido a vapor. Ambos procesos que ocurren simultáneamente dan lugar al lo que se conoce como evapotranspiración.

Drenaje: es la eliminación del excedente de agua del suelo, puede ser subterráneo por percolación profunda y por escurrimiento superficial y subsuperficial.

Movimiento del agua en el suelo hasta la raíz: detallado en la guía anterior de esta serie.

Capilaridad: es otra forma de movimiento en el suelo; es la altura de ascenso del agua por los microporos o capilares que forman un *continuum* en la matriz del suelo, siendo el movimiento generado por la propiedad de cohesión que tiene el agua, donde las moléculas tienden a unirse y van siguiendo un gradiente de humedad y potencial.

Conductividad Hidráulica

Para describir el proceso de infiltración se partirá del concepto de conductividad hidráulica, que es una propiedad física de los suelos que describe su capacidad para transmitir agua, se expresa en unidades de velocidad.

La ley de Darcy estudiada en edafología descripta para suelos saturados, permite establecer el caudal que pasa por una sección, según la textura y estructura de los suelos, características propias de cada suelo que define el tamaño de los poros.

Para tener una idea de la importancia de la conductividad hidráulica imaginemos los acuíferos, que son reservas de agua subterránea, formados por un volumen de suelo saturado que tienen en general una granulometría gruesa y por lo tanto una conductividad alta, y un espesor que determina la capacidad del acuífero es decir el caudal que se puede extraer en relación a su capacidad de recarga, la cual está definida en gran medida por la conductividad hidráulica.

El concepto de permeabilidad difiere con el concepto de conductividad hidráulica en que no es constante como éste y caracteriza la velocidad de flujo en suelo insaturados.

Concepto de infiltración

La infiltración se define como el proceso de movimiento de agua en el suelo que ocurre después de un riego o una lluvia, donde se produce una entrada vertical desde la superficie a la matriz del mismo.

Por otro lado la velocidad de infiltración caracteriza el ritmo de ingreso o de la infiltración y se expresa en termino de lámina de agua ingresada en la unidad de tiempo, o lo que es lo mismo el “volumen de agua que se mueve hacia el interior del suelo por unidad de área y por unidad de tiempo” (Jara, 1999).

Es sumamente importante conocer la infiltración desde el punto de vista del riego, ya que su conocimiento resulta necesaria en el abordaje disciplinar, tanto sea para diseñar, como para programar y evaluar el desempeño del riego.

Si se quiere observar la aplicación práctica e inmediata de conocer la infiltración, veamos la siguiente situación en el proceso del riego de un cultivo determinado, donde lo primero que hay que saber identificar es la lámina de reposición o lámina de riego, luego, conociendo el modelo que describe la infiltración se puede determinar el tiempo necesario para la incorporación de esa lámina. O por el contrario, si se efectuó un riego de determinado tiempo, con dicho modelo de infiltración se puede conocer cuál es la lámina infiltrada en la parcela de riego y consecuentemente definir si hay excedentes y déficit de riego.

Otro ejemplo del uso de modelos matemáticos que describen la infiltración, es en el diseño de un método de riego por aspersion. Con este método el riego se produce generando una lluvia artificial cuya pluviometría debe necesariamente estar ajustadas a la capacidad de infiltración del suelo; el dispositivo aspersor elegido en el diseño y su disposición en el terreno deben garantizar que la lluvia sea de una intensidad, menor o igual a dicha capacidad de infiltración del terreno (velocidad de *infiltración básica*), caso contrario se produciría escurrimiento superficial y el riego no sería de la eficiencia deseada. Si hay escurrimiento esto está indicando que la intensidad de lluvia del aspersor elegido y/o su disposición en el terreno no se adecuan por cuanto la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad que tiene el suelo para que infiltre.

En riego superficial, cuando se riega un surco o melga, existe un caudal de entrada determinado, con una pendiente o sin ella según cada caso y por lo tanto puede haber o no escurrimiento al pié. En la zona más cercana al pié, el tiempo de oportunidad de riego debe

ser el que permita infiltrar la lámina de reposición calculada previamente, es decir, el tiempo de infiltración necesario para incorporar esa lámina. Si se conoce la velocidad de infiltración se puede estimar la lámina que infiltró en ese punto y teniendo toda la superficie regada también se puede saber cuál es el volumen infiltrado.

Factores que influyen en la infiltración

La velocidad de infiltración no es constante, pero sigue un patrón que es necesario conocer para llevar a cabo prácticas adecuadas del riego tanto en lo productivo como en la utilización racional y eficiente del agua. La velocidad depende de varios factores tales como: textura, estructura, contenido de humedad, contenidos salinos, cobertura, temperatura del agua, etc.

Textura: La textura del suelo está en relación directa con la disposición y tamaño de los poros y consecuentemente a la velocidad del agua tanto en su matriz como en la infiltración. En términos generales se puede decir que una textura arenosa del suelo contiene una mayor cantidad de poros grandes, aun cuando la cantidad total de espacio poroso sea inferior a un suelo de textura fina, por lo tanto es razonable que la mayor velocidad de infiltración se presente en los suelos arenosos.

Estructura: tiene en cuenta la disposición y estabilidad de los agregados y en consecuencia de la microporosidad. Sus efectos sobre la infiltración tienen relación directa con la estabilidad estructural, es decir que aquellos factores que favorezcan la estabilidad han de favorecer la infiltración, por consiguiente todos aquellos promotores de la estabilidad influyen positivamente en la infiltración (válido para suelos agrícolas de estructuras granulares y granulares sueltos, a estructuras masivas prismáticas o en placas laminares o bloques no se incluye en esta afirmación).

Es decir que a mayor cantidad de materia orgánica, mayor cantidad de sales de calcio, menor cantidad de sales de sodio; en todos estos casos se facilita la infiltración.

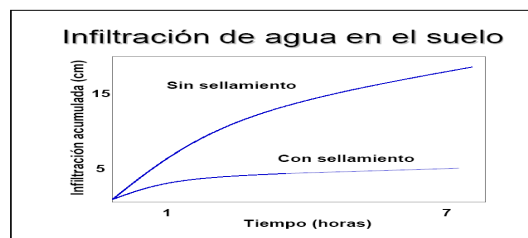
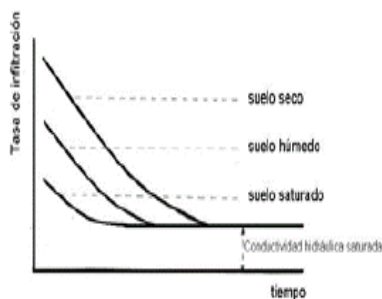
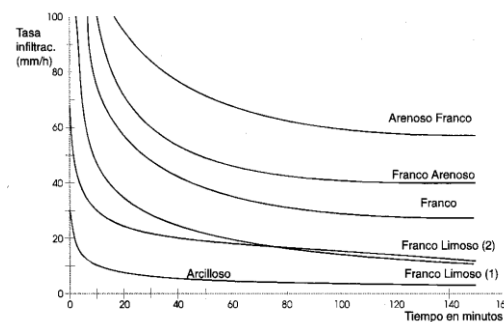
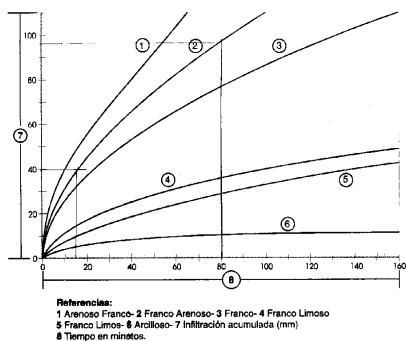
Cobertura: una buena cobertura mejora la velocidad del flujo horizontal pero también genera espacios que permiten mejorar la infiltración.

Humedad actual: un suelo seco tiene mayor infiltración inicial porque hay mayor gradiente hidráulico, mayor diferencia de potencial.

Temperatura: a mayor temperatura, menor viscosidad del agua, más fluida es por lo tanto hay mayor infiltración.

Cada suelo tiene una velocidad de infiltración determinada, dado por las características del mismo, variando desde aquellos de infiltración excesiva (suelos arenosos gruesos) hasta los de infiltración extraordinariamente lenta (suelos arcillosos densos).

Gráficas de láminas acumuladas y velocidad de infiltración según distintas situaciones



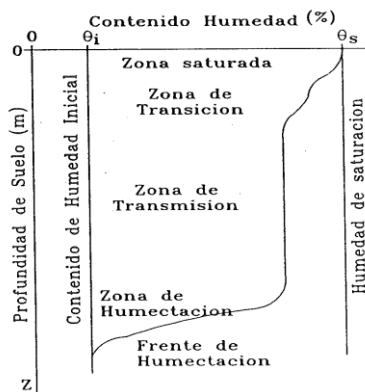
Esta propiedad de los suelos de permitir el paso de agua a través de su superficie determina, en gran parte, la posibilidad de riego con una determinada eficiencia y es uno de los factores preponderantes en la selección del método de riego a emplear.

Movimiento del agua en el suelo durante el proceso de infiltración

Se analizará a continuación el desplazamiento del agua en el suelo durante el proceso de infiltración y cómo influyen los potenciales en el mismo.

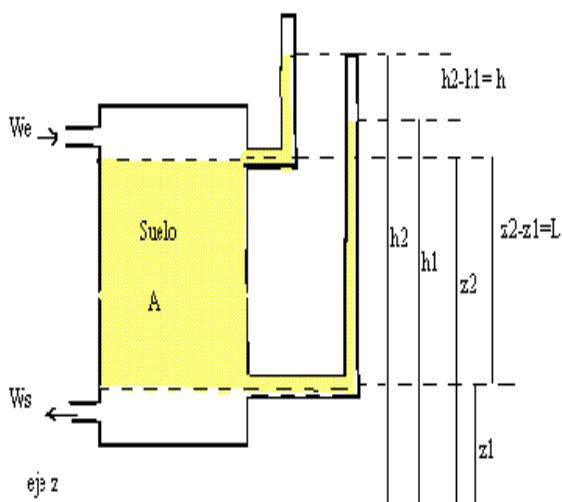
Una vez que el agua infiltra debido a una lluvia o a un riego, en el suelo existe una redistribución a nivel del perfil. Como ya se describió, al principio el agua ingresa

verticalmente y luego se dirige a ocupar todo el volumen del suelo regado y según lo permita el sistema agua- suelo.



En un ensayo de infiltración con infiltrómetro de doble anillo, el potencial presión a nivel de superficie va a tener una carga hidráulica dada por la carga hidráulica del anillo interior, si se supone que se tiene una altura de no más de 10 a 12 cm. en términos de potencial esto no es significativo. Cuando empieza el proceso de infiltración hay una zona saturada los primeros centímetros, posteriormente el agua sigue avanzando y en toda esta zona de transición si bien el suelo tiende a saturarse con el tiempo, ello ocurre al cabo de muchas horas. El contenido de humedad en esa zona de transición va a estar por arriba de capacidad de campo actuando en consecuencia el potencial gravimétrico. El movimiento descendente en el suelo, entonces, va a estar comandado por la presencia del potencial gravitacional pero a medida que se va alejando el contenido de humedad va disminuyendo en el frente de humedecimiento, el gradiente hidráulico va disminuyendo y va ganando relevancia la influencia del potencial mátrico.

Situación en suelos saturados e insaturados



En un sistema donde el suelo se encuentra saturado de agua, se cumple que el Q calculado a partir de la ley de Darcy es:

$$Q = . K . A . i$$

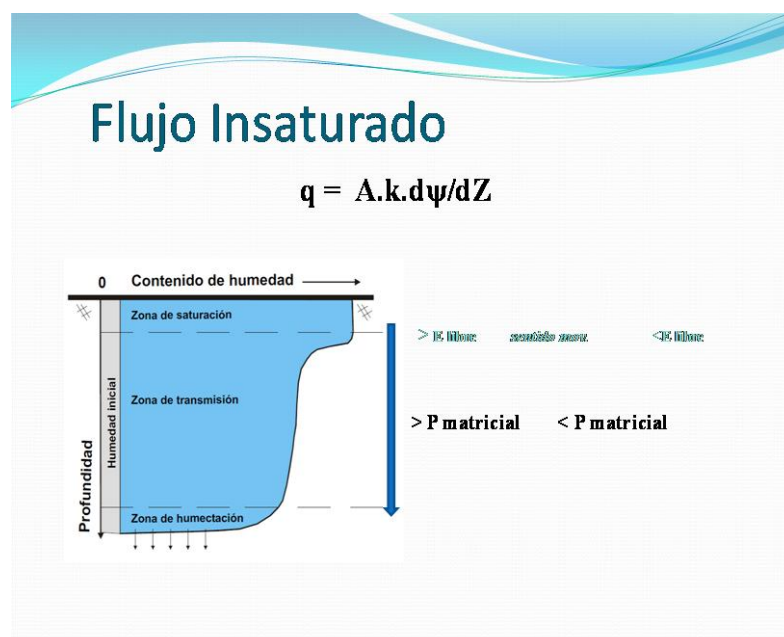
Donde A es área de la sección, K la Conductividad Hidráulica e i el gradiente de energía y Q caudal que pasa por un volumen de suelo:

i está integrado por la diferencia $(\lambda h) = h_2 - h_1$ de altura que es el potencial de presión, y la distancia entre la entrada y salida del agua L (diferencia entre Z_2 y Z_1),

Así la ecuación de Darcy expresa el caudal de agua en un suelo saturado $Q = K \cdot A \cdot I$, donde I es el gradiente hidráulico, siendo en este caso una diferencia de altura, del potencial de presión λh y L es la longitud y K es la constante, que es la conductividad de cada suelo en particular.

De la ecuación se puede inferir que cuando mayor es la longitud, menor es el caudal y entonces varía la velocidad, siendo también menor si el área es constante (tener en cuenta que $Q = \text{vol}/t$ o $Q = V \cdot A$).

Una situación parecida pasa con los suelos insaturados, que es el caso del movimiento de infiltración, en la que el principal componente del potencial hídrico que opera es el matricial, en tanto que el de presión es cero.



Velocidad de infiltración e infiltración básica

Si se analiza el proceso de infiltración, se puede observar que inicialmente la velocidad es alta y va bajando la tasa de variación de velocidad en iguales intervalos de tiempo hasta hacerse casi constante en un tiempo que depende del tipo de suelo, ello se explica por la disminución del gradiente hidráulico por el aumento de la distancia desde zona de infiltración inmediatamente superior a la zona saturada hasta la zona de

humedecimiento. Cuando la velocidad llega a este punto se dice que se llega a Infiltración básica. El componente de potencial hídrico de mayor incidencia en este caso es el potencial matricial y en menor medida el gravitatorio.

En la infiltración básica, la tasa de variación es del 10 % o menos (por convención), con respecto a la tasa de variación del intervalo anterior, siendo esto que ya se puede asumir como constante.

Método para determinar la velocidad de infiltración

Según Valenzuela y Jara (1998), uno de los métodos más comúnmente usados para medir la velocidad de infiltración es el cilindro infiltrómetro doble, el cual presenta la ventaja de que el flujo radial es minimizado por medio de un área tampón alrededor del cilindro central. El movimiento del agua es en dirección vertical hasta que pasa a la parte inferior de la orilla del cilindro, desde donde puede fluir en la dirección gobernada por la permeabilidad del suelo.

Para conocer la infiltración actual en una parcela próxima a regar, se debe efectuar un ensayo de infiltración, cumpliendo a través de este objetivos básicos tales como efectuar la toma de datos a campo necesarios para obtener las curvas de infiltración, confeccionar la curva de infiltración y determinar los parámetros de la ecuación de Kostiakov y su utilidad práctica o aplicaciones.

Los materiales utilizados para este ensayo son: un juego de anillos infiltrómetros (Diámetro menor aproximado: 35 cm. de diámetro mayor aproximado 65 cm., de acero galvanizado con un espesor de 0,5 cm. y 40 cm. de altura), un martillo, una tabla de madera fuerte que cubra el anillo mayor, una regla de 30 cm. de longitud graduada en mm., un reloj cronómetro, baldes con agua, una bolsa plástica grande, planilla para el registro de datos.

Según Valenzuela (1998), una de las limitantes más importantes en el uso de los cilindros infiltrómetros es que su ubicación en el suelo causa un cierto grado de alteración de las condiciones naturales (destrucción de la estructura o compactación), lo que puede provocar una variación en la cantidad de agua que penetra en el suelo. Además, en la interfase suelo-agua dentro de la columna de suelo existe la posibilidad de aire atrapado. La incapacidad del aire para escapar desde el suelo, bajo condiciones de flujo saturado, generalmente crea un cojín de aire interno que resulta un impedimento para el

movimiento vertical del agua. Tampoco es conveniente medir la velocidad de infiltración en suelos muy disturbados, como por ejemplo un terreno recién arado, porque varían enormemente los resultados de ensayos similares.

Procedimiento para efectuar el ensayo de medición de la velocidad de infiltración

El procedimiento del ensayo consiste en recorrer el lote en el cual se determinará la infiltración y elegir 3 (tres) sectores representativos del mismo, con condiciones similares al lugar donde se va a efectuar el riego (condiciones de humedad, laboreo, cobertura, estructura del suelo, etc.).

Una vez ubicados los puntos se procede de la siguiente manera:

Con una pala se limpia la superficie de vegetación en el lugar donde se instalarán los cilindros infiltrómetros, teniendo la precaución de no alterar la estructura del suelo.

Se colocan los cilindros en el suelo, uno adentro del otro en forma concéntrica y se sitúa la tabla de madera encima, en cuyo centro se martilla para hacer penetrar los anillos al suelo al mismo tiempo y en forma pareja, enterrándolos unos 10- 15 cm. El anillo externo hace efecto buffer, es decir, con él se induce el movimiento del agua en el anillo interno de manera que sea vertical y no haya redistribución lateral, de modo que realmente se mida la infiltración vertical unidireccional.

Posteriormente, se ubica la regla graduada en forma vertical dentro del anillo interno para medir la altura de agua (haciendo coincidir el cero de la regla con el suelo) y el plástico en el fondo de dicho anillo a fin de evitar la alteración de la superficie del suelo al inicio del ensayo y para retener el agua de modo que arranque el conteo del tiempo al comienzo del ensayo y que ahí inicie la infiltración, ya que si no se retiene el agua con el plástico el proceso de infiltración comienza antes, se va a tener error de medición de lámina y no se va a saber la correcta lámina inicial en el primer tiempo de riego que generalmente es al primer minuto; una vez llenado ambos anillos con agua, en el anillo central se retira dicho plástico y se toma la altura de agua a tiempo cero. Aquí se arranca la medición del tiempo y se va midiendo en la regla la lámina infiltrada a diferentes tiempos predeterminados. Es conveniente comenzar con lecturas a intervalos pequeños que se podrán ampliar conforme aumente el tiempo desde el inicio de la inundación del anillo. Por ej.: a intervalos fijos de 5 – 10 minutos se mide altura de agua dentro del anillo. Para medir la velocidad de infiltración del suelo y en función de sus características, se requiere por lo

general entre 3 y 5 horas según el tipo de suelo, al término de las cuales se llega a una velocidad de infiltración constante, denominada infiltración básica.

Cuando el nivel del agua en el cilindro central llega a ser de unos 5- 10 cm., se llena nuevamente este hasta el nivel inicial. Aquí se debe tomar la medida del nivel del agua antes (nivel de reposición) y después de rellenar el cilindro interno (nivel de enrase).

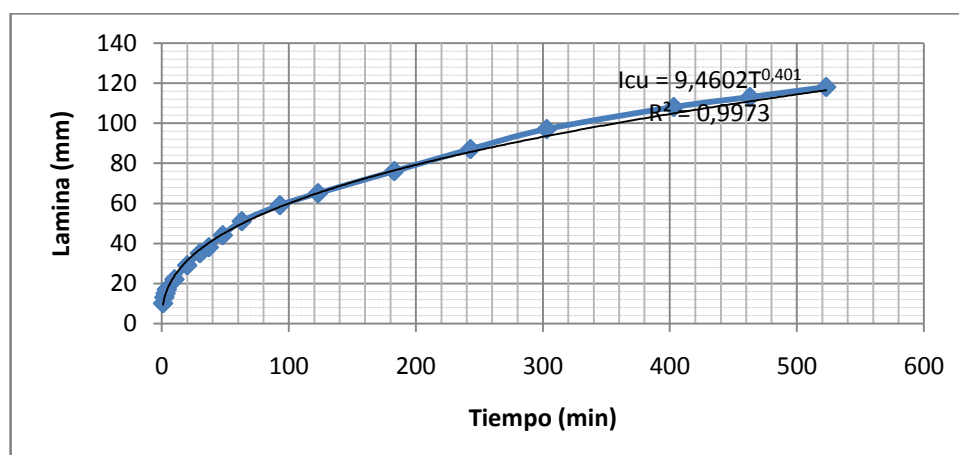
En el comienzo del ensayo se saturan los primeros cm (pero si se dejarían 24 hs se satura todo) y el agua se va distribuyendo en el suelo como ya se describió con el transcurso del tiempo.

En el proceso de infiltración la variación del potencial gravimétrico opera en una primera instancia.

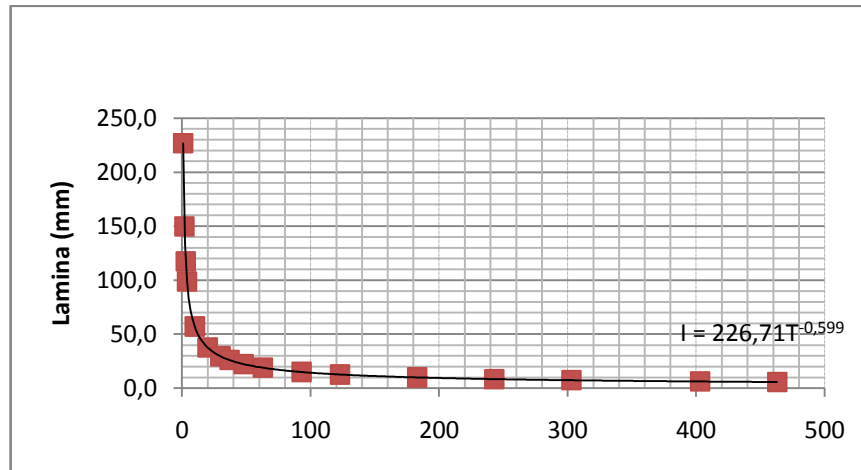
El potencial presión está dado por la altura que tiene el anillo interno. A medida que va avanzando el proceso, el valor de esta altura va disminuyendo, y el movimiento del agua se debe al potencial matricial y potencial gravitatorio; con el avance del tiempo el valor de potencial gravitatorio va disminuyendo y el potencial matricial tiene mayor influencia, por esto la velocidad de infiltración va disminuyendo porque la variación de la longitud va siendo cada vez mayor. Con el paso del tiempo la velocidad de infiltración tiende a hacerse constante ya que actúa fundamentalmente el potencial matricial.

Se obtienen con este ensayo de infiltración una serie de datos con los cuales se efectúan tablas de láminas parciales, láminas acumuladas y tiempos. Una vez recolectados los datos, se construyen las curvas de infiltración acumulada e infiltración instantánea y se determina la ecuación de infiltración. Normalmente se grafican promedios de velocidad por intervalos de tiempo.

Si se grafica la lámina infiltrada acumulada en función del tiempo, siendo este la variable independiente, se va a obtener una curva así:



Esta curva está indicando que, para intervalos de tiempo regulares, la tasa de variación de infiltración o velocidad de infiltración va disminuyendo, quedando graficada de esta forma:



Esta curva con pendiente negativa indica la velocidad de infiltración en cada punto, siendo al principio alta y más o menos según el suelo rápidamente empieza a disminuir hasta que tiende a hacerse casi constante. Cuando esto último ocurre no cruza en ningún momento el eje de las x y ni siquiera lo roza, porque nunca se iguala a cero. Cuando la curva tiende a hacerse constante, significa que para cualquier intervalo de tiempo va a tener el mismo valor de velocidad, siendo esta curva asintótica al eje de las x.

Para obtener la ecuación de infiltración, el procedimiento se puede realizar de dos formas: por método gráfico o por método analítico.

Determinación por método gráfico:

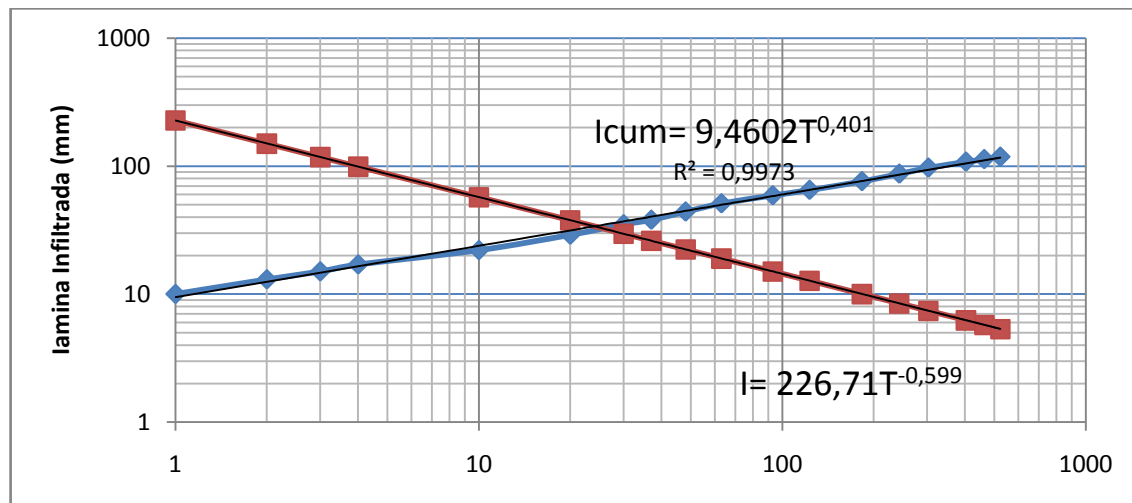
Partiendo de la conocida Ecuación de Kostiakov, $I_{ac} = K \cdot t^m$, se aplica logaritmo a ambos datos (tiempos y láminas acumuladas) y se obtiene así la ecuación de una recta:

$$\text{Log } I = \text{log } K + m \cdot \text{log } t$$

Donde “K” es la ordenada al origen para $\text{log } t = 0$ (o sea cuando $t = 1$) y “m” es la pendiente de la recta.

Esto también se puede obtener volcando directamente los valores obtenidos de láminas acumuladas y tiempos, en papel doble- logarítmico. Se grafican así los datos

tomados a campo: en el eje de las ordenadas las alturas (láminas en mm.) y en el eje de las abscisas los tiempos.



De esta manera, se marcan en el papel una serie de puntos y se traza una línea recta entre ellos de modo que se obtenga un balance de los puntos a ambos lados de la recta (ajuste visual).

Obtenida la recta, el valor de “K” se obtiene por la ordenada al tiempo 0 y el valor de “m” por la pendiente de la recta que siempre es negativa.

Para encontrar el valor de K hay que calcular el antilogaritmo y la pendiente de esta recta es el valor de m.

Determinación por método analítico:

El ajuste visual realizado en el punto anterior no garantiza el mejor resultado. Esto se puede mejorar utilizando el “método de los mínimos cuadrados” que garantiza que la sumatoria del cuadrado de los desvíos es mínima. Las ecuaciones utilizadas para dicho cálculo se encuentran en la planilla anexa de trabajo a campo.

Una manera sencilla de obtener el mismo resultado es la aplicación de la “regresión lineal” que es una herramienta matemática que está disponible en cualquier planilla de cálculo.

Obtención de la velocidad de infiltración e infiltración instantánea:

Lo primero que se grafica como ya se dijo, con los datos de campo, son láminas acumuladas en el eje de las ordenadas y tiempos en el eje de las abscisas, para posteriormente obtener la curva de velocidad instantánea donde se utiliza el concepto de derivada o de diferencial.

Se conoce que una de las aplicaciones de la derivación es el cálculo de la tasa de cambio en cada punto de una curva dada. La derivada de una función en un valor cualquiera de la variable independiente, indica la pendiente de la recta tangente que pasa por ese punto; la pendiente de una recta es cateto opuesto sobre cateto adyacente, entonces λx indica cuánto varía la infiltración cuando varía el tiempo en una unidad pequeña (infinitesimal), así, para conocer la velocidad instantánea en cada punto se usa la función derivada.

Ecuación de Kostiakov

Entre varios autores que estudiaron esto, se destaca la ecuación de Kostiakov 1932:

$$I = K \cdot t^m$$

Esta ecuación indica la velocidad de infiltración

Kostiakov muestra cómo se obtiene la velocidad de infiltración instantánea; para conocer la lámina acumulada total que infiltra o infiltración acumulada (I_{ac}), se integra dicha ecuación no obstante por ser más simple explica cómo se hace el análisis inverso, es decir partir de la infiltración acumulada.

De todos modos, para que sea más fácil de entender se parte de la ecuación de I_{ac} . La función inversa de la integración es la derivada, entonces se comienza con:

$I_{ac} = K \cdot t^m$ y derivando queda:

$$I'' = K \cdot m \cdot t^{m-1}$$

O se puede expresar como sigue:

$$I_{ac} = A \cdot t^B$$

$$I'' = A \cdot B \cdot t^{B-1}$$

Si $a = A \cdot B$ y $b = B - 1$, la ecuación derivada queda así:

$$I'' = a \cdot t^b \text{ para simplificar}$$

Esto representa una función con pendiente positiva, pero hay que tener en cuenta que la tasa de cambio es decreciente ya que para cada intervalo de tiempo el incremento es cada vez menor, entonces B toma valor positivo menor que 1, es decir entre 0 y 1.

De mismo modo, "b" va a tener valor negativo, por tanto la pendiente de la curva también lo es $I'' = a \cdot t^b$ que es la velocidad de infiltración que se expresa en mm/h o mm/min.

Uso práctico en riego

Las fórmulas que se utilizan en cálculo de diseño y evaluación de riego a los fines prácticos son la de la de infiltración acumulada y la de infiltración básica.

En el caso de obtener la ecuación de infiltración básica, se calcula la segunda derivada y se iguala a 0,1 lo que significa que se alcanza dicha infiltración cuando la tasa de variación en iguales intervalos de tiempos sea igual o menor al 10 %. Entonces, se puede decir que la derivada segunda se iguala a:

$$I''' = a \cdot 0,1 I'' \text{ siendo:}$$

$$I'' = a \cdot t^b \text{ (velocidad de infiltración en mm/hs o mm/min)}$$

$$I = A \cdot t^B \text{ (Inf acumulada en mm)}$$

Con la I''' se calcula un determinado tiempo donde la variación de la velocidad es de 10 %, de modo que se condiciona o impone esto para el cálculo de la Infiltración básica, con lo cual se conoce en qué momento en el tiempo desde el inicio de la infiltración, se inicia la I_b , es decir, ocurre la misma quedando:

$$I''' = a \cdot b \cdot t^{b-1} = -0,1 I''$$

$$a \cdot b \cdot t^{b-1} = -0,1 I''$$

$$a \cdot b \cdot t^{b-1} = -0,1 \cdot a \cdot t^b$$

$$b \cdot t^{b-1} = -0,1 \cdot t^b$$

$$b / -0,1 = -10 b$$

$$-10 b = t^b / t^{b-1}$$

$$10 b = t \text{ que es el tiempo en que se produce la infiltración básica}$$

Entonces, reemplazando en la primera derivada o velocidad de infiltración instantánea, queda:

$$I_b \text{ (infiltración básica)} = a \cdot t^b$$

$$I_b = a \cdot (- 10 b)^b$$

Si el tiempo está calculado en minutos, hay que multiplicarlo por 60 para pasarlo a mm/hora y al reemplazar va a quedar:

$$I_b = 60a \cdot (- 600 b)^b$$

Relaciones entre modelos matemáticos

Otras expresiones matemáticas, usadas en riego son del SCS (Servicio de Conservación del Suelo de USDA) y un modelo ajustado de Kostiakov que se usa en riego de escurrimiento superficial (Kostiakov – Lewis)

Los parámetros de estos tres modelos se relacionan en el cuadro siguiente

F	Código (Ib)		Textura	SCS-USDA			Kostiakov		Kostiakov-Lewis		
	(mm/h)	("/h)		A'	B'	C'	A	B	a	k	fo
		0,01	Muy arc.						0,200	0,00440	0,000011
		0,05	arc.						0,258	0,00426	0,000022
ML	2,5	0,10	arc.	0,62	0,660	7	1,22	0,580	0,317	0,00383	0,000035
		0,15	arc. Lig.						0,357	0,00360	0,000046
		0,20	Fco arc						0,388	0,00346	0,000057
		0,25	Fco arc						0,415	0,00337	0,000068
L	7,5	0,30	Fco arc	0,93	0,720	7	1,76	0,630	0,437	0,00330	0,000078
		0,35	Limoso						0,457	0,00326	0,000088
		0,40	Limoso						0,474	0,00323	0,000098
		0,45	Fco Lim						0,490	0,00321	0,000107
Mod.L	12,5	0,50	Fco Lim	1,20	0,750	7	2,20	0,660	0,504	0,00320	0,000117
		0,60	Fco Lim						0,529	0,00320	0,000136
		0,70	Fco Lim						0,550	0,00321	0,000155
		0,80	Fco Are						0,568	0,00322	0,000174
		0,90	Fco Are						0,584	0,00324	0,000193
Mod.	25	1,00	Fco Are	1,79	0,785	7	3,10	0,690	0,598	0,00326	0,000212
Mod. R	37,5	1,50	Arenoso	2,28	0,800	7	3,90	0,700	0,642	0,00340	0,000280
R	50	2,00	Arenoso	2,75	0,808	7	4,50	0,710	0,672	0,00355	0,000325
MR	75	3,00	Arenoso	3,65	0,816	7	5,80	0,715			
Ex.R	100	4,00	Arenoso	4,45	0,827	7	7,00	0,720	0,750	0,00421	0,000390

En la primer columna se observa la característica de los suelos en cuanto a la velocidad desde muy lento (ML) hasta extremadamente rápido (Ex.R); en la segunda y tercer columna se observan la familia de infiltración caracterizada por la infiltración básica

en mm/h y pulgadas /horas respectivamente , luego aparecen las clases texturales y por últimos los equivalentes entre los parámetros de las tres ecuaciones:

$$I_c(\text{SCS}) = AT^B + C$$

$$I_c(\text{K-L}) = at^b + f_0$$

Como ejercicio para el lector queda averiguar el parámetro C de la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos SCS y f_0 en el modelo de Kostiakov – Lewis

Infiltración: Problemas de aplicación

Dada la siguiente ecuación de infiltración acumulada (Kostiakov) obtenida con el infiltrómetro de doble anillo:

$$I_{ac} = 5,1 \cdot T^{0,47}$$

- a) Calcular la lámina acumulada en 1 (una) hora.
- b) Calcular la infiltración instantánea (velocidad de infiltración) a los 100 minutos.
- c) Calcular el valor de la infiltración básica y del tiempo base.
- d) Si se necesita incorporar 60 mm en el suelo ¿Cuánto tiempo hay que regar?

Fuentes consultadas:

- . Angella, G. et al. (2016). Conceptos básicos de las relaciones agua- suelo-planta. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero. ISSN en trámite. **ver**
- . Cátedra Riego y Drenaje (2018). Apuntes de clases teórico- prácticas. Facultad de Ciencias Agrarias. UNCa.
- . Grassi, C. (1972). Métodos de Riego. Mérida, Venezuela, CIDIAT.
- . Grassi, C. J. (1998). Fundamentos del riego. CIDIAT, Serie: Riego y Drenaje 38.
- . Jara R., Jorge. Relación Suelo-Planta-Agua (1999). ICA. Departamento de Recursos Hídricos.
- . INTA-PROCADIS. (1999). Curso a distancia sobre métodos de riego. Módulo I. Relación agua-suelo-cultivo.
- . Lafi, S.; Angella, G. A.; Frías, C. (2011). Retención y flujo de agua en el suelo. Apuntes de Cátedra de Hidrología Agrícola. Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- . Prieto, D. (2017). Relaciones suelo- planta- agua- atmósfera. Módulo I. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero.
- . Prieto, D. (2018). Apuntes curso de posgrado Relación agua- suelo- planta- atmósfera. Maestría en Riego y Uso Agropecuario del Agua. UNCa. Catamarca.
- .Salgado, E. (2001). Curso Relación suelo- agua- planta. Ediciones Universitarias de Valparaíso de la Universidad Católica de Valparaíso, Chile. ISBN 956-17-0321-1.
- .Tosso, J. y Tondreau, J. (1975). Velocidad de infiltración para diseño de métodos de riego. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero (Boletín Técnico).
- . Valenzuela, A. (1998) y Jara, J. Relaciones S- A- P-. II: El agua en el suelo. Facultad de Ingeniería Agrícola, Dpto. Riego y Drenaje. Universidad de Concepción. Chile.

En internet:

- . <http://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/composicion-y-clasificacion-de-los-suelos-1293271.html>
- . http://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm