

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA



EFFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE
EL PROCESO DE INFILTRACION DEL AGUA
EN EL SUELO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO FITOTECNISTA

PRESENTA

ADELFO CARDOZO GALLEGOS

MARIN, N. L.

MAYO DE 1983

T

S613

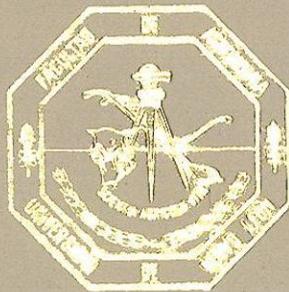
C3

c.1



1080061060

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA



EFFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE
EL PROCESO DE INFILTRACION DEL AGUA
EN EL SUELO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO FITOTECNISTA

PRESENTA

ADELFO CARDOZO GALLEGOS

MARIN, N. L.

MAYO DE 1983

V/5613
C3


Biblioteca Central
Maena Solidaridad
F-Tesis


BU Raúl Rangel Fias
UANL
FONDO
TESIS LICENCIATURA

040 631
#A 2
1983

D E D I C A T O R I A .

Con profundo agradecimiento y cariño:

A mis padres: PROCORO CARDOZO CARBAJAL

CATALINA GALLEGOS DE C.

Quienes me enseñaron a seguir el camino recto de la vida y a quienes debo lo que soy.

A mi esposa: JUANA HERNANDEZ DE C.

Por su gran apoyo moral.

A mis hijos: DALIA ARGELIA

VICTOR ISRAEL

RICARDO MIGUEL

Por que su presencia fué para mi, un impulso para seguir adelante y buscar la superación.

A todos mis hermanos:

Por sus palabras de aliento

Muy especialmente a los CC. Ingenieros:

BENJAMIN S. IBARRA RUIZ .

Por la valiosa ayuda y asesoramiento en la elaboración del presente trabajo.

SERGIO SANCHEZ FERNANDEZ.

Por su desinteresada cooperación

Y a todos los maestros del Departamento de Ingeniería Agrícola, amigos y compañeros de generación.

I N D I C E

	Pag.
INDICE DE TABLAS	III
INDICE DE FIGURAS	IV
INTRODUCCION	1
LITERATURA REVISADA	3
Aspectos generales sobre el proceso de infiltración.	3
Infiltración vertical	9
Infiltración del agua de lluvia	11
Factores que tienen influencia sobre la infiltración.	12
Otros factores	20
Control de la infiltración	22
Ecuaciones aplicadas a la infiltración	25
Métodos para determinar la infiltración	35
MATERIALES Y METODOS	43
RESULTADOS Y DISCUSION	45
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
RESUMEN	61
BIBLIOGRAFIA	62

INDICE DE TABLAS.

	Pag.
TABLA 1. Valores del coeficiente de infiltración - Básica (Cms/Hr), obtenidos en los diferen- tes sitios de muestreo. "Influencia de la cobertura vegetal sobre el proceso de in- filtración del agua en el suelo". Marín -- N.L. 1981.	45
TABLA 2. Comparación entre las ecuaciones para la - velocidad de infiltración instantánea, de- terminadas por los métodos gráfico y anali- tico." Influencia de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	51
TABLA 3. Ecuación de la velocidad de infiltración - instantánea obtenida por el método analíti- tico." Efecto de la cobertura vegetal so- bre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	52
TABLA 4. Ecuación de la velocidad de infiltración - instantánea obtenida por el método gráfico para los diferentes tratamientos. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso - de infiltración del agua en el suelo". Ma- rín N.L. 1981.	52
TABLA 5. Determinación de la ecuación de infiltra- ción acumulada por el método gráfico."Efec- to de la cobertura vegetal sobre el proce- so de infiltración del agua en el suelo".- Marín N.L. 1981.	57
TABLA 6. Determinación de la densidad aparente , -- (Gr/Cm ³), para los diferentes sitios de -- muestreo. "Efecto de la cobertura vegetal- sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	58
TABLA 7. Determinación de la textura para los dife- rentes sitios de muestreo."Efecto de la co- bertura vegetal sobre el proceso de infil- tración del agua en el suelo". Marín N.L.† 1981.	59

INDICE DE FIGURAS.

		Pag.
Figura 1.	Proceso de infiltración en un suelo inicialmente seco.	6
Figura 2.	Perfil de la humedad durante la infiltración. A la izquierda una sección esquemática del perfil; a la derecha el contenido de humedad contra la curva de profundidad.	8
Figura 3.	Infiltración en un surco de un suelo inicialmente seco, el frente húmedo está visto a diferentes periodos.	10
Figura 4.	Relación entre la humedad relativa y la infiltración	20
Figura 5.	Representación de las curvas características de la infiltración.	26
Figura 6.	Gráfica que muestra la forma de obtención de los parámetros K y n de la ecuación de Kostiakov.	28
Figura 7.	Gráfica que muestra la forma de obtención de los parámetros C y m por el método gráfico.	30
Figura 8.	Determinación del Coeficiente de infiltración básica (CIB), para el cultivo de avena. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981	47
Figura 9.	Determinación del Coeficiente de Infiltración básica (CIB), para el suelo desnudo. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	48
Figura 10.	Determinación del Coeficiente de Infiltración básica (CIB), para el área de pastizal. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	49
Figura 11.	Determinación del Coeficiente de Infiltración básica (CIB), para el área de matorral. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981...	50

	Pag.
Figura 12. Ecuación de infiltración para el cultivo de avena, obtenida por el método gráfico "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	53
Figura 13. Ecuación de infiltración para el suelo desnudo, obtenida por el método gráfico "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	54
Figura 14. Ecuación de infiltración para el área de pastizal, obtenida por el método gráfico "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	55
Figura 15. Ecuación de infiltración para el área de matorral, obtenida por el método gráfico "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.	56

I N T R O D U C C I O N .

Es de todos conocido que la producción agrícola en México es insuficiente, que lo que se produce no alcanza para cubrir las necesidades mas elementales de la población, año con año se tienen que importar granos y otros productos agrícolas.

México tiene en explotación 5 millones de hectáreas bajo riego y 16 millones de hectáreas de temporal, de los cuales 12 millones tienen buen temporal y en los otros 4 millones es muy irregular. La mayoría de los suelos tienen problemas de erosión.

La erosión es ocasionada por el mal manejo de los suelos, tala de áreas forestales, suelos sobrepastoreados y la orografía del territorio nacional (regiones montañosas), etc. que dificultan la retención del agua en el suelo, por eso -- es muy común encontrar arroyos secos y norias agotadas, debido a que los mantos acuíferos no se pueden recuperar, de ahí se desprende y es obligatorio por la escasez del agua -- hacer uso de esta con la mayor eficiencia posible.

Es muy importante el manejo hidrológico de las cuencas -- desde el punto de vista de captación de agua, si el terreno es de explotación ganadera, evitar sobrepastoreos y destrucción de la vegetación porque con esto el suelo es presa fácil de la erosión, si es una área de explotación agrícola -- y con pendiente de consideración se debe poner énfasis a la-

construcción de terrazas a nivel, surcos a nivel, establecimiento de cultivos de protección, control de cárcavas, construcción de tinas ciegas e incorporación de materia orgánica para promover la infiltración, retener el agua y controlar la erosión.

Es muy importante el buen manejo del agua desde el punto de vista hidrológico y de irrigación, debido a la escasez de esta, por lo cual debe utilizarse con máxima eficiencia. Uno de los factores mas importantes que intervienen en el manejo del agua a cualquier nivel es la infiltración.

El objetivo del presente trabajo, es el de determinar la influencia de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo.

BIBLIOGRAFIA REVISADA.

1. INFILTRACION.

La infiltración se refiere al movimiento del agua al interior del suelo (3). Es el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie cuando este se mantiene en contacto con agua a la presión atmosférica (4).

El agua penetra en el suelo por los surcos, grietas y orificios practicados por gusanos u ocasionados por raíces podridas, así como por las cavidades hechas durante la laboranza.

La infiltración generalmente decrece a medida que transcurre el tiempo, si se sigue aplicando agua en la superficie del suelo; esta agua primero llena las deficiencias de humedad de este y después el exceso se mueve en el interior y llega a ser el agua del suelo. La cantidad de agua captada por el suelo se le llama capacidad de infiltración.

La magnitud de la infiltración se clasifica como sigue (6).

Muy lenta. Suelos con capacidad de infiltración menor de 0.25 Cms. de lámina de agua por hora, en este grupo están los que contienen un gran porcentaje de arcilla.

Lenta. Infiltración de 0.25 a 1.75 Cms/Hr., suelos con alto porcentaje de arcilla, de bajo contenido de materia orgánica o suelos someros.

Media. 1.75 a 2.5 Cms/Hr., La mayoría de los suelos de este grupo son migajones arenosos o limosos.

Rápida. Infiltración mayor de 2.5 Cms/Hr., arenas y migajones limosos profundos y de buena agregación.

De una manera muy general pueden asumirse valores estándar para los distintos tipos de suelo, con relación a la infiltración básica (5).

S U E L O .	CIB (Cms/Hr).
Suelo arenoso grueso.	2.5 a 8.0
Arenoso fino.	1.8 a 2.5
Franco arenoso.	1.4 a 1.8
Franco limoso.	1.0 a 1.4
Franco arcilloso.	0.7 a 1.0
Arcilloso limoso.	0.4 a 0.7
Arcilloso compacto.	0.2 a 0.5

Si una capa ligera de agua se aplica instantáneamente y es mantenida sobre la superficie de un suelo inicialmente no saturado, la medida completa de la capacidad de infiltración del suelo entra en acción desde el principio. Muchas medidas de infiltración bajo un estancamiento ligero han -- mostrado variación y generalmente decrecen con el tiempo. Por eso la infiltración acumulativa es el tiempo integral -- requerido por el total de la infiltración.

La infiltrabilidad del suelo y sus variaciones con el tiempo dependen del contenido inicial de humedad y uniformidad (o secuencia de los estratos), del perfil. En general, la infiltrabilidad del suelo es alta en las primeras etapas particularmente donde el suelo está inicialmente seco, pero tiende a decrecer en forma paulatina y eventualmente la curva se vuelve asintótica a una velocidad de infiltración constante que se llama capacidad de infiltración final o coeficiente de infiltración básica (CIB).

El detrimento en la infiltración de una alta velocidad inicial, puede en algunos casos resultar (al menos en parte) de la deteriorización gradual de la estructura del suelo, el sellado parcial del perfil del suelo por la formación de una costra y por migración de partículas bloqueadoras de los poros, por expansión de las arcillas, por atrapamiento de aire (bolsas), o por la compresión del aire del suelo cuando no puede escapar a medida que se adiciona agua. Primeramente, sin embargo, la disminución en la velocidad de infiltración es resultado de un detrimento en el gradiente de succión matricial que constituye una de las fuerzas que atraen el agua al interior del suelo.

Al inicio de una prueba de infiltración el suelo tiene un contenido de humedad diferente al de saturación, por lo tanto, existe un corto periodo en que el agua se infiltra a gran velocidad, esta velocidad decrece hasta que se hace

constante, a la velocidad constante de infiltración se le denomina coeficiente de infiltración básica (CIB), y es semejante al valor de la conductividad hidráulica (K_0), que indica la habilidad que tiene el suelo para transmitir el agua en forma constante a través de sus poros cuando estos están saturados y varia según el tipo de suelos (8). En otras palabras, si la superficie de un suelo inicialmente seco se satura repentinamente, el gradiente de succión matricial que está actuando en el estrato superficial es primeramente muy alto, pero a medida que la zona húmeda se profundiza, este gradiente se reduce hasta llegar a ser muy pequeño a medida que la zona húmeda del perfil viene a ser mas y mas gruesa.

1.1 Distribución de la humedad en el suelo durante la infiltración.

En una prueba de infiltración la distribución de la humedad a diferentes intervalos se puede representar como sigue:

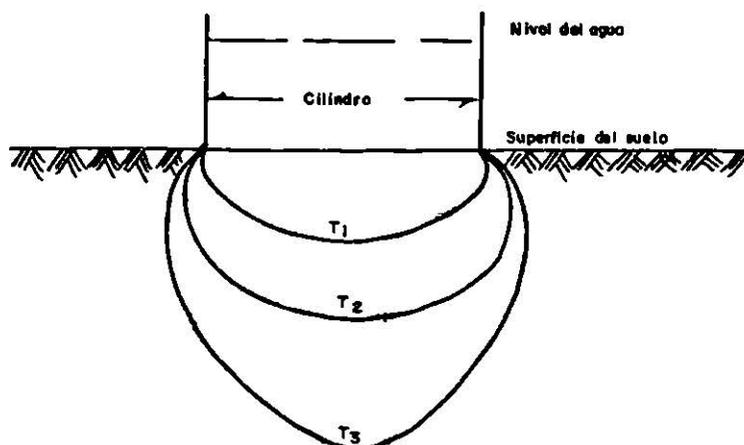


Fig. 1 . Proceso de infiltración en un suelo inicialmente seco.

A un tiempo T_1 , el potencial mátrico del suelo es tan pequeño (gran fuerza de succión) que la infiltración ocurre en todas direcciones y en gran magnitud. La profundidad a la que avanza el agua es poca, por lo que el efecto de la gravedad (g), es de poca importancia.

A medida que transcurre el tiempo, los gradientes en potencial mátrico disminuyen y comienza a predominar el efecto de la gravedad, de ahí que el perfil húmedo adquiera la forma alargada.

La determinación del CIB, es de mucha importancia en el diseño de sistemas de riego, ya que la longitud de los surcos, melgas, etc., y el tiempo de riego se calculan en función de este, también es importante en el diseño de drenaje.

Si examinamos un perfil de suelo homogéneo en cualquier momento durante la infiltración por inundación podremos encontrar que la superficie del suelo está saturada tal vez a una profundidad de varios milímetros o centímetros y que bajo esta zona de saturación completa, hay una zona de uniformidad aparente cercana a la saturación conocida como zona de transmisión. Después de esta zona está una zona de humedecimiento en la cual la humedad del suelo decrece con la profundidad hasta formar un frente húmedo, donde el gradiente de humedades es muy elevado y parece que hay un límite muy marcado entre el suelo húmedo y el seco como se aprecia en la figura siguiente:

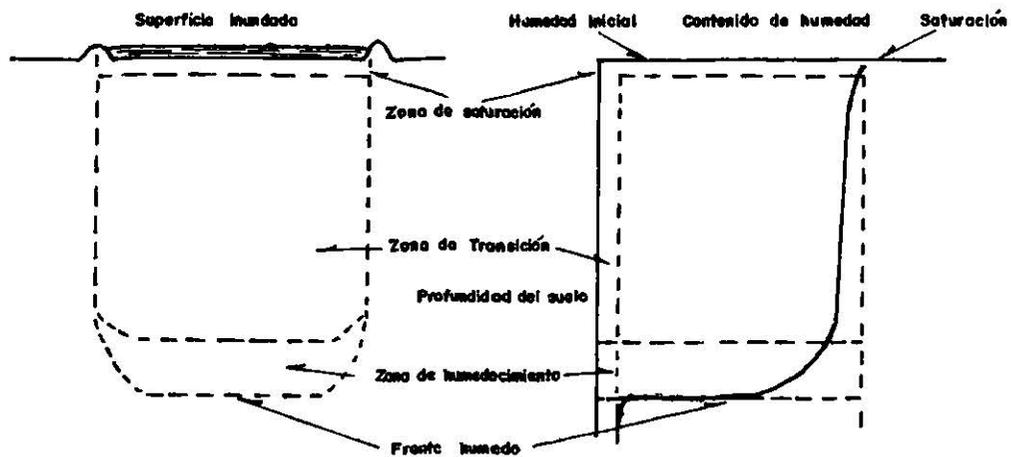


Fig. 2. Perfil de la humedad durante la infiltración.-- a la izquierda una sección esquemática del perfil; a la derecha el contenido de humedad contra la curva de profundidad.

El perfil típico de humedad durante la infiltración descrito primeramente por Bodman y Coleman (1944) y Coleman y Bodman (1945)., se muestra esquemáticamente en la figura 2.- Investigaciones posteriores han puesto la interrogante de si hay un diferencial necesariamente entre la zona de saturación y la zona de transmisión o si es meramente una anomalía resultado de las pérdidas de estructura, inactividad o expansión del suelo en su superficie.

La superficie del suelo cuando está sujeta a la acción disturbadora e inactivadora de las gotas de lluvia y de la turbulencia del agua, a menudo son rotos sus agregados y coloides, resultando la formación de una costra, que a su vez afecta la humedad del perfil del suelo bajo la misma.

Si continuamos examinando la humedad del perfil periód-

dicamente durante la infiltración, podremos ver que la zona de transmisión cercana a la saturación se alarga (en profundidad) continuamente y que la zona de humedecimiento y el frente húmedo se mueven hacia abajo continuamente .

1.2. Infiltración vertical.

La infiltración hacia abajo en un suelo inicialmente no saturado generalmente ocurre bajo la influencia combinada de los gradientes de succión y de gravedad. A medida que el agua penetra más y que la parte húmeda del perfil se elonga, el promedio del gradiente de succión decrece, debido a que la diferencia total en presión (entre la superficie del suelo saturada y el suelo seco dentro del perfil), se divide en distancias constantes. Esta tendencia continúa hasta que eventualmente el gradiente de succión en la parte superior del perfil llega a ser despreciable, dejando solo el gradiente gravitacional constante, como la única fuerza que influye en el movimiento del agua hacia abajo en esta parte superior o zona de transmisión. Debido a que el potencial del gradiente hidráulico tiene valor de 1 (el potencial gravitacional decrece en proporción de 1 centímetro por cada centímetro de profundidad), esto da por resultado que el flujo tienda a aproximarse a la conductividad hidráulica como un valor límite. En un suelo uniforme (sin costra), bajo un prolongado encharcamiento, el contenido de agua en la zona húmeda se aproxima a la conductividad hidráulica saturada.

La ecuación de Darcy para el flujo vertical es:

$$q = -K \frac{dH}{dz} = -K \frac{d}{dz} (H_p - Z)$$

En un suelo no saturado, H_p es negativo y puede ser expresado como un potencial de succión ψ ; $q = \frac{Kd}{dz} \psi + K$.

Donde: q es el flujo, H es el potencial hidráulico total, H_p es el potencial presión, ψ es el potencial matricial de succión, z es la distancia vertical hacia abajo desde la superficie del suelo (profundidad) y K es la conductividad hidráulica.

Cuando la infiltración se hace en un suelo inicialmente seco, los gradientes de succión son primeramente mucho más grandes que los gradientes gravitacionales y la cantidad de infiltración inicial es una columna horizontal. El agua de surco por esto, tiende en un principio a infiltrarse lateralmente con casi la misma extensión que la infiltración vertical.

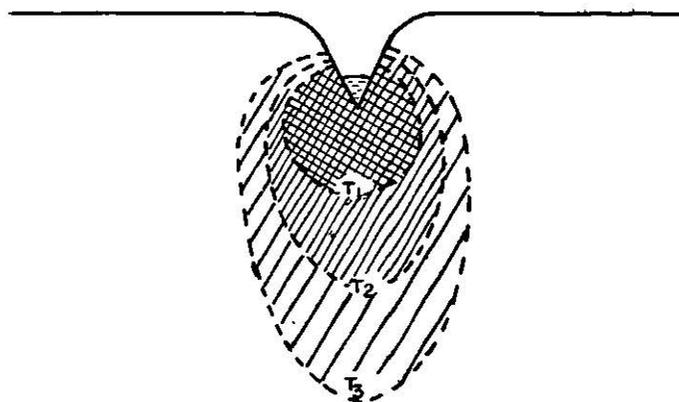


Figura 3. Infiltración en un surco de un suelo inicialmente seco, el frente húmedo está visto a diferentes periodos.

Al principio la fuerza de los gradientes de succión hacen que la infiltración sea casi uniforme en todas direcciones, eventualmente, los gradientes de succión decrecen y el gradiente gravitacional predomina.

Por otro lado, cuando la infiltración se efectúa en un suelo inicialmente húmedo, los gradientes de succión son pequeños en un principio y llegan a ser despreciables rápidamente.

1.3 Infiltración del agua de lluvia.

Cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, el proceso de infiltración es el mismo que en el caso de inundación superficial. Si la intensidad de la lluvia es menor que el valor inicial de la capacidad de infiltración del suelo, pero mas grande que el valor final, entonces, en un principio, el suelo absorberá agua en menor cantidad que su potencial y el flujo en el suelo ocurrirá bajo condiciones no saturadas, sin embargo, si la lluvia continúa con la misma intensidad y como la capacidad de infiltración del suelo decrece, la superficie del suelo llegará a saturarse y desde aquí el proceso continuará como en el caso de infiltración por inundación. Por otro lado, si la intensidad de la lluvia es siempre mas baja que la capacidad de infiltración del suelo, este continuará absorbiendo agua a medida que se le aplica sin llegar a saturarse. Después de un largo tiempo, a medida que el gradiente de succión llega a ser despreciable, el perfil alcanzará una humedad para la cual la con -

ductividad hidráulica es igual a la cantidad de agua aplicada.

1.4 Factores que tienen influencia sobre la infiltración.

1.4.1. Laboreo.

Las prácticas de manejo de suelos tienen mucho que ver - respecto a la cantidad de agua infiltrada. Arando, subsolando o cualquier otra clase de movimiento de suelo, normalmente incrementa la abertura del suelo, especialmente si está susceptible a fractura por la operación de labrado. Musgrave y Free han demostrado que para algunos tipos de suelos, la cantidad de lluvia infiltrada cuando fueron arados a una profundidad de 10 centímetros fué de 2.54 centímetros por hora. En los -- que fueron arados a una profundidad de 15 centímetros, la lluvia infiltrada tuvo un promedio de 3 centímetros por hora, y para un suelo que no fué cultivado solo se obtuvo un promedio de 1.95 centímetros por hora.

1.4.2. Materia orgánica.

Cuando se incorpora materia orgánica al suelo, la porosidad llega a ser alta en un periodo relativamente largo, dependiendo principalmente de la cantidad de descomposición del material. Efectos similares en la porosidad del suelo son producidos por la rotación de los cultivos.

Los suelos con agregados grandes, tienen poros mas grandes y consecuentemente mayor capacidad de infiltración asi como mayor capacidad de absorción de agua.

1.4.3. Impurezas del agua.

La cantidad de infiltración de un suelo está profundamente afectada por las impurezas del agua superficial. El agua limpia penetra mas rápidamente al suelo que el agua sucia. Esto es debido a que el material del suelo suspendido en el agua tiende a obstruir las entradas impidiendo el movimiento del agua al interior del suelo.

Los suelos con buena cantidad de materia orgánica no entran tan fácilmente en suspensión para producir suciedad en el agua superficial que aquellos con deficiencia de humus.

Lowdermilk encontró que el agua sucia se percoló a través del suelo estudiado en solo una décima parte de lo que el agua limpia lo hizo.

La cubierta vegetal y el contenido de materia orgánica ayudan a mantener los agregados del suelo y así mismo previenen el que quede suelo en suspensión en el agua superficial al evitar la acción del golpeo de las gotas de lluvia (2).

El proceso de infiltración del agua de lluvia no ha sido estudiado con suficiente detalle en el campo para establecer la aplicación de las teorías existentes. Las complicaciones debido a la alta variabilidad en la intensidad de las lluvias, la energía de las gotas y la naturaleza inestable de muchos (posiblemente todos) suelos pueden causar anomalías en las teorías idealizadas, complicaciones adicionales se pueden presentar con la heterogeneidad del perfil (4).

1.4.4. Características de la lluvia.

Cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración de un suelo, toda la lluvia que cae no tomada como almacenamiento superficial se infiltrará al interior del suelo, así que habrá una relación directa entre la infiltración y la intensidad de la lluvia, el término cantidad de infiltración es de hecho, a menudo usado para implicar que la infiltración está precediendo a una cantidad que es llamada capacidad de infiltración. Cuando, sin embargo, la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración la relación entre infiltración e intensidad de la lluvia se invierte. Esto es normalmente el caso en que al aumentar la intensidad de la lluvia se incrementa el tamaño de las gotas y consecuentemente se aumenta la fuerza de compactación con que las gotas golpean la superficie del suelo.

En adición a estas influencias directas, las características de la lluvia pueden afectar la infiltración indirectamente al aumentar el contenido de humedad del suelo, influenciando el movimiento de las lombrices y otros animales dentro del suelo y por varios efectos sobre la estructura de la masa del suelo.

1.4.5. Condiciones de la superficie del suelo.

1.4.5.1 Compactación.

En ausencia de vegetación o de un cultivo de cobertura las gotas de lluvia pueden compactar la superficie del suelo.

Así que la infiltración se vé efectivamente reducida. Este efecto es mas notable en suelos arcillosos, los cuales pueden llegar a ser prácticamente impermeables, mientras que los suelos arenosos son mucho menos susceptibles a la compactación por las gotas de lluvia.

Un efecto similar puede ser el pisoteo producido por los animales en una zona de pastoreo o por el tráfico de vehículos.

1.4.5.2 Lavado de partículas pequeñas.

Las partículas pequeñas que trae en suspensión el agua, pueden obstruir los poros en la superficie del suelo y de esta forma afectar la velocidad de infiltración. Esta clase de partículas son particularmente abundantes en la superficie del suelo al término de un periodo de sequía, por lo cual tienden a obstruir la superficie del suelo durante las primeras lluvias. Bajo estas condiciones, sin embargo, estas partículas finas son efecto del golpeo de las gotas de lluvia.

1.4.5.3. Profundidad del almacenamiento superficial del agua.

En la mayoría de las condiciones naturales, la profundidad del agua que se acumula dentro del suelo durante la infiltración es pequeña. Debido a que la gravedad es uno de los principales factores que causan la entrada del agua al suelo, se espera que varíe la velocidad de infiltración con la profundidad del agua acumulada, particularmente en las primeras etapas del proceso cuando solo un estrato delgado de la super

ficie del suelo a sido saturado, asi que la resistencia a la entrada del agua es comparativamente baja. Sin embargo, debido a la evidencia experimental Philip concluyó que este efecto es menor. La infiltración inicial puede ser incrementada con un máximo alrededor del 2 %, por cada centímetro adicional en la profundidad del agua.

1.4.5.4 Formación de grietas.

La remoción de humedad de las capas superficiales del suelo por evaporación, principalmente en suelos arcillosos da por resultado la formación de grietas. Por estos medios la capacidad de infiltración es considerablemente incrementada, asi que durante las primeras etapas de la lluvia ocurren grandes cantidades de infiltración. En el caso de suelos desnudos las grietas se cierran una vez que el suelo a sido humedecido pero un suelo que a sido secado por transpiración de las plantas puede tomar gran cantidad de agua de la precipitación antes que las grietas vuelvan a cerrar.

1.4.5.5 Pendiente.

Como es de esperar, la pendiente afecta indirectamente la cantidad de infiltración. En pendientes fuertes, el agua se mueve rápidamente sobre la superficie, dejando poco tiempo para la infiltración, mientras que en superficies planas o con poca pendiente, el agua se mueve lentamente, o da lugar a estancamientos que favorecen la infiltración.

1.4.5.6. Laboreo.

Las técnicas como la formación de terrazas y trabajos en contorno, tienden a incrementar la velocidad de infiltración-retardando el flujo superficial, lo cual da lugar a un mayor tiempo para la toma de agua.

1.4.6 Condiciones de la cubierta vegetal.

1.4.6.1. Tipo de vegetación.

La cubierta vegetal tiende a incrementar la velocidad de infiltración en comparación con áreas de suelo desnudo, no solo retardando el flujo superficial, lo cual da lugar a un mayor tiempo para la entrada del agua al suelo, sino también - protegiendo la superficie del suelo del impacto directo de -- las gotas de lluvia, lo cual reduce la compactación. Además - la formación de un complejo sistema radicular incrementa la - permeabilidad de los estratos superficiales del suelo.

En relación con la vegetación natural o seminatural, la mayor parte de la evidencia experimental indica que la infiltración es mas alta bajo áreas forestales que bajo pastizales aunque Lull reportó experimentos desarrollados por T.S. Coile que muestran que la infiltración no necesariamente se incrementa con el desarrollo de vegetación forestal.

La densidad de la cubierta vegetal es tal vez mas importante que la diferencia en el tipo de vegetación. (Ward R.C.- 1967), (9).

1.4.6.2. Cultivos agrícolas.

La cantidad de infiltración varía ampliamente bajo diferentes cultivos agrícolas. Como puede ser esperado la variación mas rápida ocurre entre pastizales relativamente densos los cuales han sido pastoreados por varios años, y cultivos ampliamente espaciados como maiz, papa, etc., particularmente en sus primeras etapas de crecimiento. Cultivos tales como cebada y el trigo tienden a ser intermedios en sus efectos sobre la velocidad de infiltración.

1.4.7. Transmisibilidad de la masa del suelo.

1.4.7.1. Porosidad no capilar.

Uno de los principales factores que gobiernan la transmisión del agua hacia abajo a través del suelo es el número de poros de tamaño supercapilar a través de los cuales el agua se puede mover debido a la fuerza de gravedad. Igualmente importante es el grado de estabilidad de la estructura y lo extenso de la variación del tamaño de los poros de acuerdo a las condiciones de humedad, los gránulos en los suelos arcillosos a menudo se desintegran por el humedecimiento del agua de lluvia, lo cual reduce rápidamente la porosidad no capilar

Un suelo que contiene grandes cantidades de material coloidal, tendrá considerables variaciones estructurales, debido a la expansión de los coloides cuando estos están húmedos.

Los factores bióticos también pueden tener influencia en el número de espacios no capilares dentro del suelo. Fenwick señaló la importancia de los canales formados por las lombrí

ces de tierra, particularmente en suelos superficiales en áreas de pastoreo y observó en las áreas estudiadas que la cantidad de un millón de lombrices por acre no es una cantidad excesiva. Los canales del suelo pueden ser debidos también a animales e insectos o por la descomposición de los sistemas radiculares de las plantas.

Finalmente es necesario considerar la naturaleza del perfil del suelo y sus efectos en la distribución vertical de los poros no capilares en el suelo. En varias áreas húmedas por ejemplo, el lavado de minerales y partículas finas de los estratos superficiales y su acumulación a menor o mayor profundidad bajo la superficie, a menudo da por resultado un detrimento en el número de poros grandes en la zona de acumulación. En ocasiones extremas se puede formar lo que se llama un "piso", lo cual reduce la permeabilidad a casi cero. Aunque la superficie tienda a ser más permeable que el subsuelo no en todos los casos sucede, pero cualquier horizonte del suelo puede limitar la transmisibilidad del perfil completo.

1.4.7.2. Contenido de humedad del suelo.

Varios investigadores han demostrado que la infiltración varía inversamente con el contenido de humedad del suelo, particularmente durante las primeras etapas de la lluvia. Esto se puede ver en la figura 4, cuyos datos fueron obtenidos por Kowe.

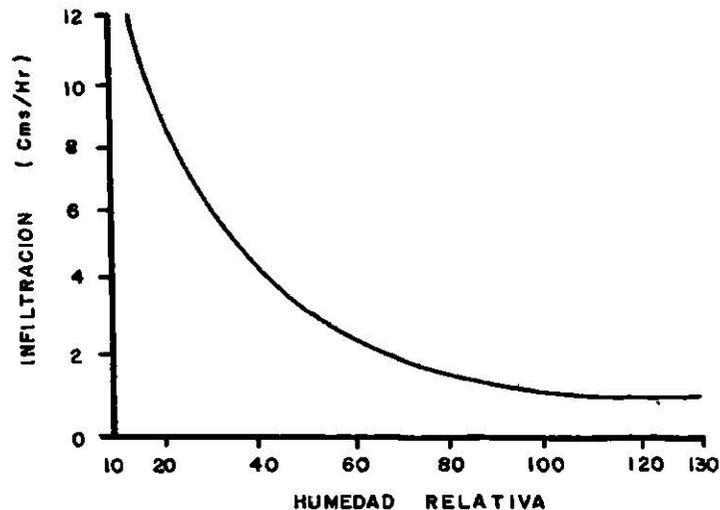


Figura 4. Relación entre la humedad relativa y la infiltración.

El contenido de humedad del suelo tiende a afectar la infiltración en 3 diferentes formas, primero: A medida que el contenido de humedad se incrementa, el número de poros desocupados en el suelo se reduce, segundo: Cuando la lluvia humedece la superficie de un suelo seco, se forman fuerzas capilares que tienden a atraer el agua hacia el interior del suelo con una fuerza mayor que las producidas por el solo efecto de la gravedad, tercero: El contenido de humedad del suelo afecta la infiltración a través de factores tales como la expansión coloidal y la consecuente reducción de la velocidad de infiltración a medida que el suelo se humedece y el espacio poroso se reduce.

1.4.7.3 Otros factores.

Las fuerzas capilares son capaces y retener una capa muy

delgada de agua alrededor de cada grano de suelo y la repulsión de esta capa después de condiciones intensas de sequía puede ayudar a la rápida distribución del agua a través del perfil del suelo, sin embargo, este efecto es muy pequeño en comparación con el movimiento total del agua infiltrada, por lo cual no se toma en cuenta.

Otro de los factores sería aquel producido por el atrapamiento de volúmenes de aire lo cual reduce la transmisibilidad. Este efecto es de corta duración y de poca importancia.

1.4.8 Características del agua infiltrada.

1.4.8.1. Temperatura.

La viscosidad del agua afecta la facilidad con que esta pueda moverse a través del espacio poroso del suelo, la temperatura que tiene influencia sobre la viscosidad, tiende a ejercer alguna influencia sobre la velocidad de infiltración. Existe escasa evidencia que ilustre definitivamente esta relación, aunque es sabido que la velocidad de infiltración, para condiciones de precipitación dadas es mas alta en verano y otoño que en invierno y al principio de primavera cuando las temperaturas son mas bajas.

1.4.8.2. Calidad del agua.

La calidad del agua es otro factor que tiene influencia sobre la infiltración, este factor es difícil de delimitar -- cuantitativamente.

La mayor cantidad del agua que pasa a través de un suelo colecta partículas finas de arcilla y las lleva en suspensión al interior del perfil del suelo, donde puede ocurrir el bloqueo de poros pequeños. Se ha encontrado que la velocidad de infiltración varia cuando el agua está contaminada por sales, particularmente en suelos muy alcalinos, debido a que -- las sales afectan no solo la viscosidad del agua sino también la expansión de los coloides (9),

1.5 Control de la infiltración.

1.5.1. Control de la infiltración excesiva.

Se puede probar que es deseable reducir la infiltración que ocurre en la práctica común de irrigación por dos razones si el suelo es permeable, la razón de controlar la infiltración es para minimizar las pérdidas por percolación del agua que avanza mas abajo de la zona radicular y además se puede, de esta manera , prevenir la excesiva acumulación de sales, por otro lado, si el subsuelo es lentamente permeable, pero está cubierto con un suelo mas permeable, la infiltración excesiva puede causar movimiento subsuperficial de agua y causar daños a los cultivos susceptibles. En el último caso la necesidad de control depende de las permeabilidades relativas de la superficie asi como del subsuelo las cuales determinan el grado de movimiento de agua subsuperficial que ocurre durante la irrigación además de la permeabilidad y profundidad del estrato limitante que determina la duración del flujo subsuperficial.

El medio mas obvio para controlar la excesiva infiltración es irrigar por aspersión debido a que la cantidad de agua a aplicar, está controlada por el sistema mas que por el suelo en irrigación superficial, la aplicación de agua puede ser acelerada reduciendo la longitud que tenga que recorrer el agua - incrementando el flujo por unidad de área y minimizando los -- factores que retardan el flujo sobre la superficie o en el surco.

1.5.2. Incremento de la velocidad de infiltración.

Existen dos formas generales de tratar de resolver el problema, la primera es mejorando la estructura del suelo y la segunda por medio de un adecuado manejo del agua.

1.5.2.1. Mejoramiento de la estructura del suelo.

Por medio de aditamentos químicos, los cuales generalmente solo incrementan la infiltración en los suelos afectados -- por el sodio, aunque la baja capacidad de infiltración es algunas veces atribuida a la excesiva cantidad de amonio y potasio en el suelo. Una muy baja cantidad de electrolitos puede dar lugar a una baja permeabilidad aún en suelos con alto contenido de calcio.

Si el suelo es de buena estructura y solo la parte superficial tiene baja permeabilidad, la aplicación de pequeñas cantidades de yeso tienen rápida respuesta.

1.5.2.2 Laboreo.

La efectividad de esta operación en el incremento de la velocidad de infiltración está delimitada por el mejoramiento que produce en el estrato que impide la entrada del agua.

Doneen y Henderson (1953), encontraron menor reducción en infiltración cuando un tractor pasó sobre un suelo seco -- que en un suelo húmedo, también encontraron que los suelos débiles cohesivamente fueron mas adversamente afectados por el laboreo cuando estaban secos que cuando estaban moderadamente húmedos.

1.5.3 Manejo del agua.

El manejo del agua involucra aspectos tales como métodos de irrigación, duración de la irrigación etc., el incremento de la frecuencia de riegos es el mas simple de aplicar porque el sistema de irrigación y el modo de operación no necesitan ser alterados. La principal desventaja es que se requiere una mayor cantidad de labor en la irrigación.

Otro factor sería prolongando el tiempo de irrigación -- si la cantidad de infiltración no llega a un valor despreciable, el prolongar el tiempo de aplicación incrementa la profundidad del agua aplicada aunque no en proporción directa.

También podría considerarse la utilización de la capacidad de almacenamiento del suelo, pues los problemas de baja infiltrabilidad pueden ser minimizados teniendo un máximo de

agua almacenada al principio del periodo de rápido uso de --
 agua por las plantas. Las reservas subsuperficiales de agua -
 producen marcados incrementos en la producción en los terre -
 nos en que la baja infiltrabilidad tiende a causar pérdidas.-

1.6 Ecuaciones aplicadas a la infiltración.

1.6.1. Ecuación de Kostiakov.

La dirección de las ecuaciones de infiltración han sido encaminadas a dar una expresión matemática del detrimento de la velocidad de infiltración con respecto al tiempo y es un intento para dar una explicación física de estos procesos. La aproximación matemática comienza físicamente y muestra que el detrimento en velocidad de infiltración es una consecuencia - del detrimento del gradiente del potencial matricial y que está asociado con la penetración del frente de humedecimiento - durante la infiltración.

Varios autores han estudiado y analizado el proceso de - infiltración en el suelo, destacándose principalmente la e --
 cuación enunciada por Kostiakov (1932), la cual es una expresión matemática de una recta representada en papel logaritmico para calcular la infiltración instantánea en centímetros - por hora, dicha ecuación es la siguiente:

$$I = K T^n$$

Donde:

I= Infiltración instantánea o considerada en un momento determinado y se expresa en centímetros por hora.

T = Tiempo que se aplica o permanece el agua en el suelo y se expresa en centímetros.

K = Es una constante, es un parámetro que está en función de las características del suelo como son porosidad, textura-etc., y representa la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial.

n = Pendiente de la recta. Parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo.

La constante K no debe ser confundida con la conductividad hidráulica solo se relacionan indirectamente. Los parámetros de la ecuación anterior no tienen significado físico y son evaluados de datos experimentales.

A partir de los datos de una prueba de infiltración se determinan las ecuaciones de velocidad de infiltración y lámina acumulada, al graficar estos datos se obtienen las curvas características de la infiltración, las cuales se observan en la figura 5.

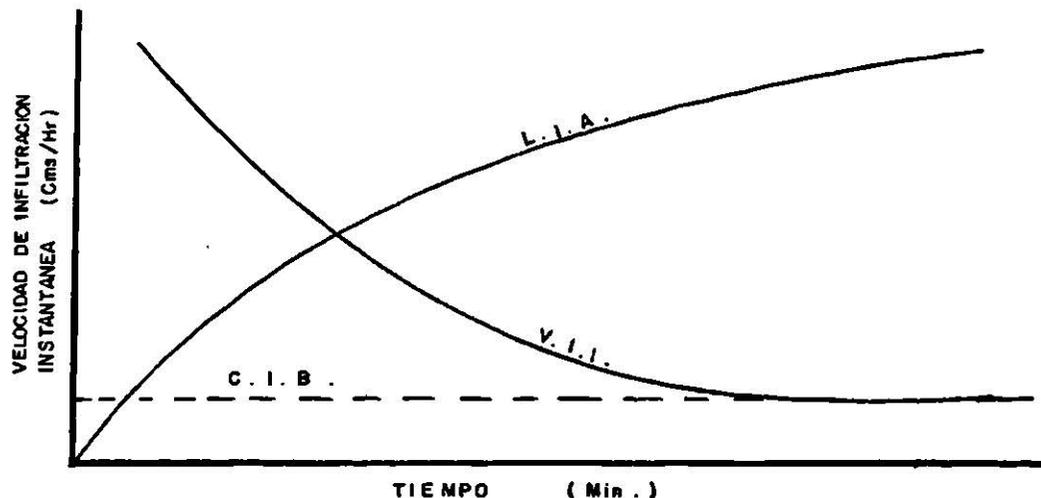


Figura 5. Representación de las curvas características de la infiltración.

En esta figura se presenta la curva de la velocidad de infiltración instantánea (V.I.I) , y lámina infiltrada acumulada (L.I.A) así como la forma de obtención del coeficiente de infiltración básica (C.I.B).

En la curva de análisis del régimen de infiltración instantánea se observa que, para dicha ecuación el valor de la infiltración varía con el tiempo puesto que (n), es negativa los valores de la infiltración decrecen en función del tiempo y la gráfica asume las características de una curva decreciente que se prolonga infinitamente hasta hacerse asintótica al eje de las X.

Para obtener los valores de K,n,C y m, para un suelo en particular se utiliza el método gráfico y/o el método de regresión lineal simple.

1.6.1.1. Método gráfico.

Se basa en algunas propiedades de la línea recta. El desarrollo es el siguiente:

Ecuación general de la línea recta.

$$y = a + bx.$$

Donde:

a = Intersección del eje "y".

b = Pendiente de la recta.

El valor de K se obtiene directamente en la recta que resulta de graficar en papel logaritmico la velocidad de infil -

tracción instantánea sobre el tiempo acumulado y proyectándola hasta la intersección con el eje "y".

La pendiente de la recta se obtiene construyendo un triángulo rectángulo y midiendo con una regla los diferenciales (dy) y (dx), como se expresa en la fórmula siguiente:

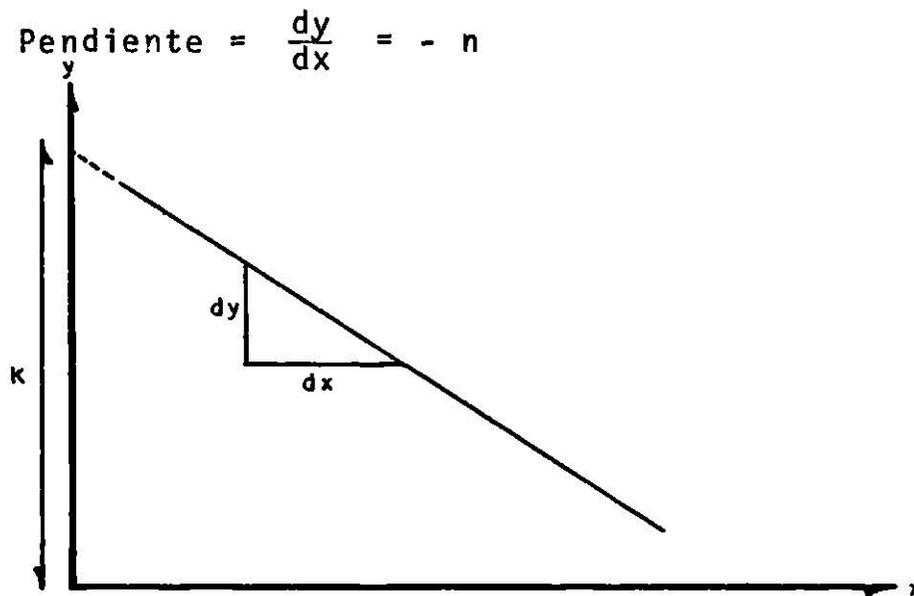


Figura 6. Gráfica que muestra la forma de obtención de los parámetros K y n de la ecuación de Kostiakov .

Considerando el aspecto de sumatoria de los valores de terminados en cada instante, es decir como valores acumulados estamos en presencia de la infiltración acumulada (D), cuya ecuación empírica responde a una fórmula similar a la anterior.

$$D = C T^m$$

Donde:

D = Lámina infiltrada en centímetros.

C = Lámina infiltrada acumulada en el tiempo de un minuto

o en la unidad de tiempo, depende de las características del suelo como textura, estructura, etc.

T= Tiempo.

m= Pendiente.

El exponente positivo de la pendiente indica que la curva crece en función del tiempo hasta llegar a hacerse mínima dentro del límite de saturación.

Considerando como en el caso anterior la expresión gráfica de dicha curva dentro de un sistema de coordenadas log-log la recta resultante poseerá una inclinación dada por el coeficiente angular (m), y la ecuación adquiere la forma:

$$\text{Log } D = \text{Log } C + m \cdot \text{Log } T$$

Donde : Log C corresponde al valor de la ordenada en el origen ligado a la humedad inicial en el suelo con que se comienza el ensayo de infiltración.

Para la obtención de los parámetros C y m , se grafica en papel logaritmico la infiltración acumulada sobre tiempo acumulado obteniéndose una línea recta la cual se proyecta hasta el eje y, donde C se lee directamente y (m) se obtiene construyendo un triángulo rectángulo y midiendo con una regla los diferenciales dy y dx. Ver figura 7.

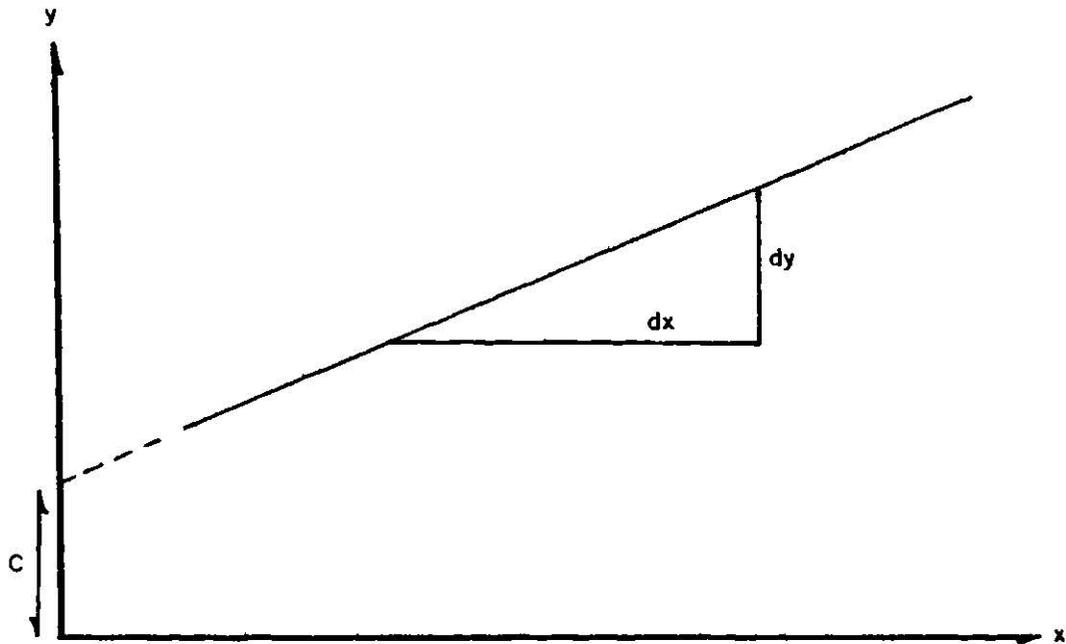


Figura 7. Gráfica que muestra la forma de obtención de los parámetros C y m por el método gráfico.

1.6.1.2. Método de regresión lineal simple.

Es recomendable la utilización de este método porque los resultados tienen mayor precisión .

Se utiliza para la obtención de los parámetros K y n.

El método se basa en el ajuste de los datos de campo de la curva de infiltración al modelo $I = K T^n$, si esta ecuación se expresa logarítmicamente con el objeto de linealizarla .

$$\text{Log } I = \text{Log } K + n \cdot \text{Log } T$$

Esta ecuación tiene la misma forma que el siguiente modelo.

$$y = b_0 + b_j X_j$$

Que es el modelo de regresión lineal simple.

La transformación de los términos se hace de la manera siguiente:

$$\text{Log I} = Y_i$$

$$\text{Log K} = b_0$$

$$n = b_i$$

$$\text{Log T} = X_i$$

Para la determinación de b_0 y b_i que son las incógnitas para resolver, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$b_i = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}$$

$$b_0 = Y - b_i X$$

$$\text{Antilog } b_0 = K$$

$$\text{Antilog } b_0 = K$$

Finalmente se obtiene r :

$$r = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\left[\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right] \left[\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right]}$$

r = Es la medida del grado o intensidad de asociación -- entre las variables y se conoce como coeficiente de correlación.

r^2 = Es un término asociado con r y nos indica el porcentaje de variación de y que es explicado por la regresión lineal de y en x .

1.6.2. Ecuación de Horton.

Horton (1933,1939), prestó gran atención a la investigación sobre la infiltración y desarrolló una ecuación que está muy de acuerdo con los conceptos físicos del proceso.

La proporción de infiltración está dada en el modelo de Horton por la ecuación:

$$i = i_s + (i_0 - i_s) \exp. (-Bt)$$

Que para propósito de comparación con la ecuación de -- Kostiaikov se integra para obtener la infiltración acumulativa

$$I = i_s t + \frac{(i_0 - i_s)}{B} [1 - \exp. (-Bt)]$$

En ambas ecuaciones, i_0 es la infiltración inicial en un tiempo $t = 0$, i_s , es la constante de infiltración la cual se presentó en un tiempo largo; B es un parámetro del suelo que describe la proporción en que decrece la infiltración.

Horton (1940), observó que la reducción después de iniciada esta, estaba fuertemente controlada por factores que operaban en la superficie del suelo. Entre los que estaban incluidos la expansión de los coloides del suelo y por la oclusión de pequeñas aberturas que de esta forma sellaban la superficie del suelo. La compactación de la superficie del suelo por la lluvia, también se considera importante en lugares en que no hay cultivo. Los datos de campo de Horton al igual que los de otros investigadores, indican que la infiltración decrece después de 2 ó 3 horas de iniciada.

La infiltración tiende a un valor constante que casi --

siempre es menor que la permeabilidad saturada del suelo.

Las bolsas de aire y la incompleta saturación han sido consideradas como las causas de estos resultados. Horton usó una función exponencial para describir el detrimento en infiltración debido a que los datos se adaptan muy bien.

1.6.3. Ecuación de Green y Ampt .

Green y Ampt (1911), derivaron una ecuación para la infiltración que estaba basada en un modelo físico del suelo, muy simple. Tiene la ventaja que los parámetros de la ecuación pueden ser relacionados con las propiedades físicas del suelo. Físicamente Green y Ampt asumieron que el suelo estaba saturado detrás del frente húmedo, esta asunción cuando se combinó con la ley de Darcy se prestó a la expresión:

$$L - Q_L \ln \left(\frac{I + L}{Q_L} \right) = \frac{K t}{f}$$

Donde: L es la profundidad del frente húmedo, Q_L es el potencial matricial en el frente húmedo y K es la permeabilidad del suelo, f es la porosidad del suelo y t es el tiempo.

La infiltración acumulativa es:

$$I = f L$$

Es interesante notar que la ecuación de Horton puede ser derivada usando la aproximación de Green y Ampt; lo cual fué demostrado por Gardner y Widstoe (1921) pero se necesita que exista una proporcionalidad entre el potencial del agua y el contenido total de agua en el suelo, así como una per

meabilidad constante.

1.6.4. Ecuación de Philip.

Las soluciones exactas para las ecuaciones de flujo para infiltración requieren procedimientos numéricos demasiado complejos para cualquier solución que no se haga por medio de -- computadoras. Un procedimiento que se presta a computación ha sido desarrollado por Philip. La solución aparece en una forma infinita de términos conteniendo valores de $t^{1/2}$.

$$i = S t^{1/2} + (A_2 + K_0) t + A_3 t^{3/2} + A_4 t^2$$

Donde: S es un parámetro que Philip llamó capacidad de absorción, A_2 , A_3 , A_4 , son características constantes del suelo y K es la conductividad hidráulica del suelo al contenido final de agua (generalmente se considera la saturación aunque no siempre lo es).

El primer término en la ecuación es exactamente la expresión que se obtendría con una entrada de agua al suelo en forma horizontal, bajo las mismas condiciones y limitaciones pero sin tomar la gravedad como factor, los otros términos -- son una consecuencia gravitacional. Los términos mas allá del cuarto en la serie infinita son muy pequeños para computarlos y se desprecian. Estos términos llegan a ser significativos -- a medida que aumenta el valor de t y la ecuación comunmente -- fracasa debido a la ausencia de valores grandes de t .

Para valores grandes de t :

$$i = K t$$

Una conclusión de los análisis hechos por Philip es que el frente húmedo toma una forma constante cuando la proporción se aproxima a un valor constante y que este frente se mueva hacia abajo a través del suelo con una velocidad constante (1), y (7).

1.7 Métodos para determinar la infiltración.

1.7.1 Cilindros infiltrómetros.

Es un método por inundación muy utilizado para determinar la infiltración, debido a que sus requerimientos de material especializado son pequeños y por su confiabilidad y fácil manejo, consta de 2 cilindros infiltrómetros de metal los cuales pueden ser de varios tipos, tales como cilindros individuales, cilindros múltiples, lisímetros de balanza y lisímetros para drenaje.

La cantidad de agua infiltrada por unidad de área varía marcadamente con el tamaño del cilindro, decreciendo en forma asintótica a medida que se incrementa el diámetro de este -- (Marshall y Strik, 1950).

Para controlar el movimiento lateral del agua bajo el -- cilindro, el cual es causa de los altos valores apartados de la realidad obtenidos con cilindros pequeños, la mayoría de los investigadores usan cilindros concéntricos y mantienen -- el agua estancada en ambos, y solo se hacen las medidas de infiltración en el cilindro interior.

Swartzendruber y Olson (1961 a, 1961 b), estudiaron la infiltración por medio de la técnica de los cilindros dobles en un suelo de tipo arenoso y encontraron que la velocidad de infiltración se incrementó marcadamente a medida que el cilindro externo se aproximó al central. Bajo condiciones análogas, la cantidad de agua infiltrada en el centro del anillo se incrementó cuando el diámetro del cilindro se redujo a 30 centímetros o menos. En estudios posteriores involucrando material uniforme, estratos restringidos, estratos impermeables diferentes texturas y diferentes profundidades de humedecimiento, encontraron que los mejores resultados fueron obtenidos en un cilindro interior de 101.6 centímetros de diámetro y con 121.92 centímetros para el exterior.

Con estos cilindros se espera tener una medida de infiltración muy aproximada a la de una área indefinida en tamaño, de la misma naturaleza, con la condición de que la profundidad de humedecimiento no exceda de 60.96 centímetros y que no haya otros estratos de suelo dentro de la zona de humedecimiento del agua.

La disturbancia del suelo al colocar los cilindros infiltrómetros en posición para hacer las mediciones puede tener efecto significativo en los resultados obtenidos.

La compactación del suelo adyacente a los límites del cilindro cuando este es introducido es inevitable. Los errores de este tipo se pueden reducir colocando los cilindros algún tiempo antes de efectuar las mediciones de infiltra -

ción.

El aire atrapado en la columna del suelo bajo el frente de avance del agua, puede tener efecto significativo en los resultados obtenidos y su efecto se espera que varíe de acuerdo al tamaño de los cilindros empleados y con la profundidad a que sean colocados.

Con este método de infiltrómetros de estancamiento el área delimitada se inunda completamente y es importante tener una área amortiguadora (buffer) inundada alrededor de aquella en que se van a hacer las mediciones.

Bajo la mayoría de las condiciones, la cantidad de infiltración es mucho mayor que la de evaporación, así que el error debido a esta puede ser despreciado.

Descripción del método.

Seleccionar una área que sea representativa para los propósitos de estas mediciones. Examinar y describir las condiciones del perfil del suelo sobre textura, estructura, contenido de agua y sodio adsorbido, con especial interés en los primeros 30 centímetros. Obtener muestras para determinar la cantidad de sodio (donde el sodio puede ser problema), y el contenido de agua. Tomar en cuenta la clase de cultivo, estado de crecimiento y describir cualquier clase de cubierta del suelo, condición de la superficie, tomar nota de cualquier otra condición observada que pueda tener alguna influencia en la cantidad de agua infiltrada. Tomar medidas de 3 sitios o

mas, seleccionar los sitios exactos para las medidas dentro de una área limitada, normalmente media hectárea o menos. A no ser que el objetivo sea hacer medidas de condiciones especiales, eludir áreas que puedan ser afectadas por una disturbancia inusual de la superficie, piedras que puedan dañar los cilindros, tráfico animal o de maquinaria, etc., Ponga el cilindro en el sitio seleccionado y presionarlo fuértemente dentro del suelo. Para cilindros de 61 centímetros de diámetro o menos, se introduce este, colocando una placa metálica sobre el cilindro y se golpea uniformemente con el martillo hasta lograr la profundidad deseada, ponga el cilindro verticalmente usando si es necesario un nivel de carpintero, no introduzca el cilindro en el suelo en forma irregular, es decir debe hacerse la introducción uniformemente, de lo contrario se disturba el núcleo del suelo dentro del cilindro. Si el cilindro entra al suelo con cierto ángulo, se saca y se coloca en otro sitio. Se coloca el cilindro a una profundidad aproximada de 10 centímetros.

Alrededor del cilindro en el cual se van a hacer las mediciones se coloca otro cilindro (amortiguador buffer), que cuando menos sea 20 centímetros de diámetro mas grande, se introduce este cilindro de 4 a 10 centímetros en el suelo, o bién se puede formar una especie de dique con una altura de 5 a 15 centímetros, evitando la disturbancia del suelo dentro del dique y manteniendo el límite interior de este, a cuando menos una distancia de 15 centímetros del cilindro.

Ponga cualquier clase de protección en el suelo dentro del cilindro central. Después llene el área exterior con una altura de 5 centímetros y mantenga aproximadamente la misma profundidad durante el periodo de observación. Inmediatamente después llene el cilindro central a la altura deseada (generalmente de 10 a 13 centímetros), quite la cubierta protectora del cilindro central y haga las medidas marcando el cilindro para que las medidas siguientes se hagan en este punto.

Para la mayoría de los suelos, observaciones a 1,3,5, 10,20,30,45,60,90 y 120 minutos y después cada hora, nos darán la información adecuada. Se pueden hacer observaciones frecuentemente en los suelos con un alto rango de infiltración. Como regla general la infiltración entre el tiempo que transcurre para hacer cada lectura no debe exceder de 2.54 centímetros. Se continúan tomando lecturas hasta que la cantidad de infiltración sea casi constante. Cuando el nivel del agua a bajado aproximadamente 5 centímetros en el cilindro, agregue la suficiente para llegar al nivel inicial. Tomar nota del nivel y del tiempo antes de llenar y el nivel después de esto, mantener el intervalo entre estas operaciones (rellenado) tan corto como sea posible a fin de evitar errores durante el llenado (cuando se analizan los datos se asume que el relleno es instantáneo).

1.7.2. Simulación de lluvia ó lluvia artificial.

Es un método muy satisfactorio para medir la cantidad de agua infiltrada proveida por lluvia artificial y debe te

ner las siguientes características:

A. La distribución del tamaño de las gotas debe ser uniforme sobre el área tratada.

B. La lluvia artificial debe ser similar a la natural respecto al tamaño de la gota, su velocidad, intensidad y valor total de energía.

C. El tamaño del área debe ser lo suficiente grande para muestrear la población (Aproximadamente 3.65 metros cuadrados para la mayoría de las condiciones del suelo).

D. La lluvia artificial debe ser aplicada no solo al área tratada, si no también alrededor de ella.

La diferencia entre el agua aplicada y el escurrimiento es generalmente tomada como el agua infiltrada. La cantidad de agua aplicada es medida continuamente por un calibrador de lluvia en el área tratada.

Descripción del método.

Se debe dar atención primeramente a una área que presente las condiciones para la cual las medidas sean las deseadas.

Si se van a hacer medidas con repetición como es generalmente el caso, se debe tener la seguridad de que hay suficiente área uniforme, tomando en cuenta no solo el área que recibe la lluvia artificial sino también aquella que se necesite para las diversas operaciones. La superficie del suelo en las diferentes áreas que serán utilizadas como repe-

taciones deberán estar exentas de micro-depresiones muy marcadas, grietas y otras irregularidades que puedan tener efecto diferencial en los resultados, la densidad de la vegetación deberá ser aproximadamente la misma.

Aplicar la lluvia artificial por medio de cualquier clase de simulador abarcando completamente el área de prueba y alrededores y medir la cantidad de agua acumulada. Alternativamente coleccionar la lluvia artificial de una pequeña área conocida por medio de cualquier clase de aparato, durante el escurrimiento normal. Medir la cantidad acumulada de escorrentía por medio de un registro colocado en un tanque calibrado o cualquiera de los demás métodos posibles.

Para calcular la cantidad de agua infiltrada se sustrae la cantidad de escorrentía de la cantidad de agua aplicada, para obtener una curva relativamente constante de datos de escorrentía, se divide el tiempo total en periodos razonables y se grafica el promedio de escorrentía acumulativa durante estos periodos tomando para lo anterior el punto medio de cada periodo,

1.7.3. Método de entradas y salidas.

Es un método por inundación muy utilizado para medir la infiltración en surcos, el cual tiene la ventaja de que el material especializado requerido es pequeño y no se requieren grandes volúmenes de agua.

Es importante tener una área amortiguadora (buffer) inun-

dada alrededor de aquella en que se van a hacer las mediciones. Con esta técnica de surcos sólo hay inundación parcial del suelo y la cantidad de agua infiltrada halla aplicación específica para condiciones de aplicación de este método bajo las cuales estas medidas son hechas y no para condiciones en que el área esté completamente inundada.

Descripción del método.

Se utilizan dos aforadores parshall en cada surco, los cuales se instalan a la entrada y salida de estos, el gasto a aplicar debe ser constante, para lograr esto se utilizan sifones, los necesarios para lograr un gasto máximo que no provoque erosión y además que no rebase la cantidad de conducción de los surcos. La velocidad de infiltración se mide determinando la diferencia de gastos a la entrada y salida del surco en un tiempo determinado y dividiendo esta cantidad entre el producto de la longitud del segmento de surco por el perímetro mojado del mismo.

MATERIALES Y METODOS.

A continuación se enlista el material utilizado en las pruebas de infiltración.

- A. 3 juegos de cilindros infiltrómetros .
- B. equipo para instalación de cilindros (Plancha y martinete)
- C. 3 tanques para agua con capacidad de 85 -litros.
- D. 1 cubeta.
- E. 1 pieza de hule u otro material impermeable.
- F. 1 reloj.

Descripción del método.

El método utilizado fué el de cilindros infiltrómetros- los cuales trabajaron a carga constante (12 Cms). por medio de un flotador colocado en el cilindro interior y conectado a un depósito de agua.

Se seleccionaron 4 áreas diferentes en cuanto a cobertura vegetal, estas fueron: Area de pastizal, área de matorral cultivo de avena y suelo desnudo, pero homogéneos con respecto a la textura del suelo, para esto último fué necesario - muestrear hasta 90 centímetros de profundidad, obteniéndose el porcentaje de arena, limo y arcilla de cada área, resultandoun suelo arcilloso en todos ellos.

Estos valores se mantuvieron muy similares en los sitios muestreados (ver tabla 6).

Se llevaron a cabo 3 pruebas de infiltración en cada área, con 3 repeticiones cada una, la duración de cada prueba fué de 264 minutos y los intervalos entre lecturas de la siguiente manera: 1,1,1,2,2,2,5,5,5,10,10,20,20,30,30,60 y 60, tiempo considerado como suficiente para llegar a la obtención del coeficiente de infiltración básica (CIB), esta estimación se hace en el campo al momento en que el decremento de la infiltración en la unidad de tiempo tiende a hacerse constante y después graficando en papel milimétrico la velocidad de infiltración instantánea sobre tiempo acumulado.

Se analizaron los datos de las 9 repeticiones hechas en las 3 pruebas de cada área para obtener la velocidad de infiltración instantánea, lámina infiltrada acumulada y velocidad promedio, graficándose posteriormente en papel milimétrico para la obtención del CIB y en papel log-log para la obtención de los parámetros K y n de la ecuación de Kostiakov.

De la misma forma se procedió con las pruebas de las otras áreas obteniéndose finalmente un promedio general de cada una de ellas. Los parámetros K y n de la ecuación de Kostiakov también se obtuvieron por el método analítico "Mínimos cuadrados", resultando valores muy semejantes.

RESULTADOS Y DISCUSION.

A continuación se presentan los resultados obtenidos -- en los diferentes sitios de muestreo, así como la interpretación de los valores y las posibles causas que los originaron.

TABLA 1. Valores del coeficiente de infiltración básica (Cms/Hr), obtenidos en los diferentes sitios - de muestreo. "Influencia de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	R E P E T I C I O N E S .			PROMEDIO. \bar{X}
	I	II	III.	
CULTIVO AVENA.	1.0	3.5	6.6	2.75
SUELO DESNUDO.	2.5	3.8	2.0	2.5
PASTIZAL.	5.2	6.6	5.0	4.8
MATORRAL.	1.0	0.9	1.2	1.0

La tabla 1 reporta los valores de CIB obtenidos en los diferentes sitios de muestreo, considerando 3 repeticiones - en cada lugar, el promedio de la columna de la derecha no corresponde al aritmético de las 3 repeticiones , lo anterior- se debe a que el CIB se obtiene gráficamente y de acuerdo a - la tendencia de la curva que resulta de graficar los datos - de todas las pruebas (9 repeticiones).

En esta tabla se puede observar que los mas altos valo-

res de CIB se obtuvieron en el área de pastizal (4.8 Cm/Hr), la razón de este alto valor es posiblemente debido a que el área cubierta por pastizal presenta una gran cantidad de raíces. El área de pastizal fué representada por zacate buffel el cual presenta una profundidad radicular estimada entre 0.9 y 1.5 metros, lo cual pudo haber influido en su alto CIB lo anterior concuerda con lo reportado en la literatura revisada ya que de acuerdo a Ward R.C.(1967), la densidad de la cubierta vegetal es tal vez mas importante que la diferencia en el tipo de vegetación.

Por otro lado si se analiza la tabla 1, se encuentra que el valor mas bajo corresponde al área de matorral donde se obtuvo un CIB promedio de 1.0 Cm/Hr., en esta área el suelo se encontraba muy compactado pués incluso se tuvieron problemas en la instalación de los cilindros infiltrómetros. En esta área el tipo de vegetación predominante es el mezquite, el cual por lo que se pudo observar tiene poca o ninguna influencia sobre el proceso de infiltración, también es probable que el bajo valor de este sea debido a la compactación del suelo.

Finalmente al observar los valores promedio de CIB, obtenidos en el suelo desnudo 2.5 Cm/Hr., y cultivo de avena 2.75 Cm/Hr., nos encontramos con cierta semejanza probablemente debida a que ambas áreas fueron laboreadas y hay poca

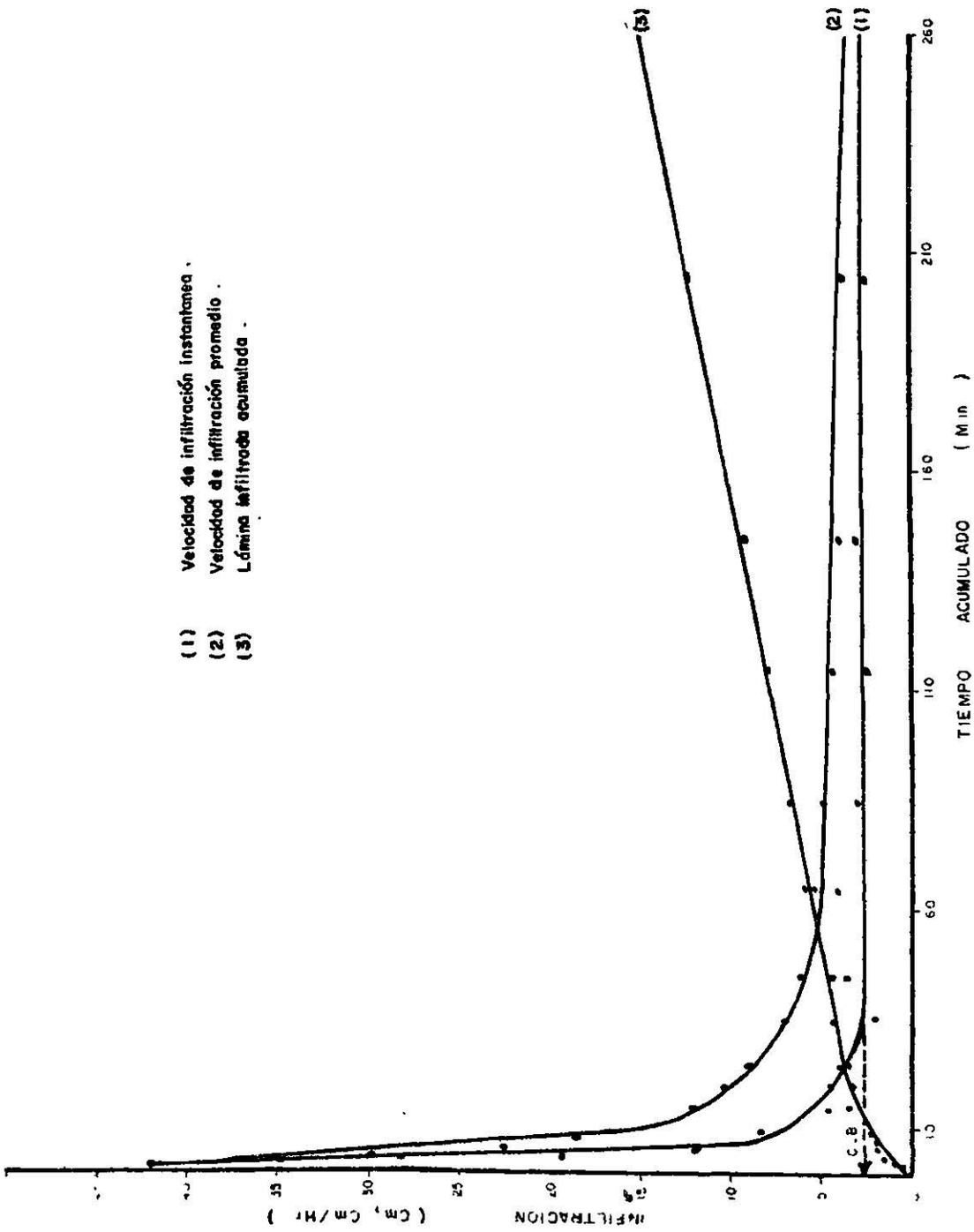
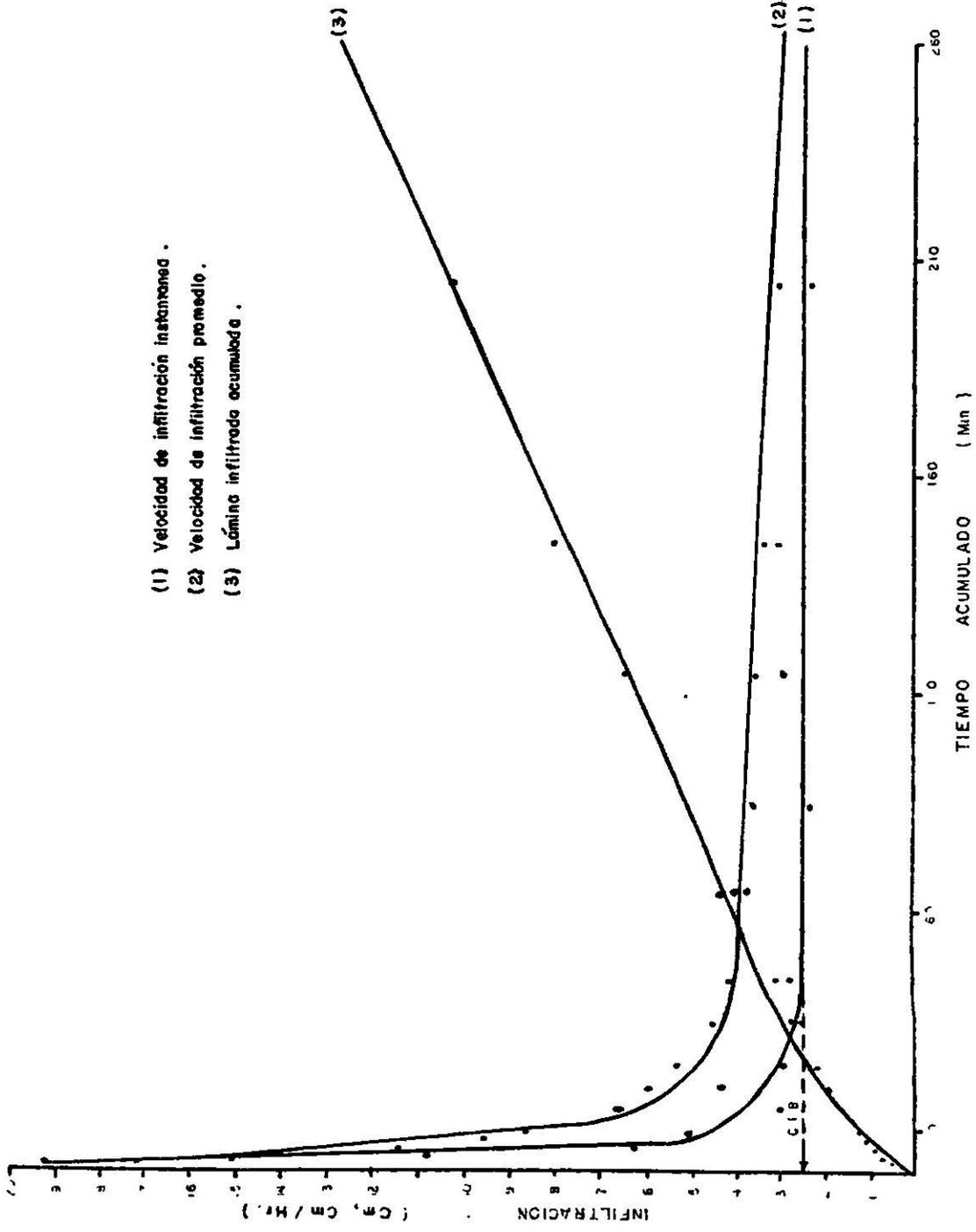


Figura 8 . Determinación del coeficiente de infiltración básica - (CIB), para el cultivo de avena. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.



- (1) Velocidad de infiltración instantánea .
- (2) Velocidad de infiltración promedio .
- (3) Límite infiltrado acumulado .

Figura 9. Determinación del coeficiente de infiltración básica - (CIB), para el suelo desnudo. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo" . Marín N.L. 1981.

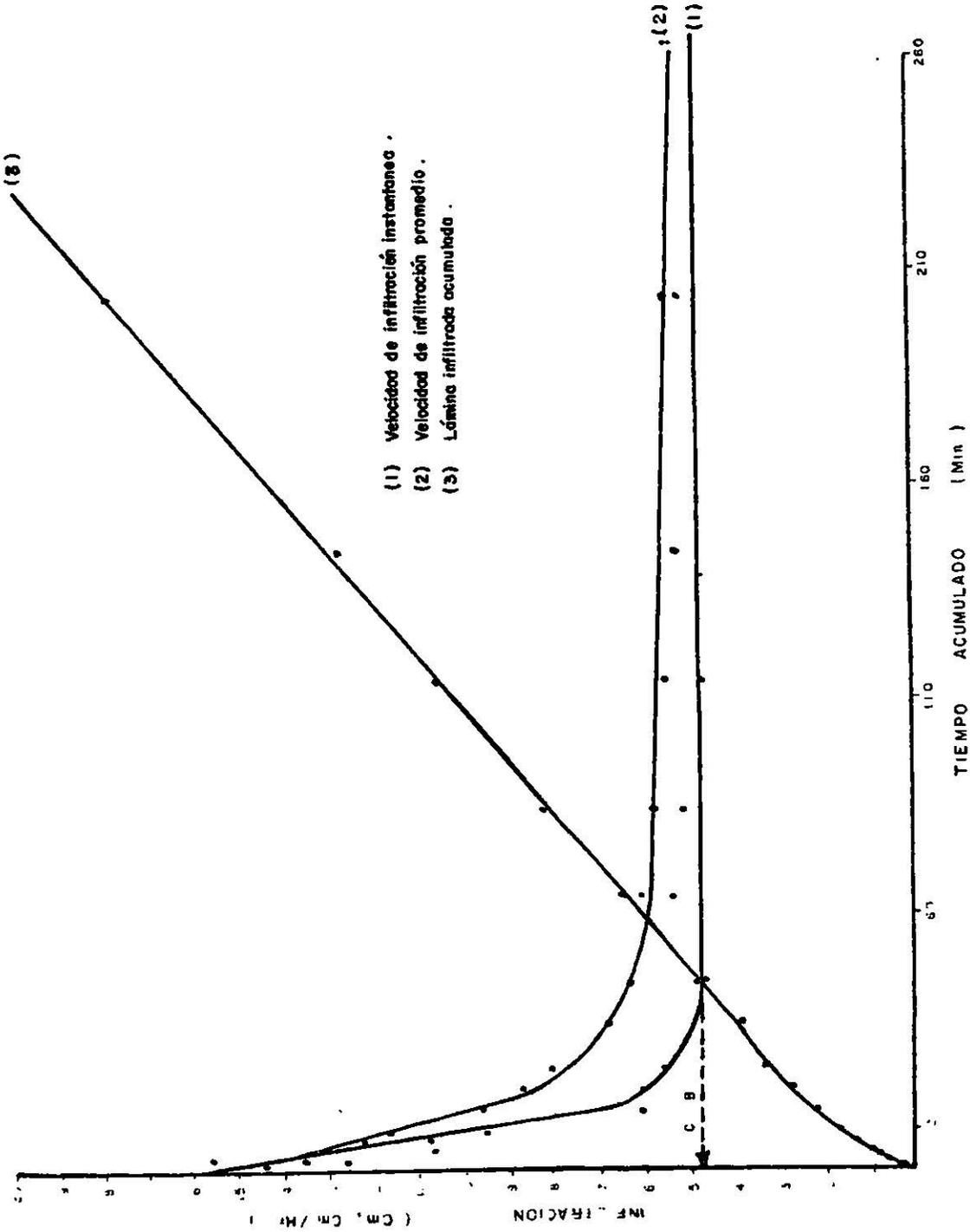


Figura 10. Determinación del coeficiente de infiltración básica (CIB), para el área de pastizal. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo. Marín N.L. 1981.

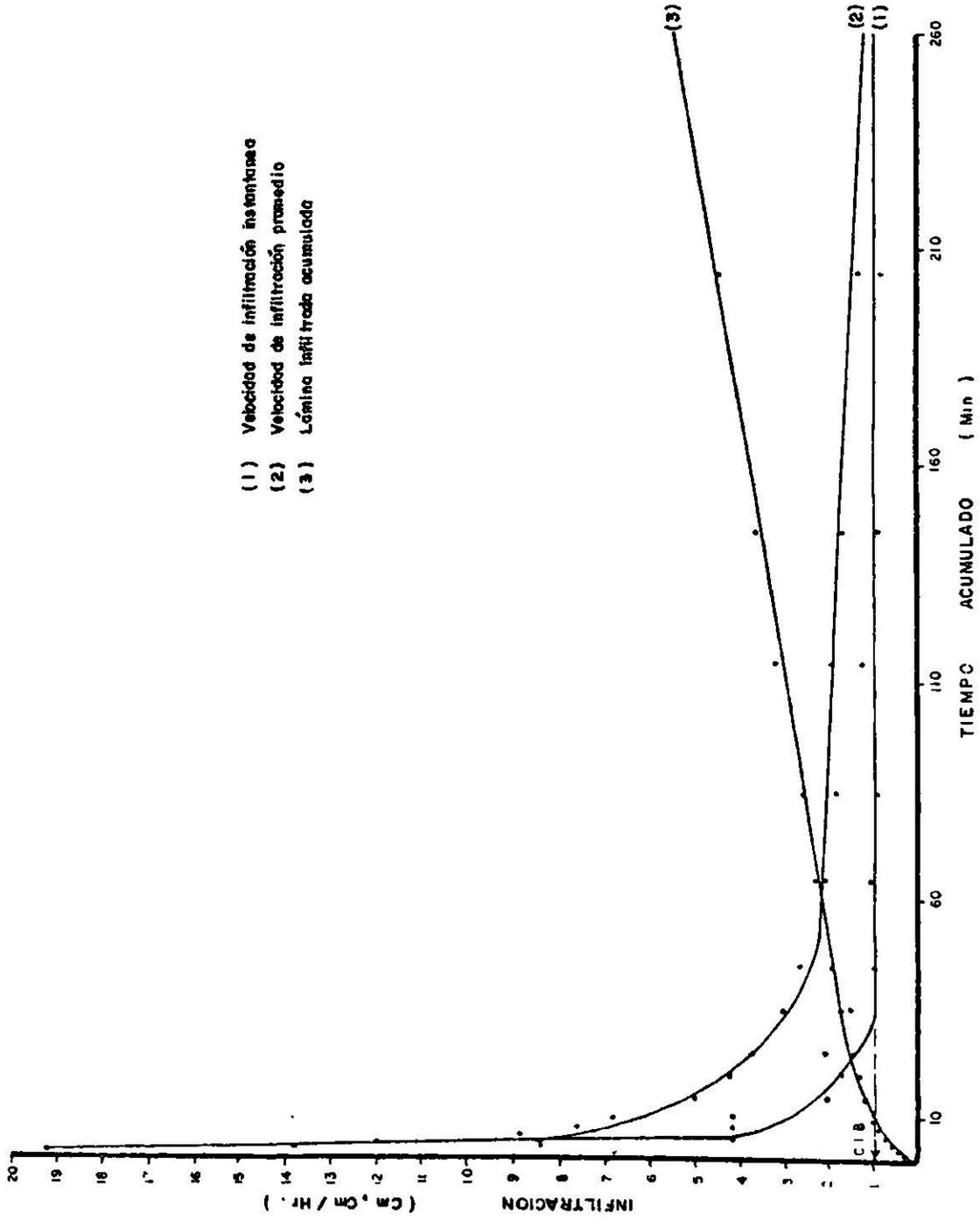


Figura 11. Determinación del coeficiente de infiltración básica (CIB), para el área de matorral. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

compactación, si es un poco mayor en el cultivo de avena, es porque la profundidad radicular de esta, está estimada en 1.5 metros, motivo importante porque favorece el proceso de infiltración.

TABLA 2. Comparación entre las ecuaciones para la velocidad de infiltración instantánea, determinadas por los métodos gráfico y analítico. "Influencia de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	METODO ANALITICO	METODO GRAFICO.
CULTIVO AVENA.	$I = 26.59 T^{-0.488}$	$I = 26 T^{-0.487}$
SUELO DESNUDO.	$I = 12.84 T^{-0.353}$	$I = 13 T^{-0.342}$
PASTIZAL.	$I = 14.51 T^{-0.238}$	$I = 13 T^{-0.218}$
MATORRAL.	$I = 12.01 T^{-0.539}$	$I = 14 T^{-0.59}$

En esta tabla se presentan los valores de la velocidad de infiltración instantánea obtenidos por ambos métodos y en los cuales se observa que no difieren grandemente, demostrándose además que ambos son confiables, con la salvedad de que el método analítico ofrece mas precisión.

A continuación se presenta la tabla 3, con los valores de velocidad de infiltración instantánea, determinados por el método analítico, y la tabla 4 con los valores determinados por el método gráfico.

TABLA 3. Ecuación de la velocidad de infiltración instantánea obtenida por el método analítico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	R E P E T I C I O N E S .			PROMEDIO.
	I	II	III	
CULTIVO AVENA	I=68.3 T ^{-0.942}	I=30.47 T ^{-0.446}	I=11.67 T ^{-0.118}	I=26.6 T ^{-0.488}
SUELO DESNUDO.	I=25.12 T ^{0.475}	I=17.4 T ^{-0.334}	I=13.21 T ^{-0.4}	I=12.9 T ^{-0.357}
PASTIZAL.	I=16.0 T ^{-0.261}	I=16.3 T ^{-0.181}	I=11.13 T ^{-0.186}	I=14.5 T ^{-0.238}
MATORRAL.	I=11.9 T ^{-0.533}	I=11.3 T ^{-0.522}	I=15.26 T ^{-0.534}	I=12.0 T ^{-0.539}

TABLA 4. Ecuación de la velocidad de infiltración instantánea obtenida por el método gráfico para los diferentes tratamientos. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	R E P E T I C I O N E S .			PROMEDIO.
	I	II	III	
CULTIVO AVENA.	I=12.5 T ^{-0.131}	I=67 T ^{-0.827}	I=36 T ^{-0.537}	I=26 T ^{-0.487}
SUELO DESNUDO.	I=21 T ^{-0.425}	I=16 T ^{-0.315}	I=14.5 T ^{-0.416}	I=13 T ^{-0.342}
PASTIZAL.	I=16 T ^{-0.246}	I=16 T ^{-0.164}	I=11.5 T ^{-0.151}	I=13 T ^{-0.218}
MATORRAL.	I=16 T ^{-0.516}	I=11 T ^{-0.488}	I=14 T ^{-0.519}	I=14 T ^{-0.590}

- (1) Velocidad de infiltración instantánea .
- (2) Velocidad de infiltración promedio .
- (3) Lámina infiltrada acumulada .

$$I = 26 T^{-0.487}$$

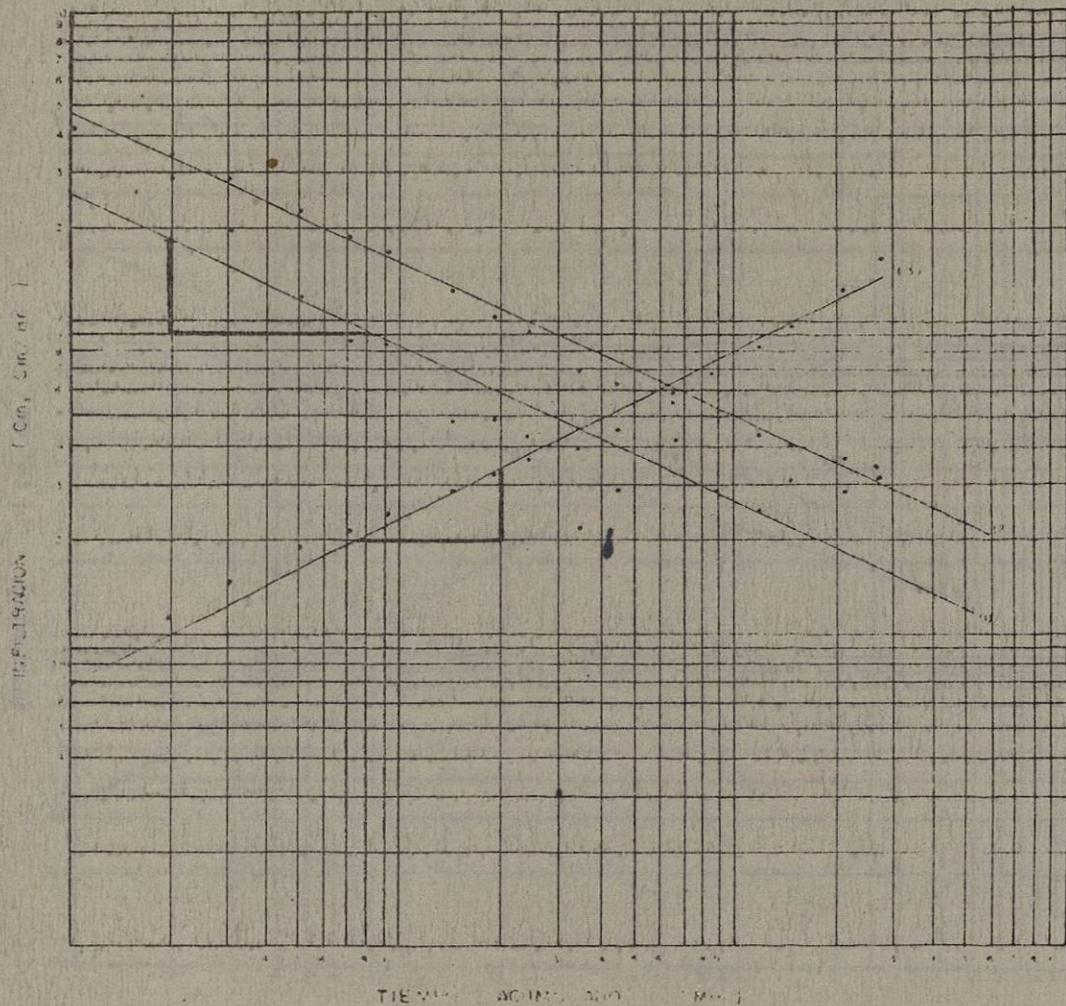


Figura 12. Ecuación de infiltración para el cultivo de avena obtenida por el método gráfico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

- (1) Velocidad de infiltración instantánea .
- (2) Velocidad de infiltración promedio .
- (3) Lámina infiltrada acumulada .

$$I = 13 T^{-0.342}$$

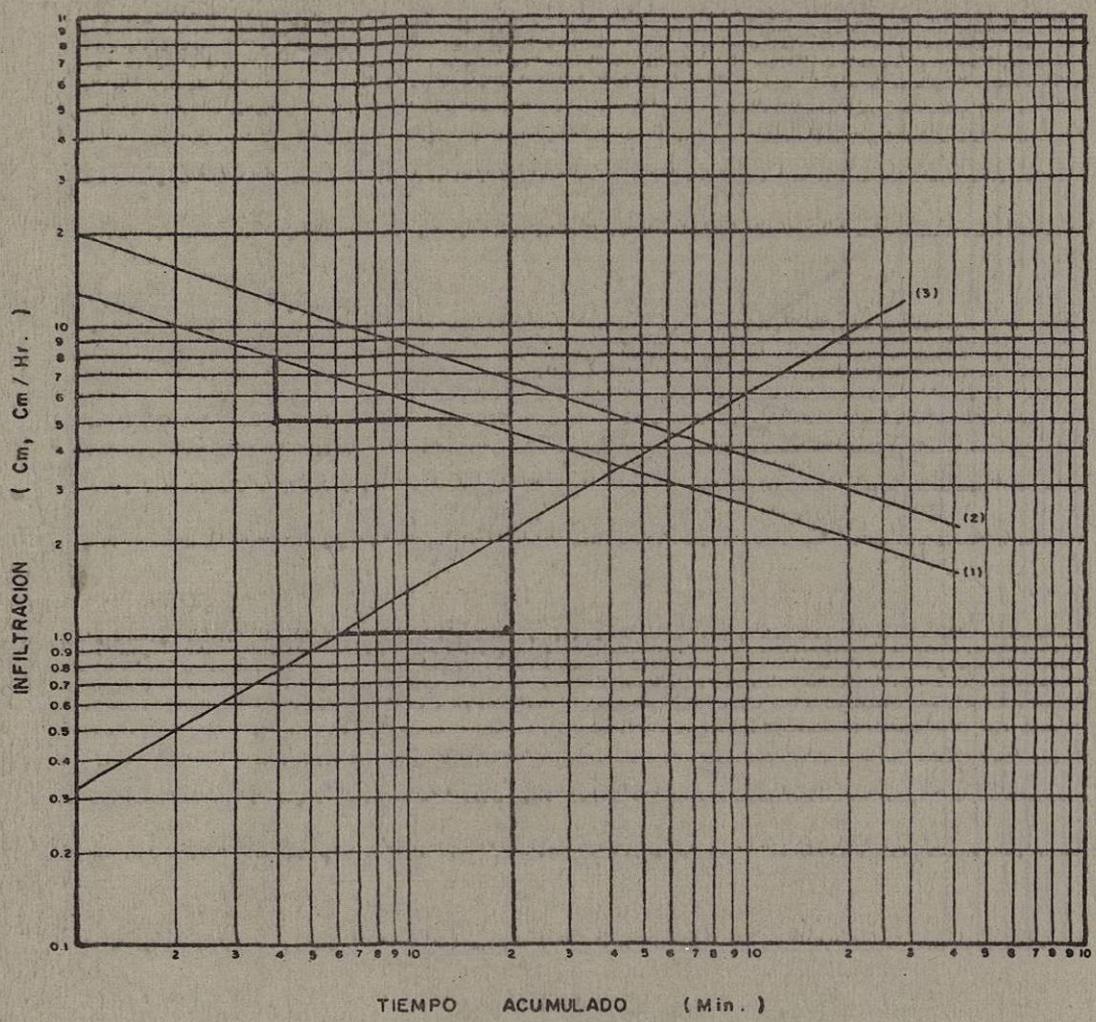


Figura 13 . Ecuación de infiltración para el suelo desnudo, obtenida por el método gráfico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

- (1) Velocidad de infiltración instantáneo .
- (2) Velocidad de infiltración promedio .
- (3) Lámina infiltrada acumulada .

$$I = 13 T^{-0.218}$$

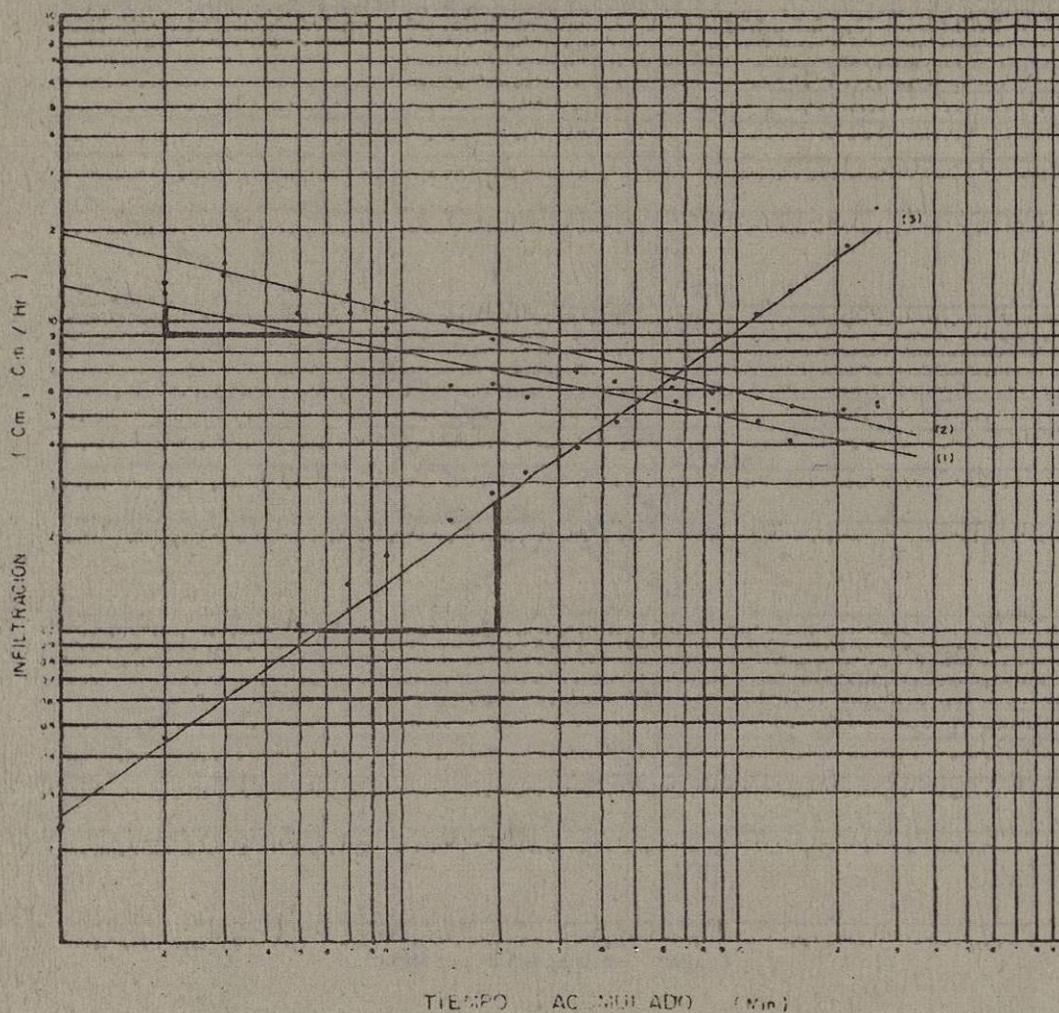


Figura 14. Ecuación de infiltración para el área de pastizal obtenida por el método gráfico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

- (1) Velocidad de infiltración instantánea
 (2) Velocidad de infiltración promedio
 (3) Límino infiltrado acumulado

$$I = 14 T^{-0.590}$$

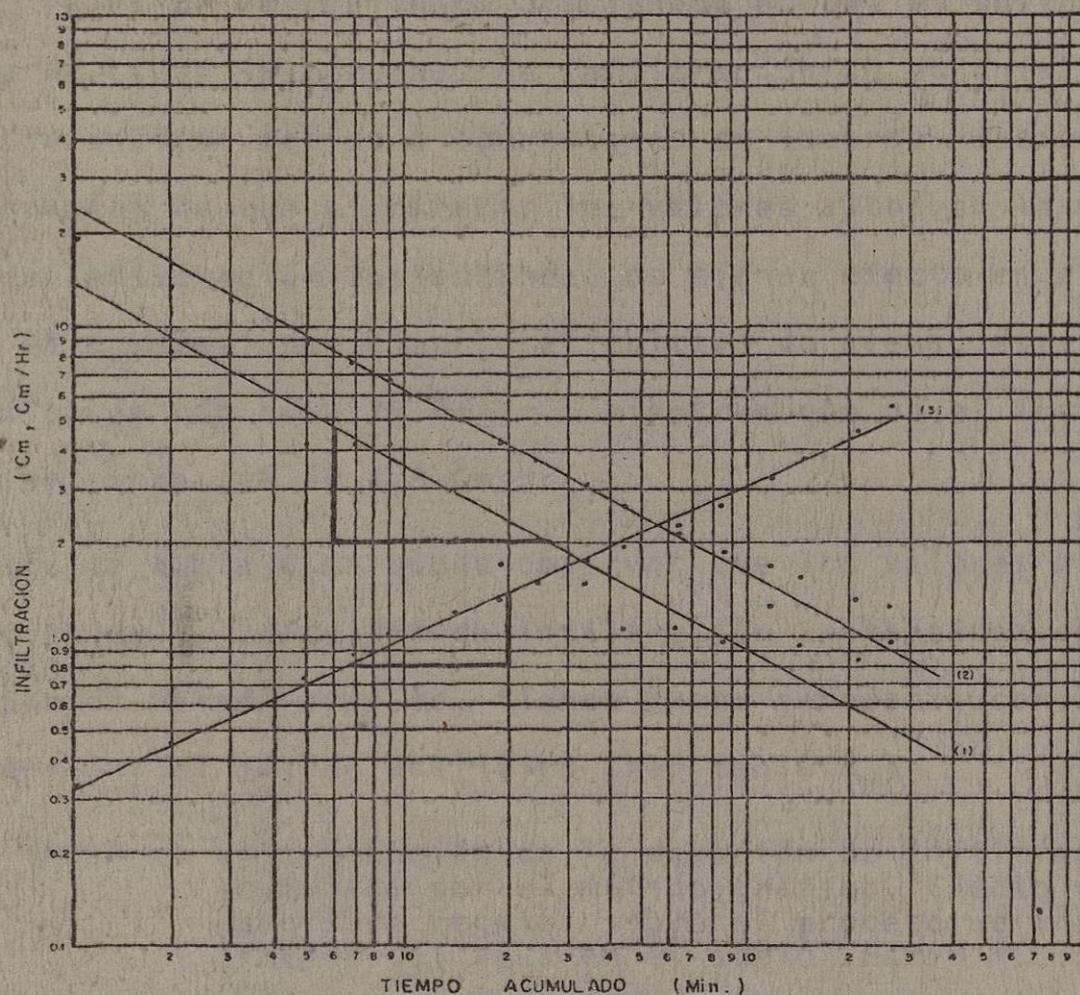


Figura 15. Ecuación de infiltración para el área de matorral obtenida por el método gráfico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

En la tabla 3 se puede observar que los valores de la velocidad de infiltración instantánea se mantienen mas o menos constantes en las áreas de suelo desnudo, pastizal y matorral, exceptuando el cultivo de avena donde se obtuvo un valor fuera de la realidad, ocasionado porque el suelo al momento de hacer las pruebas de infiltración se encontraba súmamente suelto, debido a operaciones de laboreo. Haciendo la observación de que al parecer los valores altos en la velocidad de infiltración instantánea, no tienen efecto en el CIB, pues si tomamos como ejemplo el cultivo de avena, este tiene un valor de CIB de 2.75 Cm/Hr., mientras que en el área de pastizal este fué de 4.8 Cm/Hr.

En la tabla 4 se puede observar que los valores de la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea obtenidos por el método gráfico, tienen mucha semejanza con los obtenidos por el método analítico (Ver tabla 3)

TABLA 5. Determinación de la ecuación de infiltración acumulada por el método gráfico. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo".Marín N.L.1981.

AREA.	R E P E T I C I O N E S .			PROMEDIO. X
	I	II	III	
CULTIVO AVENA.	$D=2.1 T^{0.243}$	$D=1.1 T^{0.482}$	$D=0.41 T^{0.739}$	$D=0.7 T^{0.535}$
SUELO DESNUDO.	$D=1.0 T^{0.439}$	$D=0.28 T^{0.705}$	$D=0.36 T^{0.555}$	$D=0.32 T^{0.558}$
PASTIZAL.	$D=0.3 T^{0.75}$	$D=0.32 T^{0.772}$	$D=0.23 T^{0.781}$	$D=0.25 T^{0.771}$
MATORRAL.	$D=0.41 T^{0.41}$	$D=0.25 T^{0.519}$	$D=0.42 T^{0.485}$	$D=0.32 T^{0.483}$

TABLA 6 . Determinación de la densidad aparente (Gr/Cm^3) para los diferentes sitios de muestreo. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	PROFUNDIDAD (Cms.)	DENSIDAD APARENTE. (gr/cm^3)	PROMEDIO. \bar{X}
CULTIVO AVENA.	0- 30	1.32	1.44
	30- 60	1.39	
	60- 90	1.60	
SUELO DESNUDO.	0- 30	1.10	1.19
	30- 60	1.13	
	60- 90	1.33	
PASTIZAL.	0- 30	1.21	1.34
	30- 60	1.40	
	60- 90	1.41	
MATORRAL.	0- 30	1.30	1.30
	30- 60	1.28	
	60- 90	1.34	

En esta tabla se puede observar que los valores promedio de la densidad aparente, se mantienen dentro de un mismo rango, siendo mayor para el cultivo de avena ($1.44 \text{ gr}/\text{Cm}^3$), y correspondiendo el valor mas bajo al suelo desnudo con ($1.19 \text{ gr}/\text{Cm}^3$).

En la misma tabla se observa que la densidad aparente -- varia directamente con la profundidad, es decir al aumentar --

esta, aumenta el valor de la densidad aparente, posiblemente por el efecto de la compactación del suelo.

TABLA 7. Determinación de la textura para los diferentes sitios de muestreo. "Efecto de la cobertura vegetal sobre el proceso de infiltración del agua en el suelo". Marín N.L. 1981.

AREA.	PROFUNDIDAD. Cms.	% ARENA.	% LIMO.	% ARCILLA.	TEXTURA.
CULTIVO AVENA.	0- 30	16.76	34.72	48.52	Arcilloso.
	30- 60	10.76	36.72	52.52	id.
	60- 90	14.76	34.72	50.52	id.
SUELO DESNUDO.	0- 30	14.76	30.72	54.52	id.
	30- 60	12.76	32.72	54.52	id.
	60- 90	16.76	30.72	52.52	id.
PASTIZAL.	0- 30	12.76	36.72	50.52	id.
	30- 60	14.76	34.72	50.52	id.
	60- 90	10.76	36.72	52.52	id.
MATORRAL.	0- 30	14.76	36.72	48.52	id.
	30- 60	10.76	32.72	48.52	id.
	60- 90	14.76	34.72	50.52	id.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo al análisis de los resultados del presente trabajo se pueden llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

En forma general, los valores de CIB obtenidos, resultaron ser mas altos de los que reporta la literatura para suelos arcillosos.

Se debe tomar en cuenta el efecto de la vegetación, para determinar las características de infiltración de un suelo que estará sujeto a riego.

Existe un efecto muy marcado de la densidad radicular sobre el proceso de infiltración, encontrándose que el suelo cubierto con pastizal reportó los valores mas altos de CIB (4.8 Cms/Hr), en contraposición del suelo cubierto por vegetación de matorral (1.0 Cms/Hr).

No existen diferencias altamente significativas entre los métodos gráfico y analítico para determinar las ecuaciones de infiltración de los suelos.

Para trabajos posteriores se recomienda efectuar análisis de algunas otras características que puedan tener efecto sobre el proceso de infiltración, tales como: Contenido de materia orgánica, contenido de sales, compactación del suelo y densidad radicular en el perfil del suelo en relación a su cubierta vegetal.

R E S U M E N .

El presente trabajo, se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado en el municipio de Marín N.L., durante los meses de abril, mayo y junio de 1981.

El objetivo fué el de determinar el efecto de la vegetación sobre el proceso de infiltración. Para tal fin se seleccionaron 4 áreas de diferente cobertura vegetal, pero con características de suelo similares.

Las diferentes cubiertas vegetales bajo estudio fueron: pastizal, matorral, cultivo de avena y suelo desnudo. El área de pastizal básicamente cubierta por zacate buffel y la de matorral representada por mezquite principalmente.

Las determinaciones que se hicieron fueron: Coeficiente de infiltración básica, ecuación de la velocidad de infiltración instantánea (según Kostiaikov) por los métodos gráfico y analítico, determinación de textura y densidad aparente en 3 estratos de 30 centímetros de profundidad cada uno.

En cuanto al coeficiente de infiltración básica, los resultados ordenados de mayor a menor quedaron como sigue: Pastizal 4.8 Cms/Hr., cultivar de avena 2.75 Cms/Hr., suelo desnudo 2.5 Cms/Hr., y matorral 1.0 Cms/Hr.

Al obtener las ecuaciones de infiltración, no se encontraron diferencias significativas entre los 2 métodos.

B I B L I O G R A F I A .

- (1) Baver L.D. 1956. Soil Physics. John Wiley and son Inc. New York.
- (2) Bennet H.H. 1955. Elements of soil conservation - Mc. Graw. Hill Book Company Inc. pp. 107-110.
- (3) Donahue R.L. et al. 1971. Soils. Prentice- Hall - Inc. Englewood Cliffs. N.J. pp. 209-211
- (4) Hillel Daniel. 1971. Soil and Water. Academic -- Press. N.Y. London. pp. 131-153.
- (5) Luque J. y J. Paoloni. 1971. Manual de operacio - nes de riego. pp. 240-249.
- (6) Ortiz V.B. Edafologia . Chapingo Mex. pp. 148.
- (7) Pérez Rodriguez M.A. 1975. Tesis sin publicar. -- Modelos matemáticos del movimiento del agua en - riego por surcos. Esc. Nac. Agric. Colegio Post-- graduados . Chapingo Mex. pp. 11-15.
- (8) Vega Gutierrez J.D. Curso de uso y manejo del -- agua. Instituto Tecnológico y de Estudios supe -- riores de Monterrey. pp. 121-122 .
- (9) Ward R.C. 1967. Principles of Hydrology Mc. Graw Hill Publishing Co. pp. 181-189.

