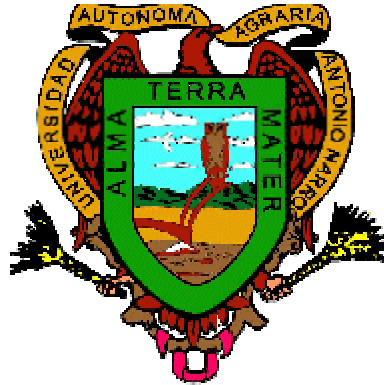


# UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERIA



EVALUACIÓN DEL PROCESO DE INFILTRACIÓN EN SUELOS  
CASTAÑOZEM, ALTERADOS MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE LODOS  
TRATADOS Y ESTIÉRCOL BOVINO

POR

VICTOR ALEJANDRO ALVAREZ ORTIZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO  
DE:

INGENIERO AGRÓNOMO  
EN IRRIGACIÓN

Buenavista Saltillo, Coahuila, México Mayo del 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE INFILTRACIÓN EN SUELOS  
CASTAÑOZEM, ALTERADOS MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE LODOS  
TRATADOS Y ESTIÉRCOL BOVINO

Realizado por:

VICTOR ALEJANDRO ALVAREZ ORTIZ

Que somete a la consideración de H. Jurado Examinador  
Como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

---

Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga  
Asesor principal

---

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho  
Asesor

---

M.C. Luis Samaniego Moreno  
Asesor

---

M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos  
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista Saltillo, Coahuila, México Mayo del 2002

## DEDICATORIA

Al Dr. Juan Francisco Pissani Zúñiga, asesor principal de mi tesis, por su constante apoyo y consejos que dedicó en mi formación. A mis asesores Dr. Javier de Jesús Cortes Bracho y al MC. Luis Samaniego Moreno por sus valiosa participación con su experiencia en el presente trabajo.

Con muy especial admiración la dedico a mis padres, que con su apoyo y esfuerzo han sabido sacarnos adelante.

Sr. Carmelino Álvarez Gómez  
Sra. Pascuala Ortiz Estrada

A mis hermanos, por su apoyo moral que siempre me brindaron, siendo indispensable en mi formación profesional.

Rubí Magdalena Álvarez Ortiz  
Samuel de Jesús Álvarez Ortiz  
Obdulia del Carmen Álvarez Ortiz  
Irene del Refugio Álvarez Ortiz  
Yasmín Araceli Álvarez Ortiz  
Lino Orlando Álvarez Ortiz  
Everardo Álvarez Ortiz

Con buenos recuerdos la dedico a Ana María Rivero Rugerio (qepd).

También la dedico con mucho cariño a la familia Guillermo Encina, que me brindó apoyo durante mi estancia en Saltillo.

A todas aquellas personas que de una u otra manera participaron en la realización de este trabajo.

## AGRADECIMIENTO

A DIOS:

Por haber permitido terminar con mis estudios satisfactoriamente, guiándome por un buen camino, permitiendo a mis padres ver la formación de su fruto y cumplir esa meta tan deseada.

Agradezco a mis padres y mis hermanos, el inmenso apoyo que me brindaron durante toda mi formación, dejando de comer el pan de cada día por ver cumplir con éxito mi carrera.

A mis abuelos, que nunca me faltaron esos buenos consejo.

A mis demás familiares: tíos, primos y sobrinos.

A la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por abrirme las puertas para poder continuar con mi formación profesional.

A los ingenieros del Departamento de Riego y Drenaje que aportaron sus conocimientos para mi formación.

## INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
Hipótesis	3
Justificación	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Infiltración	5
2.2 Infiltración en suelos estratificados	9
2.2.1 Infiltración en suelos que forman costra	10
2.3 Infiltración del agua de lluvia	11
2.4 Factores que afectan la infiltración	11
2.4.1 Características de la lluvia	12
2.4.2 Condiciones de la superficie del suelo	13
2.4.3 Condiciones de la cubierta superficial	15
2.4.4 Transmisibilidad de la masa del suelo	16
2.4.5 Características del agua	18
2.5 Métodos para estimar la infiltración	20
2.5.1 Estudios de parcela	20
2.6 Clasificación de la infiltración	25
2.7 Formas de expresar la infiltración	26
2.8 Ecuaciones para estimar la infiltración	26
3. MATERIALES Y METODOS	34
3.1 Localización	34
3.2 Clima	34
3.3 Lisímetros	36
3.4 Suelos	36
3.5 Lodos	37
3.5.1 Metales contenidos en el estiércol y en los lodos	38

3.2.1	Químicos orgánicos sintéticos contenido en el estiércol y en los lodos.	39
3.2.2	Microorganismos en los lodos.	39
3.2.3	Nutrimiento contenido en los lodos y estiércol.	40
3.2.4	Salinidad del estiércol y lodos.	41
3.6	Pruebas de infiltración.	42
3.7	Tratamientos.	48
3.8	Diseño experimental y distribución de los tratamientos.	49
3.9	Análisis de medias.	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1	Análisis físico químico del suelo	53
4.2	Modelos y coeficientes básicos de infiltración	53
4.3	Análisis del efecto de los tratamientos en la infiltración	54
4.3.1	Análisis de varianza	59
5.	CONCLUSIONES.	68
6.	RECOMENDACIONES.	70
7.	RESUMEN	71
8.	LITERATURA CITADA	73
9.	APÉNDICE.	79
	APÉNDICE A	80

## INDICE DE CUADROS

CUADROS	PAGINA
1 Resumen de las características de las ecuaciones de Horton, Kostiakov, Philips y Green- ampt.	33
2 Precipitación y temperatura media mensual y anual que predominan en la zona de influencia de la Facultad de agronomía de la Universidad de Nuevo León	35
3 Características de las plantas de tratamiento. San Rafael y Noreste	37
4 Análisis físico de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas Residuales : San rafael y Noreste, Monterrey N.L.	37
5 Metales contenidos en Estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales : San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.	38
6 Análisis de contaminantes orgánicos en estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: San Rafael y Noreste, Monterrey N.L. (mg/l)	39
7 Microorganismos analizados en los lodos seleccionados contra Los límites permisibles o aceptables de la EPA para la aplicación al suelo de lodos residuales.	40
8 Análisis de fertilidad del estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.	41
9 Análisis de salinidad del estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales seleccionadas: San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.	42
10 Análisis del agua utilizada para las pruebas de Infiltración	43
11 Ejemplo del cálculo de las velocidades e infiltración	44
12 Análisis físico químico de los suelos para el llenado de los	53

Lisímetros	
13 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del lodo San Rafael (A)	55
14 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del lodo de la planta Noreste (N)	55
15 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del testigo (B)	56
16 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela con estiércol (E)	56
17 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela con lodo de la planta San Rafael (A)	56
18 Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela con lodo de la planta Noreste (C)	58
19 Análisis de varianza para antes de aplicar los tratamientos.	59
20 Análisis de varianza de los análisis de infiltración de los lodos.	60
21 Pruebas de medias de los análisis de infiltración de los lodos.	60
22 Análisis de varianza para después de aplicar los tratamientos	60
23 Pruebas de varianza para después de aplicar los tratamientos	60
24 Análisis de varianza para $I_{cum}$ . antes de aplicar los tratamientos	61
25 Análisis de varianza para $I_{cum}$ . De los análisis de infiltración de los lodos	61
26 pruebas de medias para los lodos	62
27 Análisis de varianza para $I_{cum}$ . después de aplicar los tratamientos	62
28 Pruebas de medias para $I_{cum}$ . después de aplicar los tratamientos.	62
29 Modelos promedios de los análisis de infiltración	63
30 Modelos promedios de los análisis de infiltración de los lodos	63



## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>PAGINAS</b>
1. Velocidad de infiltración de agua al suelo en función del tiempo.	6
2. Perfil del humedecimiento del suelo durante la infiltración. (a) aspecto frontal del perfil; (b) representación de la distribución de la humedad en función de la profundidad.	7
3 Infiltración de agua desde un surco a un suelo seco.	8
4 Efecto de partículas finas en suspensión en el agua en la infiltración	19
5 Plano con la localización y distribución de los tratamientos en la estación lisimétrica.	52
6 Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I), promedio (Ip) lámina infiltrada acumulada (Icum) antes y después de la aplicación de los lodos de la planta San Rafael (A)	64
7 Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I), promedio (Ip) lámina infiltrada acumulada (Icum) antes y después de la aplicación de los lodos de la planta Noreste (C)	65
8 Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I), promedio (IP) lámina infiltrada acumulada (ICUM) antes y después de la aplicación del estiércol (E)	66
9 Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I), promedio (Ip) lámina infiltrada acumulada (Icum) correspondientes al testigo (B)	67

## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia técnica del proceso de infiltración para los fines de un manejo eficiente de los recursos agua y suelo, determina la posibilidad de almacenar suficiente agua para los cultivos y una recarga mayor en los acuíferos. El conocimiento de este proceso y sus relaciones con sus propiedades de los suelos y formas de suministro de agua son indispensables en los estudios de disponibilidad de agua y de conservación de los recursos naturales. Si la infiltración es inadecuada, las plantas quedan expuestas a la deficiencia hídrica y pérdidas de productividad. Además, la infiltración está inversamente relacionada con el escurrimiento superficial. Si la infiltración es deficiente y los aportes de agua a la superficie de agua abundantes, el riesgo de erosión por arrastre superficial del suelo se agudiza.

El escurrimiento e infiltración son procesos de conocimiento indispensable para el manejo de conservación de suelos, ya que de estos depende la cantidad de humedad disponible en el suelo para el crecimiento de las plantas. La velocidad de infiltración, juega uno de los principales papeles en todos los estudios relacionados con la capacidad agraria de los suelos, ya que interpreta diversas propiedades, además mediante el proceso de infiltración aunado al de percolación, las corrientes subterráneas tienen oportunidad de recargarse por lo que cualquier alteración de estos dos procesos tienen consecuencias en el ciclo hidrológico.

Muchos trabajos de investigación han sido conducidos sobre la infiltración del agua al suelo. Los principios básicos del flujo de suelo-agua

están bien entendidos. Por lo tanto, algunos problemas surgen al aplicar la teoría de infiltración en condiciones de campo. Primero, la infiltración es grandemente afectada por las condiciones de la superficie del suelo. Estas condiciones son a su vez afectadas por una serie de factores que influyen: prácticas culturales, tipo de suelo, clima, crecimiento de las plantas, otras actividades biológicas, lluvias y riego. Frecuentemente las condiciones de la superficie del suelo cambian durante el proceso de riego. Esto hace difícil aplicar la teoría de la infiltración cuando los parámetros del suelo (permeabilidad, porosidad, contenido de humedad, densidad) están de hecho, cambiando constantemente.

Outwater (1994) menciona que la aplicación de lodos tratados al suelo está siendo considerado como uno de los métodos de disposición más atractivos, debido a su costo relativamente bajo y a su potencial como una amplia solución de aplicación.

La aplicación de lodos residuales a suelos agrícolas es una práctica habitual en países desarrollados por razones prácticas y económicas (Ottavian; et al., 1991). El lodo tratado puede aplicarse a suelos agrícolas, forestales, para rehabilitar terrenos marginales o en sitio de contacto público (parques, jardines, cementerios, etc.) la aplicación de lodo al suelo ha sido practicada satisfactoriamente desde antes de los años de 1940 y ha sido una práctica común en los Estados Unidos de América (E.U.A.), debido a su costo relativamente bajo y a su potencial como una amplia solución de disposición ( Metcalf y Eddy, 1991 ). Además de que puede ser una fuente significativa de materia orgánica y nutrientes; pueden aportar apreciables cantidades de Nitrógeno y Fósforo además de Potasio, este ultimo en menor cantidad. Por lo general, el lodo contiene 30 - 60% de materia orgánica, la cual puede mejorar las propiedades físicas del suelo tales como: estructura, capacidad de retención del agua, infiltración, aireación, por lo cual facilita la labranza y disminuye la erosión del suelo.

La utilización de fertilizantes orgánicos en la agricultura se ha venido realizando desde la antigüedad, al utilizar los residuos ganaderos, agrícolas y humanos para restituir la materia orgánica del suelo y así aumentar la retención de los nutrientes. La materia orgánica juega un importante papel en la movilización y adsorción de diferentes elementos del suelo ( Schnitzer, 1991).

El presente trabajo está enfocado al análisis del proceso de infiltración en suelos Castañozem alterados, mediante la incorporación de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y estiércol bovino.

### Objetivo

Evaluar el proceso de infiltración en suelos castañozem, alterados mediante la incorporación de lodos de dos diferentes plantas tratadoras de aguas residuales y estiércol bovino.

### Hipótesis.

La velocidad de infiltración básica del suelo y la lámina infiltrada acumulada, son afectadas con la aplicación de lodos y estiércol bovino. Y sus valores más altos sera con la aplicación del estiércol debido a su alto contenido de materia orgánica.

### Justificación.

Considerando el alto deterioro y la baja productividad en los suelos que existen actualmente, el presente trabajo contribuirá al conocimiento de la utilización de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales, que pueden mejorar las características físicas del suelo. Los lodos así como las aguas residuales contribuyen como un recurso hidrico en las zonas con alta

densidad de población, en las que hay problemas de falta de agua y su reutilización e incorporación puede ser una alternativa para esos problemas.

Los lodos se pueden utilizar como un sustituto parcial de fertilizantes químicos costosos y pueden actuar como mejoradores o acondicionadores del suelo para facilitar el transporte de nutrientes, aumentar la retención del agua y mejorar la aptitud del suelo para el cultivo (Pissani, 1990; Metcalf y Eddy, 1991).

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Infiltración

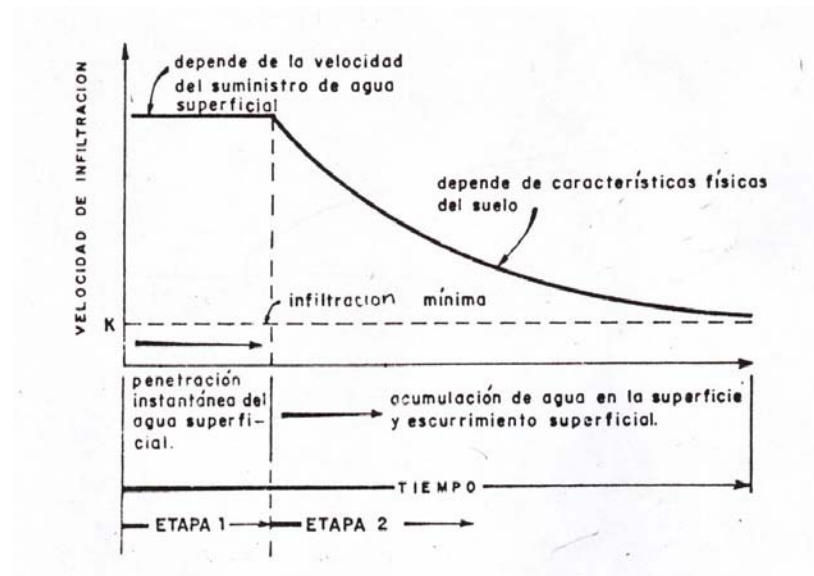
Infiltración es el proceso por medio del cual el agua pasa del medio ambiente al interior del suelo a través del mismo. ( Gutierrez y Duñez 1998 ); es el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie cuando ésta se mantiene en contacto con agua a la presión atmosférica ( Hillel y Daniel 1971 ).

El papel que juega la infiltración consiste en la determinación de la cantidad de agua que puede producir una cuenca como recarga de humedad en el suelo ( Kramer 1969 ). Además, las tasas de infiltración determinan la cantidad de agua que entra en el suelo, así como la cantidad de exceso de lluvia que producirá escurrimiento, por ello el conocimiento del proceso de infiltración es necesario para el manejo eficiente del suelo y del agua ( Gutierrez et. al., 1979 ). Por lo que Hillel (1971) señala que el conocimiento de los procesos de infiltración se encuentran determinados por las propiedades del suelo y por la eficiencia del manejo de agua en el suelo.

La infiltración se inicia tan pronto el agua entra en contacto con el suelo. Si el suministro inicial es lento el agua penetra tan rápidamente como llega, pero si aquel aumenta, llega un momento en que el aporte excede la capacidad del suelo de absorber el agua, ésta comienza a acumularse y escurrir sobre la superficie. Si el suministro de agua se mantiene por debajo

de la velocidad de infiltración del suelo, la penetración depende de la velocidad con que el agua superficial fluye hacia él. Tan pronto ésta velocidad supera la infiltración, la penetración está determinada por las características físicas del perfil (Figura. 1).

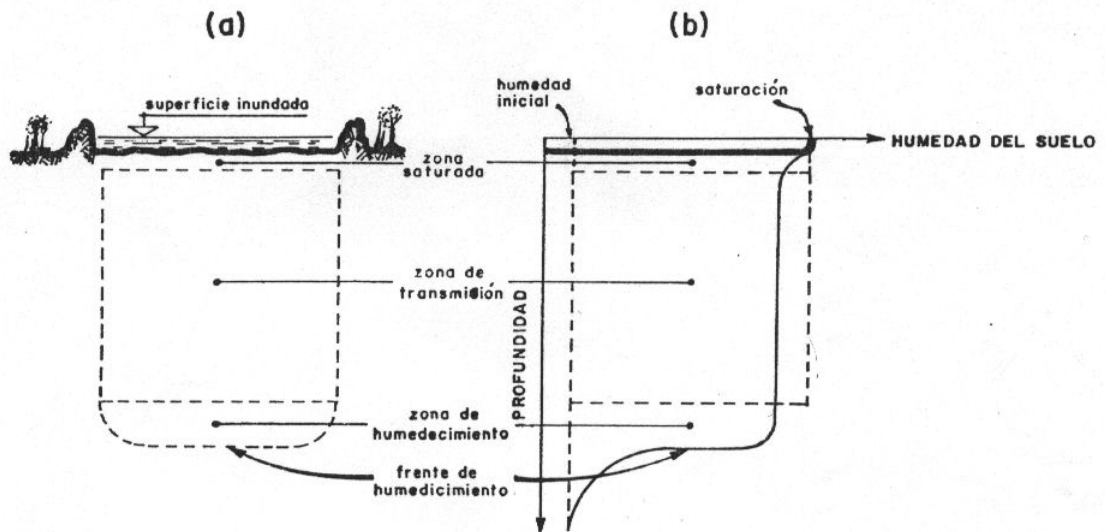
La infiltración disminuye gradualmente con el tiempo. Es máxima en el comienzo del proceso, particularmente si el suelo está bastante seco, y tiende luego progresivamente hacia un valor mínimo, llamado "Velocidad de Infiltración Básica". En la primera etapa el aporte de agua a la superficie es menos rápida que en la intensidad del suelo para absorberla; en la segunda etapa, las condiciones físicas del suelo limitan gradualmente la velocidad de penetración hasta aproximarse a  $K$ , la conductividad hidráulica a saturación.



**Figura . 1.** Velocidad de infiltración de agua al suelo en función del tiempo.

El perfil de un suelo inundado durante la infiltración revela las siguientes características (Figura. 2): la superficie del suelo está saturada hasta una profundidad de algunos milímetros a varios centímetros; bajo

ésta zona saturada se extiende una zona de humedad uniforme constante y casi saturada, llamada “ zona de transmisión”; más abajo de ésta se encuentra la “zona de humedecimiento” en el cual la humedad varía desde el contenido casi saturado da la zona de transmisión hasta el contenido de humedad inicial del suelo.



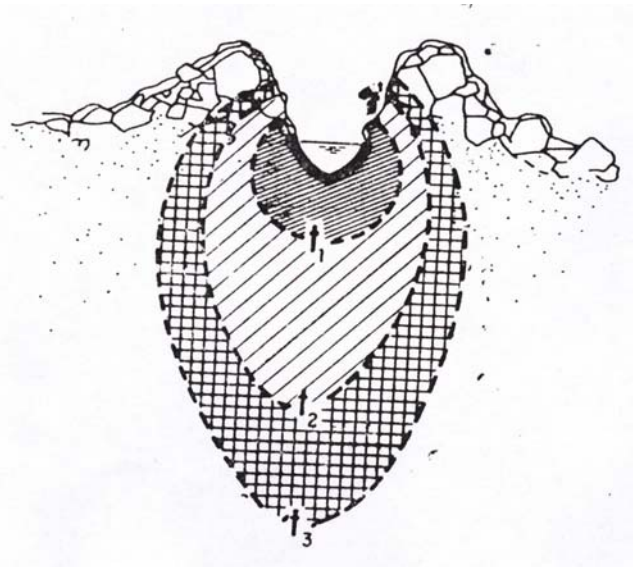
**Figura. 2.** Perfil del humedecimiento del suelo durante la infiltración. (a) aspecto frontal del perfil; (b) representación de la distribución de la humedad en función de la profundidad.

La zona de transmisión con este marcado gradiente de humedad denominado “frente de humedecimiento” suele detectarse fácilmente por la diferencia de color entre el suelo mojado (oscuro) que transmite el agua y el suelo (seco) que la recibe. La razón del pronunciado gradiente de humedad que se identifica con el frente de humedecimiento radica en el hecho de que la conductividad hidráulica decrece considerablemente con la disminución de la humedad. Como el flujo es el producto de un gradiente potencial por la conductividad hidráulica para que el agua descienda, la diferencia de potencial debe ser muy grande entre puntos y muy cercano para compensar la baja conductividad del suelo más seco.



Durante la infiltración, la zona casi saturada se extiende en profundidad continuamente, siempre precedida por un frente de humedecimiento.

La infiltración vertical a un suelo inicialmente insaturado ocurre bajo la influencia combinada de gradientes mátricos y gravitacionales. En un comienzo, cuando apenas se han saturado los primeros centímetros, el gradiente mátrico es mucho mayor que el gradiente gravitacional y gobierna la velocidad de penetración del agua. Además si el agua no inunda toda la superficie, si no que penetra por un surco o una grieta, lo anterior hace que la infiltración se extienda alrededor del punto de entrada con igual rapidez en todas direcciones produciendo una distribución prácticamente radial del agua (Figura. 3) a medida que el agua penetra más profundamente en el suelo, el gradiente máximo disminuye puesto que la diferencia de potencial ( $d\Psi$ ) entre la superficie ( $\sim 0$  porque está saturada) y el frente de humedecimiento se reparte en una distancia ( $dz$ ) cada vez mayor. El frente de humedecimiento inicial ( $t_1$ ) es prácticamente radial por el predominio del gradiente mátrico sobre el gradiente gravitatorio. Gradualmente se invierte esta situación, hasta que el contorno del frente húmedo acusa el predominio del gradiente gravitatorio. ( $t_2, t_3$ ).



**Figura. 3.** Infiltración de agua desde un surco a un suelo seco.

Esta tendencia continúa hasta que el gradiente mátrico está muy reducido en comparación con el gradiente gravitatorio y éste rige el proceso (Figura. 3,  $t_2$ ). Además, como el gradiente gravitatorio es igual a uno, (expresado en dimensiones de longitud es igual a Z), la velocidad de infiltración se hace constante. Este es el momento en que el proceso alcanza su valor mínimo (Figura. 1).

## **2.2 Infiltración en suelos estratificados**

El efecto de la estratificación del perfil en la infiltración fue estudiado por Hanks y Bowers (1962), quienes usaron una técnica matemática para analizar la ecuación de flujo, y por Miller y Gardner (1962), quienes hicieron experimentos para ver el efecto de estratos delgados interpuestos en perfiles uniformes. Un suelo conductivo debe tener succión matricial continua y valores de potencial hidráulico a lo largo, sin contar con una secuencia de estratos. Sin embargo, el humedecimiento y los valores de conductividad pueden exhibir abruptas discontinuidades entre los límites de los estratos.

Un caso típico es aquel en que un estrato de arena de alta conductividad hidráulica saturada está sobre uno de textura fina. En cuyo caso, la cantidad de infiltración está controlada en un principio por el estrato de arena, pero cuando el frente de humedecimiento llega a penetrar el estrato de textura fina, se espera que la infiltración decrezca. Debido a esto, es el estrato de mayor conductividad el que controla el proceso. Si la infiltración se prolonga, entonces se puede desarrollar un potencial de presión positivo en el suelo arenoso, justamente arriba del límite con el estrato de textura fina.

En el caso contrario cuando en la parte superior está un estrato de textura fina y en el inferior uno de textura gruesa, la cantidad de infiltración

inicial está de nuevo determinado por el estrato superior. A medida que el agua llega a la interfase con el estrato de textura gruesa, sin embargo, puede decrecer la infiltración. El agua en el frente de humedecimiento normalmente está bajo succión y ésta succión puede ser tan alta que permita la entrada en los poros relativamente grandes de la capa arenosa. Esto explica la observación (Miller y Gardner, 1962) de que el avance del frente de humedecimiento se detenga por un tiempo hasta que el potencial de presión en la interfase crezca lo suficiente para la penetración en el material arenoso. Por eso, una capa de grava o arena en medio de un suelo con textura fina, lejos de promover el movimiento de agua en el perfil puede impedirlo.

### **2.2.1 Infiltración en suelos que forman costra**

Un caso especial muy importante de suelos estratificados es aquel en que en un perfil uniforme se desarrolla una costra en la superficie. La costra se puede formar por la acción de fuerzas desintegradoras (gotas de lluvia o turbulencia del agua de riego) que desagregan o suspenden material coloidal. Esto produce costras superficiales que ejercen gran influencia en el proceso de infiltración, las costras superficiales están caracterizadas por tener gran densidad, poros finos y baja conductividad saturada. Una vez formada una costra superficial puede impedir en gran cantidad la toma de agua por el suelo, aún si la costra es muy delgada, estas costras alcanzan espesores de apenas unas fracciones de milímetros a unos pocos milímetros de espesor y en ellas las partículas de arcilla libradas en la desintegración de agregados se encuentran obturando los poros. La permeabilidad de estas capas puede ser de 200 a 2000 veces menor que la del suelo bajo ellas (Harshall, T. J; 1959). Una falla al tomar en cuenta la formación de costras puede dar como resultado una estimación no exacta de la infiltración.

### **2.3 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 estancamiento superficial. Si la intensidad de la lluvia es menor que el valor inicial de la capacidad de infiltración del suelo, pero más 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 estancamiento. Por otro lado, cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración en 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 lluvia.

### **2.4 Factores que afectan la infiltración**

Moore y Col. (1979), Branson y Col (1981) agrupan los factores que influyen en el nivel de infiltración del suelo, en seis grupos principales, siendo estas: a) La cobertura del suelo, con sus porcentajes de hojarasca, piedras y grava; b) Características físicas del suelo como: textura, estructura, densidad aparente y contenido de humedad; c) Características químicas del suelo, como es material parental, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de base y contenido de sodio; d) Factores bióticos como: vegetación, cobertura vegetal, densidad de la vegetación, actividad microbiana, tipos y cantidad de fauna en el suelo; e) Condiciones climáticas, estación del año, intensidad, forma y duración de la precipitación, y la velocidad del viento y f) Fisiografía de área, pendiente del terreno, exposición de la superficie y altitud del lugar.

De manera similar Musgrave, (1955) Moore, y Col. (1979), resumen los factores que afectan la infiltración en cinco categorías, los cuales son:

1. Propiedades físicas: Textura, estructura, densidad aparente, temperatura, cobertura del suelo: vegetal, piedras y grava.
2. Propiedades químicas: Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Por ciento de Saturación de Base (PSB), etc.
3. Factores bióticos: cobertura vegetal, Flora en general, fauna, así como la situación del agua en el suelo, (por ciento de humedad, capacidad de retención ,etc.).
4. Condiciones climáticas: estación del año, temperatura, precipitación etc.
5. Fisiografía de área: Pendiente del terreno, etc.

#### 2.4.1 Características de la lluvia

Normalmente la velocidad de infiltración es grandemente afectada, cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, esto se debe 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.

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

#### 2.4.2. Condiciones de la superficie del suelo

- a. **Materia orgánica.** Cuando se incorpora materia orgánica al suelo, la velocidad de infiltración llega a ser alta en un período relativamente largo, dependiendo principalmente de la cantidad de descomposición de la materia. Efectos similares en la porosidad del suelo son producidos por la rotación del cultivo. Los suelos con agregados grandes, tienen poros más grandes y consecuentemente mayor capacidad de infiltración. La incorporación excesiva, puede ocasionar pérdidas de suelo por altas velocidades de infiltración.
  
- b. **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 es rápida y efectivamente reducida. Este efecto es más notable en suelos arcillosos, los cuales pueden llegar a ser prácticamente impermeables de este modo, los suelos arenosos los cuales 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.
  
- c. **Lavado de partículas pequeñas.** Las partículas pequeñas que trae en suspensión el agua de infiltración puede obstruir los poros en la superficie del suelo, y de esta forma afecta la cantidad de infiltración. Esta clase de partículas son particularmente abundantes en la superficie del suelo al término de un período de sequía, por lo cual tienden a obstruir la superficie del suelo durante las primeras lluvias. Bajo otras condiciones, sin embargo, estas partículas finas son efecto del golpeo de las gotas de lluvia .

- d. Profundidad del almacenamiento superficial del agua. En la mayoría de las condiciones naturales, la profundidad del agua que se acumula sobre la superficie durante la infiltración, es pequeña. Debido a que la gravedad es uno de los principales factores que causan la entrada de agua al suelo, se espera que varíe la cantidad de infiltración con la profundidad del agua acumulada, particularmente en las primeras etapas del proceso, cuando solo un estrato delgado de la superficie del suelos ha sido estratificado, así que la resistencia a la entrada del agua es comparativamente baja. Sin embargo, debido a evidencia experimental Philip concluyó que éste efecto es menor. La infiltración inicial puede ser incrementada como un máximo alrededor del dos por ciento por cada centímetro (cm) adicional en la profundidad del agua.
- e. Formación de grietas. La remoción de humedad de las capas superficiales del suelo por evaporación, particularmente en suelos arcillosos, da por resultado la formación de grietas. Por estos medios, la capacidad de infiltración es considerablemente incrementada, así que durante las primeras etapas de la lluvia ocurren cantidades mayores de infiltración. En el caso de suelos desnudos, las grietas se cierran una vez que el suelo ha sido humedecido, pero un suelo que ha sido secado por transpiración de las plantas, puede tomar numerosas precipitaciones antes de que las grietas vuelvan a cerrar.
- f. Pendiente. Como se puede esperar, la pendiente afecta indirectamente la capacidad de infiltración. En pendientes fuertes, el agua se mueve rápidamente sobre la superficie, dejando poco tiempo para la infiltración, mientras que, en superficie planas o con

poca pendiente, el agua se mueve lentamente o da lugar a estancamientos, dando lugar a grandes cantidades de infiltración.

- g. Laboreo. Técnicas como la formación de terrazas y trabajos en contorno, tienden a incrementar la infiltración retardando el flujo superficial, lo cual da lugar a un mayor tiempo para la toma de agua. Las prácticas de manejo de suelo tienen mucho que ver respecto a la cantidad de agua infiltrada. Arado, subsoleo o cualquier otra clase de movimiento del suelo normalmente incrementa la abertura del suelo, especialmente si está susceptible a fractura por la operación de labrado

#### 2.4.3. Condiciones de la cubierta superficial

- a. Tipo de vegetación. la cubierta vegetal tiende a incrementar la infiltración en comparación con áreas de suelo desnudo, no solo retardando, 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 semi – natural, la mayor parte de la evidencia experimental indica que la infiltración es más alta bajo áreas forestales que bajo pastizales aun que hay casos que muestran que la infiltración no necesariamente se incrementa con el desarrollo de vegetación forestal. La densidad de la cubierta



vegetal es tal vez más importante que la diferencia en el tipo de vegetación.

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

#### 2.4.4 Transmisibilidad de la masa del suelo

- a. 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 súper capilar a través de los cuales el agua se puede mover debido a la fuerza de gravedad. La porosidad no capilar, definida en estos términos, no está necesariamente relacionada a la porosidad total, sin embargo, puede ser un indicador de potencial del suelo. La estructura del suelo, y particularmente el grado de agregación de las partículas individuales es un factor importante en la determinación de la transmisibilidad del agua. 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 están húmedos.

Los factores bióticos también pueden tener influencias en el número de espacios no capilares dentro del suelo. La importancia de los canales formados por las lombrices de tierra, particularmente en suelos superficiales en áreas de pastoreo observa en las áreas estudiadas que la cantidad de un millón de lombrices no sería 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 de la distribución vertical de los poros no capilares en el suelo. En muchas 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 de la zona de acumulación.

En ocasiones extremas se puede formar lo que se llama un “piso” lo cual reduce la permeabilidad a casi cero. Aún que la superficie tiende a ser más permeable que el subsuelo, aun que no en todos los casos y, de hecho, cualquier horizonte del suelo puede limitar la transmisibilidad del perfil completo

- b. 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. El contenido de humedad del suelo tiende a afectar la infiltración en tres diferentes formas. Primero: a medida que el contenido de humedad se incrementa, el número de poros en el suelo desocupado se reduce, lo cual reduce la capacidad de infiltración del

suelo. Segundo: cuando la lluvia humedece la superficie de un suelo seco, se forman fuerzas capilares que tienden a atraer al agua hacia el interior del suelo con una fuerza mayor que la producida 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 infiltración a medida que el suelo se humedece y el espacio poroso se reduce.

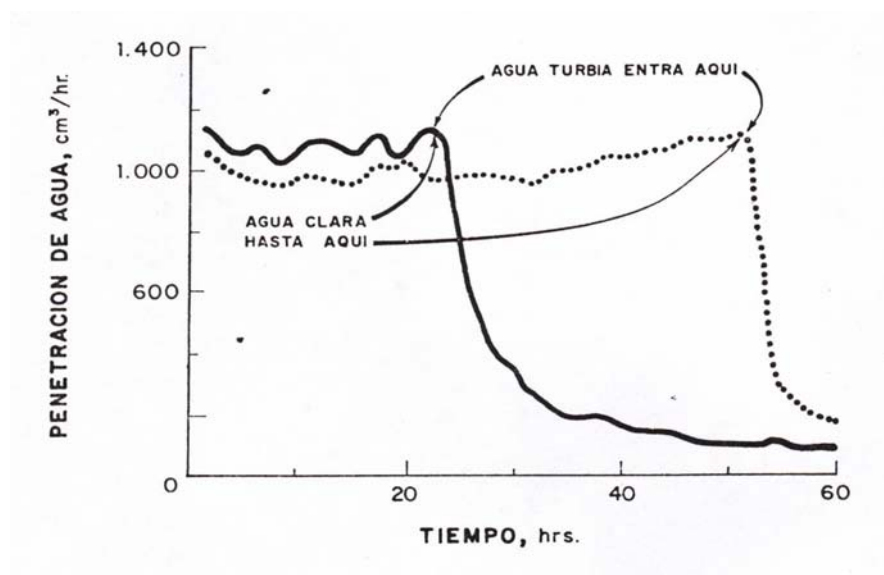
- c. Otros factores. Las fuerzas moleculares son capaces de atraer y retener una capa muy delgada de cada grano de suelo y la repulsión de esta capa después de condiciones intensas de sequía, puede ayudar a la rápida distribución del agua a través del perfil del suelo, sin embargo, este efecto es muy pequeño en relación con el movimiento total del agua infiltrada por lo cual no se toma en cuenta.

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

#### 2.4.5 Características del agua

- a. Temperatura. Debido a que la viscosidad del agua, y por eso, la facilidad con que esta pueda moverse a través del espacio poroso del suelo, varía con la temperatura del agua, tiende a ejercer alguna influencia sobre la cantidad de infiltración. Existe escasa evidencia que ilustre definitivamente esta relación, aun que es sabido que la cantidad de infiltración, para condiciones de precipitación dadas, es más alta en verano y otoño que en invierno y a principios de primavera cuando las temperaturas son más bajas.

- b. 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 también que la infiltración varía 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.
- c. Turbidez. La cantidad de infiltración de un suelo está profundamente afectada por la turbidez del agua superficial. El agua limpia penetra más rápidamente al suelo que el agua turbia (Figura. 4). Esto es debido a que el material de suelo suspendido en el agua tiende a obstruir las entradas impidiendo el movimiento del agua hacia adentro del suelo. Los suelos con una buena cantidad de materia orgánica no entran tan fácilmente en suspensión para producir turbidez en el agua superficial que aquellos con deficiencia de humus.



**Figura. 4.** Efecto de partículas finas en suspensión en el agua en la infiltración.

## 2.5 Métodos para estimar la infiltración

Muchos métodos se han desarrollado para estimar las tasas de infiltración estos pueden ser resumidos como:

### 2.5.1 Estudios de parcela

En este método se encuentran los estudios mediante lisímetros, parcelas de inundación de áreas confinadas y los llamados mecanismos de aspersion (Wood y Blackburn, 1981 b). Estos métodos pueden ser clasificados también de varias formas, de acuerdo a la manera en que el agua es aplicada, la forma en que se determina el área para tomar las lecturas, la forma en que se hacen las medidas. Un estudio de Infiltración - escurrimiento puede envolver uno de los cuatro siguientes planteamientos a) Infiltrómetros del cilindro, b) Simuladores de lluvia, c) Métodos de cuencas hidrográficas y d) Métodos de entradas y salidas.

#### a) Infiltrómetros de Cilindros

Musgrave (1935) propuso el método de doble cilindro para medir la velocidad de entrada vertical de un suelo. Este método consiste en instalar en terrenos escogidos para la prueba, un juego de dos cilindros de acero, huecos en el centro, de 40 cm de alto, de 30 y 45 cm de diámetro, respectivamente.

Se coloca una placa de acero sobre los cilindros manteniéndolos a nivel. Luego se golpea la placa hasta que los cilindros penetren de 10 a 15 cm dentro del suelo, procurando que entren lentamente perpendicular al suelo, se coloca el plástico dentro de la superficie interior, procurando que la superficie del suelo y las paredes del cilindro queden completamente cubiertas, se llena de agua la

parte comprendida entre los dos cilindros, y posteriormente se llena de agua el cilindro interior cubierto con el plástico y se mide el tirante y la lectura inicial antes de quitarlo. Se retira el plástico rápidamente y se hace la segunda lectura del nivel del agua utilizando la regla o tornillo micrómetro colocada en el interior del cilindro.

Las lecturas se hacen para diferentes intervalos, dejando que baje el nivel del agua de tres a cinco cm volviendo a agregar agua. Esto se hace en un intervalo corto de tiempo llamado tiempo muerto (un min.) en el cual no se calcula la velocidad de infiltración.

Por su simplicidad, este método se utiliza ampliamente. La información que se obtiene es la lámina de agua que se infiltra del cilindro central, por intervalos de tiempo seleccionados y medidos, hasta alcanzar un valor constante en la velocidad de infiltración.

Los cilindros infiltrómetros de metal son usados muy comúnmente. Son de varios tipos, incluyendo cilindros individuales, cilindros múltiples, lisímetros de balanza y lisímetros para drenaje. Los cilindros metálicos son incrustados en el suelo a profundidades (sobre) algunos pies, para instalaciones temporales, los cuales son usados muy comúnmente. Los cilindros no son introducidos a una profundidad considerable y en el que el diámetro de los mismos es lo suficientemente pequeño para el uso experimental, 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 del cilindro (Marshall y Stirk, 1950) .

La disturbancia de los suelos 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 infiltración

El aire atrapado en la columna del suelo bajo el frente de avance del agua puede tener efecto significativo en los resultados obtenidos. El efecto del aire atrapado se espera que varíe de acuerdo al tamaño de los cilindros empleados y con la profundidad a que sean colocados. La utilización de los infiltrómetros de doble cilindro, se considera una técnica pobre si se desea estimar la capacidad de infiltración bajo lluvia natural; sin embargo, diferencias comparativas pueden ser obtenidas bajo este método, y la técnica es probablemente adecuada en circunstancias dónde las inundaciones naturales ocurren, como la irrigación por inundación o dentro de zanjas en contornos. Las tasas de infiltración bajo lluvia natural pueden ser estimadas de pequeñas parcelas o cuencas hidrológicas naturales (Branson et al., 1981).

Este método se considera una técnica muy pobre por algunos autores, pero recomendable por otros autores para obtener índices confiables con un método rápido y relativamente sencillo que señale la importancia del uso que se le da al suelo.

#### b) Simuladores de Lluvia

Los simuladores de lluvia para estudios de infiltración, escurrimiento, erosión y producción de sedimentos han proliferado, estos instrumentos usan diversos mecanismos para formar tamaños de gotas y para imponerles a estas niveles de energía e intensidades similares a las condiciones naturales ( Robinson, 1979).

Un método satisfactorio para medir la cantidad de agua infiltrada por lluvia artificial debe tener las siguientes características: 1) La distribución del tamaño de las gotas debe ser uniforme sobre el área tratada. 2) La lluvia artificial debe ser similar a la natural respecto al tamaño de gotas, su velocidad, intensidad y valor total de energía. 3) El tamaño del área debe ser lo suficientemente grande para muestrear la población (aproximadamente 12 pies cuadrados para la mayoría de las condiciones del suelo). 4) La lluvia artificial debe ser aplicada no solo al área tratada si no también alrededor de ésta.

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

Según Kirbi y Morgan (1984) existen dos tipos principales de simuladores de lluvia: los de cedazo de goteo y los rociadores, los primeros utilizan agujas hipodérmicas, tubos capilares y goteadores de hilo; con el simulador de aspersion, el formador de gotas es una boquilla y debe proporcionarse un mecanismo para aplicar la aspersion en la forma deseada. Muchos investigadores han diseñado varios mecanismos de simuladores de lluvia que varía enormemente en el tamaño y complejidad.

Steinhardt y Hillel (1966) diseñaron un simulador se lluvia de tipo de cedazo de goteo, ligero, compacto y portátil, diseñado para uso de laboratorio y campo. Amernan *et. al.* (1970) y Rawitz *et. al.* (1972) describen un simulador de lluvia de tipo de aspersion o rociado ("Splinkler"), el cual es portátil y de fácil operación.

c) Método de cuencas hidrográficas



Donde el área de una cuenca y el total de la lluvia y el escurrimiento durante una precipitación son conocidas, es posible calcular la infiltración total, sin tomar en cuenta la evaporación. En un momento dado durante la lluvia por supuesto, alguna parte de agua es retenida en las depresiones superficiales de la cuenca y otra resulta en escurrimiento, como fue denotado por Sharp y Holston (1940) la porción que no ha resultado como escurrimiento, pero que no ha sido todavía absorbida por el suelo es difícil de estimar en una cuenca compleja. Por lo cual, las medidas de lluvia y escurrimiento en un momento dado antes de que el escurrimiento cese, no son relacionados a infiltración de una manera tan directa y verdadera como lo de los métodos anteriores.

Sharp y Holtn (1940, 1942) propusieron un método gráfico para estimar la cantidad de agua infiltrada por un suelo en presencia de retención de agua por el mismo, y este método fue usado por Bertoni et. al (1958) para estimar la cantidad de agua infiltrada en parcelas con diferente grado de pendiente, dónde la intensidad de la lluvia y el escurrimiento eran conocidos.

La interpretación de los datos hidrográficos de la cuenca es muy complejo y altamente especializado. En general se puede decir que la cantidad de infiltración derivada de cuencas hidrográficas es de valor limitado para propósito agronómico, la razón estriba en que un solo valor no da información sobre las muchas variaciones en pendiente, tipo de suelo, condiciones superficiales del suelo, contenido de agua del suelo y vegetación de cada área individual que constituya el conjunto.

#### d) Métodos de entradas y salidas

Este método se utiliza en riegos por surcos, en canales de sección pequeña, en los cuales el agua se infiltra gradualmente a lo largo del recorrido; para medir la velocidad de infiltración en el campo utilizando este método se puede seguir el siguiente procedimiento:

Se selecciona el tramo del surco, de preferencia que sea constante, con sifones debidamente calibrados, luego se calcula la velocidad de infiltración, partiendo de que se tiene un gasto,  $Q_1$ , en la cabecera y un gasto de salida,  $Q_2$ , medido en la estación aforada, la diferencia de gastos,  $Q_1$  menos  $Q_2$ , es el caudal de agua que permanece dentro del tramo del surco escogido, si se considera el tiempo transcurrido y el agua de dicho tramo, es posible obtener la velocidad de infiltración.

Para esto existen varios modelos empíricos por medio de los cuales se ajustan los métodos de campo.

## 2.6 Clasificación de la infiltración

Según Donahue, R.L. et. al. (1971) la infiltración se puede clasificar como sigue:

- a. Muy lenta.- Suelos con valores de infiltración menores de 0.254 centímetros por hora (cm/hr). Son clasificados como de muy lenta infiltración. en esta clase de suelo están aquellos con alto porcentaje de arcilla.
- b. Lenta.- Infiltración de 0.254-1.27 cm/hr. Este grupo incluye suelos con alto contenido de arcilla, bajos en M.O o suelos superficiales

- c. Media.- Con valores de infiltración de 1.27 - 2.54 cm/hr. La mayoría de los suelos de este grupo son arcillo - arenosos.
- d. Alta.- Incluye suelos que tienen arriba de 2.254 cm/hr de infiltración. Suelos arenosos profundos y arcillo - limosos profundos con buena agregación

## **2.7 Formas de expresar la infiltración**

Según Musgrave (1955) la infiltración puede ser expresada en los siguientes términos:

- a. Tasa de infiltración ( $f_p$ ). Cantidad máxima de agua infiltrada tomando en cuenta un tiempo determinado.
- b. Tasa de infiltración inicial ( $f_o$ ). Tasa máxima a la cual puede penetrar el agua a un suelo al inicio de un evento de precipitación.
- c. Tasa de infiltración constante ( $f_c$ ). También denominada tasa de infiltración básica o terminal, es la tasa máxima a la cual puede penetrar el agua en un suelo cuando este se encuentra en una situación estable en cuanto a infiltración de refiera.
- d. Infiltración acumulada ( $F$ ). Es la cantidad total de agua que penetra en un suelo desde el inicio de un evento de precipitación hasta un tiempo determinado.

## **2.8 Ecuaciones para estimar la infiltración:**

Según Pissani (1976) se han desarrollado varias ecuaciones empíricas y racionales que expresan la velocidad de infiltración en función del tiempo. Una de las más usadas es la ecuación de Kostiakov (1932) la cual es una función simple.

$$I = Kt^n \quad (1)$$

Donde:

$I$  = Velocidad de infiltración instantánea ( $LT^{-1}$ ) en  $cm \text{ min}^{-1}$  o  $cm \text{ h}^{-1}$ .

$K$  = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración instantánea a  $t= 1.0$  minutos. Expresada en  $cm \text{ min.}^{-1}$  o  $cm. \text{ h}^{-1}$ . Representa la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial; por lo tanto, depende de la estructura y de la condición del suelo en el momento en que se aplicó el agua. Si el suelo tiene grietas y poros grandes, el valor de  $K$  es relativamente mayor que si solamente tiene poros pequeños.

$t$ = Tiempo de infiltración ( $t$ ) en min ó h.

$n$ = Exponente adimensional. Es siempre negativo con valores que varían entre 0 y  $-1.0$  indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo; por lo tanto depende de los cambios estructurales resultantes del humedecimiento.

Los suelos que se hinchan cuando se humedecen y tienden a sellarse, situación que tiende a presentarse en el caso de suelos arcillosos, tienen un valor relativamente bajo de  $n$  del orden de 0.30, contrariamente, los suelos arenosos tienden a un valor de  $n$  de 0.70. Los suelos que tienen una estructura muy estable presentan exponentes de  $n$  mayores de 0.60 y pueden aproximarse a 1.0 bajo condiciones en que predomina el flujo gravitacional, este parámetro también depende de la geometría del flujo.

La Ecuación Racional trata del efecto global de infiltración en un campo en relación con la cantidad de lluvia caída para producir el escurrimiento. La forma métrica de la ecuación Suárez de Castro (1956) es la siguiente:

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (2)$$

Donde:

$Q$  = La tasa máxima del flujo del escurrimiento del campo en (m<sup>3</sup>/seg)

$C$  = El coeficiente de escurrimiento, o sea la relación de escurrimiento y la cantidad de lluvia, cuya relación varía entre cero y uno y depende de las características de la cuenca, mayormente su capacidad de infiltración.

$I$  = El promedio de la intensidad de lluvia caída durante un período expresado en mm/hora. Para tasas de flujo máximas, o sea flujo debido a las contribuciones de toda la cuenca, se usa el tiempo de concentración, que es el necesario para que el agua de una cuenca siga el camino desde el comienzo (del lugar más remoto de la cuenca hasta el punto de salida);

$A$  = EL área del campo (cuenca) en hectáreas (ha).

Horton(1903,1939) presentó gran atención a la investigación infiltración y desarrolló una ecuación que está muy de acuerdo con los conceptos físicos del proceso. La proporción de filtración está dada en el modelo de Horton por la ecuación:

$$I = if + (Ii - If) \exp(-Kt) \quad (3)$$

Donde:

$I_f$  = infiltración final (cm/hr).

$I_i$  = infiltración inicial (cm/hr).

$\exp(-Kt)$  = base de los logarítmicos a la potencia  $-Kt$ .

$t$  = tiempo (horas)

La cual, con el fin de compararla con la ecuación de Kostiakov, es integrada para obtener la infiltración acumulada.

$$I = I_f t + \frac{I_i - I_f}{K} (1 - \text{Exp}(-Kt)) \quad (4)$$

Horton (1940) observó que la reducción en la infiltración después de iniciada esta, estaba controlada fuertemente 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 cultivos. Los datos de Horton al igual que otros investigadores indican que la infiltración decrece después de dos o tres 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 completa 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.

Gree y Ampt (1911) derivaron una ecuación de filtración basada en un modelo físico del suelo muy simple. Tiene la ventaja de que los parámetros de

la ecuación pueden ser relacionados con las propiedades físicas del suelo. Green y Ampt asumieron que el suelo estaba saturado detrás del frente de mojado. Estas Asunciones, combinadas con la ley de Darcy, condujeron a la expresión.

$$L - \Phi_L \ln \left( \frac{1 + L}{\Phi_L} \right) = \frac{Kt}{f} \quad (5)$$

Donde:

$L$  = Es la profundidad hasta en frente de mojado.

$\Phi_L$  = Es el potencial matricial en el frente.

$K$  = Es la permeabilidad del suelo.

$f$  = Es la porosidad del suelo.

$t$  = Es el tiempo.

La infiltración acumulada es justamente.

$$I = fL \quad (6)$$

Es interesante notar que la ecuación de Horton puede ser derivada usando la aproximación de Green y Ampt; lo cual fue demostrada por Garner y Widstoe (1921) pero se necesita que exista una proporcionalidad entre el potencial del agua y el contenido de agua en el suelo, así como una permeabilidad constante.

Un procedimiento que se presenta a continuación ha sido desarrollado por Phillips (1921). La solución aparece en una forma infinita de términos conteniendo valores de  $t^{\frac{1}{2}}$ .

$$i = S t^{\frac{1}{2}} + (A_2 + K_o) t + A_3 t^{\frac{3}{2}} + A_4 t^2 \quad (7)$$

Donde:

$S$  = Parámetro de Philips, llamado capacidad de absorción.

$A_2, A_3, A_4$  = Características constantes del suelo.

$K$  = Es la conductividad hidráulica del suelo al contenido final del agua (generalmente se considera la saturación aun que no siempre es).

$t$  = Tiempo (minutos).

El primer término de la ecuación (7) 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 del campo gravitacional. Los términos más allá del cuadro de 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 comúnmente fracasa debido a la ausencia de valores de  $t$ . Para valores grandes de  $t$ :

$$i = K t \quad (8)$$

Una conclusión de los análisis hechos por Philips es que el frente de mojado toma una forma constante cuando la proporción de infiltración se aproxima a un valor constante y que este frente se mueve hacia abajo a través del suelo con una velocidad constante.



En el cuadro 1 se presentan un resumen de la ecuaciones de: Horton, Kostiakov, Philips y Gree y Ampt.

### **3. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 Localización**

El presente trabajo se realizó en la estación lisimétrica del campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, que se localiza en Marín N. L. Cuyas coordenadas geográficas son: 25° 52' Latitud Norte y 100° 30' Latitud Oeste, con una altitud promedio de 393 msnm.

#### **3.2 Clima**

El tipo de clima que predomina en el área de estudio (Marín N. L.) de acuerdo a la clasificación climática de Koppen modificada por García (1976) es: clima (A)Cx', el cual es un clima semicálido subhúmedo con lluvia escasa todo el año.

El clima semicálido subhúmedo con lluvia escasa todo el año ( (A)Cx' ), se caracteriza por tener un porcentaje de lluvia invernal mayor de 18, un índice de precipitación medio anual entre 500 y 800 mm y una temperatura media anual mayor de 22 °C. En septiembre se registra la máxima precipitación anual, con rangos de 110 a 150 mm, en los meses de Abril y Marzo se presenta la mínima, que oscila entre 10 y 20 mm. En el mes de Julio y Agosto se presentan las temperatura medias mensuales más altas, que van de 28 a

30 °C; en tanto que la menor se observa en diciembre, con valores entre 13 y 15 °C.

**Cuadro -2. Precipitación y temperatura media mensual y anual que predominan en la zona de influencia de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Nuevo León (Martínez, 1999).**

<b>ESTACIÓN:</b>	<b>MARÍN N. L.</b>	
<b>Mes</b>	<b>Temp. Media (°C)</b>	<b>Prec. Media (mm)</b>
<b>Enero</b>	13.3	33.6
<b>Febrero</b>	15.5	15.2
<b>Marzo</b>	19.7	14.2
<b>Abril</b>	23.4	31.3
<b>Mayo</b>	26.1	62.5
<b>Junio</b>	27.8	62.6
<b>Julio</b>	28.1	43.1
<b>Agosto</b>	28.2	71.3
<b>Septiembre</b>	25.6	94.3
<b>Octubre</b>	22.3	37.3
<b>Noviembre</b>	17.5	15.7
<b>Diciembre</b>	14.2	30.3
<b>Medio Anual</b>	21.8	511.6

En los climas cálidos y secos o con bajas precipitaciones anuales se tienen algunas ventajas comparados con los climas húmedos, ya que la aplicación de los lodos puede realizarse prácticamente todo el año, debido a que no se tienen problemas de inundación por altas precipitaciones que se registran en los climas húmedos, además la posible lixiviación a las aguas subterráneas de algunos de los componentes de preocupación de los lodos (metales, químicos orgánicos sintéticos y microorganismos) será menor en los climas secos que en los climas con alta precipitación. Otra ventaja que se tiene en los climas secos es que los requerimientos de almacenamiento de lodos son menores que en los climas con altas precipitaciones, debido a que en estos últimos se tiene que esperar a los períodos o estaciones de baja

precipitación o períodos secos que minimicen el potencial de inundaciones superficiales, para poder aplicar los lodos.

Una de las desventajas que se tiene en los climas secos o con baja precipitación, es que hay posibilidad de un aumento de sales en los terrenos enmendados con lodo, debido a que la lixiviación de las sales es baja, la salinidad en los terrenos enmendados va a depender principalmente del grado de salinidad y del tipo de sal que se tenga en los lodos, del tipo de tratamiento de los lodos, dosis de aplicación y del manejo que se de a dicho suelo.

### **3.3 Lisímetros**

En el trabajo de investigación se utilizaron 6 lisímetros de entradas y salidas cuyas características son: 4 m de longitud por 1 m de ancho y 1.20 m de profundidad. Cada lisímetro se dividió en 4 unidades lisimétricas con un área de 1 m<sup>2</sup> con sus respectivos sistemas de drenaje independiente para cada uno.

### **3.4 Suelo**

De acuerdo con la base de referencia mundial de los recursos de suelo de 1994 (O. C. Spaargaren 1994) el grupo mayor de suelos que predominan en el municipio de Marín N. L. donde se encuentra ubicado el campo experimental de la Facultad de Agronomía, son los suelos Castañozem. Dichos suelos fueron los utilizados para el llenado de los lisímetros, ya acomodados y estabilizados se procedió a realizar el muestreo para el análisis físico y químico de las profundidades siguientes: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm.

### 3.5 Lodos

Los lodos utilizados en el proyecto de investigación fueron lodos tratados procedentes de la planta San Rafael y de la planta Noreste, cada uno con diferentes características (cuadro -3). El lodo de la planta Noreste es característico de los procedentes de aguas residuales tipo domestico mezclado con industrial, los lodos de la planta San Rafael son provenientes de aguas residuales tipo domestico de acuerdo a la clasificación de lodos residuales de la EPA que se basa en la concentración de metales pesados. El análisis físico de los lodos de dichas plantas se presentan en el cuadro - 4 (Pissani, 2001).

**Cuadro -3** Características de las plantas de tratamiento. San Rafael y Noreste (C)

Planta	Ubicación Municipal	Area (Ha)	Capacidad (lps)		Método de Tratamiento	Inicio de Operación	Población Beneficiada (Habitantes)
			Actual	Total			
Noreste	Apodaca	18.36	500	4,000	Lodos activados, aireación extendida. Disposición de lodos aerobia. Deshidratación mediante filtros prensa de banda.	Mayo 1995	240,000
San Rafael	Guadalupe		598.3	900	Lodos activados, aireación extendida. Disposición de lodos aerobia		250,000

**Cuadro -4** Análisis físico de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: San Rafael y Noreste, Monterrey N.L.

PARÁMETRO	SAN RAFAEL	NORESTE
%		
S.T	0.57	3.084
S.D.T	0.10	0.602
S.S.T	0.46	2.482
S.S.	0.04	0.025
Grasas y aceites g/kg. ps	66.54	22.17

Dichos lodos cumplen con límites máximos permisibles para metales y químicos orgánicos que establece la EPA. En cuanto a patógenos, el lodo de la planta Noreste se clasifica como de clase B y su salinidad es baja por su conductividad eléctrica que se asemeja a un suelo normal, por lo tanto son lodos aptos para usos agrícolas como fertilizantes o mejoradores de suelo (Pissani, 2001).

Los análisis correspondientes a lo mencionado anteriormente se muestran los siguientes cuadros.

### 3.5.1 Metales contenidos en el estiércol y en los lodos

De acuerdo a los resultados de los análisis de las muestras la concentración de Molibdeno y Selenio encontrados en el lodo de la planta San Rafael rebasan los límites para lodos con bajos contenidos de metales o clasificados como "Lodos Limpios" en cuanto a metales por la EPA (Cuadro-5).

**CUADRO 5 .** Metales contenidos en Estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales : San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.

PARÁMETRO	ESTIÉRCOL MG/L	SAN RAFAEL MG/KG. PS	NORESTE MG/KG. PS	LÍMITES PERMISIBLES DE EPA	
				Límite máximo de concentración	Límite de concentración (Lodo Limpio)
<b>Arsénico</b>	<0.020	<3.54	<1.688	75	41
<b>Cadmio</b>	0.26	<8.85	<16.234	85	39
<b>Crómo total</b>	<0.30	<53.10	<9.740	3000	1200
<b>Cobalto</b>	<0.5	<88.5	<16.234		
<b>Cobre</b>	<0.20	<35.4	<6.494	4300	1500
<b>Hierro</b>	0.55	83.19	19.481		
<b>Mercurio</b>	<0.010	<1.77	<5.195	57	17
<b>Manganeso</b>	0.15	553.98	3.247		
<b>Molibdeno</b>	<0.44	<74.3	<14.286	75	18
	56.64	0.64	6.494	420	420
<b>Plomo</b>	1.24	<53.10	<9.740	840	300
<b>Selenio</b>	<0.030	<53.10	<0.974	100	36
<b>Zinc</b>	0.30	<26.55	<0.487	7500	2800

### 3.5.2 Químicos orgánicos sintéticos contenidos en el estiércol y en los lodos

Al comparar las concentraciones de los químicos contenidos en los lodos y el estiércol, ninguno de los compuestos excede el nivel máximo permisible establecido por la EPA. (Cuadro -6).

**Cuadro -6.** Análisis de contaminantes orgánicos en estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: San Rafael y Noreste, Monterrey N.L. (mg/l)

PARÁMETRO	ESTIÉRCOL	SAN RAFAEL	SAN RAFAEL	NORESTE	LIMITE EPA
Hexaclorobenceno		<0.000005	<0.000005		29
Lindado		0.00005	<0.00005		
Heptacloro		<0.000007	0.000033		7.4
Aldrin		<0.000003	<0.000003		2.7
Dieldrin		<0.000003	<0.000003		2.7
Endrin		<0.00001	0.00001		
DDT		<0.00005	<0.00005		120
Metoxicloro		0.00005	<0.00005		
Clordano		<0.0003	<0.0003		86
Toxaferno		<0.0005	<0.0005		
Benceno	<0.040	<0.040	<0.040	<0.040	16,000
Benzo (a) Antáceno	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
Criseno	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
Benzo (a) Pireno	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	15
Benzo(k)Fluoranteno	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
Benzo(b)Fluoranteno	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	

### 3.5.3 Microorganismos en los lodos

Los lodos de las dos plantas de tratamientos rebasan los límites fecales para los lodos clase A. Por lo tanto estos lodos pertenecen a un lodo de clase B los cuales deben estar sometidos a ciertas restricciones cuando estos se

aplican a los suelos, para proteger el medio ambiente y la salud pública. (Cuadro –7).

**Cuadro -7.** Microorganismos analizados en los lodos seleccionados contra los límites permisibles o aceptables de la EPA para la aplicación al suelo de lodos residuales.

MICROORGANISMOS	SAN RAFAEL	NORESTE	LIMITE EPA	
			Clase a	Clase B
<b>Colif. Totales</b>	700,000 NMP/ g	140,000 NMP/g	A	a
<b>Colif. Fecales</b>	35,000 NMP /g	30,000 NMP /g	<1,000 NMP/gr de sólido total (peso seco)	2,000,000 NMP/gr de sólido total (peso seco)
<b>Salmonella sp</b>	Negativo*	Negativo*	<3NMP/4 gr de sodio total (peso seco)	a
<b>Shigella sp</b>	Negativo*	Negativo*	A	a
<b>Vibro choleare</b>	Negativo**	Negativo**	A	a

NMP/g: Número más probable/gramo de sólido totan (peso seco)

\* en 25 gramos de muestra; \*\* en 50 gramos de muestra

a información no disponible

### 3.5.4 Nutrimiento contenido en los lodos y el estiércol bovino

Se compararon las concentraciones de nutrimento contenido en el estiércol y los lodos seleccionados (cuadro –8), encontrándose lo siguiente:

- a) El contenido de materia orgánica, el porciento de carbono orgánico, así como la relación carbono nitrógeno, nitrógeno total, nitratos, fósforo y potasio es mayor en el estiércol que en los lodos.
- b) El contenido de amonio es mayor en los lodos que en el estiércol.
- c) El contenido de materia orgánica, relación carbono / nitrógeno, nitrógeno total, nitratos, fósforo y potasio es mayor en el lodo de la planta Noreste que en el lodo de la planta San Rafael.



- d) El por ciento de carbono orgánico y amonio es mayor en el lodo de la planta San Rafael que en el lodo de la planta Noreste.

**Cuadro -8.** Análisis de fertilidad del estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales: San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.

PARÁMETRO	ESTIÉRCOL	SAN RAFAEL	NORESTE
M.O. %	67.57	12.0	16.83
CO	38.86	4.46	3.82
C/N	11.50	0.61	0.841
CIC meq/100 gr	26.8		
N T %	3.37	0.61	0.84
NO3 ppm	2145	88	126.5
NH4 ppm	0.26	11.09	7.17
P ppm	110.0	76.6	80
K ppm	88	52.7	59

### 3.5.5 Salinidad del estiércol y lodos

Se presentan los valores de los parámetros de salinidad del estiércol y los lodos en el cuadro -9. Comparando los resultados se tiene lo siguiente:

- a) El estiércol contiene un grado de salinidad mayor que los lodos seleccionados, ya que en todos los parámetros que se determinaron de salinidad, excepto potasio, los valores del estiércol son mayor que el de los lodos seleccionados.
- b) Comparando los dos lodos se tiene que el lodo de la planta Noreste es ligeramente más salino que el lodo de la planta San Rafael, ya que sus valores de conductividad eléctrica, pH, calcio , sodio, potasio y boro son mayores.

- c) Los valores de sulfatos, cloruros y bicarbonatos del lodo de la planta San Rafael son mayores a los de la planta Noreste

**Cuadro -9.** Análisis de salinidad del estiércol y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales seleccionadas: San Rafael y Noreste, Monterrey, N.L.

PARÁMETRO	ESTIÉRCOL	SAN RAFAEL	NORESTE
ce mmhos/cm	27.05	0.933	1.960
PH	8.06	7.05	7.3
Sulfatos meq/l	8	3.4	2.8
Cloruros meq/l	216	8.64	6.24
CO3 meq/l	0	0	0
HCO3 meq/l	54.3	7.56	4.32
Fluoruros meq/l	1.15	0.90	0.90
Calcio meq/l	100	5	9
Magnesio meq/l	80	1.6	1.6
Sodio meq/l	12.8	0.68	3.98
Potasio meq/l	1.46	1.93	2.69
Boro meq/l	1.10	0.87	0.90

### 3.6 Pruebas de infiltración

Para evaluar las velocidades de infiltración en el presente trabajo, se utilizó el método de doble cilindro propuesto por Musgrave (1935). El agua utilizada para dichas pruebas fue de la misma calidad durante todo el tiempo que duró la realización del proyecto. Los análisis del agua se muestran en el cuadro -10.

**Cuadro -10.** Análisis del agua utilizada para las pruebas de Infiltración.

DETERMINACIÓN		CLASIFICACION
Ph	7.38	SM
TDS (mg/l)	1380	SM
CE (mmhos/cm)	2.75	SM
Cationes meq/l		
Calcio (Ca)	4.2	NS
Magnesio (Mg)	10.8	SA
Potasio (K)	0.43	
Sodio (Na)	12.2	SA
Suma de cationes	27.63	
Aniones meq/l		
Carbonatos (CO3)	0.0	
Bicarbonatos (HCO4)	8.1	SM
Sulfatos (SO4)	2.0	
Cloruros (CL)	17.4	SA
Suma de aniones	27.5	
Rel de adsorción de Sodio (RAS)	16.71	SA

Con los datos obtenidos en los lisímetros se determinó la velocidad de infiltración instantánea ( $I$ ), utilizando el modelo de Kotiakov (1932), en base a la ecuación (1).

$$I = K t^n$$

En caso de que las observaciones de la infiltración se refieran a períodos largos, se obtiene una representación de los datos más adecuado utilizando la ecuación:

$$I = K t^n + c \quad (9)$$

Donde:

$c$  = Velocidad de infiltración constante para  $t = \infty$ . Teniendo en cuenta que  $n$  es negativo,  $I$  y  $t$  se mueven en sentido apuesto. Por consiguiente, la

velocidad de infiltración  $I$  tenderá a  $c$  cuando el tiempo aumente. Por lo general, la velocidad de infiltración tiende a una constante que se denomina velocidad de infiltración básica.

De acuerdo con el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. La velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo, cuando la velocidad de cambio de la infiltración para un período estándar es el 10 % o menos de su valor.

Teniendo esto en cuenta, con los valores de  $L_p$  obtenidos en el campo se calculó la lámina infiltrada acumulada ( $I_{cum}$ ), calculando a su vez el valor de infiltración  $I$  en cm / hr. y la velocidad de infiltración promedio ( $I_p$ ), como se muestra en el cuadro -11.

**Cuadro -11 Ejemplo del cálculo de las velocidades de infiltración**

$T_p$	$T_a$	$L_p$	$I_{cum}$	$I$	$I_p$
-------	-------	-------	-----------	-----	-------

Donde:

$T_p$  = Tiempo parcial (min).

$T_a$  = Tiempo acumulado (min).

$L_p$  = Lámina infiltrada parcial (cm/min).

$I_{cum}$  = Lámina infiltrada acumulada (cm).

$I$  = Velocidad de infiltración (cm/hr).

$I_p$  = Velocidad de infiltración promedio (cm/hr).

Los valores fueron sometidos a un análisis de regresión con el modelo de mínimos cuadrados utilizando el modelo de regresión exponencial. (steel y Torrie, 1985; Oastle, 1965).

$$Y = a x^b \quad (10)$$

Donde:

$$a = K$$

$$b = n$$

$x = t$  tiempo acumulado

$I =$  Infiltración en cm/hr.

De acuerdo a Pissani (1976), el valor de la velocidad de infiltración básica como se utiliza en el presente trabajo, se puede calcular por medio de la ecuación (1).

$$I = K t^n$$

Haciendo las consideraciones siguientes:

$I =$  Velocidad de infiltración es en  $\text{cm min}^{-1}$  y se introduce el factor 60 para espresarla en  $\text{cm h}^{-1}$

$t =$  Se reemplaza por el tiempo "teórico" ( $t_b$ ) definiéndose como el tiempo necesario para llegar a la velocidad de infiltración básica ( $I_b$ ) y aplicando el concepto de infiltración básica del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América se tiene:

$$K t^n = K (tb - 60)^n - \frac{K (tb - 60)^n}{10} \quad (11)$$

Despejando  $t$  se obtiene el tiempo “teórico” ( $tb$ ) al cuál se alcanza la velocidad de infiltración básica ( $Ib$ ).

$$tb = \left[ \frac{60}{1 + \left( \frac{10}{9} \right)^{1/n}} \right] \quad (12)$$

El valor del tiempo “teórico” ( $tb$ ) se sustituye en la ecuación (1) para obtener la velocidad de infiltración básica ( $Ib$ ).

$$Ib = K \left[ \frac{60}{1 + \left( \frac{10}{9} \right)^{1/n}} \right]^n \quad (13)$$

Los valores de la velocidad de infiltración básica fueron calculados con la formula anterior para todas las repeticiones de cada tratamiento.

Hay que ser cuidadosos cuando se utiliza la velocidad de infiltración básica en los proyectos de irrigación. Cuando los riegos son ligeros, tal es el caso de riegos frecuentes, la aplicación de agua puede haber terminado antes de que se alcance la velocidad de infiltración básica.

El volumen de agua que penetra en el terreno puede representarse más adecuadamente por la lámina acumulada de agua infiltrada, puesto que la velocidad inicial supera en mucho a la velocidad de infiltración básica.

Al integrar la ecuación (1) entre los límites  $t = 0$  y  $t = 1$  se obtiene la lámina acumulada de agua infiltrada  $I_{cum}$ .

$$I_{cum} = \frac{1}{60} \int_0^t I dt = \frac{1}{60} \int_0^t K t^n dt$$

$$I_{cum} = \frac{K}{60(n+1)} t^{n+1} \quad (14)$$

La ecuación (14) puede también ser representada como:

$$I_{cum} = At^n$$

Donde:

$$A = \frac{K}{60(n+1)} \quad y \quad m = n+1$$

O integrando la ecuación (9), en el caso de que esta represente con más precisión la función de infiltración, la lámina acumulada de agua infiltrada será:

$$I_{cum} = \frac{1}{60} \int_0^t I dt = \frac{1}{60} \int_0^t (Kt^n + c) dt = \frac{K}{60(n+1)} t^{n+1} + ct \quad (15)$$

La ecuación (15) puede ser representada como:

$$I_{cum} = At^m + ct$$

La infiltración promedio  $I_p$  es la relación entre la infiltración acumulada ( $I_{cum}$ ) y el tiempo ( $t$ ).

$$I_p = \frac{I_{cum}}{t} \quad (16)$$

Al sustituir la ecuación (14) en la ecuación (16) se obtiene la ecuación de infiltración promedio en un punto:

$$I_p = \frac{K}{60(n+1)} t^n \quad (17)$$

Los parámetros de la ecuación de infiltración dependen de muchos factores, los cuales resultan de una gran diversidad de valores cuantitativos comúnmente encontrados en condiciones de campo. Pero algunos de estos factores son extremadamente dinámicos, cambiando con el suelo y el manejo del agua. Por lo tanto, no ha sido posible obtener un valor de infiltración correspondiente a una específica unidad taxonómica de suelo, excepto cuando se estima un valor relativo de la velocidad de infiltración básica o cuando se usa una expresión cualitativa, moderada o baja.

### 3.7 Tratamientos

**Tratamiento 1.** Lodo planta San Rafael (**A**). Se aplicó en forma superficial una dosis de 8 ton peso seco/ha de lodo líquido, calculado en base a la demanda de nitrógeno del cultivo de nopal forrajero (*Opuntia ficus indica variedad copena F1*) y sólidos totales en el lodo. Esta aplicación se hizo antes del establecimiento del cultivo.



**Tratamiento 2.** Lodo planta Noreste **(C)** se aplicó en forma superficial una dosis de 6 ton peso seco/ha de lodo líquido, antes del establecimiento del cultivo de nopal forrajero (*Opuntia ficus indica variedad Copena F1*), calculado éste basándose en la demanda del Nitrógeno del cultivo y sólidos totales en el lodo.

**Tratamiento 3.** Estiércol bovino **(E)**. la dosis aplicada fue 200 ton./ha, el estiércol se mezcló e incorporó al suelo antes del establecimiento del cultivo.

**Tratamiento 4.** Testigo **(B)** se empleó un testigo absoluto para comparar los efectos de los tratamientos empleados.

### **3.8 Diseño experimental y distribución de los tratamientos.**

En el presente trabajo se utilizó un análisis de varianza en un diseño de bloques al azar con cuatro tratamientos y seis repeticiones. De acuerdo a la metodología propuesta por Snedecor y Cochram (1967), Ostle (1965) y Steel y Torrie (1985), para evaluar las siguientes hipótesis:

Ho = Hay diferencia entre tratamientos.

Aplicada para los siguientes tratamientos:

- a) Los análisis antes de aplicar los tratamientos.
- b) Análisis de la infiltración de los lodos

c) Los análisis después de aplicar los tratamientos.

En la Figura 5, se muestra el plano con la localización y distribución de los tratamientos en la estación lisimétrica.

De acuerdo a Ostle (1965), el modelo estadístico es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + E_{ij} \quad (17)$$

Donde:

$\mu$  = Media general del experimento.

$\tau_i$  = Efecto del tratamiento i.

$\beta_j$  = Efecto del bloque j.

$E_{ij}$  = Error experimental para cada observación (ij).

### 3.9 Análisis de medias:

Los análisis de medias de los tratamientos se observó por medio de la prueba de Scheffé. Por ser considerada la prueba más estricta, de fácil aplicación y utilización de los valores de la tabla de F que se usa en el ANVA, (Padrón Corral., 1996), el valor de  $w$  obtenido para comparar las medias de los tratamientos está dado por.

$$w = \sqrt{F(t-1) S^2 \left( \frac{C_1^2}{r} + \frac{C_2^2}{r} + \dots + \frac{C_n^2}{r} \right)} \quad 18$$

Donde:

$F$  = Valor tabular de acuerdo con el número de grados de libertad del Tratamiento y grados de libertad de error.

$(t - 1)$  = Grados de libertad de los tratamientos.

$r$  = Número de repeticiones.

$S^2$  = Cuadrado medio del error.

$C_n^i$  = Coeficiente de los contrastes



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1 Análisis físico químico del suelo.

En el área de influencia de la estación lisimétrica de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, predominan los suelos Castañosem que tienen una profundidad de 100 – 125 cm, una textura migajón arcillosa ó franco, la estructura de estos suelos va de forma de bloques angulares, tamaño fino y desarrollo débil, normalmente presentan horizontes A y B, el pH de estos suelos es de 8.0 y 8.3, tienen una Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT) que va de 11 a 26 meq/100 g y una conductividad eléctrica menor que 2 dS/m. Los resultados de los análisis físico químicos del suelo utilizado se muestran en el cuadro -12.

**Cuadro 12.** Análisis físico químico de los suelos para el llenado de los lisímetros.

PROFUNDIDAD CM	TEXTURA	PH	C.E.X10 dS/m.	MO %	N %	P %	K %
0-15	Migajón Migajón-limoso	8.06	2.38	2.38	0.119	20.49	1.30
15-30	Migajón-limoso	7.78	2.77	1.59	0.079	29.62	1.54
0-50	Migajón Migajón-limoso	7.86	2.98	2.12	0.106	28.23	1.64

### 4.2 Modelos y Coeficientes Básicos de Infiltración

Los modelos obtenidos por regresión, con sus correspondientes valores de correlación muestral (  $R$  ), tanto para la infiltración instantánea (  $I$  ),

promedio ( $I_p$ ), acumulada ( $I_{cum}$ ) y los coeficientes de infiltración básica ( $I_b$ ) de los análisis de velocidad de infiltración de los lodos de las plantas tratadoras de aguas residuales San Rafael (A) y Noreste (C), se muestran en los cuadros 13 y 14. De la misma manera en los cuadros 15,16,17 y 18 para antes y después de aplicar los tratamientos.

#### **4.3 Análisis del efecto de los tratamientos en la infiltración.**

De acuerdo a los modelos y coeficientes de velocidad de infiltración básica que se presentan en los cuadros 13,14,15,16,17 y 18, correspondientes a los análisis de los datos de campo, los valores de K y n son mayores antes, que después de aplicar los tratamientos con lodos de las plantas tratadoras de aguas residuales, San Rafael (A) y Noreste (C) , al igual que el testigo (B), pero diferente del estiércol bovino (E), que es mucho mayor después de aplicarlo. Esto se debe por el alto contenido de materia orgánica que contiene el estiércol, que por sus características ocasionan cambios estructurales, aumentando la porosidad, mejorando el movimiento del agua al momento del riego y la capacidad de retención en el suelo por más tiempo, para un buen desarrollo del cultivo.

Los tratamientos con lodos de las plantas tratadoras de aguas residuales San Rafael (A) y Noreste (C), tienen un menor contenido de materia orgánica, (cuadro. 8) por el lugar de procedencia y por un porcentaje alto de Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T.) (cuadro. 4) que reducen la porosidad del suelo y un buen movimiento del agua.

**CUADRO 13 . Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del lodo San Rafael (A)**

TRATAMIENTOS	PARÁMETROS				
	V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B (.cm/hr)	* Icum (cm)
A – I	23.159(t) <sup>-0.2922</sup> 0.935	18.75(t) <sup>-0.1854</sup> 0.9881	0.35845(t) <sup>0.7934</sup> 0.9983	8.171	9.23
A – II	61.588(t) <sup>-0.6435</sup> 0.9738	50.653(t) <sup>-0.4274</sup> 0.9835	0.84421(t) <sup>0.5726</sup> 0.9907	6.562	8.8
A – III	34.134(t) <sup>-0.479</sup> 0.9133	26.734(t) <sup>-0.2944</sup> 0.9249	0.44557(t) <sup>0.7056</sup> 0.9861	6.37	8.0
A – IV	56.204(t) <sup>-0.5887</sup> 0.9128	43.408(t) <sup>-0.3694</sup> 0.9547	0.72347(t) <sup>0.6306</sup> 0.984	7.217	9.56
A – V	91.399(t) <sup>-0.7012</sup> 0.8807	53.459(t) <sup>-0.3704</sup> 0.9067	0.89099(t) <sup>0.6296</sup> 0.9656	8.001	11.7
A – VI	53.841(t) <sup>-0.6379</sup> 0.8739	32.936(t) <sup>-0.3355</sup> 0.8727	0.54894(t) <sup>0.6645</sup> 0.9642	5.847	8.34

\*I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora.

**CUADRO 14 . Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del lodo de la planta Noreste (C)**

TRATAMIENTOS	PARÁMETROS				
	V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B (.cm/hr)	* Icum (cm)
C – I	5.2542(t) <sup>-0.2303</sup> 0.6956	4.4604(t) <sup>-0.1415</sup> 0.9143	0.07434(t) <sup>0.8585</sup> 0.9975	2.29	2.5
C – II	2.8633(t) <sup>-0.1256</sup> 0.6965	2.7053(t) <sup>-0.0875</sup> 0.9032	0.04509(t) <sup>0.9125</sup> 0.999	1.79	1.9
C – III	13.352(t) <sup>-0.5927</sup> 0.8512	10.835(t) <sup>-0.4177</sup> 0.9824	0.18059(t) <sup>0.5823</sup> 0.9909	1.69	1.96
C – IV	4.6069(t) <sup>-0.4224</sup> 0.8667	3.7304(t) <sup>-0.2848</sup> 0.9762	0.06217(t) <sup>0.7152</sup> 0.9961	1.042	1.16
C – V	15.881(t) <sup>-0.5707</sup> 0.8805	10.836(t) <sup>-0.3577</sup> 0.9923	0.1806(t) <sup>0.6423</sup> 0.9976	2.17	2.5
C – VI	4.9997(t) <sup>-0.3836</sup> 0.5337	2.9699(t) <sup>-0.1486</sup> 0.6079	0.0495(t) <sup>0.8514</sup> 0.9807	1.291	1.6

\*I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora

**CUADRO 15 . Modelos de los análisis de velocidad de infiltración del testigo (B).**

TRATAMIENTOS		PARAMETROS				
		V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B (cm/hr)	* Icum (cm)
B – I	A	26.617(t) <sup>-0.1569</sup> 0.5334	29.705(t) <sup>-0.1522</sup> 0.9789	0.4951(t) <sup>0.8478</sup> 0.9993	14.938	15.93
	D	6.3486(t) <sup>0.0355</sup> 0.147	5.9878(t) <sup>0.0506</sup> 0.4852	0.0998(t) <sup>1.0506</sup> 0.9975	6.596	7.37
B – II	A	35.046(t) <sup>-0.2112</sup> 0.9103	35.028(t) <sup>-0.1597</sup> 0.9884	0.5838(t) <sup>0.8403</sup> 0.9996	16.316	18.21
	D	8.1442(t) <sup>-0.0932</sup> 0.1401	12.353(t) <sup>-0.1755</sup> 0.7019	0.20589(t) <sup>0.8246</sup> 0.9811	5.708	6.02
B – III	A	46.159(t) <sup>-0.3375</sup> 0.7365	43.371(t) <sup>-0.2271</sup> 0.967	0.72285(t) <sup>0.7729</sup> 0.9971	13.952	17.11
	D	5.7102(t) <sup>-0.0512</sup> 0.0316	9.7991(t) <sup>-0.17</sup> 0.5867	0.1633(t) <sup>0.83</sup> 0.9713	4.66	4.9
B – IV	A	38.214(t) <sup>-0.231</sup> 0.6138	34.937(t) <sup>-0.1383</sup> 0.9337	0.5823(t) <sup>0.8617</sup> 0.9982	16.623	19.83
	D	17.42(t) <sup>-0.1966</sup> 0.5977	23.518(t) <sup>-0.2379</sup> 0.8943	0.392(t) <sup>0.7621</sup> 0.9886	8.53	8.9
B – V	A	19.313(t) <sup>-0.0984</sup> 0.2009	23.444(t) <sup>-0.1184</sup> 0.8644	0.39073(t) <sup>0.8816</sup> 0.9972	13.3	14.44
	D	5.4999(t) <sup>-0.0043</sup> 0.0009	6.8615(t) <sup>-0.0587</sup> 0.3719	0.1144(t) <sup>0.9413</sup> 0.9935	5.404	5.4
B - VI	A	32.932(t) <sup>-0.1713</sup> 0.5794	32.932(t) <sup>-0.1713</sup> 0.9292	0.52069(t) <sup>0.887</sup> 0.9988	17.586	19.67
	D	2.9154(t) <sup>0.0425</sup> 0.0143	5.7303(t) <sup>-0.1193</sup> 0.3254	0.0955(t) <sup>0.8807</sup> 0.9633	2.46	3.5

\*I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora.

**CUADRO 16. Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela con estiércol (E)**

TRATAMIENTOS		PARÁMETROS				
		V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B (cm/hr)	* Icum (cm)
E – I	A	26.042(t) <sup>-0.1888</sup> 0.6662	24.505(t) <sup>-0.123</sup> 0.946	0.40841(t) <sup>0.877</sup> 0.9989	13.094	14.81
	D	119.9(t) <sup>-0.4928</sup> 0.9399	136.94(t) <sup>-0.4165</sup> 0.9947	2.2823(t) <sup>0.5835</sup> 0.9973	21.342	24.88
E – II	A	38.238(t) <sup>-0.2396</sup> 0.7377	42.893(t) <sup>-0.2145</sup> 0.9694	0.71488(t) <sup>0.7855</sup> 0.9977	16.15	17.9
	D	77.644(t) <sup>-0.432</sup> 0.856	82.145(t) <sup>-0.3488</sup> 0.9757	1.3691(t) <sup>0.6512</sup> 0.9929	17.002	19.7
E – III	A	36.978(t) <sup>-0.2685</sup> 0.8692	40.123(t) <sup>-0.2235</sup> 0.9956	0.66872(t) <sup>0.7765</sup> 0.9996	14.148	16.07
	D	56.487(t) <sup>-0.3838</sup> 0.9214	62.148(t) <sup>-0.3289</sup> 0.9866	1.0358(t) <sup>0.6711</sup> 0.9968	14.578	8.04
E – IV	A	32.198(t) <sup>-0.1785</sup> 0.5974	34.753(t) <sup>-0.1554</sup> 0.9791	0.57922(t) <sup>0.8446</sup> 0.9993	16.773	18.4
	D	66.7(t) <sup>-0.3259</sup> 0.913	72.139(t) <sup>-0.2784</sup> 0.9955	1.2023(t) <sup>0.7216</sup> 0.9993	20.975	5.6
E – V	A	20.886(t) <sup>-0.0915</sup> 0.4835	21.296(t) <sup>-0.0768</sup> 0.9114	0.35493(t) <sup>0.9232</sup> 0.9993	14.726	15.55
	D	21.238(t) <sup>-0.1789</sup> 0.6255	26.848(t) <sup>-0.2053</sup> 0.8903	0.9203(t) <sup>0.6802</sup> 0.9868	11.048	9.95
E - VI	A	29.314(t) <sup>-0.235</sup> 0.8137	34.006(t) <sup>-0.2233</sup> 0.9835	0.567(t) <sup>0.7767</sup> 0.9986	12.578	13.64
	D	125.06(t) <sup>-0.5582</sup> 0.9767	127.68(t) <sup>-0.4367</sup> 0.9984	2.1281(t) <sup>0.5633</sup> 0.999	17.815	12.8

\* I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora.



**CUADRO 17 . Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela con lodo San Rafael (A)**

TRATAMIENTOS		PARÁMETROS				
		V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B. (cm/hr)	* Icum (cm)
A - I	A	39.358(t) <sup>-0.2588</sup> 0.7639	33.343(t) <sup>-0.1491</sup> 0.8188	0.56239(t) <sup>0.8509</sup> 0.9933	15.57	18.32
	D	5.2392(t) <sup>-0.0286</sup> 0.1023	5.6804(t) <sup>-0.0474</sup> 0.4767	0.09467(t) <sup>0.9526</sup> 0.9973	4.664	4.68
A - II	A	27.904(t) <sup>-0.1625</sup> 0.541	26.287(t) <sup>-0.095</sup> 0.8345	0.43812(t) <sup>0.905</sup> 0.9978	15.36	17.82
	D	10.694(t) <sup>-0.106</sup> 0.1197	17.284(t) <sup>-0.1959</sup> 0.7011	0.28807(t) <sup>0.8041</sup> 0.9753	7.164	7.75
A - III	A	16.447(t) <sup>-0.1425</sup> 0.2199	27.336(t) <sup>-0.2507</sup> 0.8641	0.4556(t) <sup>0.7493</sup> 0.9827	9.702	9.8
	D	10.598(t) <sup>-0.086</sup> 0.2279	12.815(t) <sup>-0.1138</sup> 0.6931	0.21358(t) <sup>0.8862</sup> 0.9927	7.62	8.04
A - IV	A	18.371(t) <sup>-0.1109</sup> 0.1528	25.044(t) <sup>-0.158</sup> 0.8653	0.4174(t) <sup>0.842</sup> 0.9945	12.097	13.11
	D	10.72(t) <sup>-0.1868</sup> 0.3662	17.155(t) <sup>-0.2748</sup> 0.869	0.28592(t) <sup>0.7252</sup> 0.9788	5.43	5.6
A - V	A	20.813(t) <sup>-0.1567</sup> 0.3871	24.284(t) <sup>-0.1485</sup> 0.8774	0.40474(t) <sup>0.8515</sup> 0.9958	11.689	13.22
	D	12.567(t) <sup>-0.0679</sup> 0.1594	16.017(t) <sup>-0.1163</sup> 0.6427	0.26694(t) <sup>0.8837</sup> 0.9905	9.642	9.95
A - VI	A	29.331(t) <sup>-0.1662</sup> 0.7583	30.966(t) <sup>-0.1389</sup> 0.982	0.51611(t) <sup>0.8611</sup> 0.9995	15.94	17.54
	D	27.335(t) <sup>-0.2328</sup> 0.8202	28.655(t) <sup>-0.1971</sup> 0.9504	0.47759(t) <sup>0.8029</sup> 0.9969	11.82	12.8

\* I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora.

**CUADRO 18 . Modelos de los análisis de velocidad de infiltración de la parcela del lodo Noreste(C)**

TRATAMIENTOS		PARÁMETROS				
		V.I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	V.I.M.(cm/hr) R <sup>2</sup>	LIA(cm) R <sup>2</sup>	C.I.B. (cm/hr)	* Icum (cm)
C - I	A	35.0(t) <sup>-0.4112</sup> 0.7075	32.889(t) <sup>-0.2737</sup> 0.9872	0.54815(t) <sup>0.7263</sup> 0.9982	8.23	10.72
	D	5.2259(t) <sup>-0.0719</sup> 0.4053	5.906(t) <sup>-0.0907</sup> 0.8349	0.09843(t) <sup>0.9093</sup> 0.998	3.952	4.07
C - II	A	28.254(t) <sup>-0.2421</sup> 0.6824	27.037(t) <sup>-0.1666</sup> 0.8789	0.45061(t) <sup>0.4334</sup> 0.9945	11.832	2.66
	D	1.8213(t) <sup>-0.1038</sup> 0.0637	3.8514(t) <sup>-0.2655</sup> 0.6991	0.06419(t) <sup>0.7345</sup> 0.9468	1.23	1.3
C - III	A	17.242(t) <sup>-0.0183</sup> 0.0159	17.185(t) <sup>-0.0057</sup> 0.0341	0.28641(t) <sup>0.9943</sup> 0.9991	15.99	16.79
	D	7.1109(t) <sup>-0.0209</sup> 0.0088	10.053(t) <sup>-0.1077</sup> 0.4082	0.16754(t) <sup>0.8923</sup> 0.9783	6.53	6.5
C - IV	A	29.37(t) <sup>-0.13</sup> 0.4075	25.43(t) <sup>-0.0494</sup> 0.5666	0.42383(t) <sup>0.9506</sup> 0.9979	18.093	20.77
	D	9.0143(t) <sup>-0.2142</sup> 0.5454	13.107(t) <sup>-0.2687</sup> 0.8969	0.21844(t) <sup>0.7313</sup> 0.9847	4.154	4.4
C - V	A	31.083(t) <sup>-0.1866</sup> 0.622	29.377(t) <sup>-0.1167</sup> 0.8795	0.48962(t) <sup>0.8833</sup> 0.9976	15.75	18.22
	D	9.5252(t) <sup>-0.1112</sup> 0.2691	13.15(t) <sup>-0.1699</sup> 0.778	0.21917(t) <sup>0.8301</sup> 0.9882	6.266	6.6
C - VI	A	26.135(t) <sup>-0.1605</sup> 0.5479	28.57(t) <sup>-0.1481</sup> 0.9483	0.47617(t) <sup>0.8519</sup> 0.9984	14.49	15.6
	D	2.1748(t) <sup>0.0573</sup> 0.0269	4.0314(t) <sup>-0.0949</sup> 0.1859	0.06719(t) <sup>0.9051</sup> 0.954	1.74	2.73

\* I cum = lámina infiltrada acumulada en una hora.

Por lo anterior, los mejores resultados obtenidos en base a los análisis de los datos, fue el estiércol bovino, que después de su incorporación, mejoraron las condiciones estructurales del suelo, obteniéndose en los modelos de velocidad de infiltración valores de K y n altos, y una velocidad de infiltración básica que se mantiene en 17 cm/h. El coeficiente K depende de la textura y de las condiciones del suelo en el momento en que se aplica el agua. Si el suelo tiene grietas o poros grandes, el valor de K es relativamente mayor que si solamente tiene poros pequeños. De la misma manera el exponente n indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo; por lo tanto depende de los cambios de estructura del suelo, resultantes del humedecimiento. Los suelos que se hinchan cuando se mojan y tienden a sellarse y volverse impermeable, tienen un valor de n pequeño. Es por ello que los tratamientos con estiércol tienen mayor capacidad de retener el agua, efecto que la materia orgánica ocasiona, aumentando la porosidad y permeabilidad del suelo. Después del estiércol, los mejores resultados que se obtuvieron fue con el lodo de la planta San Rafael (A), seguido del testigo (B) y por ultimo el lodo de la planta Noreste (C). Este ultimo fue menor que el testigo por su alto porcentaje de Sólidos Suspendidos Totales y por su lugar de procedencia que son de aguas residuales tipo domestico, mezclado con industrial.

En los análisis de *Icum* con los 60 minutos de tiempo acumulado, los tratamientos que mayor capacidad de retención de humedad tienen son: el estiércol (E), manteniéndose en 19.52 cm después de su incorporación. Esto hace más complejo en lo mencionado anteriormente, que con su incorporación mejora las características físicas del suelo. Del estiércol le sigue el lodo de la planta San Rafael (A), posteriormente el testigo (B) y el tratamiento con el que se obtuvo menores resultados después de su incorporación, fue el lodo de la planta Noreste (C) que se mantiene con valores inferiores en relación con los demás tratamientos.

### 4.3.1 Análisis de Varianza.

Las velocidades de infiltración obtenidas en el campo con sus respectivas repeticiones se presentan en el apéndice A. Estos resultados fueron analizados a través de un análisis de varianza, los resultados de estos análisis se muestran en los cuadros 19 y 22, para antes y después de aplicar los tratamientos, en el cuadro 20 para los análisis de velocidad de infiltración de los lodos, acompañados con sus respectivas pruebas de medias que se muestran en los cuadros 21 y 23 respectivamente.

En los análisis de varianza para antes de aplicar los tratamientos, no se obtuvo diferencias, por lo que se puede considerar que no existe una variación significativa de las características físicas del suelo.

**Cuadro 19.** Análisis de Varianza para antes de aplicar los tratamientos.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	25.322	5.0644	0.7793	2.90	4.56
<b>TRATAMIENTOS</b>	3	13.579	4.5263	0.6965	3.29	5.42
<b>ERROR</b>	15	97.473	6.4982			
<b>TOTAL</b>	23	136.374				

C.V = 17.74 %

NOTA :

No se hace la comparación de medias porque no hay diferencia significativa entre tratamientos.

En los análisis de velocidad de infiltración de los lodos se obtuvo una diferencia altamente significativa entre tratamientos, que mediante una prueba de medias se puede decir que el lodo de la planta San Rafal (A) tiene mejores resultados que lodo de la planta Noreste (C).

**Cuadro 20.** Análisis de Varianza de los análisis de infiltración de los lodos.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	4.21	0.842	3.24	5.05	10.97
<b>TRATAMIENTOS</b>	1	84.774	84.774	325.993	6.61	16.26
<b>ERROR</b>	5	1.3	0.26			
<b>TOTAL</b>	11	90.285				

C.V = 11.67 %

**Cuadro 21.** Pruebas de medias de los análisis de infiltración de los lodos

MEDIA	TRATAMIENTO
<b>LODO SAN RAFAEL (A)</b>	7.028 A
<b>LODO NORESTE (C)</b>	1.712 B

Nivel de significancia = 0.01, 0.05

DMS = 1.2 , 0.757

Para los análisis después de aplicar los tratamientos se tuvo una diferencia altamente significativa entre tratamientos, para lo cual, mediante una prueba de medias se observó que el mejor tratamiento fué el estiércol (E), seguido del lodo San Rafael (A), por último el testigo (B) y lodo Noreste (C).

**Cuadro 22.** Análisis de Varianza para después de aplicar los tratamientos..

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	10.75	2.15	0.221	2.90	4.56
<b>TRATAMIENTOS</b>	3	624.44	208.146	21.404	3.29	5.42
<b>ERROR</b>	15	145.87	9.725			
<b>TOTAL</b>	23	781.06				

C.V = 36.27 %

**Cuadro 23.** Pruebas de medias para después de aplicar los tratamientos

MEDIA	TRATAMIENTO
<b>ESTIERCOL (E)</b>	17.1267 A
<b>LODO SAN RAFAEL (A)</b>	7.7233 B
<b>TESTIGO (B)</b>	5.5600 B
<b>LODO NORESTE (C)</b>	3.9783 B

Nivel de significancia = 0.01, 0.05

DMS = 3.8368, 5.3060

Los análisis de varianza también realizados para la infiltración acumulada (\**Icum*) con  $t = 60$  min, se anexa en los cuadros 24 y 27 para antes y después

de aplicar los tratamientos. De la misma manera el análisis de varianza de la infiltración acumulada de los análisis de infiltración de los lodos, se encuentran en el cuadro 25. Estos acompañados de sus pruebas de medias que se muestran en los cuadros 26 y 28 respectivamente.

En los análisis de *Icum* antes de aplicar los tratamientos, no se encuentran diferencias significativas, considerando que las características de los suelos son semejantes en todas las repeticiones

**Cuadro 24.** Análisis de Varianza para la *Icum*. antes de aplicar los tratamientos.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	39.66	7.93	0.4376	2.90	4.56
<b>TRATAMIENTOS</b>	3	38.96	12.98	0.7163	3.29	5.42
<b>ERROR</b>	15	271.93	18.13			
<b>TOTAL</b>	23	350.56				

C.V = 27.17 %

NOTA :

No se hace la comparación de medias porque no hay diferencia significativa entre tratamientos.

En los análisis de la infiltración acumulada de los lodos, se tuvo una diferencia altamente significativa entre tratamientos. Para lo cual, mediante una prueba de medias, se obtuvo que el mejor tratamiento fue el lodo San Rafael (A) y el tratamiento con resultados más bajos fue el lodo de la planta Noreste (C)

**Cuadro 25.** Análisis de Varianza para *Icum* de los análisis de infiltración los lodos.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	6.44	1.28	1.79	5.05	10.97
<b>TRATAMIENTOS</b>	1	161.40	161.40	224.22	6.61	16.26
<b>ERROR</b>	5	3.59	0.72			
<b>TOTAL</b>	11	171.45				

C.V = 15.14 %

**Cuadro 26.** Pruebas de medias para de lodos

MEDIA	TRATAMIENTO	
<b>LODO SAN RAFAEL (A)</b>	9.2717	A
<b>LODO NORESTE (C)</b>	1.9367	B

Nivel de significancia = 0.01,0.05  
DMS = 1.259, 1.975

Después de aplicar los tratamientos se encontró una diferencia altamente significativa entre tratamientos, teniendo mediante una prueba de medias que el tratamiento con Estiércol (E) fue el mejor, seguido el lodo de la planta San Rafael (A) y el testigo (B), por último el lodo de la planta Noreste (C).

**Cuadro 27.** Análisis de Varianza para la Icum despues de aplicar los tratamientos.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	
					5 %	1 %
<b>BLOQUES</b>	5	11.72	2.34	0.2	2.90	4.56
<b>TRATAMIENTOS</b>	3	911.04	303.68	30.9	3.29	5.42
<b>ERROR</b>	15	147.55	9.84			
<b>TOTAL</b>	23	1070.30				

C.V = 32.64 %

**Cuadro 28.** Pruebas de medias de la Icum despues de aplicar los tratamientos

MEDIA	TRATAMIENTO	
<b>ESTIERCOL (E)</b>	20.0117	A
<b>LODO SAN RAFAEL (A)</b>	8.1367	B
<b>TESTIGO (B)</b>	6.0150	B
<b>LODO NORESTE (C)</b>	4.2667	B

Nivel de significancia = 0.01,0.05  
DMS = 3.858 ,5.336

En representación al conjunto de datos que se mencionan en el apéndice A. Los modelos promedios por tratamiento se presentan en los cuadros 29 y 30 para los análisis de velocidad de infiltración de los lodos, de la misma manera la representación de antes y después de aplicar los tratamientos.

**CUADRO 29.** Modelos promedios de los análisis de infiltración

TRATAMIENTOS		PARÁMETROS				
		I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	IP (cm/hr) R <sup>2</sup>	Icum(cm) R <sup>2</sup>	I.B (cm/hr)	* Icum (cm)
B	A	32.731(t) <sup>-0.2035</sup> 0.8819	32.807(t) <sup>-0.1529</sup> 0.991	0.5468(t) <sup>0.8471</sup> 0.9997	15.652	17.54
	D	8.4522(t) <sup>-0.1054</sup> 0.2553	10.996(t) <sup>-0.152</sup> 0.7833	0.1833(t) <sup>0.848</sup> 0.9912	5.674	5.9
E	A	30.649(t) <sup>-0.2028</sup> 0.9476	32.673(t) <sup>-0.1739</sup> 0.9934	0.5446(t) <sup>0.8261</sup> 0.9997	14.69	16.7
	D	73.618(t) <sup>-0.4101</sup> 0.9397	82.501(t) <sup>-0.352</sup> 0.9928	1.375(t) <sup>0.648</sup> 0.9979	17.37	19.52
A	A	26.296(t) <sup>-0.1809</sup> 0.9004	28.07(t) <sup>-0.1538</sup> 0.9963	0.4678(t) <sup>0.8462</sup> 0.9999	13.586	14.95
	D	12.792(t) <sup>-0.133</sup> 0.4495	16.06(t) <sup>-0.1656</sup> 0.8192	0.2677(t) <sup>0.8344</sup> 0.9914	7.798	8.15
C	A	27.292(t) <sup>-0.1784</sup> 0.862	26.237(t) <sup>-0.1216</sup> 0.9664	0.4373(t) <sup>0.8784</sup> 0.9993	14.222	15.95
	D	5.788(t) <sup>-0.0857</sup> 0.1718	8.2059(t) <sup>-0.1597</sup> 0.6916	0.1368(t) <sup>0.8403</sup> 0.9842	4.166	4.27

\* I cum = Lámina infiltrada acumulada en una hora.

**CUADRO 30.** Modelos promedios de los análisis de infiltración de los lodos

TRATAMIENTOS		PARÁMETROS				
		I.(cm/hr) R <sup>2</sup>	IP (cm/hr) R <sup>2</sup>	Icum(cm) R <sup>2</sup>	I.B (cm/hr)	* Icum (cm)
A		50.921(t) <sup>-0.5614</sup> 0.9562	37.62(t) <sup>-0.3417</sup> 0.9499	0.627(t) <sup>0.6583</sup> 0.986	7.17	9.3
C		6.8043(t) <sup>-0.3814</sup> 0.889	5.5519(t) <sup>-0.255</sup> 0.9754	0.0925(t) <sup>0.745</sup> 0.9971	1.77	1.95

\* I cum = Lámina infiltrada acumulada en una hora.

En las figuras 6,7,8 y 9 se muestra el comportamiento de las velocidades de infiltración en el suelo, que se obtuvo graficando el tiempo en las abscisas contra la velocidad de infiltración instantánea en las ordenadas. Estas son promedios de los datos de campo de las seis repeticiones por tratamiento, para antes de aplicar los tratamientos, para los análisis de velocidad de infiltración de los lodos y después de aplicar los tratamientos. Obteniéndose una tendencia rectilínea que se ajustó al modelo de Kostiakov (1932).

## 5. CONCLUSIONES

- . El lodo de la planta San Rafael (A) , de acuerdo a la clasificación de lodos residuales de la EPA, son lodos provenientes de aguas residuales tipo domestico, aun que estos rebasan los límites permisibles de Molibdeno y Selenio para lodos clasificados como “limpios”, pueden ser usados en la agricultura como sustitutos de fertilizantes y mejoradores de suelo
- . Los lodos de las plantas San Rafael (A) y Noreste (C) se clasifican como de clase “B” en cuanto a patógenos se refiera, aún que cumple con los límites máximos permisibles para metales y químicos orgánico sintéticos, su aplicación al suelo debe hacerse con algunas restricciones.
- . En la evaluación del proceso de infiltración, antes de aplicar los tratamientos no se obtuvieron diferencias significativas, por lo que no existe variación entre las características físicas del suelo.
- . La evaluación de la infiltración de los lodos, fue mejor el del lodo de la planta San Rafael (A), por tener menor contenido de Sólidos Suspendidos Totales, un mayor porcentaje de materia orgánica y por el lugar de procedencia con relación al lodo de la planta tratadora Noreste (C).
- . Al evaluar la infiltración después de aplicar los tratamientos, el estiércol (E), dio los mejores resultados. Por el alto contenido de materia orgánica, relación carbono nitrógeno y nitrógeno total, que son mayores en relación con los lodos.



- . El coeficiente “K” y el exponente “n” correspondientes a los modelos de infiltración, son mayores en el tratamiento con estiércol (E), por las características físicas del suelo, que el estiércol mejoró con su incorporación, teniendo mayor porosidad, permeabilidad y mayor capacidad de retención del agua al momento del riego.

## 6. RECOMENDACIONES

- . La utilización de los lodos tratados procedentes de aguas residuales, son recomendables como sustitutos parciales de fertilizantes químicos costosos, que pueden mejorar las características físicas de un suelo pobre.
- . La utilización de los lodos de las plantas San Rafael y Noreste, para su uso agrícola se deben hacer con ciertas restricciones, al ser clasificados como de clase B.
- . La incorporación del estiércol bovino, es recomendable para el uso agrícola, porque mejora las características físicas del suelo, teniendo mayor capacidad de retención de agua por más tiempo, favoreciendo un buen desarrollo de los cultivos.

## 7. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el proceso de infiltración en suelos Castañozem, alterados mediante la incorporación de lodos de dos diferentes plantas tratadoras de aguas residuales y estiércol bovino.

El trabajo fue realizado en la estación lisimétrica del campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Los primeros análisis se realizaron el 23 de Febrero del 2000, antes de aplicar los tratamientos. El 28 de Junio del mismo año se incorporó el estiércol bovino (E) y los lodos de las plantas tratadoras de aguas residuales San Rafael (A) y Noreste (C), los cuales también se les evaluó la velocidad de infiltración. Después de ser alterados los suelos Castañozem, por la incorporación de el estiércol y los lodos, se evaluó la velocidad de infiltración el 22 de diciembre del 2000. La dosis correspondiente a los tratamientos se calculó en base a la demanda del Nitrógeno del cultivo del nopal forrajero (*Opuntia ficus indica* variedad *copena F1*) y sólidos totales en el lodo.

Para los análisis se utilizó el método de doble cilindro propuesto por Musgrave (1935), para todos los tratamientos con sus respectivas repeticiones.

Los resultados obtenidos indican que las tasas de infiltración fueron similares en todos los lisímetros antes de aplicar los tratamientos. Estas semejanzas se deben a que no existe diferencia significativa entre las características físicas del suelo.

En los análisis de infiltración de los lodos fue mejor el de la planta San Rafael (A) que el lodo de la planta Noreste (C).

Después de la aplicación de los tratamientos se obtuvieron mejores resultados del tratamiento con estiércol (E), seguido el lodo de la planta San Rafael (A), y luego el y luego el testigo (B).

## 8. LITERATURA CITADA

Amerman, C.R., D.I. Hillel and A.E. Peterson. 1970. A Variable Intensity Sprinkling Infiltrometer. Soil. Sci. So. Proc. 34: 830-832. United State of América.

Baver, L.D., Soil physics (3a. ed.), John Wiley and Sons. Nueva York; 1956.

Branson, F.A.; G.F. Gifford; K. C. Renard and R. F. Hadley 1981. Rangeland Hidrology. A Publicación of the Society for Range Management. Kendal / Hunt Publishing Co. Dubuque. Iowa. U.S.A 340 P.

Forsythe, Warren. Física de Suelos. Manual de Laboratorio. 1985.

Flores Z., J. R. (1989) Comportamiento de las Tasa de Infiltración y Producción de Sedimentos a cuatro distancias de los abovedores en el Rancho "Los Angeles". Tesis Lic. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Gavande., S. A., Física de Suelos. Principios y aplicación; 4ª edición Editorial Limisa, México 1972.

Gardner., Willard y John A. Widstoe (1921). The movement of Soil moisture. Soil Sci., 11:215-232.

- Garcia E. 1976. Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Copen. U. N. A. M. México.
- Gutierrez, C. J., F. M. Smith y G.G. Medina.1979. Caracterización Hidrológica de la Cuenca de San Tiburcio Zacatecas. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Monografía Técnica Científica. S(4) Saltillo, Coahuila, México.
- Gutierrez C. J. y A. Duñez. 1998. Relación de infiltración-Edad de la Plantación en la Zona Reforestal Zapalinamé. Agraria Revista Técnica-Científica. Universidad Autónoma Agraria "Antonio narro"4(2): 158-179 México.
- Grem, W. Haber y G.A. Ampt (1911). Studies in Soil Phisies. I. Interpretación of Infiltración Capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. S: 399-417.
- Hernández J., I. I. (1991) Estudio para determinar el Uso de lodos Residuales Sobre Los Suelos Agrícolas de Cuatro Municipios de Nuevo León. Tesis Lic. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Hillel, D. 1971. Soil and Water; Phisical principles and Processens Academic Press Inc. U.S.A. 394 P.
- Horton, Robert E. (1933). The Role of Infiltración in the Hydrílogic Cycle. Trans. 14 th Ann. Meeting Am. Geophys. Union, Pags. 446-460.

Horton, Robert E. (1939). Análisis of Runoff-Plot experiment with Varying infiltración. Capacity. Soil. Trans. Am. Geophys. Union, parte IV pags. 693-694.

Horton, Robert E.(1940). An approach toward a physical interpretati6n of infiltrati6n capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc.

Israelsen, O.W. y V. E. Hanson. Principios y Aplicaciones del Riego 2° edici6n.

Kirkby, M.J. y R.P.C. Morgan.1984. Erosi6n de suelos Edit. Limusa. M6xico. 375 Pags.

Kostiakov, A.N. (1932). On the dinamic of yhe coeficient of water percolation in Soil and the necessity for studying it from a dinamic view for purposes of amelsorati6n. Trans. 6<sup>th</sup> com. Int. Soc. Sci, Russian Part A: 17-21..

Martinez R., E (1999) Estudio para determinar el Uso de Lodos Residuales Sobre Los Suelos Agrícolas de Cuatro Municipios de Nuevo Le6n. Tesis Lic. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, M6xico.187 pag.

Metcalf y Eddy. 1991. Wastewater engineering treatment and disposal reuse. Third edici6n. MC. Graw Hill.

Moore, E.E., JF. Kinsinger, R. Pitney and J. Sainsberry. 1979. Liverstok grazing management and eater quality protection (State of the reference document)EPA-91019-76-67. U.S. Burear of and manangerent. Denver, Co. U.S.A. 147 P.

Musgrave, G.W. 1955. How much of the rain enters the Soil. In: water USDA. Yearbook. A.R.M. W-10. U.S.A.

Narro Farías (1994). Física de Suelos: con enfoque agrícola. 1° Edición. Editoriál Trillas S.A. De c.v México D.F.

Orson w. Israelsen and Vaughn E. Hansen. (1975) Principios y Aplicación del Riego

Ostle, B. 1965. Estadística Plicada. Edit. Limusa. México. 629 p.

Ottavian; M.;Santarsiero A.; De Fulvio S. (1991). Hygienic, technical and legislative aspects of agricultural sewage aludge usage. Acta Chim. Hung. 128 (4-5),535-543.

Outwater B.A.1994. Reuse of Sludge minor wastewater residuals. Lewis Publishers.. United States of América.

Padron Corral, E. Diseño Experimental con Aplicación a la Agricultura y la Ganadería . México: Trillas: UAAAN 1996

Pissani. Z.J.F., 1990: Tratamiento y Aprovechamiento agrícola de Las Aguas y Lodos Residuales. Apuntes de Clase. Facultadde Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín N.L.



- Pissani, Z.J.F. 2001: Informe Técnico. Estudio de la Viabilidad del Uso Sostenible de Lodos de Suelos Calcáreos Para la Producción de Cultivos.
- Philips, J.R. (1957) The theory of infiltración. 4. Sorptivity an algebraic infiltración eguatións. Soil. Sci. 84:257-264.
- Rawits, E.,M. Margolin and D. Hillel. 1972. An Improvend Variable Intensity Sprinkling Infiltrómeter. Soil Sci. Soc. Proc. 34: 830-832. United States of América.
- Robinson, A,R, 1979. Comments. Rainfall Simulator Workshop. In; USDA (ed) Procceding of the Rainfall Simulator Workshop. Science Review and Manuals. ARM-W-10 United States of América.
- Suarez de Castro F. Conservación de Suelos. Madrid, Salvat, 1956.298 p.
- Schnitzer M. (1991). Soil Orgánic Matter-The next 75years. Soil Sci., 151 (1), 41-58.
- Snedecor, W.G. y W.G. Cochram. 1967. Mpetodos Estadísticas. Cia. Editorial Continental. S.A. México. 702 p.
- Steintardt, R. And D.I. Hillel. 1966 and A Portable low Intensity Rainfall Simulator for Field and Laboratory Use. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.. 30:661-663. United States of América.

Steel, G.D.R y J.H Torrie. 1985. Bioestadística: Principios y Procedimientos. 2-Edic. Edit. McGraw-Hill. Latinoamericana S.A. Bogotá. Colombia. 622 p.

Zarate L.A.(1988) Evaluación de la tasa de infiltración y producción de sedimentos en tre suelos de pastizal de rancho "Los Angeles" Tesis MC. UAAAN Buenavista Saltillo Coahuila. México. 106 p.

APENDICE A  
TASAS DE INFILTRACION

Cuadro 1.A Tasas de infiltración en mm/min. Antes de aplicar el estiércol (E).

Tiempo parcial	IE	IIE	IE	IVE	VE	VIE
0	0	0	0	0	0	0
2	7	12	11	10	7	9
2	7	10	9	9	5	8
2	5	9	7	8	6	7
2	7	8	7	8	7	6
3	10	8	9	8	9	7
5	11	11	15	20	12	12
5	13	15	14	10	13	12
5	13	15	14	14	11	10
5	10	14	13	19	12	9
5	14	15	8	13	14	9
5	9	14	12	13	14	10
5	12	14	11	14	13	10
5	11	14	10	14	12	9
5	11	15	11	14	12	9
5	8	13	10	14	12	10
5	9	10	10	13	11	10
5	9	10	11	12	11	10
10	20	22	21	25	25	23

Cuadro 2.A Tasas de infiltración en mm/min. Antes de aplicar el lodo de la planta San Rafael (A)

Tiempo parcial	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA
0	0	0	0	0	0	0
2	9	8	9	8	8	9
2	7	7	5	7	5	9
2	10	9	4	5	4	6
2	10	6	4	2	3	6
3	15	8	3	6	12	11
5	15	22	6	12	14	16
5	13	17	5	8	12	16
5	16	14	9	11	10	13
5	13	15	9	17	10	13
5	13	12	9	11	9	14
5	13	13	9	10	9	12
5	12	13	9	10	9	15
5	10	9	9	10	9	12
5	11	13	9	10	9	12
5	11	13	8	10	9	14
5	11	9	8	10	9	12
5	11	13	8	9	9	11
10	21	22	17	20	20	25

Cuadro 3.A Tasas de infiltración en mm/min. Antes de aplicar el lodo de la planta Noreste (C).

Tiempo parcial	IC	IIC	IIIC	IVC	VC	VIC
0	0	0	0	0	0	0
2	9	7	6	8	9	9
2	6	7	5	7	6	6
2	4	5	5	7	9	7
2	5	9	7	8	6	8
3	9	8	6	15	12	7
5	9	17	18	20	18	9
5	9	9	13	14	17	14
5	9	8	17	15	13	14
5	9	10	11	22	19	13
5	4	9	14	17	13	13
5	10	9	14	13	11	13
5	8	9	14	18	12	14
5	7	9	14	16	11	11
5	6	9	14	14	11	11
5	4	9	11	13	12	12
5	3	9	12	13	11	11
5	4	9	14	11	11	10
10	12	17	27	26	26	22

Cuadro 4.A Tasas de infiltración en mm/min. Testigo (B).

Tiempo parcial	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB
0	0	0	0	0	0	0
2	9	10	11	10	8	9
2	7	9	10	9	6	9
2	7	7	10	8	4	8
2	6	8	8	8	3	9
3	10	12	7	11	10	10
5	13	15	16	24	14	18
5	10	14	14	10	13	13
5	13	15	14	18	9	13
5	14	14	16	22	14	16
5	11	15	13	13	12	19
5	18	14	12	12	10	19
5	10	13	14	14	12	19
5	10	13	6	14	11	12
5	12	13	10	12	12	12
5	12	13	8	11	12	14
5	14	11	8	14	9	13
5	11	12	8	10	10	11
10	25	21	23	20	22	25

Cuadro 5.A Tasas de infiltración en mm/min. Del análisis de lodo San Rafael (A).

Tiempo parcial	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA
0	0	0	0	0	0	0
3	8	14	8	13	14	9
4	10	14	12	10	18	11
5	8	9	8	18	22	17
10	16	14	15	16	15	13
10	15	13	10	11	14	9
10	13	10	10	10	14	9
10	13	7	9	9	11	8
10	12	7	9	7	9	5
10	10	6	6	7	5	5
20	20	12	12	15	11	10



Cuadro 6.A Tasas de infiltración en mm/min. Del análisis de lodo Noreste (C).

Tiempo parcial	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA
0	0	0	0	0	0	0
5	3	2	5	2	5	2
10	4	3	3	2	5	2
20	10	7	5	4	9	8
20	7	6	6	4	5	5
20	6	5	4	2	5	5
20	8	6	4	2	5	2
20	5	5	2	2	4	2
20	5	5	2	2	2	2

Cuadro 7.A Tasas de infiltración en mm/min. Testigo (E).

Tiempo parcial	IE	IIE	IIIE	IVE	VE	VIE
0	0	0	0	0	0	0
3	47	32	24	27	13	40
5	24	15	16	24	9	25
10	47	34	26	48	18	45
10	49	34	26	39	17	31
10	34	34	26	26	17	27
20	57	54	41	63	33	46
20	46	40	34	54	34	37
20	42	37	35	47	33	30
30	53	49	48	63	49	46
30	49	40	42	69	45	37
30	50	35	35	70	45	33

Cuadro 8.A Tasas de infiltración en mm/min. Después de aplicar el lodo de la planta San Rafael (A).

Tiempo parcial	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA
0	0	0	0	0	0	0
3	3	10	7	8	9	13
5	4	3	5	5	6	10
10	6	10	13	7	15	22
10	8	13	13	8	16	22
10	8	13	10	8	15	20
20	16	25	30	11	32	41
20	15	22	23	16	30	36
20	16	23	26	15	32	30
30	23	33	40	24	51	46
30	23	33	33	24	48	39
30	24	34	35	32	46	39

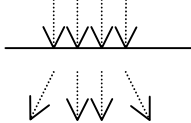
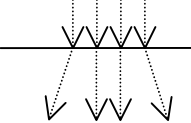
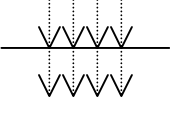
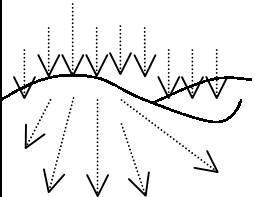
Cuadro 9.A Tasas de infiltración en mm/min. Después de aplicar el lodo de la planta Noreste (C).

Tiempo parcial	IC	IIC	IIIC	IVC	VC	VIC
0	0	0	0	0	0	0
3	3	2	6	6	7	3
5	3	1	5	4	4	1
10	7	2	6	6	11	3
10	7	1	10	6	9	3
10	6	1	9	2	9	3
20	13	3	23	12	20	10
20	12	3	20	12	19	13
20	13	5	23	11	21	10
30	18	7	35	19	31	16
30	19	9	39	17	29	17
30	20	8	38	19	30	17

Cuadro 10.A Tasas de infiltración en mm/min. Del testigo (B).

Tiempo parcial	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB
0	0	0	0	0	0	0
3	3	7	6	11	4	4
5	5	3	2	8	3	1
10	15	9	6.5	12	9	5
10	13	9	7	13	9	4
10	13	8	7	12	8	5
20	26	19	15	25	17	11
20	22	18	15	25	17	13
20	25	19	17	24	19	12
30	25	29	25	36	28	22
30	37	28	25	37	30	22
30	37	29	25	37	29	20

CUADRO –1. Resumen de las características de las ecuaciones de Horton, Kostiakov, Philips y Green-ampt.

Nombre de la ecuación	HORTON	KOSTIAKOV	PHILIPS	GREEN-AMPT	CONDICIONES NATURALES
Ecuación para lámina acumulada	$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-K_F t} +$	$Z = K t^a$	$Z = K t^{1/2} + c$	$t = 1/c z - K \ln \frac{k+z}{k}$	
Ecuación para tasa de infiltración	$I = ake^{-at} + c$	$I = ake^{-a-1}$	$I = 1/2 kt^{-1/2} + c$	$i = c \frac{k+2}{2}$	
Tipo	Empírica	Empírica	Analítica	Analítica	
Flujo esquemático en el campo					
Área de influencia del flujo	Pequeña	Pequeña	Sin límites		Grande
Medio	Relativamente Homogéneo	Relativamente Homogéneo	Homogéneo		Heterogéneo
Flujo en el campo	Aprox. Eje simétrico Tridimensional	Aprox. Eje simétrico Tridimensional	Unidimensional		Complejo Tridimensional
Parámetros que definen la ecuación	K,a,c	K,a	K,c	K,c	

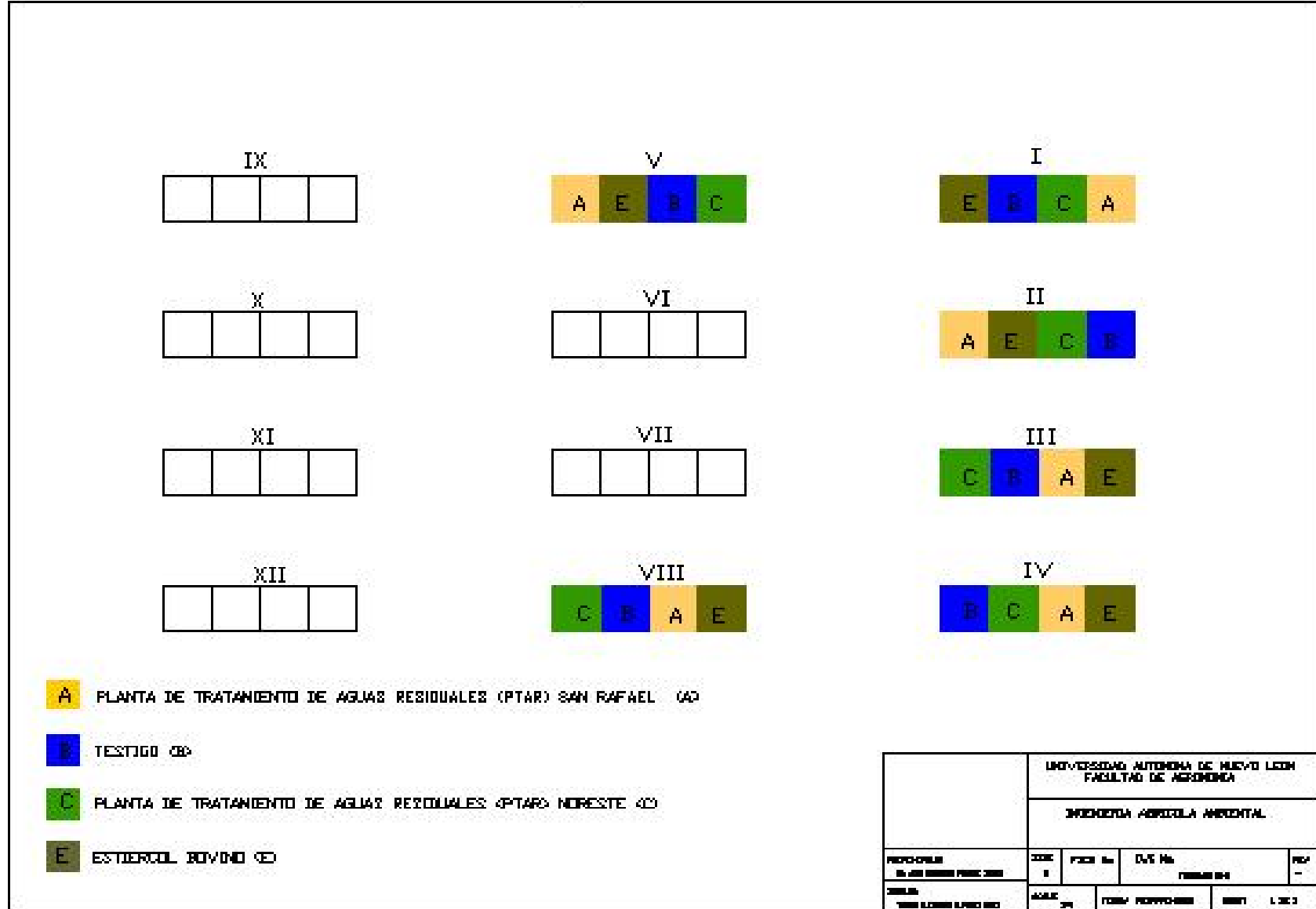


Figura 5. Plano con la localización y distribución de los tratamientos en la estación lisimétrica.

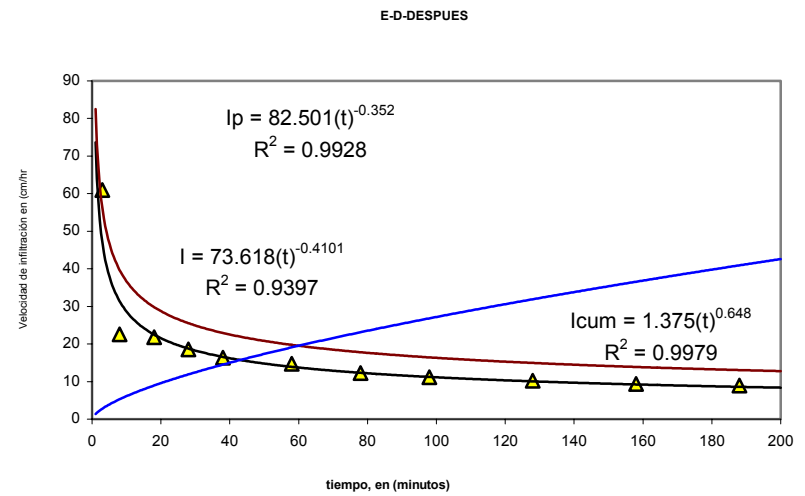
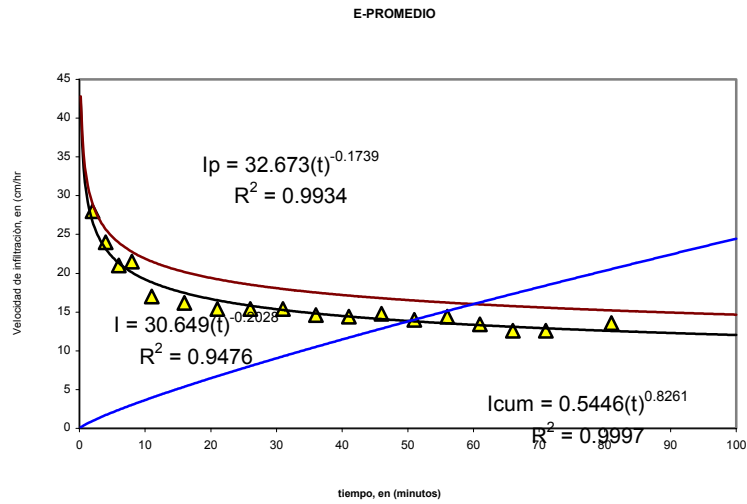
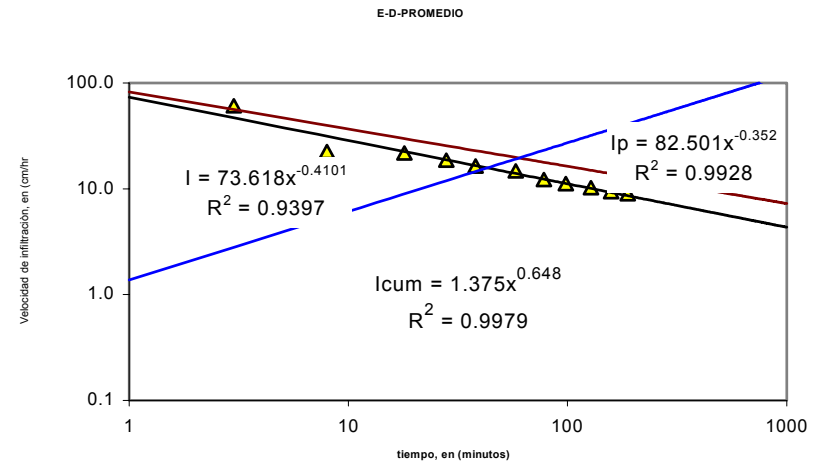
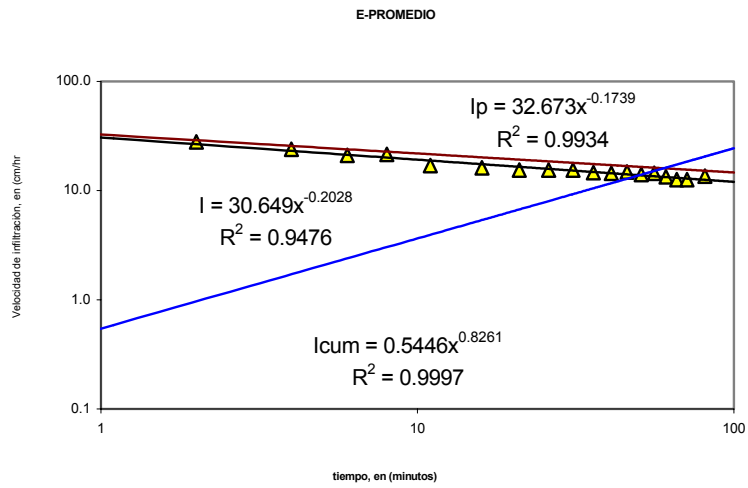


Figura.-6. Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I) promedio (Ip) y lámina infiltrada acumulada (Icum) antes y después de aplicar el estercol (E).



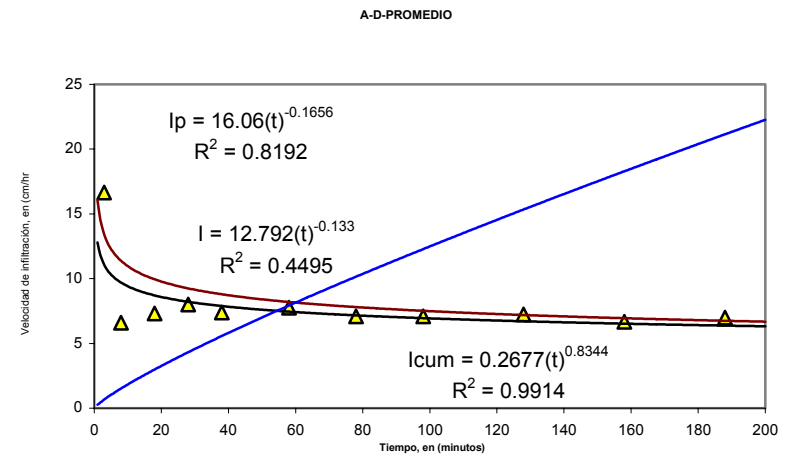
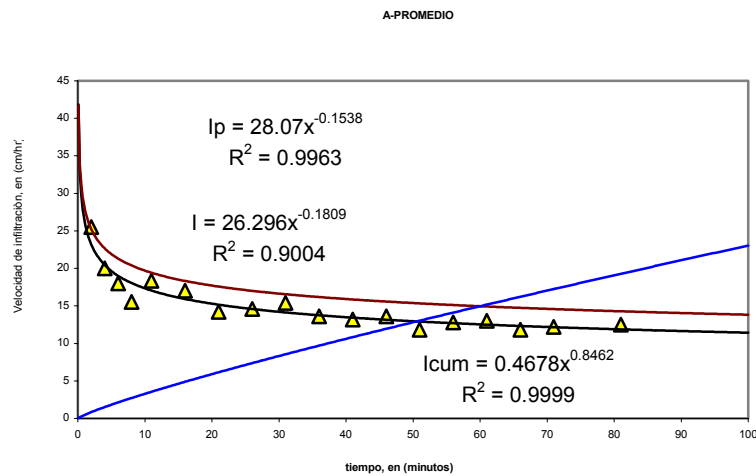
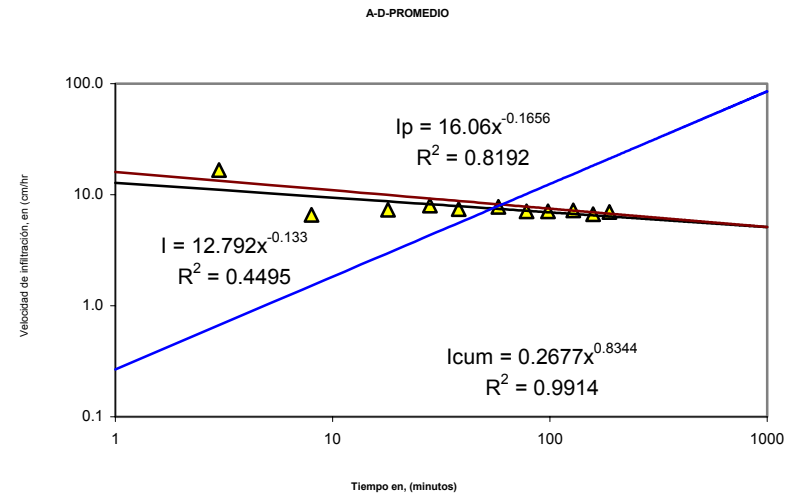
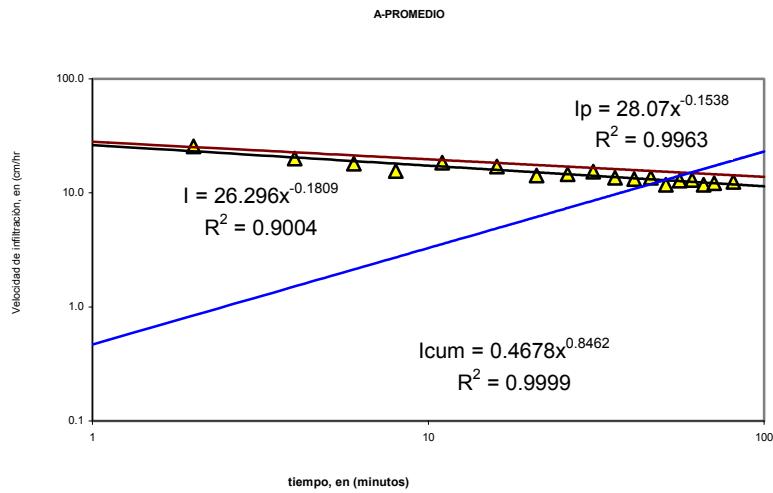


Fig.-7. Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I) promedio (Ip) y lámina infiltrada acumulada (Icum) antes de aplicar el lodo de la planta San Rafael (A)

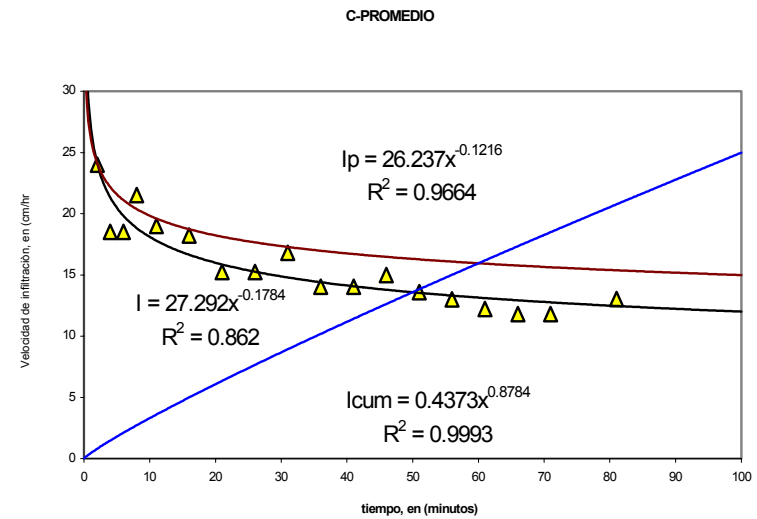
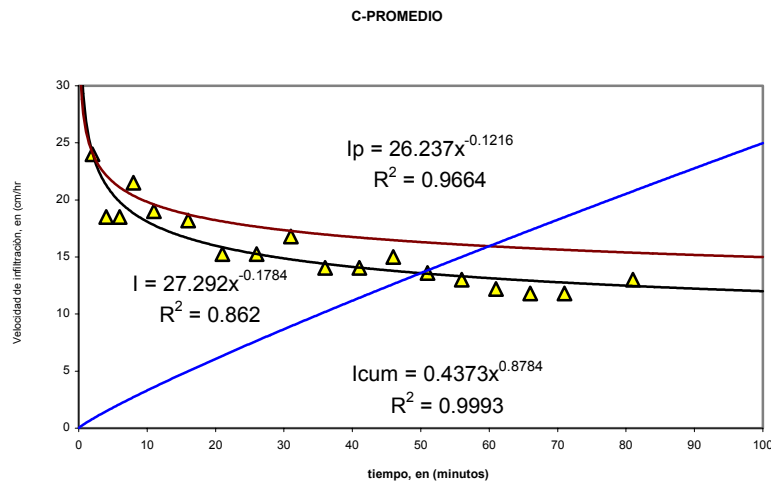
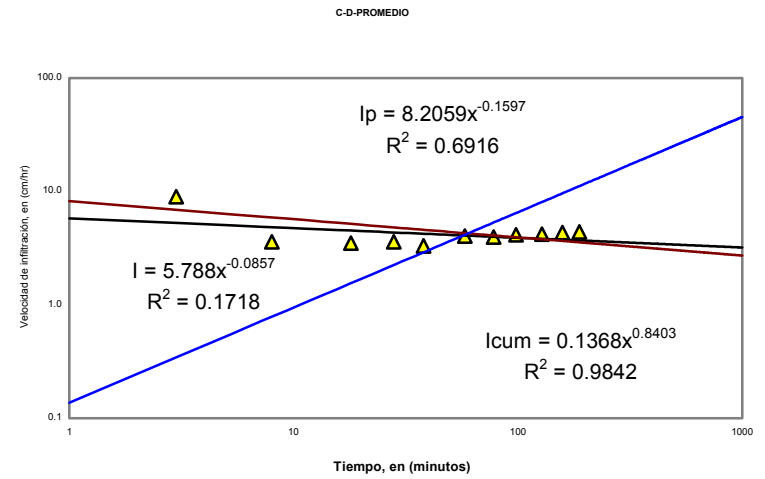
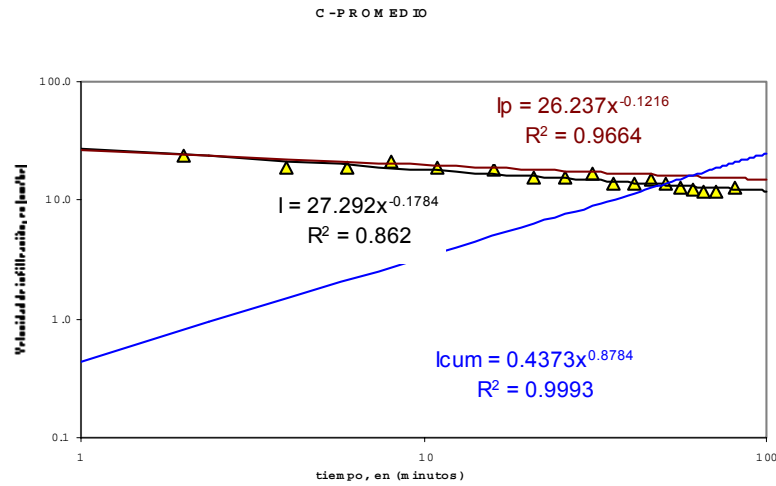


Fig.-8. Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I) promedio (Ip) y lámina infiltrada acumulada (Icum) antes y después de aplicar el lodo de la planta Noreste (C).

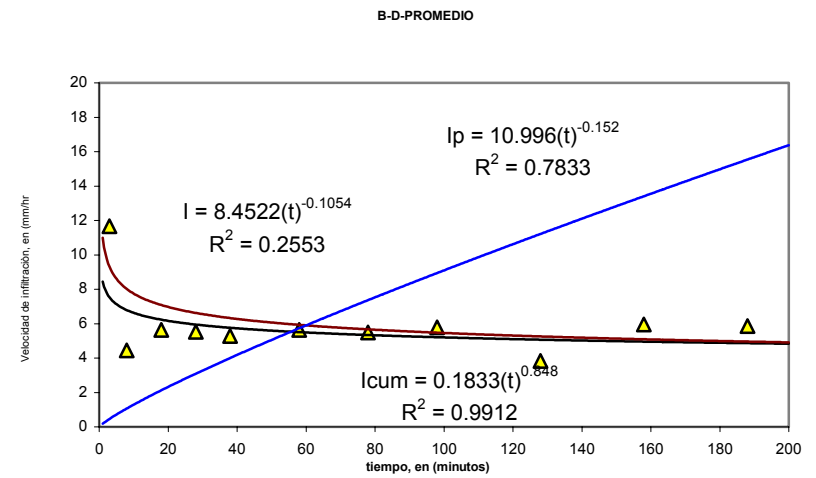
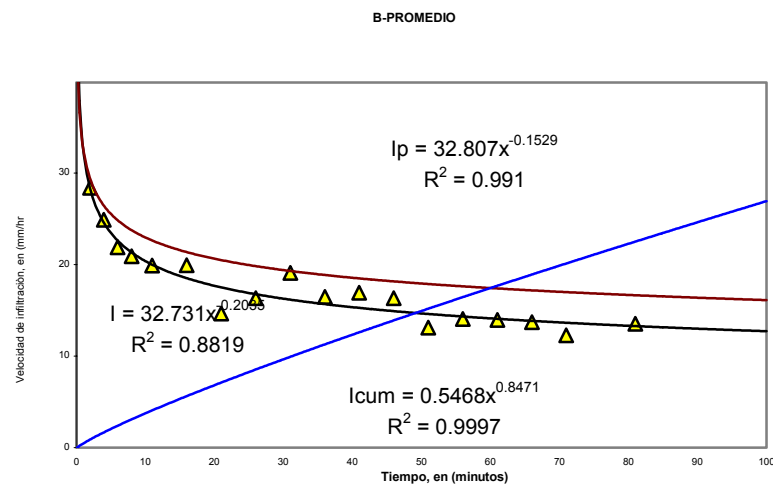
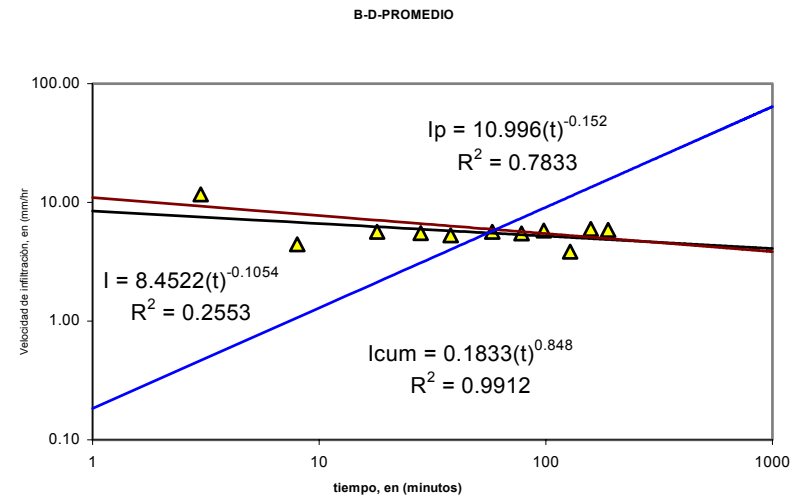
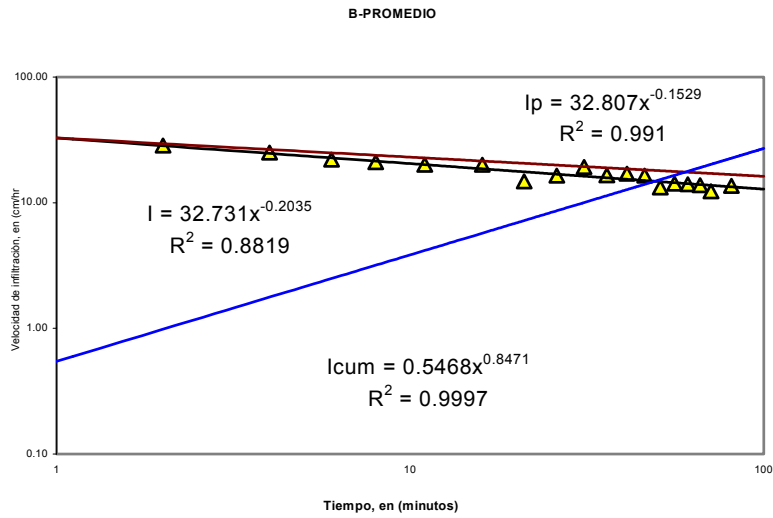


Figura.-9. Representación gráfica de la velocidad de infiltración instantánea (I) promedio ( $I_p$ ) y lámina infiltrada acumulada ( $I_{cum}$ ) en el testigo (B)