



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULACIÓN DE: INGENIERO CIVIL

**Implementación de cinco modelos matemáticos para el cálculo de la
infiltración en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB)**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Rivadeneira Erazo, Byron Geovanny

DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, PhD.

LOJA ECUADOR

2013

CERTIFICACIÓN.

Doctor.

Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN.

CERTIFICA:

Que el presente trabajo denominado **“Implementación de cinco modelos matemáticos para el cálculo de la infiltración en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB)”**, realizado por el profesional en formación Byron Geovanny Rivadeneira Erazo; cumple los requisitos establecidos para la Graduación en la Universidad Técnica Particular de Loja, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

Loja, septiembre del 2013

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.

Yo Byron Geovanny Rivadeneira Erazo declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: Byron Geovanny Rivadeneira Erazo

Cédula: 1104344609

DEDICATORIA.

El presente trabajo dedico fundamentalmente al Arquitecto del Universo, que con su expectativa me regalo la vida necesaria para culminar esta meta, y sobre todo a su sabiduría infinita por las pruebas puestas en el transcurso de este largo camino, pues de esta manera me puso al límite en la vida, como diría Facundo Cabral “No me privo de nada: ni de la miseria, tampoco del hambre o del frio, que construyen humanos más humildes”.

A mis amados padres Homero y Gladys ya fallecida, por haberme entregado la vida e iniciado en este hermoso camino de la existencia; por supuesto gracias al ejemplo de superación que me han dado hasta el día de hoy.

A mis hermanos y familiares que en este extenso sendero han formado parte de las alegrías y tristezas necesarias para haber llegado hasta este punto.

A Vladimir Toledo fue la persona que fío su confianza y me garantizo con el IECE; ¡Cuando nadie más cercano lo hizo!; Solo de esta forma pude continuar con mis estudios.

A Miguel Ángel que estando en las peores condiciones de vida, me dio cabida en la fundación “Salud y Vida” para tener un techo y un abrigo. A Diego Piedra que me brindo su techo y orientación cuando la fundación ya había cerrado. Jamás olvidaré a mi tía Mariana Y Mercedes que también me ayudaron de esta manera.

Dedico este trabajo al apoyo moral que me dio mi querido primo Santiago cuando me encontró en el fondo de un abismo, mientras nadie hubiese puesto confianza en este ser humano el me la entrego completamente; gracias a su apoyo entendí mi posición y canalice las palabras de Friedrich Nietzsche “El individuo ha luchado siempre para no ser absorbido por la tribu. Si lo intentas, a menudo estarás solo, y a veces asustado. Pero ningún precio es demasiado alto por el privilegio de ser uno mismo”.

Nunca hubiese logrado esto sin la fe y el trabajo que me regalaron Cristian Franco y Fernando Herrera indudablemente me ayudaron de manera inimaginable. David tus palabras de tranquilidad me ayudaron en todas las etapas cursadas, Amigo Raúl no sabría cómo pagarte las fuerzas entregadas y el apoyo físico que me regalaste y Juanito Constante tus palabras siempre alentaron a este soñador cuando desinteresadamente me decías con mucha confianza “Nadie muere del hambre y del frio cuando se tienen amigos”. Por todos ustedes me sentí obligado a salir de donde me encontré y espero jamás defraudarlos.

Este trabajo también es un logro tuyo Majito; llegaste como todo en la vida, en el momento adecuado con las condiciones más increíbles y me ayudaste a recuperar mi fe, mi esencia, mi felicidad... En pocas palabras me enseñaste y guiaste a ver la vida con los ojos de Dios.

Finalmente dedico este proyecto a todas las personas que por cualquier motivo lleguen a este humilde trabajo, lo utilicen, les sirva y entiendan que todo tiene un significado más grande que el de nuestra comprensión.

Byron Rivadeneira.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por haberme dado la tenacidad necesaria durante tanto tiempo, por enviarme retos y pruebas para olvidar el hambre y sueño que produjo este largo camino.

Al PhD. Fernando Oñate Valdivieso, Director de tesis, le expreso mis más sinceros sentimientos de respeto, agradecimiento y sobre todo admiración; por su apoyo tanto humano como técnico en este importante proceso de formación y culminación del presente trabajo de investigación.

Gracias Doctor Fernando por no permitirme hacer nada menor al trabajo realizado, por la motivación dentro del mismo; además por consentir poner mi valor agregado al proyecto.

Al ingeniero Santiago Quiñones, por su generoso y desinteresado asesoramiento para la culminación dentro del área de desarrollo informático de las herramientas presentadas. Pero además por ser un gran ser humano.

Agradezco a la Doctora Elsitá Cárdenas, mi tía Esperanza y tío Marco que me apoyaron incondicionalmente en momentos muy duros de mis trámites académicos.

Finalmente a mis compañeros, amigos inclusive compañeros de trabajo de quienes he aprendido mucho y me ayudaron a ser quien soy. Todos ellos me han dado las herramientas técnicas y económicas para lograr mis metas.

Mi forma de agradecerles es dejándoles la letra de una hermosa canción que me ayudó en momentos muy duros. Canción de un gran músico Latinoamericano Mercedes Sosa.

*“Tantas veces me mataron, tantas veces me morí, sin embargo estoy aquí resucitando.
Gracias doy a la desgracia y a la mano con puñal, porque me mató tan mal, y seguí
cantando.*

*Cantando al sol, como la cigarra, después de un año bajo la tierra, igual que sobreviviente
que vuelve de la guerra.*

*Tantas veces me borraron, tantas desaparecí, a mí propio entierro fui, solo y llorando.
Híce un nudo del pañuelo, pero me olvidé después que no era la única vez y seguí
cantando.*

*Cantando al sol, como la cigarra, después de un año bajo la tierra, igual que sobreviviente
que vuelve de la guerra.*

*Tantas veces te mataron, tantas resucitarás cuántas noches pasarás desesperando.
Y a la hora del naufragio y a la de la oscuridad alguien te rescatará, para ir cantando.
Cantando al sol, como la cigarra, después de un año bajo la tierra, igual que sobreviviente
que vuelve de la guerra.”*

Byron Rivadeneira.

TABLA DE CONTENIDOS.

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Introducción.....	4
1.1 Relevancia de la investigación.....	5
1.2 Formulación del problema.....	5
1.3 Objetivos generales e hipótesis.....	6
1.4 Orientación al lector acerca de la organización del TEXTO.....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. Materiales y métodos.....	9
2.1 Precipitación.....	9
2.2 Evaporación y evapotranspiración.....	9
2.2.1 Evaporación.....	9
2.2.2 Evapotranspiración.....	10
2.2.3 Intercepción.....	10
2.2.4 Retención superficial.....	10
2.3 Esguerrimiento superficial.....	10
2.3.1 Almacenamiento en depresiones.....	11
2.4 Infiltración.....	11
2.4.1 Humedad del suelo.....	12
2.4.2 Zonas que deben distinguirse en el suelo.....	12
2.4.3 FORMAS DE HUMEDAD.....	13
2.4.4 Contenido de humedad.....	13
2.4.5 Parámetros característicos de la infiltración.....	14
2.4.5.1 Capacidad de infiltración o tasa de infiltración.....	15
2.4.5.2 Velocidad de infiltración.....	17
2.4.5.3 Factores que influyen en la capacidad de infiltración.....	17
2.4.5.4 Métodos de medición de la capacidad de infiltración.....	17

2.4.5.4.1	Infiltrómetros.....	18
2.4.5.4.2	Lisímetros.....	20
2.4.5.4.3	Análisis de hidrogramas de esorrentía en cuencas pequeñas. ..	22
2.4.5.5	Métodos utilizados para el cálculo de la infiltración y aplicados al desarrollo del tema investigativo.....	22
2.4.5.5.1	Método infiltración media o índice de infiltración ϕ	22
2.4.5.5.2	Método número de la curva o número de escurrimiento.	24
2.4.5.5.3	Método de Richards-Phillips.	33
2.4.5.5.4	Método de Green-Ampt.	36
2.4.5.5.5	Método de Horton.....	40
2.4.5.6	Metodología de programación.....	42
2.4.5.6.1	Descripción y utilización de las herramientas virtuales.	42
2.4.5.6.2	Descripción del software utilizado para el desarrollo de la herramienta.	43
2.4.5.6.3	Manuales de uso de las herramientas desarrolladas e implementadas.	49
2.4.5.6.4	DIAGRAMAS DE FLUJO.....	51
CAPÍTULO III.....		56
3. Análisis de resultados.		57
3.1	Utilización de las herramientas y comparación con ejercicios resueltos de la bibliografía utilizada y con hojas de cálculo realizadas de cada método de infiltración utilizada.	57
3.1.1	Método infiltración media o índice de infiltración (ϕ).....	57
3.1.1.1	Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.	57
3.1.1.2	Ejemplo resuelto en el software microsoft excel 2010.	59
3.1.1.3	Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.....	60
3.1.1.4	Comparación de resultados.....	63
3.1.2	Método de Richard-Phillips.	63
3.1.2.1	Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.....	63
3.1.2.2	Ejemplo resuelto en el software microsoft excel 2010.	64
3.1.2.3	Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.....	65

3.1.2.4	Comparación de resultados.....	67
3.1.3	Método de Green-Ampt.....	67
3.1.3.1	Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.....	67
3.1.3.2	Ejemplo resuelto en el software microsoft excel 2010.	69
3.1.3.3	Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.....	71
3.1.3.4	Comparación de resultados.....	73
3.1.4	Método de Horton.	73
3.1.4.1	Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.....	73
3.1.4.2	Ejemplo resuelto en el software microsoft excel 2010.	75
3.1.4.3	Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.....	75
3.1.4.4	Comparación de resultados.....	77
3.1.5	Método número de la curva.....	78
3.1.5.1	Ejemplo resuelto mediante tablas y ecuaciones.	78
3.1.5.2	Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.....	80
3.1.5.3	Comparación de resultados.....	80
3.2	Análisis de resultados.	81
3.2.1	Infiltración media o índice de infiltración $F_i (\varphi)$	81
3.2.2	Infiltración método número de la cuenca.....	81
3.2.3	Infiltración método de Richad-Phillips.	81
3.2.4	Infiltración método de Green-Ampt.....	83
3.2.5	Infiltración método de Horton.	84
CAPÍTULO IV		85
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	86
4.1	Conclusiones.	86
4.2	Recomendaciones.	87
BIBLIOGRAFÍA.....		89

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución de la precipitación sobre una cuenca durante una tormenta:	11
Figura 2. Zonas de humedad durante la infiltración.	13
Figura 3. Tipos de humedad.	14
Figura 4. Capacidad de infiltración "f"	15
Figura 5. Infiltrómetro de doble anillo.	19
Figura 6 Lisímetro.....	21
Figura 7. Hietograma e Hidrograma.....	23
Figura 8. Volumen de control para el desarrollo de la ecuación de continuidad en un medio poroso no saturado.	34
Figura 9. Modelo de Green-Ampt.....	37
Figura 10. Perfiles de humedad del suelo, antes, durante y después que ocurra el encharcamiento.	40
Figura 11. Variables del modelo de Horton. Ecuación del flujo en medios no saturados.....	42
Figura 12. Portada del programa utilizado en el desarrollo de este proyecto	44
Figura 13. Portada del Sitio Web Hidrovlab	45
Figura 14. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor "Infiltración Modelo de Green-Ampt"	46
Figura 15. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor "Infiltración Modelo de Green-Ampt" ventana ".Aspx.vb"	47
Figura 16. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor "Infiltración Modelo de Green-Ampt" ventana ".Aspx"	48
Figura 17. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor "Infiltración Modelo de Green-Ampt" ventana de estilos.....	49
Figura 18. Recorte de página. Hidrograma y Hietograma	58
Figura 19. Recorte de página Cálculo escurrimiento directo.	58
Figura 20. Recorte de página Cálculo lluvia efectiva.....	59
Figura 21. Recorte de página Determinación de Φ	59
Figura 22. Recorte de página Hoja de cálculo método de infiltración media o índice de infiltración Φ	60

Figura 23. Recorte de página Panel de datos de la herramienta virtual Índice de infiltración Φ	61
Figura 24. Recorte de página Panel de resultados de la herramienta virtual Índice de infiltración Φ	62
Figura 25. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.2.1 Pág 112.	64
Figura 26. Recorte de página Hoja de cálculo método de Richad-Phillips	65
Figura 27. Recorte de página Panel de datos y resultados de la herramienta virtual Método de Richad-Phillips.....	66
Figura 28. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación de la variación en el contenido de humedad.....	68
Figura 29. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación de la infiltración acumulada.	68
Figura 30. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación tasa de infiltración.....	68
Figura 31. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 122. Tiempo de encharcamiento y profundidad de infiltración.....	69
Figura 32. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Green-Ampt. Variación en el contenido de humedad e infiltración acumulada.....	70
Figura 33. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Green-Ampt. Tasa de infiltración y tiempo de encharcamiento.....	70
Figura 34. Recorte de página Panel de datos de la herramienta virtual Método de Green-Ampt.....	72
Figura 35. Recorte de página Panel de Resultados de la herramienta virtual Método de Green-Ampt.....	72
Figura 36. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 6.4 página 170	74
Figura 37. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Horton.	75
Figura 38. Recorte de página. Panel o virtual Método de Horton.	76
Figura 39. Recorte de página. Panel de Resultados de la Herramienta virtual Método de Horton.....	77
Figura 40. Recorte de página. Tabla herramienta número de la curva.....	79
Figura 41. Recorte de página herramienta virtual "Infiltración Número de la Curva".	80

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Características y descripción hidrográficas de la hoya.....	27
Tabla 2. Grupos de suelo y sus características.....	28
Tabla 3. Tipos de suelos, usos y tratamientos.	30
Tabla 4. Condición Hidrológica.	30
Tabla 5. Condiciones de humedad antecedente.	31
Tabla 6. Números de curva escorrentía para usos selectivos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia=0.2S).....	46
Tabla 7. Valores CN para diferentes condiciones de humedad antecedente.	33
Tabla 8. Parámetros del suelo (porosidad, porosidad efectiva, cabeza de succión del suelo y conductividad hidráulica) para diferentes tipos de suelo.	38
Tabla 9. Ubicación anexos digitales de los manuales.	50
Tabla 10. Datos Hidrograma Ejemplo 7.1	57
Tabla 11. Datos Hietograma Ejemplo 7.1	58
Tabla 12. Resultados tabulados del Ejercicio 7.1	59
Tabla 13. Resultados tabulados de la Hoja de cálculo método de infiltración media o índice de infiltración Φ	60
Tabla 14. Resultados tabulados de la Herramienta Virtual Método de Infiltración Media o Índice de Infiltración Φ	62
Tabla 15. Datos ejemplo resuelto 4.2.1.....	63
Tabla 16. Resultados tabulados del Ejercicio 4.2.1	64
Tabla 17. Resultados tabulados Hoja de cálculo Método de Richard-Phillips.	65
Tabla 18. Resultados tabulados Herramienta Virtual Método de Richard-Phillips. ..	67
Tabla 19. Datos ejemplo resuelto 4.3.1.....	67
Tabla 20. Resultados tabulados del Ejercicio 4.3.1 página 119. Libro Hidrología Aplicada. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.....	69
Tabla 21. Resultados tabulados de la Hoja de cálculo Método de Green-Ampt.	71
Tabla 22. Resultados tabulados de la Herramienta Virtual Método de Green-Ampt.	72
Tabla 23. Datos ejemplo resuelto 6.4.....	73

Tabla 24. Resultados tabulados del Ejercicio 4.2.1 Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.	74
Tabla 25. Resultados tabulados. Hoja de cálculo Método de Horton.	75
Tabla 26. Resultados tabulados. Hoja de cálculo Método de Horton.	77
Tabla 27. Datos ejemplo resuelto Número de la curva.....	78
Tabla 28. Resultados de varios ejemplos resueltos por el modelo “Richard-Phillips”	82
Tabla 29. Resultados ejemplos resueltos por el modelo de “Green-Ampt”	83
Tabla 30. Resultado ejemplos resueltos por el modelo de "Horton".	84

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Evaporación.	9
Ecuación 2. Volumen de infiltración.	12
Ecuación 3. Capacidad de Infiltración Horton	16
Ecuación 4. Capacidad de infiltración Método de Porchet.	19
Ecuación 5. Cilindro excavado Método de Porchet.	20
Ecuación 6. Infiltración Simulación de lluvia.....	20
Ecuación 7. Lluvia de exceso efectiva.	23
Ecuación 8. Relación profundidad adicional del agua retenida en la cuenca.	25
Ecuación 9. Precipitación principio de continuidad.....	25
Ecuación 10. Precipitación efectiva principio de continuidad.	25
Ecuación 11. Precipitación efectiva Reemplazando $Ia = 0.25$	26
Ecuación 12. Capacidad de la hoya para abstraer agua de la precipitación.....	26
Ecuación 13. Precipitación efectiva Número de la Curva (S. Inglés)	26
Ecuación 14. Restricción de la precipitación según el Número de la curva (S. Inglés).....	26
Ecuación 15. Precipitación efectiva Número de la Curva (S. Internacional)	26
Ecuación 16. Restricción Precipitación (S. Internacional)	26
Ecuación 17. Abstracciones totales.	26
Ecuación 18. Ecuación Richards para el flujo en medios porosos no saturados.	34
Ecuación 19. Tasa de infiltración para tiempos distintos.	35
Ecuación 20. Conductividad hidráulica en las direcciones x, y, z.	36
Ecuación 21. Tasa de infiltración Richard-Phillips.....	36
Ecuación 22. Lamina de infiltración Richard-Phillips.	36
Ecuación 23. Volumen de Infiltración Green-Ampt.....	38
Ecuación 24. Tasa de infiltración Green-Ampt.	39
Ecuación 25. Intensidad de lluvia Green-Ampt	40
Ecuación 26. Tiempo de encharcamiento Green-Ampt.	40
Ecuación 27. Capacidad de infiltración Ecuación de Horton.	41

Ecuación 28. Volumen infiltrado Horton.	41
Ecuación 29. Diferencial de humedad respecto al tiempo.....	41

RESUMEN.

La presente investigación se orientó a la elaboración de cinco herramientas informáticas para ser implementadas en el Laboratorio Virtual de Hidrología (Hydrovlab); son programas para el cálculo de infiltración que utilizan el software Microsoft Visual Studio.Net 2005 y mediante los cual se pretende crear aplicaciones que permitan facilitar y simplificar procesos complejos, que se realizan en los estudios hidrológicos.

Los programas están diseñados para simular la infiltración del agua, mediante los modelos:

- ✚ Método de la Infiltración Media o Índice de infiltración F_i (\emptyset).
- ✚ Método de Green-Ampt.
- ✚ Método de Horton
- ✚ Método de Richard-Phillips
- ✚ Número de la Curva

Las herramientas se encuentran en el HYDROVLAB dentro de la sección de **Simulación**→ “Infiltración”.

Dirección electrónica:

["http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/SIMULACION/pInfiltracion/tabid/139/language/es-ES/Default.aspx"](http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/SIMULACION/pInfiltracion/tabid/139/language/es-ES/Default.aspx).

PALABRAS CLAVES: infiltración, índice de infiltración, Green-Ampt, Horton, Richard-Phillips, Número de la Curva, infiltración media, métodos de infiltración

ABSTRACT

Through this research, they were created five tools which were implemented in Hydrology Virtual Laboratory (Hydrovlab). These five programs work with Microsoft Visual Studio.Net 2005 software, and they are used for the calculation of infiltration. These applications allow realize complex processes, within hydrological studies, in a easy and simple way. The programs are designed to simulate water infiltration through the following mathematical models: PHI Index model. Green-Ampt Model. Green-Ampt Model. Phillips Curve Number Model.

Applications are in:

Web adress

["http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/SIMULACI%C3%93N/pInfiltracion/tabid/139/language/es-ES/Default.aspx"](http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/SIMULACI%C3%93N/pInfiltracion/tabid/139/language/es-ES/Default.aspx)

HYDROVLAB → Simulation section→ Infiltration.

Keywords: Infiltration/ Infiltration index/ Green-Ampt/ Horton/ Richard-Phillips/ Curve Number/ Medium infiltration/ Infiltration model.

CAPÍTULO I

1. Introducción.

Los fenómenos naturales siempre han cautivado y sorprendido al hombre, tanto por su exuberancia, complejidad y belleza como por su magnitud, frecuencia y peligrosidad. El Ciclo Hidrológico es uno de estos fenómenos, en el que además, en muchos casos, es necesario el conocimiento de sus variables de estado para la toma de decisiones en diversas áreas de la actividad humana, como pueden ser:

- ✚ Desarrollo gestión y control del agua.
- ✚ Estudio del balance hídrico en una cuenca.
- ✚ La defensa contra las crecidas e inundaciones.
- ✚ Eliminación y tratamiento de aguas usadas.
- ✚ Disminución de la contaminación.
- ✚ Generación Hídrica.
- ✚ Diseño de Obras Hidráulicas, etc.

Los estudios hidrológicos requieren del análisis de cuantiosa información hidrometeorológica; esta información puede ser datos de precipitación, caudales, temperatura, evaporación, infiltración, escorrentía superficial, entre otros.

Los datos recopilados sólo representan una información en bruto, pero si éstos se organizan y analizan en forma adecuada, proporcionan al hidrólogo una herramienta de gran utilidad que le permite tomar decisiones de vital importancia en el diseño de estructuras hidráulicas y demás actividades anteriormente mencionadas.

1.1 Relevancia de la investigación.

Debido al laborioso trabajo en el proceso de la información y de los cálculos, se puede incurrir en errores; en razón de lo cual es necesaria la elaboración de herramientas que permitan al hidrólogo simplificar todos estos procesos e inclusive simular sus resultados y de esta forma optimizar su diseño.

Considerando que el HYDROVLAB aún no cuenta con todas las aplicaciones utilizadas en la hidrología, es necesario ampliar su campo de aplicación, mejorar sus capacidades e implementar nuevas herramientas; por lo que, al incluirse el cálculo de infiltración se incrementarán sus actuales capacidades para ser un entorno virtual más completo en el ámbito hidrológico.

Es necesario elaborar una herramienta denominada “Infiltración” dentro del LABORATORIO VIRTUAL DE HIDROLOGÍA “HYDROVLAB”, La misma que cuente con una interfaz amigable que permita ingresar los datos de manera directa, y que además facilite y simplifique los cálculos que requieren los métodos de infiltración debido al análisis de la abundante información a realizar en los estudios hidrológicos.

Estas herramientas permite resolver muchos de los inconvenientes anteriormente mencionados; además de brindar a la comunidad mundial de ingeniería civil ayudas ofimáticas para el desarrollo técnico-científico en el área de la hidrología.

1.2 Formulación del problema.

Para realizar los cálculos, los hidrólogos tienen que afrontar una serie de problemas, debido a que:

- ✚ No existe programas paramétricos que realicen estos cálculos y que estén al alcance de los profesionales y sobre todo de los estudiantes; pues en un programa paramétrico se entienden de mejor manera y ordenadamente los procesos de cálculo de la información.
- ✚ El procesamiento de la información que se tiene que realizar es bastante laboriosa.
- ✚ Las ecuaciones a solucionar, en la mayoría de los casos, son muy complejas, y para su resolución se requiere el uso de métodos numéricos.
- ✚ Las simulaciones que se realizan manualmente consumen mucho tiempo, debido a los cálculos requeridos.

1.3 Objetivos generales e hipótesis.

El objetivo general de esta investigación es la **Implementación de cinco modelos matemáticos para el cálculo de la infiltración en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB)**. De esta manera se contribuye a la iniciativa del laboratorio virtual de hidrología “HYDROVLAB” que nace desde la Universidad Técnica Particular de Loja con el PhD. Fernando Oñate Valdivieso.

El laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB) tiene por finalidad proporcionar a estudiantes y profesionales un medio que permita observar, experimentar y comprender el comportamiento de un sistema hidrológico y la interrelación de las variables en éste involucradas. (HYDROVLAB; Universidad Técnica Particular de Loja; Pontificia Universidad Católica del Ecuador; Universidad Nacional de Chimborazo; CEDIA;, 2010).

1.4 Orientación al lector acerca de la organización del TEXTO.

La investigación realizada se muestra en los siguientes capítulos:

CAPÍTULO I

Información necesaria para la elaboración de este tema investigativo.

CAPÍTULO II

- ✚ Explicación detallada de los métodos que se van a desarrollar.
- ✚ Se describe el lenguaje de programación, códigos y diagramas de flujo de las herramientas virtuales.
- ✚ Se muestra información acerca del laboratorio virtual de hidrología “HYDROVLAB”.

CAPÍTULO III

Contiene ejemplos de aplicación de cada una de las herramientas implementadas en el laboratorio de hidrología “HYDROVLAB”. Y se compara con los resultados obtenidos de las hojas de cálculo realizadas en el Software Microsoft Excel 2010.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones del tema de investigación.

CAPÍTULO II

2. Materiales y métodos

2.1 Precipitación.

“La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmosfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad de condense”. (Chow, Maidment, & Mays, 1994, pág. 65). Es fundamental el estudio de la precipitación; pues de esta manera se obtiene de forma cuantitativa el ingreso de agua en una cuenca.

2.2 Evaporación y evapotranspiración.

2.2.1 Evaporación.

Es el proceso en el cual el agua que se almacena en grandes depósitos como lagos, presas, sistemas de conducción, etc. pasa de estado líquido a gaseoso y se transmite a la atmosfera. Producido por la energía cinética causada por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. (Oñate Valdivieso, 2013)

$$E = k(ew - ea) \quad \text{Ec. 1}$$

ew - Presión de vapor en la zona de intercambio

ea - Presión de vapor de aire en un momento dado.

k - Constante de proporcionalidad

E - Evaporación.

2.2.2 Evapotranspiración.

“Es la suma del agua perdida en la atmósfera por la evaporación desde cualquier superficie evaporante y por la transpiración de la vegetación”. (Oñate Valdivieso, 2013, pág. 52)

2.2.3 Intercepción.

Es la lluvia que es temporaria o permanentemente retenida antes de llegar al suelo. Durante el comienzo de la tormenta una importante porción de lluvia es retenida por la cobertura vegetal o por otras superficies. (FCEFYN, 2013)

2.2.4 Retención superficial.

Es el agua que se almacena en charcos y depresiones, que posteriormente se evapora. (Monsalve Sáenz, 1999)

2.3 Escurrimiento superficial.

En la Figura 1 se muestra de manera clara, que no todas las tormentas que ocurren en un determinado sitio se convierten en escurrimiento superficial, pues por muchos factores que interceptan el agua no permite su escurrimiento hasta un río. Estos procesos de almacenamiento se dan en depresiones, en intercepciones, por procesos de evaporación, transpiración e infiltración. (FCEFYN, 2013).

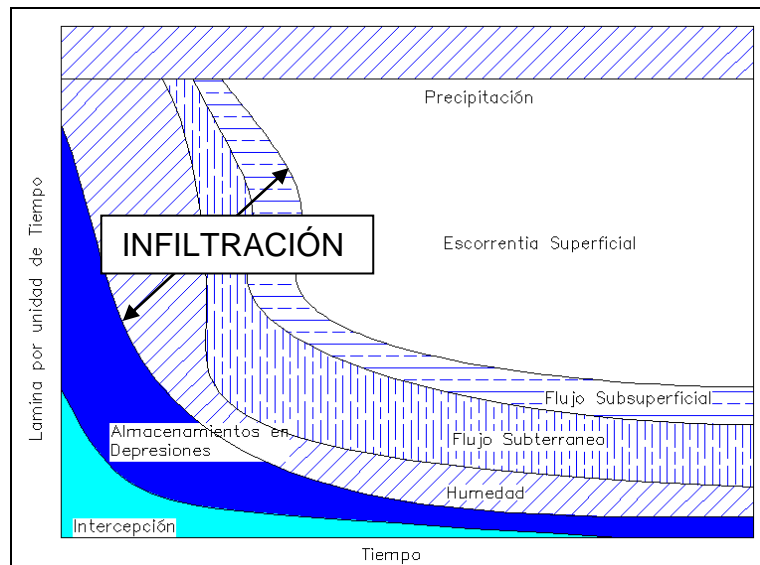


Figura 1. Distribución de la precipitación sobre una cuenca durante una tormenta:
Fuente: Adaptado de Linsley y otros 1986.

2.3.1 Almacenamiento en depresiones.

“Es el volumen de agua almacenado en las depresiones naturales, lagunas o superficies impermeables. La Figura 1 muestra que la tasa de almacenamiento en las depresiones decrece desde un valor elevado hasta un valor constante cuando todas las depresiones en la cuenca están llenas. Una vez que la intensidad de la lluvia ha excedido la capacidad de infiltración local del suelo, la superficie de las depresiones comienza a llenarse. Después que las depresiones más pequeñas se llenan, comienza el flujo subsuperficial, el cual puede llenar depresiones mayores o puede fluir directamente al canal”. (FCEFYN, 2013).

2.4 Infiltración.

Infiltración, es el proceso por el cual el agua penetra de la superficie hacia el suelo. Se lo puede mostrar en etapas por las cuales atraviesa este fenómeno:

- 1.- Satisfacer la humedad necesaria de una zona cercana a la superficie.
- 2.- Superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea para llenar los espacios vacíos. (Monsalve Sáenz, 1999; Segerer & Villodas, 2006).

La infiltración es un fenómeno muy complejo que puede escribirse mediante ecuaciones matemáticas sólo de manera aproximada.

La mayoría de las ecuaciones de infiltración describen la tasa potencial. La infiltración acumulada F es igual a la profundidad acumulada del agua infiltrada dentro de un periodo dado, y es igual a la tasa de infiltración en ese periodo.

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad \text{Ec. 2}$$

La infiltración es de amplia importancia y debe formar parte del conocimiento para entender la relación entre precipitación y el escurrimiento, existen algunos factores que afectan a la infiltración dentro de una cuenca; trataremos cada uno de ellos.

2.4.1 Humedad del suelo.

“Es el volumen de agua que se infiltra en el suelo, pero antes que llegue al nivel freático se evapora o es removida del suelo por acción de raíces de las plantas o por evaporación” (Monsalve Sáenz, 1999, pág. 132)

2.4.2 Zonas que deben distinguirse en el suelo.

Como podemos observar en la Figura 2, se muestra la división de 2 zonas, la saturada donde los poros del suelo están completamente llenos de agua; y la no saturada donde los poros de del suelo están llenos de agua y aire.

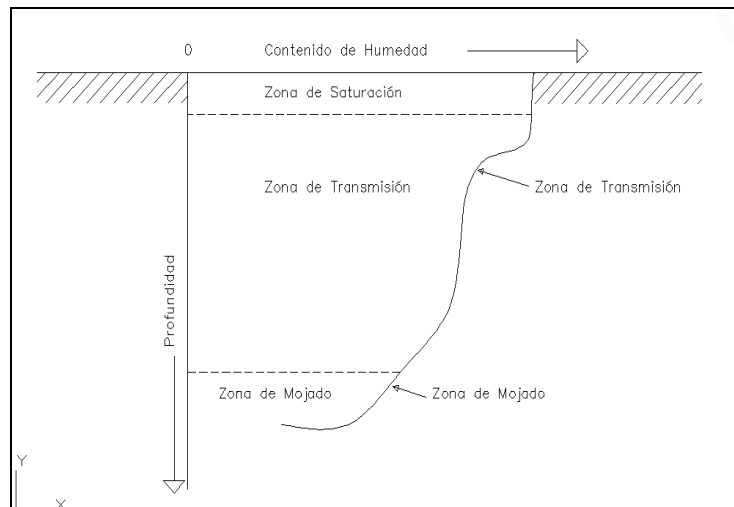


Figura 2. Zonas de humedad durante la infiltración.
Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994

2.4.3 FORMAS DE HUMEDAD

Se presentan tres tipos de humedades según sea su ubicación y disposición en el suelo: La Humedad higroscópica que no está disponible para las plantas, pues se adhiere fuertemente al suelo; humedad capilar que es la que sirve de suministro para las plantas; y la humedad gravitacional que se mueve verticalmente desde la superficie, hasta la zona saturada. (Monsalve Sáenz, 1999).

2.4.4 Contenido de humedad

En la Figura 3 se muestran los diferentes tipos de humedad que están a través de la profundidad de sus estratos, además de los índices relacionados a cada uno de ellos y sus condiciones físicas.

COEFICIENTE HIGROSCÓPICO.- Es la máxima humedad que puede absorber una muestra de suelo en contacto con una atmósfera al 50% de la humedad relativa y a 25° C. (Monsalve Sáenz, 1999)

PUNTO DE MARCHITEZ.- Es el contenido de humedad con la cual las plantas presentan permanentemente su marchitez; este punto depende mucho de las características de las plantas que se encuentren en el sector. (Monsalve Sáenz, 1999).

CAPACIDAD DE CAMPO.- Es la cantidad de agua que el suelo retiene luego de ser centrifugado con una fuerza de 100g. (Monsalve Sáenz, 1999).

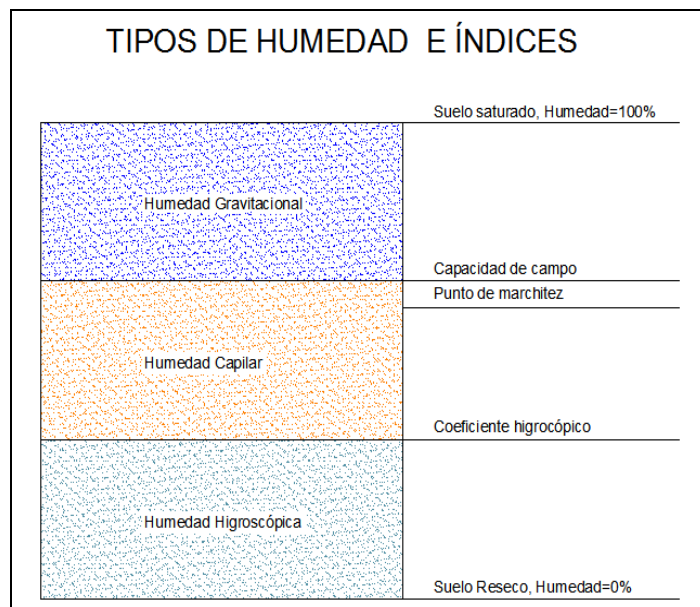


Figura 3. Tipos de humedad.
Fuente: Monsalve Sáenz, 1999.

Cuando el contenido de humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, el déficit de humedad es la diferencia entre estos dos valores. (Monsalve Sáenz, 1999).

2.4.5 Parámetros característicos de la infiltración.

A continuación se enumera las principales características de este fenómeno.

2.4.5.1 Capacidad de infiltración o tasa de infiltración.

Es la capacidad máxima de agua que puede absorber el suelo en determinadas condiciones. Este valor es variable en el tiempo en función de la humedad del suelo, y también depende de la compactación que posea el mismo. (Segerer & Villodas, 2006).

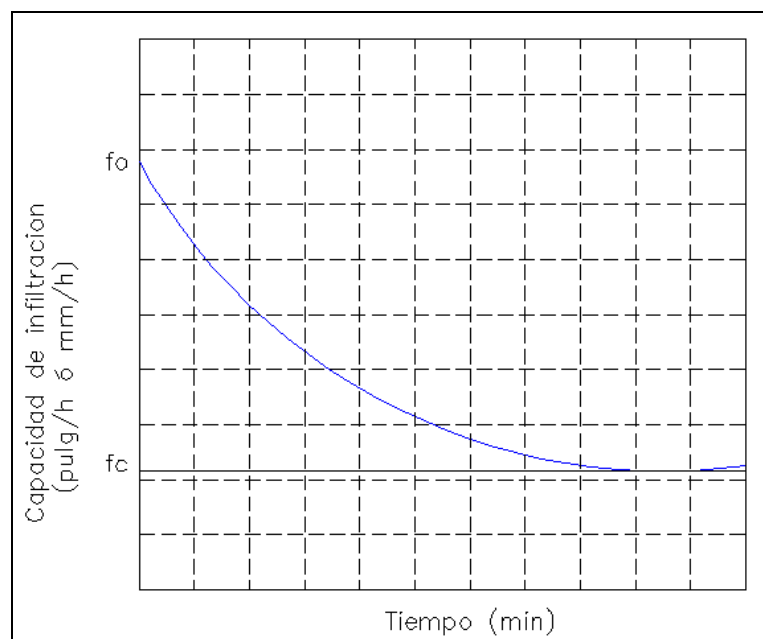


Figura 4. Capacidad de infiltración "f"
Fuente: Adaptado de Segerer & Villodas, 2006.

En la Figura 4 se muestra que la capacidad de infiltración va decreciendo conforme se desarrolla el fenómeno de infiltración, su decrecimiento se da desde el valor máximo f_0 (capacidad de absorción del terreno en las condiciones instantáneas) hasta su valor constante de infiltración f_c que alcanza el terreno un nivel de saturación.

“Es la capacidad de un suelo determinado para absorber agua de lluvia aplicada al mismo en forma continuada y excesiva, decrece gradualmente a partir de un máximo al comienzo de la precipitación, hasta alcanzar un valor mínimo de

infiltración, sensiblemente constante, por lo general dentro de un período no mayor a un par de horas. La ley de variación y la duración de tal decrecimiento son funciones del perfil del suelo. Horton relaciona la capacidad de infiltración con la duración de una lluvia de intensidad superior a aquélla en cada momento, mediante la Ecuación” (Segerer & Villodas, 2006, pág. 180).

$$f = fc + (fo - fc)e^{-kt} \quad \text{Ec. 3}$$

- f - Capacidad de infiltración en el instante.
- f_c - Valor constante de la capacidad de infiltración que se alcanza al cabo de un cierto tiempo.
- f_o - Valor máximo de la capacidad al comienzo de la lluvia.
- k - Constante positiva que depende del tiempo de terreno.
- t - Tiempo transcurrido desde el comienzo de la lluvia.

Los valores de f_c y f_o se deben obtener por mediciones directas. La capacidad de infiltración de un suelo, al comienzo de la precipitación, es función del perfil del suelo como del contenido inicial de humedad que el mismo tenga. (Segerer & Villodas, 2006).

“Cuando la intensidad de la lluvia sea menor que la capacidad de infiltración, se alcanzará una intensidad de infiltración inferior a la capacidad de infiltración. Esta constituye, por lo tanto, el valor máximo de la intensidad de infiltración, para condiciones predeterminadas del suelo”. (Segerer & Villodas, 2006, pág. 180)

El exceso de precipitación se determina al restar de la capacidad de infiltración la intensidad de lluvia, y está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Exceso de precipitación} = (i - f)\Delta t, \text{ en mm.}$$

- i - Intensidad de lluvia mm/h.
- f - Capacidad de infiltración mm/h.

A la capacidad de infiltración solo se llega si el exceso de precipitación es mayor o igual a cero. En un caso diferente la absorción de agua del suelo no es máxima, y por consiguiente no es igual a la capacidad que infiltra. (Monsalve Sáenz, 1999).

Tenemos:

$$\text{Si } i < f \Rightarrow f_o = i$$

$$\text{Si } i \geq f \Rightarrow f_o = f$$

f_o - Capacidad de absorción del terreno.

2.4.5.2 Velocidad de infiltración.

Es la velocidad media con la que el agua atraviesa el suelo, Este parámetro solo no es muy buen referente pues depende de la permeabilidad y el gradiente hidráulico. (Monsalve Sáenz, 1999).

No hay que olvidar que la infiltración depende de las condiciones del entorno.

2.4.5.3 Factores que influyen en la capacidad de infiltración.

- Humedad del suelo.
- Permeabilidad del suelo.
- Temperatura del suelo y condiciones del entorno. (Monsalve Sáenz, 1999).

2.4.5.4 Métodos de medición de la capacidad de infiltración.

Para cada método se da un valor resultado relativo y variante.

- Infiltrómetros.

- Lisímetros.
- Análisis de hidrogramas de escorrentía en cuencas pequeñas.

2.4.5.4.1 Infiltrómetros.

Se los utiliza para mediciones puntuales, y con ellos la capacidad de infiltración es determinada directamente. Para que las mediciones sean más aproximadas a la realidad la cuenca debe dividirse en áreas pequeñas donde se haga el ensayo. (Segerer & Villodas, 2006).

Hay dos tipos:

- Tipo Inundador.
- Tipo simulador de lluvia.

2.4.5.4.1.1 Infiltrómetro tipo inundador.

Aquí la capacidad de infiltración se deduce del volumen de agua que es necesario añadir para mantener una lámina de espesor constante sobre un área bien definida del terreno. La lámina debe estar en los parámetros habituales para una tormenta de la zona. El inconveniente más relevante es la compactación dada al terreno por causa de la caída de precipitación, y que no es posible simular en este modelo. (Segerer & Villodas, 2006).

Los modelos difieren en forma y métodos de medida. A continuación se enumeran algunos:

Cilindros concéntricos (método de müntz).

“Están constituidos por dos superficies cilíndricas metálicas, abiertas por ambas bases y unidas entre sí para mantenerlas concéntricas al hincalarlas parcialmente en el terreno, hasta una profundidad de unos 10 cm.” (Segerer & Villodas, 2006).

Se vierte una cantidad de agua en ambos cilindros como se muestra en la Figura 5, donde el cilindro exterior no permite la expansión lateral del agua. Luego de un determinado tiempo, el cual debe ser medido, hasta que el nivel de agua enrase con la varilla; Luego de esto se procede de manera ciclica a medir los tiempos que tarda en absorberse estos volúmenes de agua.

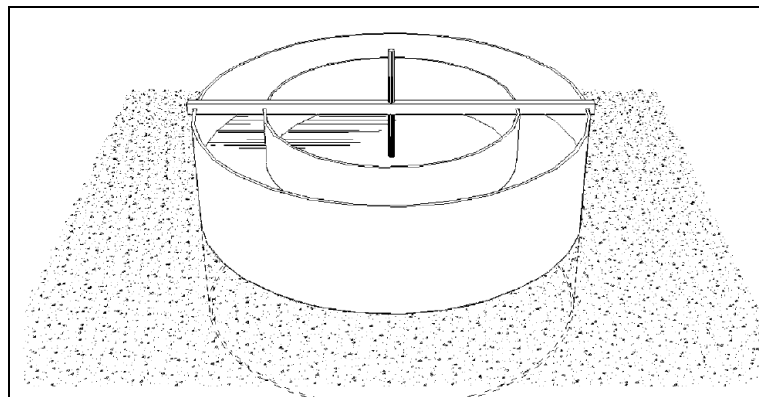


Figura 5. Infiltrómetro de doble anillo.
Fuente: Segerer & Villodas, 2006.

Cilindro excavado en el suelo (método de porchet).

Se excava un hoyo en el suelo de dimensiones R igual al radio, y se lo llena con una altura h (como se detalla en la Figura 6), posteriormente para determinar f (capacidad de infiltración) tenemos que medir los valores en pares, de manera que t_2 (tiempo 2) no sea muy diferente de t_1 (tiempo 1) y de esta forma aplicamos la expresión siguiente:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

La superficie por donde se infiltra el agua se determina con la Ecuación 5:

$$S = (2\pi R)h + \pi R^2 = \pi R(2h + R) \quad \text{Ec. 5}$$

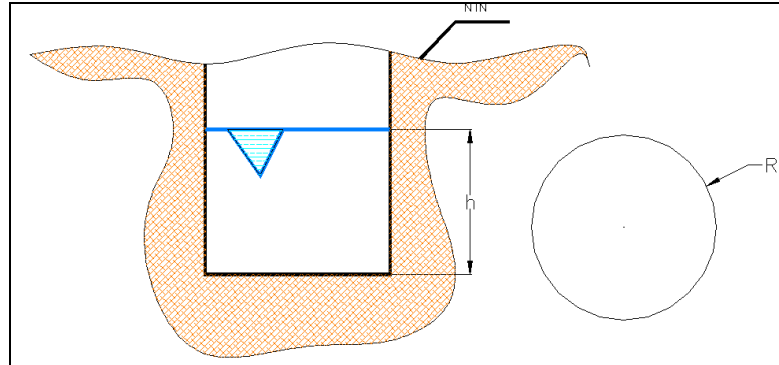


Figura 6. Cilindro excavado en el suelo
Fuente: Adaptado de Segerer & Villodas, 2006.

2.4.5.4.1.2 Infiltrómetro tipo simuladores de lluvia.

En parcelas que varían entre 0.1 y 40 m² se simula artificialmente la lluvia por medio de aspersores; los cuales controlan la intensidad, duración y la lámina total de precipitación artificial. Se mide la escorrentía superficial directa y la infiltración se deduce de la resta de la precipitación y la escorrentía. (Segerer & Villodas, 2006).

$$I = P - E \quad \text{Ec. 6}$$

- I - Infiltración.
- P - Precipitación.
- E - Esgurrimiento superficial.

2.4.5.4.2 Lisímetros.

Es un depósito rectangular, enterrado y relleno con suelo del sitio. Tiene incorporado un pluviómetro que permite medir los caudales que ingresan al

lisímetro por recolección de agua de drenaje, como por recolección de agua de escorrentía. (Segerer & Villodas, 2006; Wikipedia, 2013).

Para entender mejor la descripción remítase a observar la Figura 7, donde muestra en etapas el funcionamiento del lisímetro.

Las etapas son las descritas a continuación:

- A - Terreno de estudio.
- B - Balanza.
- C - Recolección de agua de drenaje.
- D - Recolección de agua de escorrentía.

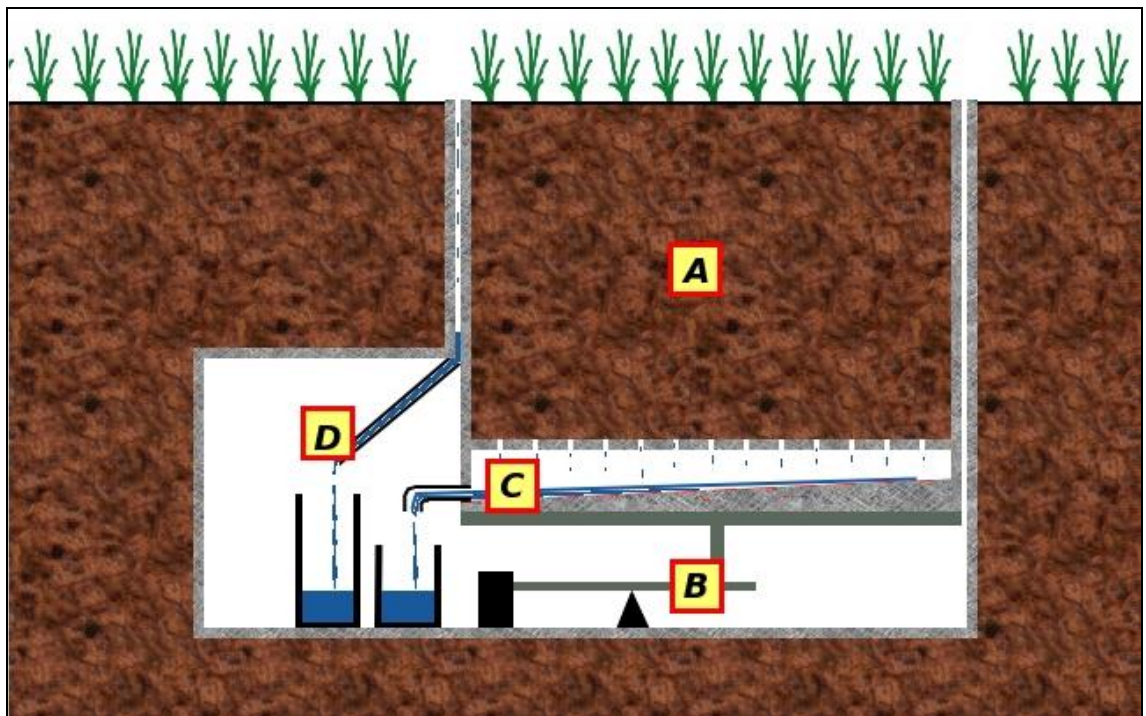


Figura 7 Lisímetro

Fuente: Wikipedia, 2013, <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Lis%C3%ADmetro&oldid=64791529>

2.4.5.4.3 Análisis de hidrogramas de escorrentía en cuencas pequeñas.

Muchos índices se usan para estimar la infiltración en una cuenca como respuesta a una lámina precipitada. Estos hallan la infiltración utilizando los hidrogramas y el Hietograma de la tormenta correspondiente. El más usado es el índice Φ , llamado de capacidad de infiltración media. El índice Φ se define como la intensidad media por encima de la cual todo lo precipitado se transforma en escorrentía superficial directa. (Oñate Valdivieso, 2013).

2.4.5.5 Métodos utilizados para el cálculo de la infiltración y aplicados al desarrollo del tema investigativo.

En los siguientes ítems se describe de manera detallada cada uno de los métodos que se desarrollaron para la determinación de la infiltración dentro del HYDROVLAB.

2.4.5.5.1 Método infiltración media o índice de infiltración φ .

Es uno de los métodos más usados, este índice es igual a la intensidad de lluvia promedio por encima del cual la masa de escorrentía superficial es igual a la masa de lluvia neta (Índice Φ en mm/h) (Monsalve Sáenz, 1999).

Este índice determina la lluvia y escorrentía superficial medidas en una hoyo hidrográfica particular.

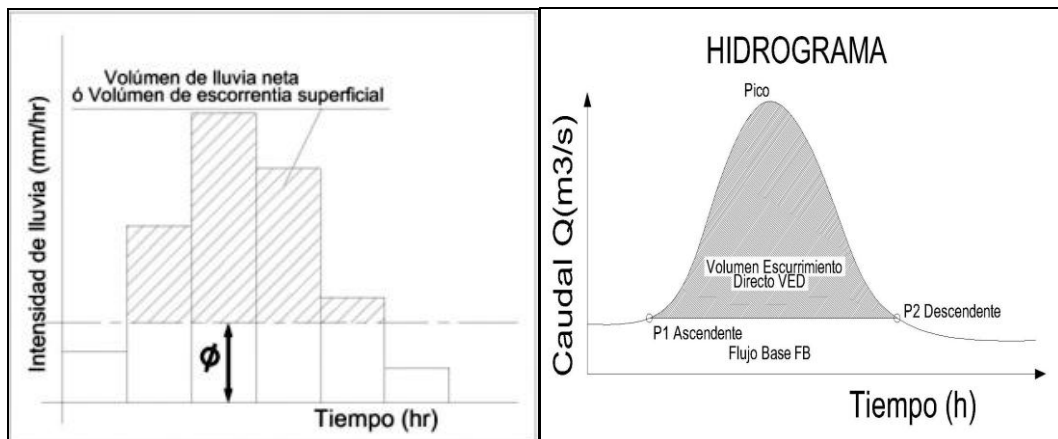


Figura 8. Hietograma e Hidrograma.
Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999

Este método tiene como premisa que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta; a esta capacidad de infiltración se la llama índice de infiltración media Φ . Cuando se tiene un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, se estima en los siguientes pasos:

- A partir del Hidrograma de la avenida se separa el volumen o caudal base, y se determina el volumen de escurrimiento directo que es el área bajo la curva excluido el flujo base (Figura 8 sección derecha).
- Se calcula la altura de lluvia en exceso o efectiva, como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca.

$$I_{ef} = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad \text{Ec. 7}$$

- Se calcula el índice de infiltración media Φ trazando una horizontal en el Hietograma (Figura 7 sección izquierda) de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de las precipitaciones que quedan arriba de esta línea sea igual a la altura de lluvia efectiva (I_{ef}). El índice de infiltración media Φ será igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal

dividida entre el intervalo de tiempo que dure cada barra del Hietograma.
(Aparicio Mijares, 1992).

Consideraciones complementarias.

La deducción del índice de infiltración es relativamente simple; sin embargo, en la realidad, los índices no son más que tasas promedio de pérdida y su magnitud depende altamente de las condiciones antecedentes, de modo que no son superiores a las relaciones multivariadas.

El índice ha sido utilizado en ciertos análisis de hidrogramas para definir el patrón de tiempo de la lluvia efectiva. En estos casos, el volumen real de escorrentía es conocido y no existe ningún problema en la determinación de Φ , pero, como la infiltración real no es uniforme, el patrón de escorrentía obtenido a partir de Φ puede no ser correcto. (Segerer & Villodas, 2006).

“En general los índices de infiltración se utilizan en sentido inverso, es decir, se supone que tienen un determinado valor, y restándolo del Hietograma, se llega a poder construir un Hidrograma aproximado del volumen de escorrentía en una sección del cauce. Pero cualquiera que sea la forma de utilización de estos índices, sólo puede esperarse de su aplicación resultados aproximados”. (Segerer & Villodas, 2006).

2.4.5.5.2 Método número de la curva o número de escurrimiento.

Este método determina la cantidad efectiva de precipitación, La precipitación efectiva es función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de la curva CN. (Monsalve Sáenz, 1999).

Fue desarrollado por el Servicio de conservación de Suelos de los Estados Unidos.

El valor de CN se encuentra entre 1 y 100.

Propiedades productoras de escorrentía de una hoya:

- a) Tipo de suelo hidrológico.
- b) Utilización y tratamiento del suelo.
- c) Condiciones de la superficie del terreno.
- d) Condiciones de la humedad antecedente del suelo.

Este método fue basado en datos de escorrentía y precipitación en un periodo de 24 horas. Nos brinda un límite en la profundidad de escorrentía, dejando de lado las variaciones temporales de la intensidad de lluvia. (Monsalve Sáenz, 1999).

La hipótesis planteada en este método es:

Las relaciones de las dos cantidades reales y las dos potenciales son iguales.

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia} \quad \text{Ec. 8}$$

Fa - Profundidad adicional del agua retenida en la cuenca.

S - Retención potencial máxima.

Pe - Precipitación o escorrentía directa.

P - Profundidad de la precipitación.

Ia - Cantidad de precipitación.

La relación obtenida del principio de continuidad es:

$$P = Pe + Ia + Fa \quad \text{Ec. 9}$$

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad \text{Ec. 10}$$

$$\text{Si } Ia = 0.2S$$

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec. 11}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ec. 12}$$

CN - Número de la curva de escorrentía (adimensional).

S - Capacidad de la hoya para abstraer agua de la precipitación; de 1000 y 10 están en pulgadas.

Si $CN = 100$, $S = 0$

Si $CN = 1$, $S = 990$ (pulgadas)

De aquí concluimos que la capacidad de la hoya hidrográfica para abstraer agua de la precipitación es inversamente proporcional al número de la curva de escorrentía.

$$Pe = \frac{[CN(P + 2) + 200]^2}{CN[CN(P - 8) + 800]}, \text{ en pulgadas.} \quad \text{Ec. 13}$$

$$\text{Si } P \geq \left(\frac{200}{CN}\right) - 2 \quad \text{Ec. 14}$$

$$Pe = \frac{R[CN((P/R) + 2) - 200]^2}{CN[CN((P/R) - 8) + 800]}, \text{ en unidades métricas.} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\text{Si } P \geq R \left[\left(\frac{200}{CN}\right) - 2 \right], R=2.54, P \text{ y } Pe \text{ en cm.} \quad \text{Ec. 16}$$

$$A = P - Pe \quad \text{Ec. 17}$$

A - Abstracciones totales.

2.4.5.5.2.1 Estimación del número de la curva de escorrentía CN .

Con la precipitación (P) y el número de la curva (CN), se puede calcular la escorrentía (Pe) por cualquiera de las ecuaciones 13 y 15.

Para cuencas hidrográficas sin tener mediciones de caudal, existen cuadros de CN para varios tipos de cubierta vegetal, factores como los siguientes son los que se deben analizar y utilizar:

- Combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos.
- El uso y tratamiento de la tierra.
- La condición hidrológica superficial.
- Condiciones de humedad antecedente.

Estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una hoya hidrográfica.

La Tabla 1 muestra las características hidrográficas de la hoya y describe a que se refiere cada característica.

Tabla 1. Características y descripción hidrográficas de la hoya.

CARACTERÍSTICA	DESCRIBE
Grupo hidrológico de suelos	Tipo de Suelo
Uso y tratamiento del suelo	Tipo y condición de la cubierta vegetal.
Condición hidrológica	Capacidad de la superficie de la hoya hidrográfica para aumenta o impedir la escorrentía directa.
Condición de humedad antecedente	Tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una medida de la cantidad almacenada por la hoya.

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999.

2.4.5.5.2.2 Clasificación hidrológica de los suelos.

Las propiedades de los suelos “desnudos” (sin cubierta vegetal), después de un humedecimiento prolongado en la tasa mínima de infiltración, son:

- Profundidad del nivel freático en temporada de invierno. (Monsalve Sáenz, 1999).
- Infiltración y permeabilidad del suelo luego de un humedecimiento prolongado y la permeabilidad hasta el estrato de permeabilidad muy lenta. (Monsalve Sáenz, 1999).

La influencia de la cobertura vegetal tratada independientemente; Los suelos han sido clasificados en A, B, C y D como muestra detalladamente la Tabla 2.

Tabla 2. Grupos de suelo y sus características.

GRUPO DE SUELO.	POTENCIAL DE ESCURRIMIENTO.
A	<u>Bajo potencial de escorrentía.</u> Suelos con alta tasa de infiltración aun cuando estén más húmedos. Consiste de arenas o grabas profundas bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen alta tasa de transmisión de agua.
B	<u>Moderadamente bajo potencial de escorrentía.</u> Suelos con tasa de infiltración moderada cuando estén muy húmedos. Suelos moderadamente bien drenados a bien drenados, Suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida
C	<u>Moderadamente alto potencial de escorrentía.</u> Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Constan de suelos con estratos que impiden el movimiento del agua hacia abajo. Suelos con texturas moderadamente finas a finas. Suelos con infiltración lenta debida a sales y alkali. Suelos con niveles freáticos moderados. Suelos están entre pobremente drenados o moderadamente bien drenados Estratos de permeabilidad lenta y muy lenta a poca profundidad (50-100cm)
D	<u>Alto potencial de escorrentía.</u> Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consiste de suelos arcillosos con alto potencial de expansión. Suelos con nivel freático alto permanente Estrato arcilloso superficial. Infiltración muy lenta debida a sales o alkali. Suelos poco profundos sobre material casi impermeable Tasa de transmisión de agua muy lenta.

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999.

2.4.5.5.2.3 *Uso y tratamiento del suelo*

“El efecto de la condición superficial sobre la hoya hidrográfica se evalúa por medio de las clases de tratamiento y usos del suelo”. (Monsalve Sáenz, 1999, pág. 145)

Esta clasificación identifica:

- Cobertura de la hoya, incluyendo todo tipo de vegetación:
 - Humus vegetal.
 - Suelo limpio.
 - Suelo no agrícola.
- Superficies:
 - De agua (lagos, ciénagas y otras).
 - Impermeables (caminos, techos, etc.).
- Tratamiento del suelo:
 - Usos agrícolas del suelo.
 - Prácticas mecánicas:
 - Perfilado curvas de nivel
 - Terraceo.
 - Prácticas de manejo:
 - Control de pastoreo.
 - Rotación de cultivos.

Se clasifica los suelos según su uso como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Tipos de suelos, usos y tratamientos.

SUELO	USO Y TRATAMIENTO
1. CULTIVADOS	Tierras en descanso. Prados. Cultivos de hilera. Cultivos de grano. Vegetales sembrados cercanamente. Rotaciones de pobre a buena. Cultivos en hileras rectas. Campos cercados a lo largo de curvas de nivel. Cultivos terrazados.
2. PRADO	
3. BOSQUE	

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999.

2.4.5.5.2.4 Condición hidrológica.

Condición hidrológica es la cobertura vegetal que tenga la hoya en porcentaje de recubrimiento y las condiciones en las que se encuentra.

Tabla 4. Condición Hidrológica.

CONDICIÓN HIDROLÓGICA	
Pastos: (pasto natural)	
Pobre	Pasto natural > 50% área cubierta Alta intensidad de pastoreo.
Pobre	50% < Área cubierta < 75% Media intensidad de pastoreo.
Buena	Área cubierta > 75% Ligera intensidad de pastoreo.
Bosques: (Pequeñas arboledas aisladas o árboles que han sido sembradas para fincas o para usar en granjas).	
Pobre	Densamente pastado o bosques regularmente quemados. Pocos arbustos, y; Muy pequeñas cantidad de humus vegetal.
Aceptable	Con pastos pero no quemados. Algunos arbustos y Moderada cantidad de humus vegetal.
Buena	Protegidos con pasto Alta cantidad de humus vegetal Muchos arbustos cubriendo la superficie.

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999.

2.4.5.5.2.5 Condiciones de humedad antecedente.

Este método tiene tres niveles de humedad antecedente, que depende de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta de estudio. La Tabla 5 describe de manera clara las condiciones de humedad antecedente que se consideran:

Tabla 5. Condiciones de humedad antecedente.

CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE (AMC)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE LOS 5 DÍAS AL EVENTO EN CONSIDERACIÓN (cm)	DESCRIPCIÓN
I	0-3.6	Menor potencial de escorrentía, con los suelos estando lo suficientemente secos para un arado satisfactorio o para que una siembra se lleve a cabo.
II	3.6-5.3	Tiene un potencial de escorrentía promedio.
III	Más de 5.3	Tiene un mayor potencial de escorrentía, con la hoya hidrográfica prácticamente saturada de precipitaciones anteriores.

Fuente: Adaptado de Monsalve Sáenz, 1999.

2.4.5.5.2.6 Determinación del número de la curva de escorrentía.

Para el desarrollo de este método tenemos que tomar en cuenta algunas tablas necesarias en la determinación del número de la curva y de esta manera remplazarlo en la Ecuación 13 o 15.

Para la determinación del número de la curva a través de la lectura de una tabla, se anexa la Tabla 6.

Tabla 6. Números de curva escorrentía para usos selectivos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a=0.25S$).

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a=0.25S$)				
Descripción del uso de la tierra	Grupo Hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamientos de conservación.	72	81	88	91
Con tratamientos de conservación.	62	71	78	81
Pastizales:				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas.	39	61	74	80
Vega de ríos:				
Condiciones óptimas.	30	58	71	78
Bosques:				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, ect.				
Óptimas condiciones: Cubierta de pasto en el 75% o más.	39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%.	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje impermeable.	promedio		
1/8 de acre o menos	65	77	85	90
1/4 de acre	38	61	75	83
1/3 de acre	30	57	72	81
1/2 de acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	98
Parques pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y acabados.	98	98	98	98
Grava.	76	85	89	91
Tierra.	72	82	67	89
Una buena cubierta está protegida de pastizales, y de los desechos del retiro de la cubierta del suelo.				
Los números de la curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de la curva.				
En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de la curva				

Fuente: Adaptado de Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Si existe otra condición de humedad de suelo antecedente (AMC), se puede hacer una corrección a los valores de la Tabla 6 de acuerdo a las siguientes equivalencias mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores CN para diferentes condiciones de humedad antecedente.

CN AMC II	CN AMC I	CN AMC III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50

Fuente: Adaptado de Oñate Valdivieso, 2013

2.4.5.5.3 Método de Richards-Phillips.

La Figura 8 es un bloque de suelo de dimensiones infinitesimalmente pequeñas que muestran, las direcciones del flujo en condiciones no saturadas en un medio poroso. A partir de la cual se muestra el volumen de control para desarrollo de la Ecuación de continuidad.

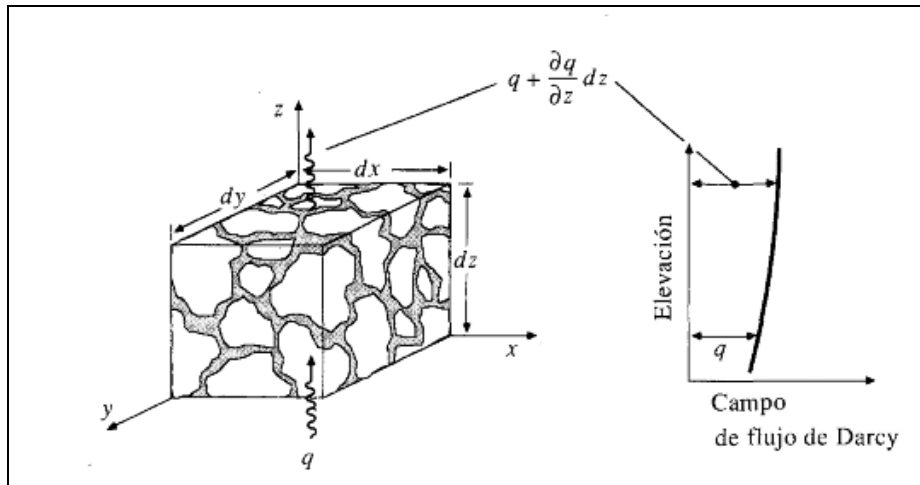


Figura 9. Volumen de control para el desarrollo de la ecuación de continuidad en un medio poroso no saturado.

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Richards plantea una ecuación para el flujo en medios porosos no saturados, expresada en derivadas parciales. La ecuación describe el flujo del agua de un medio anisotrópico saturado o no saturado que considera que el flujo cumple con la ley de Darcy. (Reina, 2008).

Ecuación altamente no lineal por motivo de la dependencia existente entre la humedad y la conductividad hidráulica con la succión.

“Las curvas de humedad en función de la profundidad y del tiempo de un suelo son importantes para entender el problema de flujo transitorio en la zona no saturada. La pendiente de la curva representa el almacenamiento característico del suelo. La pendiente indica la cantidad de agua tomada o entregada por el suelo como un resultado del cambio de la presión de agua de poros.” (Reina, 2008).

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_x k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k_y k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_z k_{rw}(H)}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad \text{Ec. 18}$$

θ_w - Cantidad volumétrica de la fase líquida.

k_x, k_y, k_z - Permeabilidades intrínsecas correspondientes a las direcciones respectivamente.

k_{rw} - Permeabilidad relativa de la fase líquida.

H - Es la succión (z-h).

h - Altura piezométrica

Esta ecuación nos da la oportunidad de calcular los perfiles de humedad del suelo y por ende la infiltración.

La tasa de infiltración es la variación de humedad para dos tiempos distintos, dividido por la variación del tiempo, y se muestra en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\Delta\theta_{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{\theta_{t+\Delta t}(h) - \theta_t(h)}{\Delta t} \quad \text{Ec. 19}$$

$\theta_{(t+\Delta t)}$ - Humedad en el tiempo $t+\Delta t$.

θ_t - Función de h.

La ecuación de Richards para flujo en medios porosos no saturados es una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden parabólica no lineal. (Reina, 2008).

La no linealidad se debe a que la conductividad hidráulica es función de h, entonces se tiene el producto de $K_{ii}(h) \frac{\partial h}{\partial i}$, donde la conductividad hidráulica e i indica las direcciones x, y, z . (Reina, 2008).

“La conductividad hidráulica no sólo no es una función lineal de la succión sino que además depende de la historia de humedecimiento y secado del suelo (histéresis)”. (Reina, 2008).

Para resolver numéricamente esta ecuación es necesario resolver un problema de valores de condiciones iniciales y de borde. (Reina, 2008) “Cuando la conductividad hidráulica no es función de la succión (es una constante) en la ecuación anterior se puede sacar de la derivada parcial y la ecuación de Richards toma la forma matemática de la ecuación de Laplace. Esto ocurre en la realidad cuando el suelo se estudia los fenómenos estacionarios” (Reina, 2008).

$$K_{s_x} \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right] + K_{s_y} \left[\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] + K_{s_z} \left[\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = 0 \quad \text{Ec. 20}$$

$K_{s_x}, K_{s_y}, K_{s_z}$ - Conductividades hidráulicas saturadas en las direcciones x, y, z respectivamente.

“Jhon R. Philip (1927-1999) en 1957 resolvió la ecuación de Richards para el caso donde la intensidad de la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración del terreno. La ecuación de Philip tiene la forma de:” (Oñate Valdivieso, 2013).

$$f = (0.5)At^{-1/2} + B \quad \text{Ec. 21}$$

$$F = At^{1/2} + Bt \quad \text{Ec. 22}$$

F - Lamina de infiltración en mm.

f - Capacidad de infiltración en mm/hora.

A, B - Constantes que dependen del tipo de terreno.

2.4.5.5.4 Método de Green-Ampt.

Green y Ampt (1911) propusieron el sistema simplificado para infiltración que se muestra sus condiciones iniciales en la siguiente Figura:

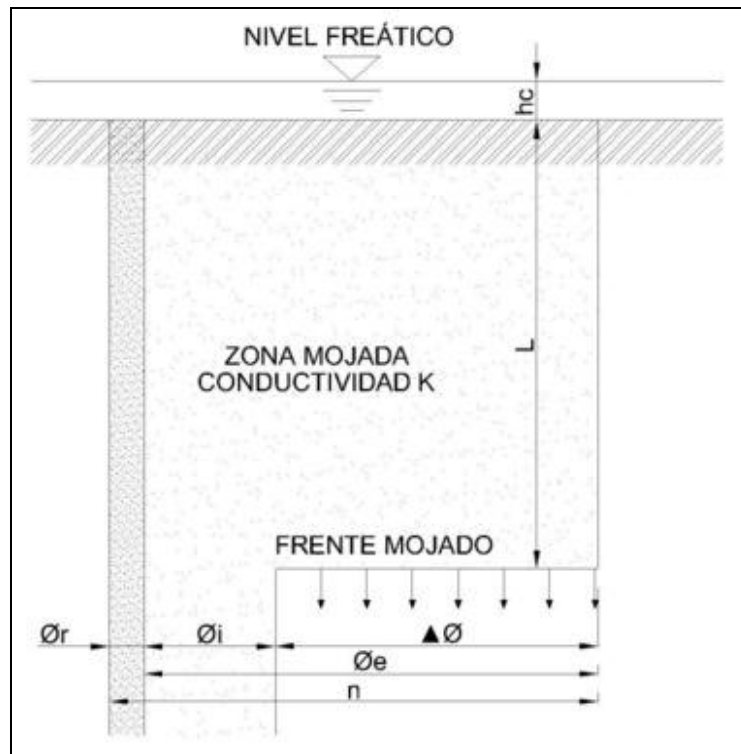


Figura 10. Modelo de Green-Ampt
Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

En la Figura 9, el eje vertical es la distancia desde la superficie del suelo hasta el frente mojado y simboliza el espesor de suelo afectado por el fenómeno de infiltración. El eje horizontal es el contenido de humedad del suelo. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Consiste en una columna vertical de suelo de sección transversal (horizontal) de área unitaria y un volumen de control definido alrededor de suelo mojado entre la superficie y la profundidad L . Si el suelo tenía un contenido de humedad inicial θ_i a través de toda una longitud, el contenido de humedad se incrementará desde θ_i hasta η (porosidad) a medida que el frente de mojado pasa. El contenido de humedad θ es la relación entre el volumen de agua y el volumen total dentro de la superficie de control, luego el incremento de agua almacena dentro del el volumen

de control como resultado de la infiltración es $L = (\eta - \theta)$ para una sección transversal unitaria, esta cantidad es igual a F .

$$F(t) = Kt + \psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad \text{Ec. 23}$$

Dado $K, t, \varphi, \Delta \theta$, se sustituye un valor de prueba para F en la parte derecha de la ecuación (un buen valor de prueba es $F = Kt$), para calcular un nuevo valor de F en la parte izquierda, el cual se sustituye como valor de prueba en la parte derecha de la ecuación, y así sucesivamente hasta que los valores calculados de F converja en una constante. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Tabla 8. Parámetros del suelo (porosidad, porosidad efectiva, cabeza de succión del suelo y conductividad hidráulica) para diferentes tipos de suelo.

<i>Parámetros de infiltración de Green-ampt para varias clases de suelos</i>				
Case de suelo	porosidad η	Porosidad Efectiva σe	Cabeza de succión del suelo en el frente mojado ψ (cm)	Conductividad hidráulica k (cm/h)
Arena	0.0437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
Arena Margosa	0.437 (0.3763-0.506)	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	2.99
Marga Arenosa	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
Marga.	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
Marga Limosa.	0.501 (0.420-0.582)	0.486 (0.394-0.587)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
Marga	0.938 (0.332-0.464)	0.33 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15
Marga	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.1
Marga Limo-	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.374-0.517)	27.3 (5.67-131.50)	0.1
Arcilla	0.43 (0.370-0.490)	0.321 (0.207-0.435)	23.9 (4.08-140.2)	0.06
Arcilla Limosa	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427-0.5232)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.03

Fuente: Adaptado de Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Tiempo de encharcamiento (t_p).

Durante una lluvia el agua se encharcara en la superficie, solamente si la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo; por lo tanto el tiempo de encharcamiento es el lapso entre el inicio de la lluvia y el momento en que el agua en la superficie se comienza a acumular o encharcar. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

En la Figura 10 se muestra el caso en el que se empieza desde un suelo seco, antes del tiempo de encharcamiento ($t < t_p$), la intensidad de lluvia es menor que la tasa de infiltración potencial y la superficie del suelo permanece no saturada. El encharcamiento empieza cuando la intensidad de lluvia excede la tasa potencial de infiltración, en ese momento ($t = t_p$) el suelo en la superficie se satura. A medida que la lluvia continua ($t > t_p$), la zona saturada se extiende profundamente en el suelo y empieza la escorrentía superficial del agua encharcada. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Para determinar el encharcamiento mediante este método de infiltración se involucran tres principios en este proceso:

1. Antes de que llegue el tiempo de encharcamiento toda la precipitación se infiltra.
2. La tasa de infiltración potencial es una función de la infiltración acumulada F .
3. El encharcamiento ocurre cuando la tasa de infiltración potencial es menor o igual que la intensidad de la lluvia.

(Chow, Maidment, & Mays, 1994)

$$f = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F} + 1 \right) \quad \text{Ec. 24}$$

K - Conductividad hidráulica del suelo.

ψ - Cabeza de presión capilar del frente mojado.

$\Delta\theta$ - Diferencia de los contenidos de humedad del suelo inicial y final-

Si: $F=it_p$, y $f=i$

$$i = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{it_p} + 1 \right) \quad \text{Ec. 25}$$

$$t_p = \frac{K \psi \Delta \theta}{i(i - K)} \quad \text{Ec. 26}$$

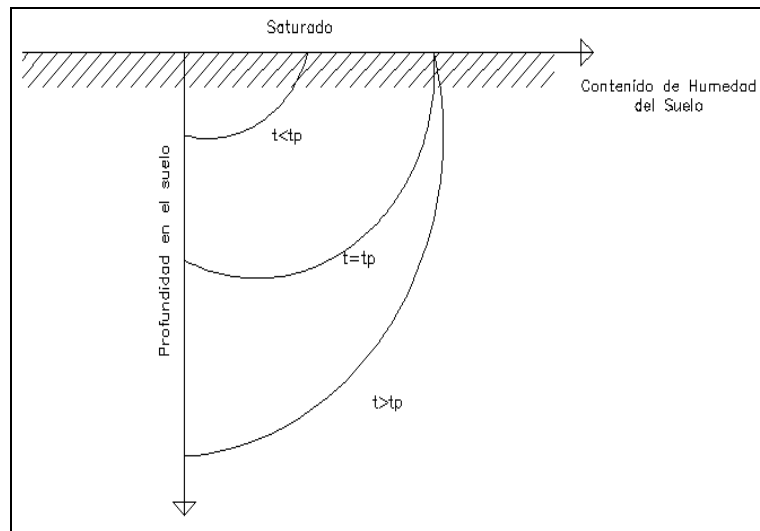


Figura 11. Perfiles de humedad del suelo, antes, durante y después que ocurra el encharcamiento.

Fuente: Adaptado de Chow, Maidment, & Mays, 1994.

2.4.5.5 Método de Horton.

Este modelo, permite simular la curva de capacidad infiltración del suelo.

Horton propone un modelo empírico y su base es simplificar conceptos, de tal forma que éstos permitan expresar la capacidad de infiltración en función del tiempo, parámetros del suelo, además de constantes empíricas.

En este método el autor propuso que:

El cambio de la capacidad de infiltración puede ser considerada proporsional a la diferencia entre la capacidad de infiltacion actual y la capacidad de infltracion final, para lo cual introdujo un factor de proporcionalidad k. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

$$fp = fc + (fo - fc)e^{-kt} \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde:

fp - Capacidad de infiltración (mm/h)

k - Factor de proporcionalidad llamado también 'parámetro de decrecimiento.

fc - Capacidad de infiltración final.

fo - Capacidad de infiltración inicial (para $t=0$).

t - Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración (en minutos).

El volumen infiltrado en milímetros correspondiente a cualquier tiempo viene dado por la siguiente expresión.

$$F = \int_0^t \frac{fp}{60} dt = \frac{fc \cdot t}{60} + \frac{(fo - fc)}{60 \cdot k} (1 - e^{-kt}) \quad \text{Ec. 28}$$

“Si suponemos que K y D son constantes independientemente del contenido de humedad del suelo” (Chow, Maidment, & Mays, 1994) Asumiendo esto tenemos,

$$\frac{d\theta}{dt} = D \frac{d^2\theta}{dz^2} \quad \text{Ec. 29}$$

Esta ecuación es la forma estándar de la ecuación de difusión que puede resolverse para calcular el contenido de humedad θ que está en función del tiempo y de la profundidad. (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

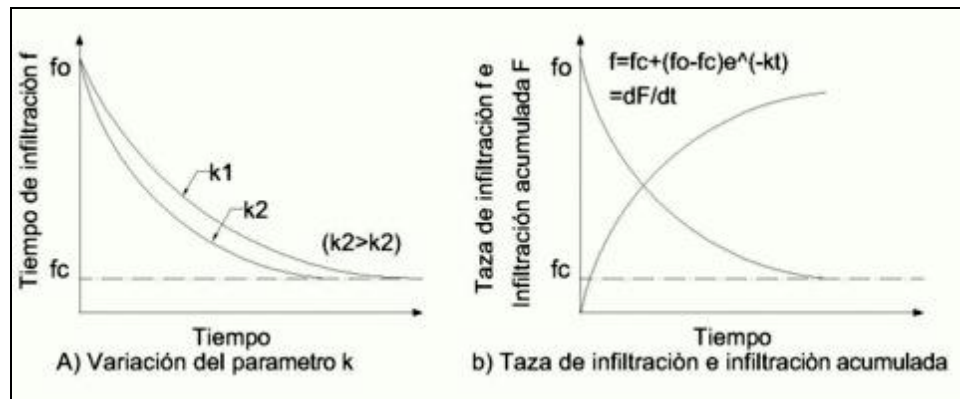


Figura 12. Variables del modelo de Horton. Ecuación del flujo en medios no saturados.

Fuente: Adaptado de (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

La Figura 11 muestra que la capacidad de infiltración está directamente relacionada a la conductividad hidráulica, por tal motivo si es mayor la conductividad hidráulica la curva de capacidad de infiltración será menos acentuada, por consiguiente el volumen de infiltración que es el área bajo la curva será mayor

2.4.5.6 Metodología de programación.

En esta sección se describe la ubicación, las herramientas que se utilizaron para desarrollar los modelos hidrológicos dentro del HYDROVLAB, metodología de programación de manera cronológica, la ubicación de los manuales y los diagramas de flujo de cada uno de los programas de infiltración.

2.4.5.6.1 Descripción y utilización de las herramientas virtuales.

Los programas de infiltración se encuentran ubicados en:

“www.hydrovlab.utpl.edu.ec/simulación/Infiltración”.

Para el desarrollo de estos programas se realizó la programación en Visual Studio.Net 2005, dentro del cual se eligió el lenguaje de Visual Basic. Net.

2.4.5.6.2 Descripción del software utilizado para el desarrollo de la herramienta.

A continuación se presenta de manera esquemática los ítems relacionados a esta temática.

2.4.5.6.2.1 Microsoft Visual Studio 2005.

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) para sistemas operativos Windows. Soporta varios lenguajes de programación tales como Visual C++, Visual C#, Visual J#, y Visual Basic .NET, al igual que entornos de desarrollo web como ASP.NET. Aunque actualmente se han desarrollado las extensiones necesarias para muchos otros.

“Visual Studio permite a los desarrolladores crear aplicaciones, sitios y aplicaciones web, así como servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET (a partir de la versión .NET 2002). Así se pueden crear aplicaciones que se intercomunican entre estaciones de trabajo, páginas web y dispositivos móviles”. (Wikipedia, Microsoft Visual Studio, 2013).



Figura 13. Portada del programa utilizado en el desarrollo de este proyecto
Fuente: www.guidebookgallery.org.

2.4.5.6.2.2 *Sitio web.*

Es una colección de páginas web relacionadas y comunes a un dominio de Internet o subdominio en la World Wide Web en Internet.

Todos los sitios web públicamente accesibles constituyen una gigantesca World Wide Web de información (un gigantesco entramado de recursos de alcance mundial RED MADRE). (Wikipedia, Sitio web, 2013).

A las páginas de un sitio web se accede frecuentemente a través de un URL raíz común llamado portada (en este caso el sitio web al que están enlazados las herramientas desarrolladas es: “<http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/>”), que normalmente reside en el mismo servidor físico. Los URL organizan las páginas en una jerarquía, aunque los hiperenlaces entre ellas controlan más particularmente cómo el lector percibe la estructura general y cómo el tráfico web fluye entre las diferentes partes de los sitios. (Wikipedia, Sitio web, 2013).

Algunos sitios web requieren una suscripción para acceder a algunos o todos sus contenidos. El sitio web Hidrovlab para poder acceder a sus herramientas exige que se cree un usuario con contraseña.



Figura 14. Portada del Sitio Web Hidrovlab
Fuente: www.hydrovlab.utpl.edu.ec.

2.4.5.6.2.3 *Página web.*

Una página web o página electrónica es el nombre de un documento o información electrónica adaptada para la World Wide Web y que puede ser accedida mediante un navegador. Esta información se encuentra generalmente en formato HTML o XHTML, una puede proporcionar navegación a otras páginas web mediante enlaces de hipertexto. Las páginas web frecuentemente incluyen otros recursos como hojas de estilo en cascada, guiones (scripts) e imágenes digitales, entre otros. (Wikipedia, Página web, 2013).

Las páginas web pueden estar almacenadas en un equipo local o un servidor web remoto. El servidor web puede restringir el acceso únicamente para redes privadas. El acceso a las páginas web es realizado mediante su transferencia desde servidores utilizando el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP). (Wikipedia, Página web, 2013).

A continuación se muestra un ejemplo de página web (página desarrollada en este proyecto de fin de carrera).

INFILTRACIÓN MODELO GREEN AMPT
[DESCARGAR MANUAL](#)

DATOS

[MOSTRAR TABLA](#)

POROSIDAD EFECTIVA	<input type="text" value="0.488"/>	Tanto x:1
POROSIDAD	<input type="text" value="0.501"/>	Tanto x:1
CAPSA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO	<input type="text" value="16.88"/>	cm
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)	<input type="text" value="0.65"/>	cm/hr
TIEMPO	<input type="text" value="1"/>	horas
SATURACIÓN EFECTIVA S_e	<input type="text" value="0.3"/>	Tanto x:1

Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

[CALCULAR](#) [EJEMPLO](#) [LIMPIAR](#)

RESULTADOS

CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO	<input type="text"/>	Tanto x:1
CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO	<input type="text"/>	Tanto x:1
<input type="checkbox"/> F(x)=K CALCULADO		
F(x) VALOR INICIAL (OPCIONAL PUEDE SER CALCULADO AUTOMÁTICAMENTE)	<input type="text"/>	cm

INFILTRACIÓN ACUMULADA

[CALCULAR F](#)

INFILTRACIÓN ACUMULADA F	<input type="text"/>	cm
TASA DE INFILTRACIÓN	<input type="text"/>	cm/hr

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

INTENSIDAD DE LUBIA (DEBE SER INGRESADO)	<input type="text"/>	cm/hr
TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO	<input type="text"/>	horas
PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA	<input type="text"/>	cm

Perfiles de humedad del suelo antes, durante y después del encharcamiento.

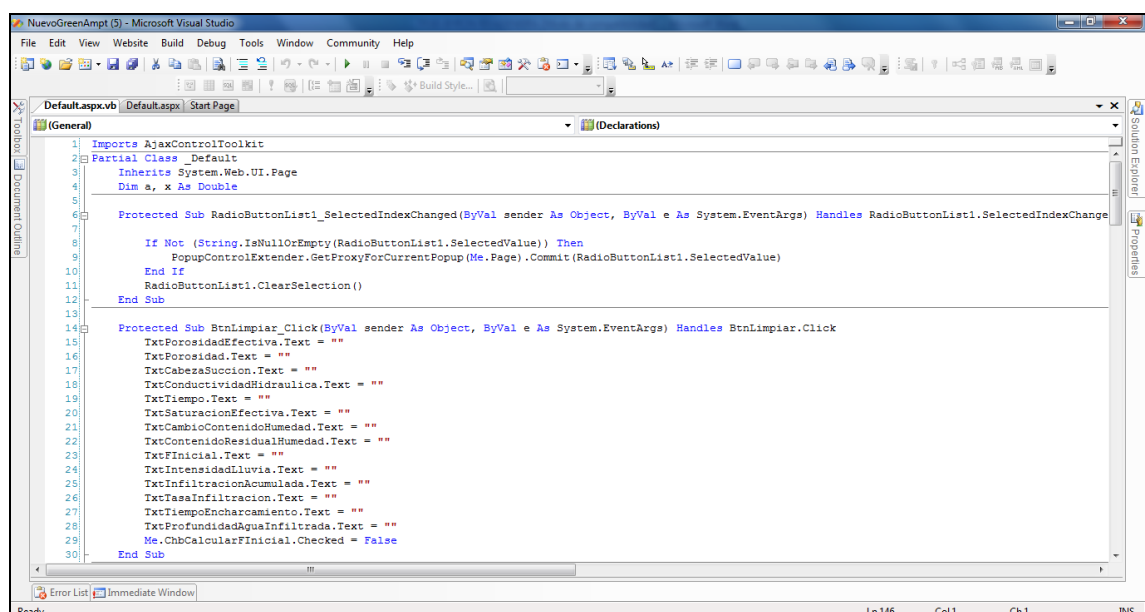
Copyright © 2012-2012 Hydrevlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 15. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor “Infiltración Modelo de Green-Ampt”

Fuente: http://200.0.29.31/GreenAmptEN/Infiltración_Green-Ampt.aspx

2.4.5.6.2.4 Lenguaje de Visual Basic. Net.

Es un lenguaje de programación orientado a objetos que se puede considerar una evolución de Visual Basic implementada sobre el framework .NET. (Wikipedia, Visual Basic .NET, 2013). El código que se programó para el desarrollo de las herramientas implementadas se muestra en un ejemplo a continuación.



```
1 Imports AjaxControlToolkit
2 Partial Class _Default
3     Inherits System.Web.UI.Page
4     Dim a, x As Double
5
6     Protected Sub RadioButtonList1_SelectedIndexChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioButtonList1.SelectedIndexChanged
7
8         If Not (String.IsNullOrEmpty(RadioButtonList1.SelectedValue)) Then
9             PopupControlExtender.GetProxyForCurrentPopup(Me.Page).Commit(RadioButtonList1.SelectedValue)
10        End If
11        RadioButtonList1.ClearSelection()
12    End Sub
13
14    Protected Sub BtnLimpiar_Click(ByVal sender As Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles BtnLimpiar.Click
15        TxtPorosidadEfectiva.Text = ""
16        TxtPorosidad.Text = ""
17        TxtCabezaSuccion.Text = ""
18        TxtConductividadHidraulica.Text = ""
19        TxtTiempo.Text = ""
20        TxtSaturacionEfectiva.Text = ""
21        TxtCambioContenidoHumedad.Text = ""
22        TxtContenidoResidualHumedad.Text = ""
23        TxtFInicial.Text = ""
24        TxtInciensidadLluvia.Text = ""
25        TxtInfiltracionAcumulada.Text = ""
26        TxtTasaInfiltracion.Text = ""
27        TxtTiempoEncharcamiento.Text = ""
28        TxtProfundidadAguaInfiltrada.Text = ""
29        Me.ChbCalcularFInicial.Checked = False
30    End Sub
```

Figura 16. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor “Infiltración Modelo de Green-Ampt” ventana “.Aspx.vb”
Fuente: Elaboración propia

Este código se lo realiza en la ventana de extensión “.Aspx.vb”

2.4.5.6.2.5 Lenguaje HTML.

HTML, siglas de HyperText Markup Language, hace referencia al lenguaje de marcado predominante para la elaboración de páginas web que se utiliza para describir y traducir la estructura y la información en forma de texto, así como para complementar el texto con objetos tales como imágenes. El HTML se escribe en forma de etiquetas, rodeadas por corchetes angulares (<,>), etc. HTML también

puede describir, hasta un cierto punto, la apariencia de un documento. (Wikipedia, HTML, 2013)

Para hacer la edición del código HTML se procede a ingresar a Fuente (Source) enmarcado de color rojo en la Figura 14) dentro del archivo de extensión “.Aspa”.

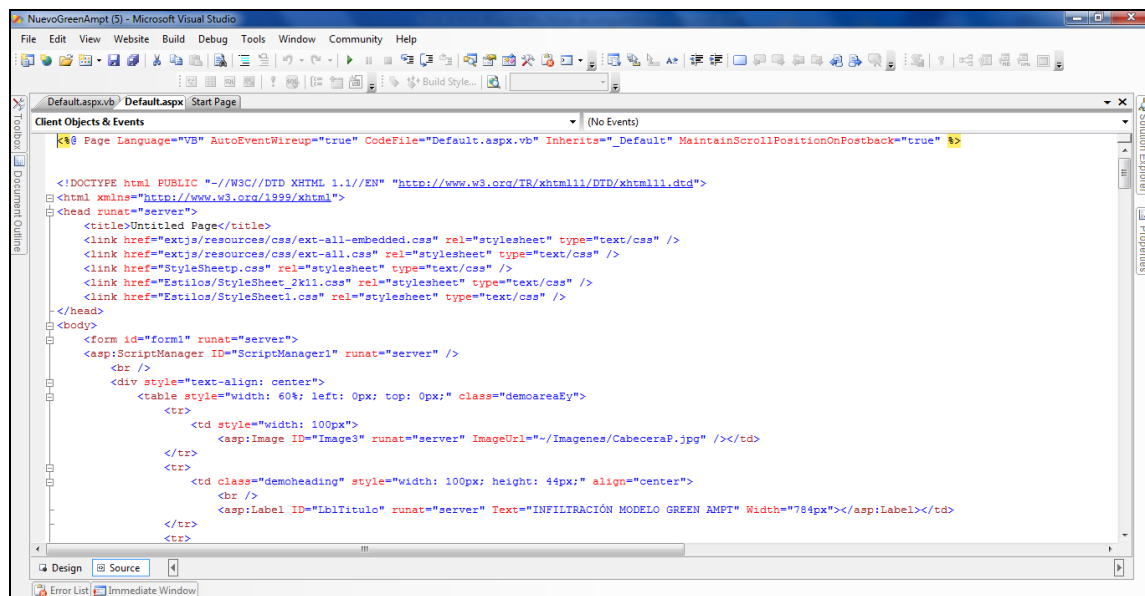


Figura 17. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor “Infiltración Modelo de Green-Amp” ventana “.Aspa”
Fuente: Elaboración propia.

2.4.5.6.2.6 Hojas de estilo

Las hojas de estilo (style sheets) son conjuntos de instrucciones, en ocasiones como archivo anexo, que se asocian a los archivos de texto y se ocupan de los aspectos de formato y de presentación de los contenidos: tipo, fuente y tamaño de letras, justificación del texto, colores y fondos, etc. Las hojas de estilo permiten liberar la composición del texto de los aspectos visuales y favorecen que se estructure y anote mediante códigos que permiten un tratamiento más eficaz de los contenidos. El uso adecuado de las hojas de estilo es uno de los aspectos clave de la edición digital.

El estilo fue cargado previamente dentro del código HTML para que sea registrado y se aplique automáticamente a todos los elementos que tengan la misma clase de estilo.

La programación del estilo se lo hace en la ventana de extensión “.css”

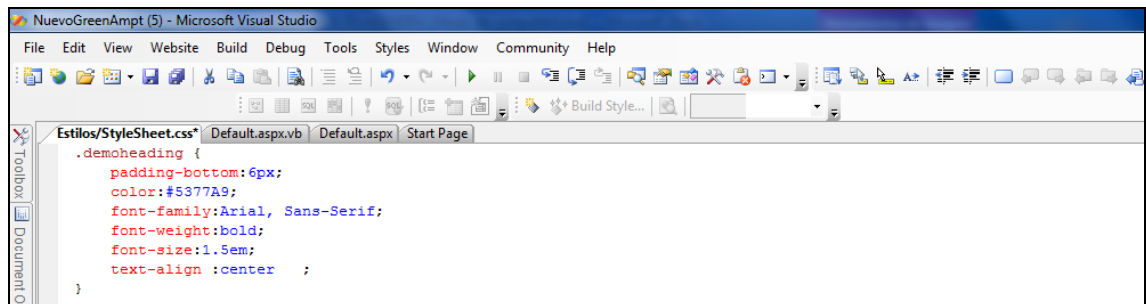


Figura 18. Página Web. Herramienta desarrollada por el Autor “Infiltración Modelo de Green-Ampt” ventana de estilos.

Fuente: Elaboración Propia.

Los estilos ya están definidos por el formato estándar que tiene el Hidrovlab y se los asigna en cada elemento del sitio web con la finalidad que se muestre adecuadamente la herramienta virtual.

2.4.5.6.3 Manuales de uso de las herramientas desarrolladas e implementadas.

Los manuales son documentos que sirven para entender la forma de utilización y de trabajo de cada una de las herramientas virtuales.

Existe un manual en inglés y uno en español de cada una de las herramientas virtuales respectivamente para las opciones de uso de las herramientas Inglés, español.

Se los puede obtener dentro de cada herramienta virtual al presionar el botón descargar manual que se encuentra en cada una de ellas; Y también en los anexos digitales entregados.

Tabla 9. Ubicación anexos digitales de los manuales.

Modelo	Ubicación Anexos.
<i>Infiltración media o índice de infiltración Φ.</i>	<p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales/Índice de Infiltración.doc.</i></p> <p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales Inglés/Índice de Infiltración.doc.</i></p>
<i>Número de la curva.</i>	<p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales/Número de la curva.doc.</i></p> <p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales Inglés/Número de la curva.doc.</i></p>
<i>Método de Richard-Phillips.</i>	<p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales/Richard-Phillips.doc.</i></p> <p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales Ingles/Richard-Phillips.doc.</i></p>
<i>Método de Green-Ampt.</i>	<p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales/Green-Ampt.doc.</i></p> <p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales Ingles/Green-Ampt.doc.</i></p>
<i>Método de Horton.</i>	<p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales/Horton.doc.</i></p> <p>CD: <i>Anexos/Word/Manuales Ingles/Horton.doc.</i></p>

Fuente: Elaboración propia

2.4.5.6.4 DIAGRAMAS DE FLUJO.

Para la resolución de las herramientas virtuales fue necesaria la generación de diagramas de flujo que guíen la lógica de uso y de programación de cada una de las herramientas.

DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO DE HORTON (1933,1939).

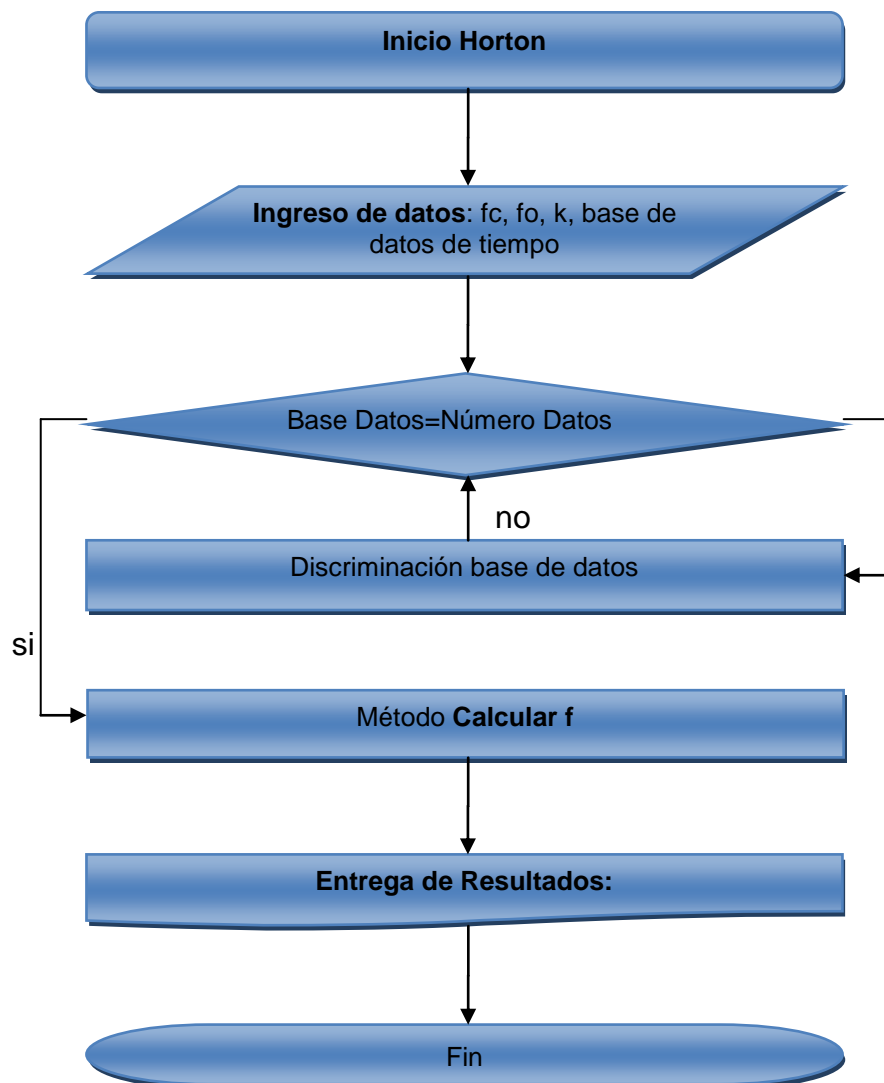


DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO INFILTRACIÓN MEDIA O ÍNDICE DE INFILTRACIÓN (ϕ).

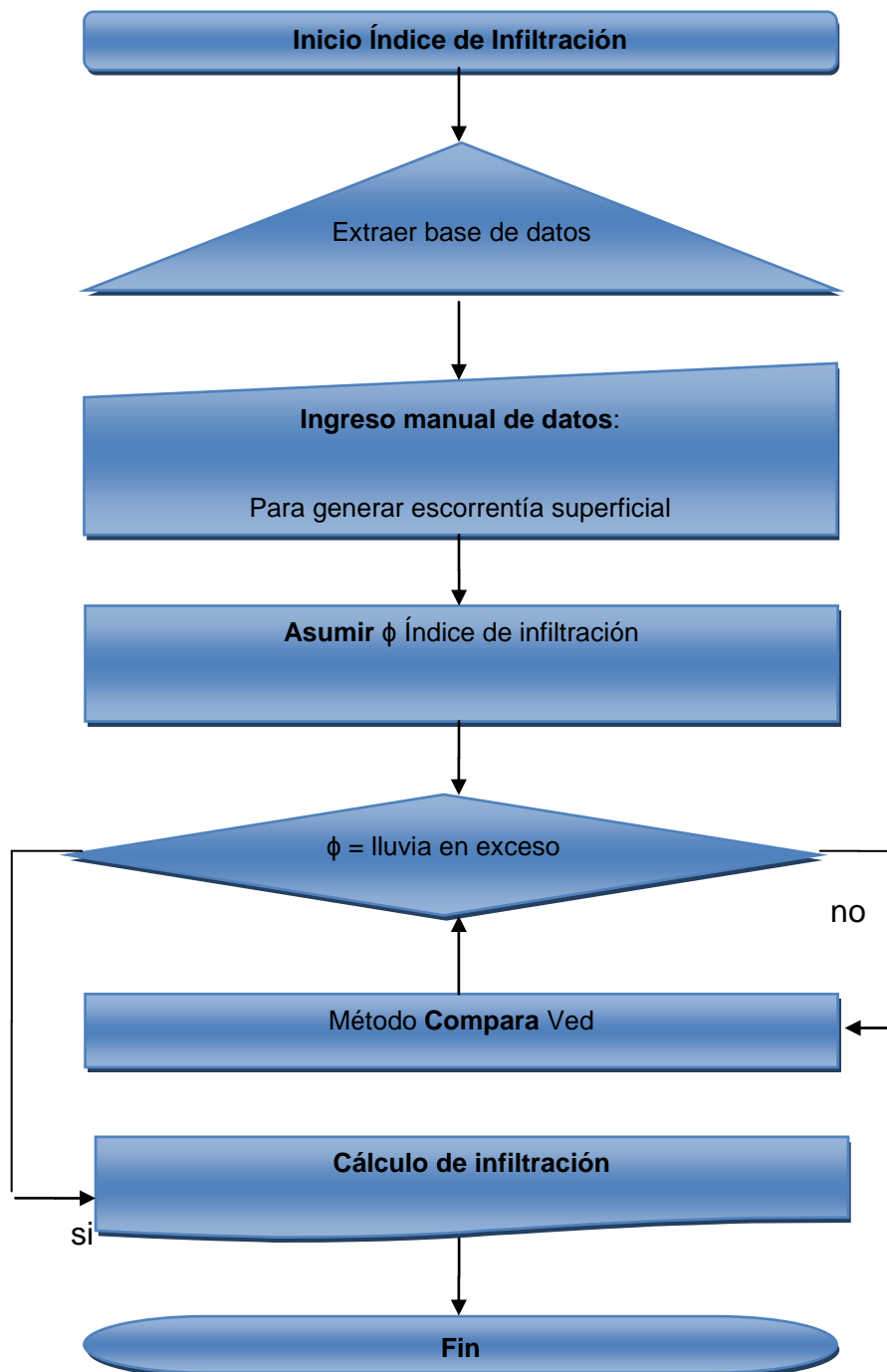


DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO NÚMERO DE LA CURVA (1982).

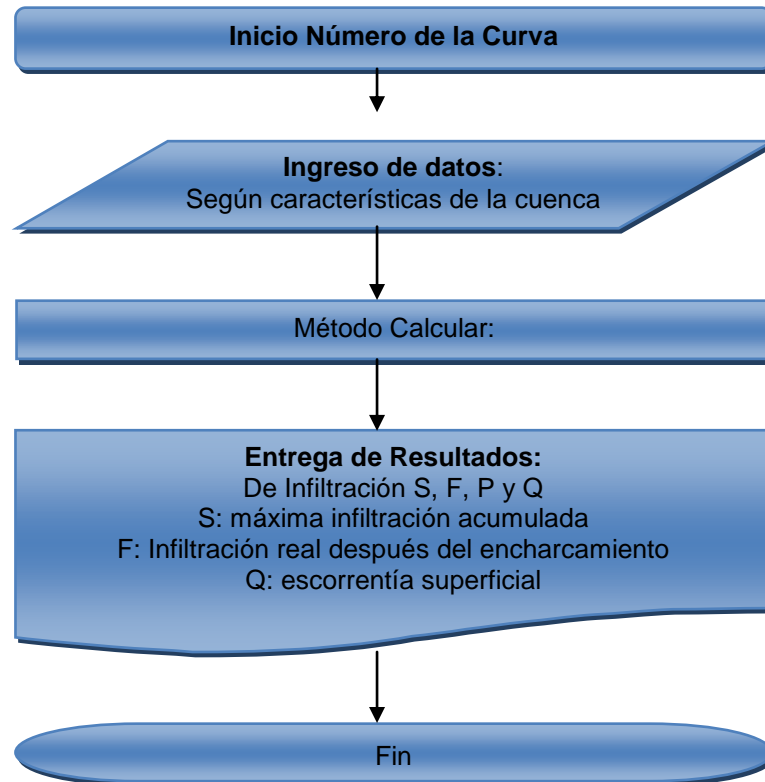


DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO DE RICHARDS-PHILIP (1957, 1969).

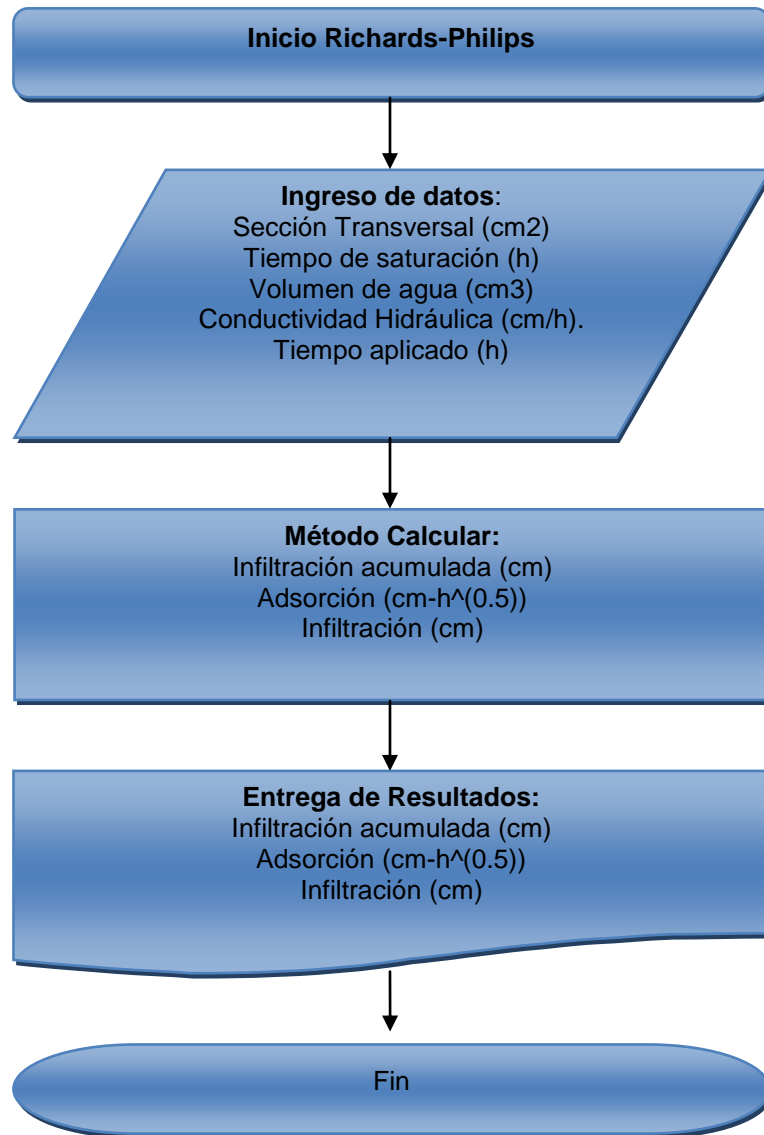
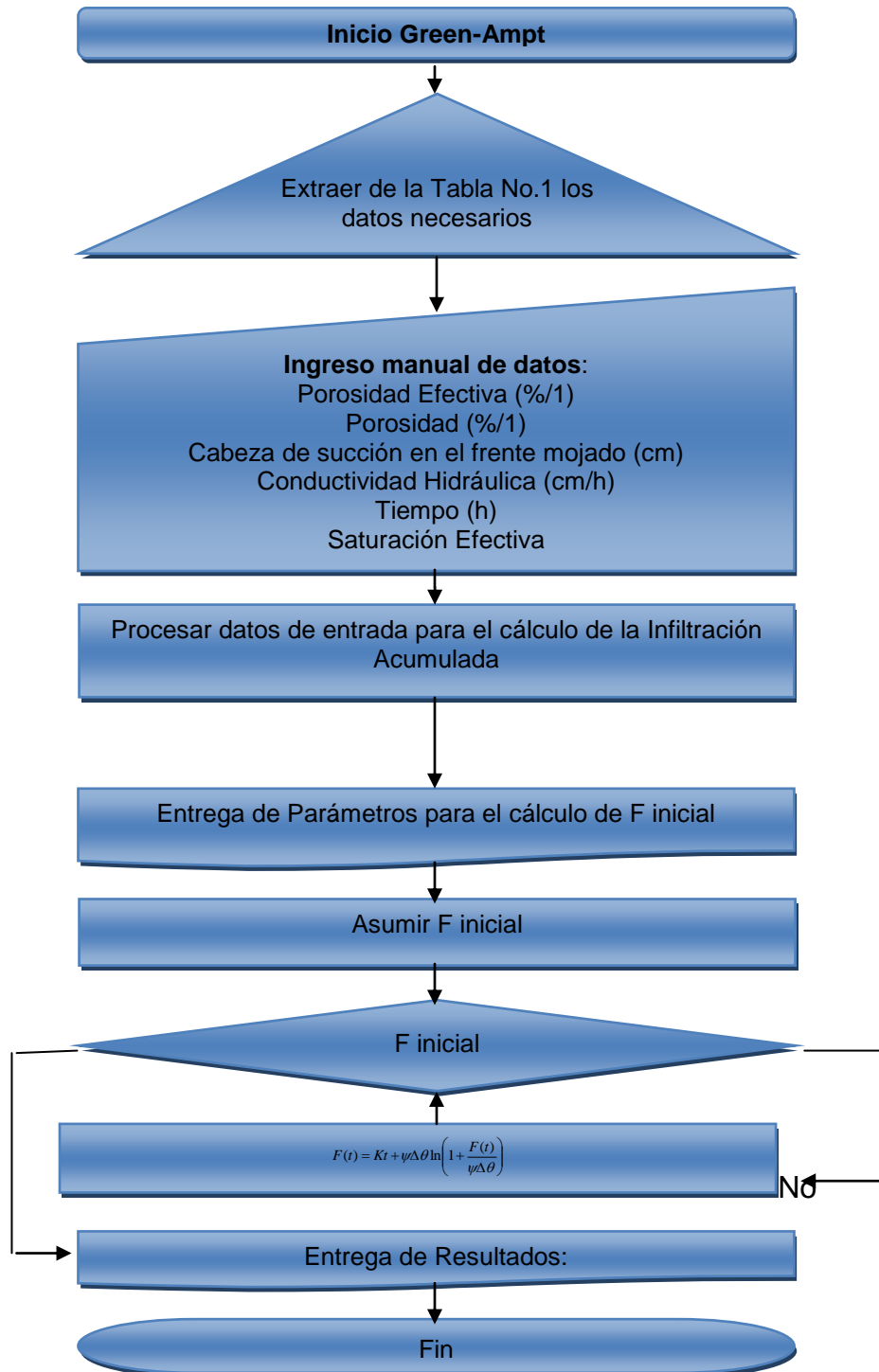


DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO GREEN-AMPT (1911).



CAPÍTULO III

3. Análisis de resultados.

3.1 Utilización de las herramientas y comparación con ejercicios resueltos de la bibliografía utilizada y con hojas de cálculo realizadas de cada método de infiltración utilizada.

En esta sección se realizara un ejemplo de cálculo de cada herramienta virtual de infiltración y se comparará el resultado de la bibliografía usada, así como también de hojas de cálculo desarrolladas para cada modelo.

3.1.1 Método infiltración media o índice de infiltración (ϕ).

3.1.1.1 Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.

Se tomó el Ejemplo Resuelto 7.1 del libro “Fundamentos de Hidrología de Superficie” del Autor: Francisco J. Aparicio Mijares.

Datos:

✚ Área de la cuenca 36 km²

✚ Hidrograma.

Tabla 10. Datos Hidrograma Ejemplo 7.1

Tiempo (h)	Caudal Q (m ³ /s)
-	2.00
6.00	1.00
10.00	8.00
16.00	1.00
20.00	1.00

Fuente: Elaboración propia.

✚ Hietograma.

Tabla 11. Datos Hietograma Ejemplo 7.1

Tiempo (h)	HP (mm)
1.00	5.35
2.00	3.07
3.00	2.79
4.00	4.45
5.00	2.20
6.00	0.60

Fuente: Elaboración propia.

Cálculos:

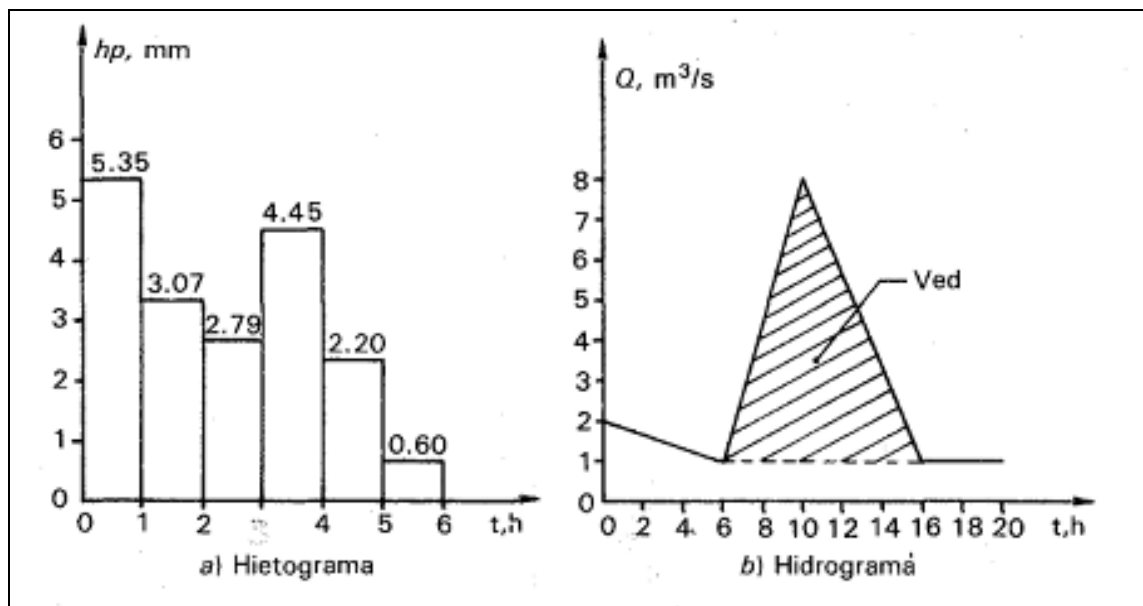


Figura 19. Recorte de página. Hidrograma y Hietograma

Fuente: Aparicio Mijares, 1992, Ejercicio 7.1 Pág 181.

Se separa el gasto base y cálculo del volúmen de escurrimiento directo.

Volumen de escurrimiento directo.

$$V_{ed} = \frac{10 \times 3\,600 \times 7}{2} = 126\,000 \text{ m}^3$$

Figura 20. Recorte de página cálculo escurrimiento directo.

Fuente: Aparicio Mijares, 1992, Ejercicio 7.1 Pág 181.

Cálculo de lluvia efectiva.

$$hp_e = \frac{126\ 000}{36 \times 10^6} = 0.0035\ m = 3.5\ mm$$

Figura 21. Recorte de página cálculo lluvia efectiva.
Fuente: Aparicio Mijares, 1992, Ejercicio 7.1 Pág. 182.

Cálculo de Φ .

Mediante tanteos se llega a determinar el valor correcto.

ϕ mm/h	hp_{e1} mm	hp_{e2} mm	hp_{e3} mm	hp_{e4} mm	hp_{e5} mm	hp_{e6} mm	Σhp_{e_i} mm
4	1.35	0	0	0.45	0	0	1.8 \neq 3.5
3	2.35	0.07	0	1.45	0	0	3.87 \neq 3.5
3.15	2.20	0	0	1.30	0	0	3.50 = 3.5

Figura 22. Recorte de página Determinación de Φ .
Fuente: Aparicio Mijares, 1992, Ejercicio 7.1 Pág. 183.

Resultados:

Tabla 12. Resultados tabulados del Ejercicio 7.1

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de escurrimiento directo	126000.00	m ³
Altura efectiva de precipitación.	3.50	mm
Índice de infiltración Φ	3.15	mm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2 Ejemplo resuelto en el software microsoft excel 2010.

En la hoja de cálculo que se desarrolló para este método se ingresan los mismos datos de la cuenca, Hidrograma y Hietograma; que del Ejemplo Resuelto 7.1 del libro “Fundamentos de Hidrología de Superficie” del Autor: Francisco J. Aparicio Mijares.

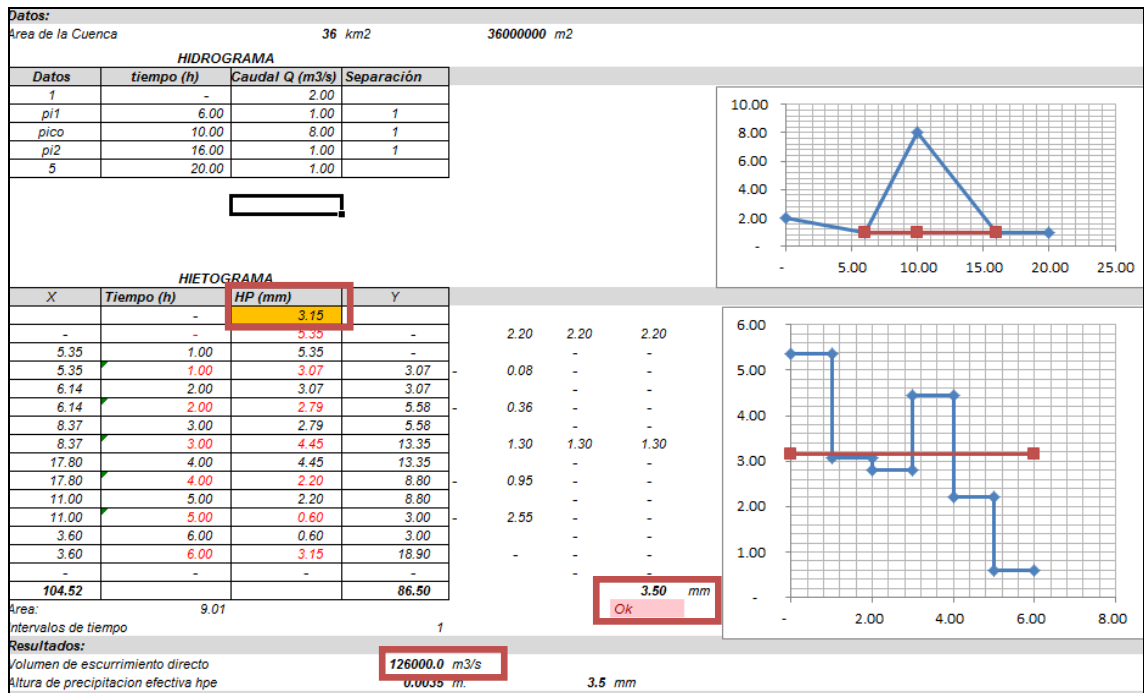


Figura 23. Recorte de página Hoja de Cálculo método de infiltración media o índice de infiltración Φ .

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se encuentran enmarcados con un recuadro color rojo dentro del recorte de la Hoja de Cálculo método de infiltración media o índice de infiltración Φ .

Tabla 13. Resultados tabulados de la Hoja de cálculo método de infiltración media o índice de infiltración Φ .

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de escurrimiento directo	126000.00	m ³
Altura efectiva de precipitación.	3.50	mm
Índice de infiltración Φ	3.15	mm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.3 Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.

De igual manera en la herramienta (programa) se ingresan los datos de la cuenca, Hidrograma y Hietograma; que del Ejemplo Resuelto 7.1 del libro “Fundamentos de Hidrología de Superficie” del Autor: Francisco J. Aparicio Mijares.

Para conocer detalladamente como utilizar la herramienta se debe descargar el manual de usuario denominado “MANUAL DE USUARIO MÉTODO ÍNDICE DE INFILTRACIÓN FI”; y se lo puede hacer con el botón denominado “DESCARGAR MANUAL” que se encuentra dentro del programa; o ver el video tutorial subido a la Internet, al presionar sobre la palabra Video Tutorial.

Se muestra a continuación en la Figura 21 el panel de ingreso de datos de la herramienta.

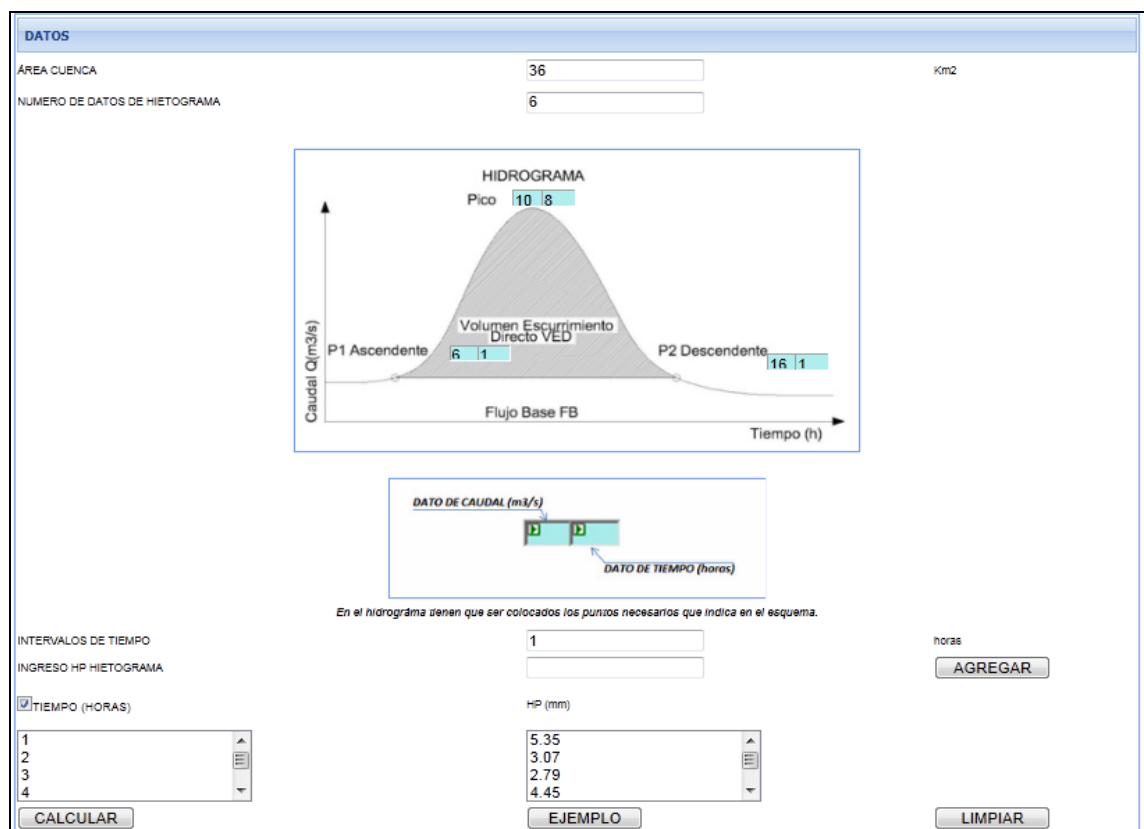


Figura 24. Recorte de página Panel de datos de la herramienta virtual Índice de infiltración Φ
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que determino el programa se muestran a continuación:

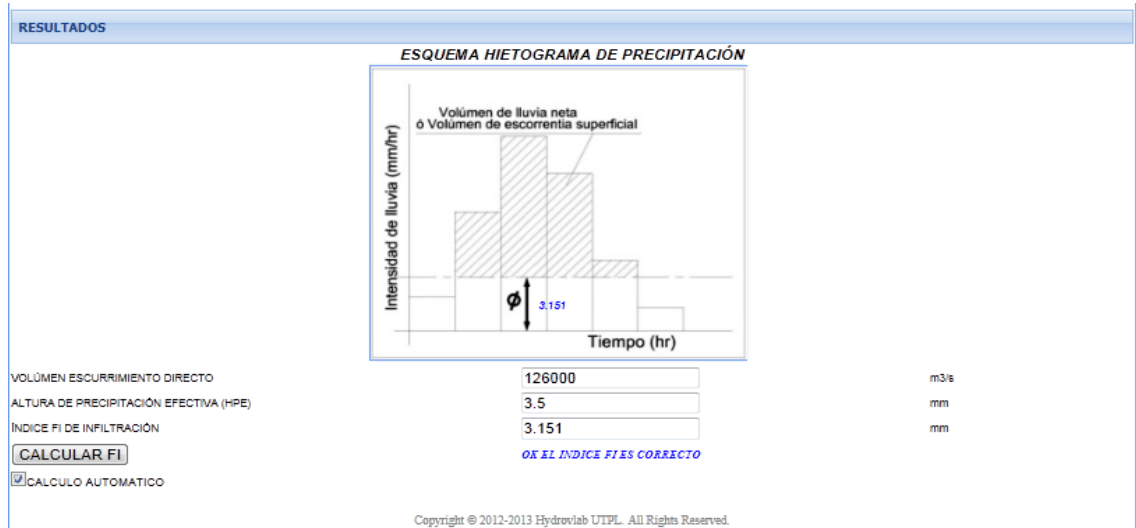


Figura 25. Recorte de página Panel de resultados de la herramienta virtual Índice de infiltración Φ .

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24 se muestra en mensaje de alerta en color azul que dice “OK EL ÍNDICE FI ES CORRECTO” ; esto significa que el valor asumido si se lo realizo por el método manual es el adecuado.

El mismo mensaje de alerta se mostrará si el cálculo del índice se lo hace de manera automática con el check list “CALCULO AUTOMÁTICO”.

Tabla 14. Resultados tabulados de la Herramienta Virtual Método de Infiltración Media o Índice de Infiltración Φ .

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de escurrimiento directo	126000.00	m ³
Altura efectiva de precipitacion.	3.500	mm
Índice de infiltración Φ	3.151	mm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.4 Comparación de resultados

Luego de haber resuelto el Problema 7.1 del libro “Fundamentos de Hidrología de Superficie” del Autor: Francisco J. Aparicio Mijares, podemos determinar que los resultados obtenidos en la herramienta virtual y la hoja de caculo coinciden: existe una leve variación en los resultados; que se debe al número de decimales que toma cada software y el autor del libro.

3.1.2 Método de Richard-Phillps.

3.1.2.1 Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.

Se tomó el Ejemplo Resuelto 4.2.1 página 112 del libro “Hidrología Aplicada”.
Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Datos:

Tabla 15. Datos ejemplo resuelto 4.2.1.

Datos	Valores	Unidades
Sección transversal	40.00	cm ²
Tiempo de Saturación	0.25	Horas
Volumen de Agua	100	cm ³
Conductividad Hidráulica	0.4	cm/hora
Tiempo Requerido	0.5	Horas

Fuente: Elaboración propia.

Solución. La profundidad de infiltración acumulada en la columna horizontal es $F = 100 \text{ cm}^3/40 \text{ cm}^2 = 2.5 \text{ cm}$. Para infiltración horizontal, la infiltración acumulada es función de la succión del suelo únicamente, luego después de $t = 15 \text{ min} = 0.25 \text{ h}$,

$$F(t) = St^{1/2}$$

y

$$2.5 = S(0.25)^{1/2}$$

$$S = 5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1/2}$$

Para infiltración hacia abajo en una columna vertical (4.2.5) se utiliza con $K = 0.4 \text{ cm/h}$. Luego, con $t = 30 \text{ min} = 0.5 \text{ h}$.

$$\begin{aligned} F(t) &= St^{1/2} + Kt \\ &= 5(0.5)^{1/2} + 0.4(0.5) \\ &= 3.74 \text{ cm} \end{aligned}$$

Figura 26. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.2.1 Pág 112.
Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Resultados:

Tabla 16. Resultados tabulados del Ejercicio 4.2.1.

Dato.	Valor.	Unidad.
Adsorción.	5.00	cm.h ^{-0.5}
Infiltración	3.74	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2 Ejemplo resuelto en el Software Microsoft Excel 2010.

En la hoja de cálculo que se desarrolló para este método se ingresan los mismos datos: área de sección transversal, tiempo de saturación y aplicado, volumen de agua y conductividad hidráulica; que del Ejemplo Resuelto 4.2.1 del libro “Hidrología Aplicada”, del Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

RICHARDS-PHILIPS		
DATOS		
Tubo sección transversal	40 cm ²	
tiempo de saturación	15 min	0.25 horas
Volumen agua	100 cm ³	
Conductividad Hidráulica K	0.4 cm/h	
Tiempo Requerido	30 min	0.5 horas
Infiltración acumulada	2.5 cm	
Ft	F(t)=[st] ^{0.5}	
Adsorción S	5 cm-h ^{-1/2}	
RESULTADOS		
F(t)=[st] ^{0.5} +Kt	3.74 cm	
f(t)=1/2 [St] ^{-0.5} +K		

Figura 27. Recorte de página Hoja de cálculo método de Richad-Phillips
Fuente: Elaboración propia.

Resultados

En esta hoja de cálculo se determina la adsorción y la infiltración. Estos resultados se los muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 17. Resultados tabulados Hoja de cálculo Método de Richard-Phillips.

Dato.	Valor.	Unidad.
Adsorción.	5.00	cm.h ^{-0.5}
Infiltración	3.74	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.3 Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.

De igual manera en la herramienta Método de Richard-Phillips se ingresan los datos: área de sección transversal, tiempo de saturación y aplicado, volumen de agua y conductividad hidráulica; que del Ejemplo Resuelto 4.2.1 del libro “Hidrología Aplicada”, del Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Para conocer detalladamente como utilizar la herramienta se debe descargar el manual de usuario denominado “MANUAL DE USUARIO MÉTODO DE RICHARD-PHILLIPS”; y se lo puede hacer con el botón denominado “DESCARGAR MANUAL” que se encuentra dentro del programa; o ver el video tutorial subido a la Internet, al presionar sobre la palabra Video Tutorial

Se muestra a continuación en la Figura 25 el panel de ingreso de datos de la herramienta.

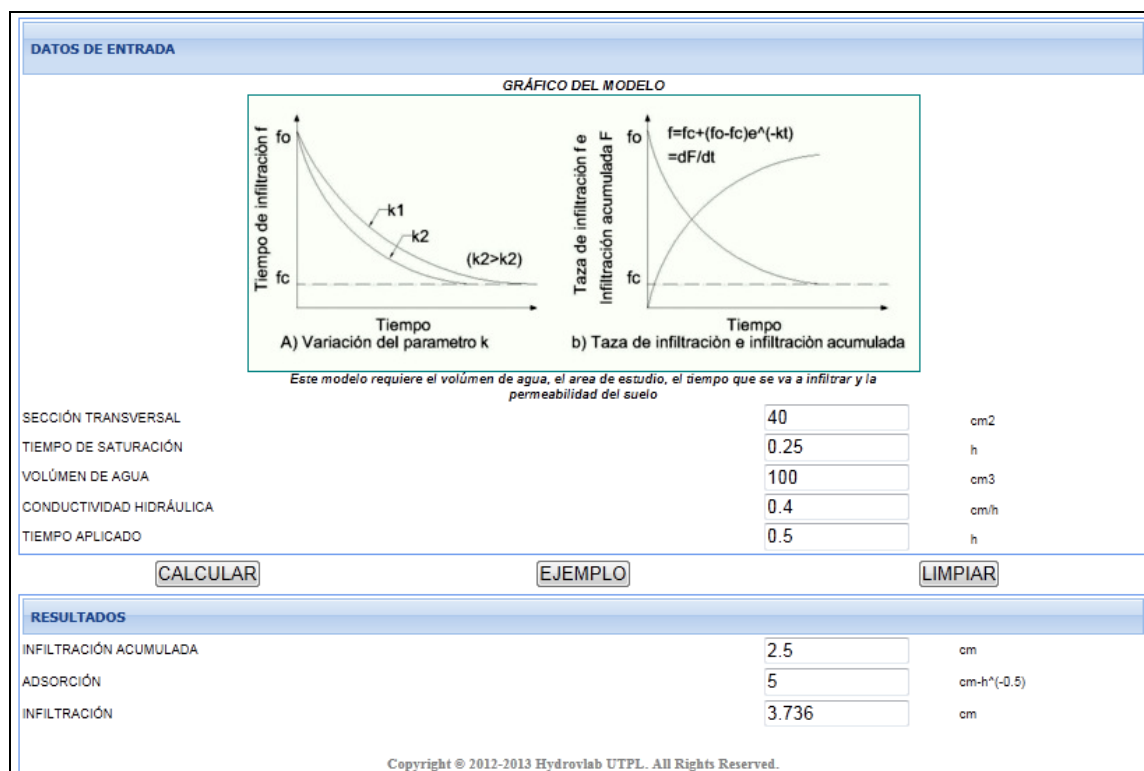


Figura 28. Recorte de página Panel de datos y resultados de la herramienta virtual Método de Richad-Phillips.

Fuente: Elaboración propia.

La herramienta emite resultados como los del orden siguiente.

Tabla 18. Resultados tabulados Herramienta Virtual Método de Richard-Phillips.

Dato.	Valor.	Unidad.
Adsorción.	5.00	cm.h ^{-0.5}
Infiltración	3.74	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.4 Comparación de resultados

Los resultados en todos los casos analizados; ya sea por el programa Excel 2010 o la herramienta virtual coinciden con los resultados obtenidos en el problema resuelto 4.2.1 página 112 del libro “Hidrología Aplicada”. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

3.1.3 Método de Green-Ampt

3.1.3.1 Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.

Se tomó el Ejemplo Resuelto 4.3.1 página 119 del libro “Hidrología Aplicada”. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Datos:

Tabla 19. Datos ejemplo resuelto 4.3.1.

Datos	Valores	Unidades
Porosidad efectiva θ_e	0.486	Tanto x1
Cabeza de succión del frente mojado ψ	16.7	cm
Conductividad Hidráulica k	0.65	cm/hora
Saturación efectiva inicial S_e	0.3	Tanto x1

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la variación de humedad.

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= (1 - s_e)\theta_e \\ &= (1 - 0.3)(0.486) \\ &= 0.340 \\ \psi\Delta\theta &= 16.7 \times 0.340 \\ &= 5.68 \text{ cm}\end{aligned}$$

Figura 29. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación de la variación en el contenido de humedad.

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Determinación de la infiltración acumulada en el lapso de 1 hora, por el método de sucesiones numéricas.

$$\begin{aligned}F(t) &= Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right) \\ &= 0.65 \times 1 + 5.68 \ln\left(1 + \frac{0.65}{5.68}\right) \\ &= 1.27 \text{ cm}\end{aligned}$$

Figura 30. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación de la infiltración acumulada.

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Determinación de la tasa de infiltración a partir de la infiltración acumulada obtenida anteriormente.

$$\begin{aligned}f &= K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F} + 1\right) \\ &= 0.65\left(\frac{5.68}{3.17} + 1\right) \\ &= 1.81 \text{ cm/h}\end{aligned}$$

Figura 31. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 119. Determinación tasa de infiltración.

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Solución. Del ejemplo 4.3.1, para un suelo limoso de marga $\psi\Delta\theta = 5.68$ cm y $K = 0.65$ cm/h. El tiempo de encharcamiento está dado por (4.4.2):

$$t_p = \frac{K \psi \Delta \theta}{i(i - K)}$$

a) Para $i = 1$ cm/h,

$$t_p = \frac{0.65 \times 5.68}{1.0(1.0 - 0.65)}$$

$$= 10.5 \text{ h}$$

y

$$F_p = i t_p$$

$$= 1.0 \times 10.5$$

$$= 10.5 \text{ cm}$$

b) Para $i = 5$ cm/h,

$$t_p = \frac{0.65 \times 5.68}{5(5 - 0.65)}$$

$$= 0.17 \text{ h (10 min)}$$

y

$$F_p = i t_p$$

$$= 5.0 \times 0.17$$

$$= 0.85 \text{ cm}$$

Figura 32. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 4.3.1 Pág 122. Tiempo de encharcamiento y profundidad de infiltración
Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Resultados:

Tabla 20. Resultados tabulados del Ejercicio 4.3.1 página 119. Libro Hidrología Aplicada. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Dato.	Valor.	Unidad.
Variación en el contenido de humedad	0.34	Tanto x1
Infiltración acumulada	3.62	cm
Tasa de infiltración	1.81	cm/hora
Tiempo de encharcamiento	10.5	horas
Profundidad de infiltración.	10.5	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.2 Ejemplo resuelto en el Software Microsoft Excel 2010.

En la hoja de cálculo que se desarrolló para este método se ingresan los mismos datos del suelo y sus condiciones; como son: porosidad y porosidad efectiva,

Cabeza de succión del frete mojado, conductividad hidráulica, tiempo de infiltración y saturación efectiva; que del ejemplo 4.3.1, página 119 del Libro Hidrología Aplicada. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Datos		MARGA LIMOSO	
TIPO DE MATERIAL			
POROSIDAD EFECTIVA θ_e		0.486	DE TABLA
POROSIDAD η		0.501	DE TABLA
CABEZA DE SUCCION EN EL FRETE MOJADO (ψ)		16.680 cm	DE TABLA
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA K		0.650 cm/h	DE TABLA
$\theta_e = \eta - \theta_r$			
θ_r		0.0150	
SATURACIÓN EFECTIVA S_e		0.30000	
$\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$		0.34020	
$\psi\Delta\theta$		5.67454	
$F(t)$		1.27	EJEMPLO EN UNA OCACIÓN

Resultados	
$F(t)$ inicial = kt	0.65
t	1 h
$F(t)1$	0.65
$F(t)$	1.27
$F(t)$	1.79
$F(t)$	2.21
$F(t)$	2.51
$F(t)$	2.73
$F(t)$	2.88
$F(t)$	2.98
$F(t)$	3.04
$F(t)$	3.09
$F(t)$	3.12
$F(t)$	3.13
$F(t)$	3.14
$F(t)$	3.15
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16
$F(t)$	3.16

EL TIEMPO PARA EL QUE SE CALCULA LA INFILTRACION ACUMULADA VALOR INICIAL LUEGO REEMPLAZAMOS Y MEDIANTE PROCESOS ITERATIVOS DETERMINAMOS EL VALOR DE

Figura 33. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Green-Ampt. Variación en el contenido de humedad e infiltración acumulada. Fuente: Elaboración propia.

CÁLCULO DE LA TASA DE INFILTRACIÓN DESPUES DE $t=1$ h						
$f = K(\psi\Delta\theta / F + 1)$						1.82 cm/h
CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO Y PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA HASTA ESE MOMENTO						
A) 1 cm/h		1 cm/h		INTENSIDAD DE LLUVIA		
B) 5 cm/h		5 cm/h		INTENSIDAD DE LLUVIA		
A) $t_r = \frac{K \psi \Delta \theta}{i(i - K)}$		10.54 h		632.31 MIN	$FP = i^*t_p$	10.54 CM PROFUNDIDAD
B) $t_r = \frac{K \psi \Delta \theta}{i(i - K)}$		0.17 h		10.18 MIN	$FP = i^*t_p$	0.85 CM PROFUNDIDAD

Figura 34. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Green-Ampt. Tasa de infiltración y tiempo de encharcamiento. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se encuentran enmarcados con un recuadro color rojo dentro del recorte de la Hoja de cálculo Método de Green-Ampt son los que se tabulan a continuación.

Tabla 21. Resultados tabulados de la Hoja de cálculo Método de Green-Ampt.

Dato.	Valor.	Unidad.
Variación en el contenido de humedad	0.34	Tanto x1
Infiltración acumulada	3.62	cm
Tasa de infiltración	1.81	cm/hora
Tiempo de encharcamiento	10.5	horas
Profundidad de infiltración.	10.5	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.3 Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.

De la misma forma en la herramienta Método de Green-Ampt se ingresan los datos del suelo y sus condiciones; como son: porosidad y porosidad efectiva, Cabeza de succión del frete mojado, conductividad hidráulica, tiempo de infiltración y saturación efectiva; que del ejemplo 4.3.1, página 119 y 122 del Libro Hidrología Aplicada. Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays. Para comparar los resultados que emite este programa.

Para conocer detalladamente como utilizar la herramienta se debe descargar el manual de usuario denominado "MANUAL DE USUARIO MÉTODO DE GREEN-AMPT"; y se lo puede hacer con el botón denominado "DESCARGAR MANUAL" que se encuentra dentro del programa; o ver el video tutorial subido a la Internet, al presionar sobre la palabra Video Tutorial.

Se muestra a continuación en la Figura 32 el panel de ingreso de datos de la herramienta.

DATOS

MOSTRAR TABLA

POROSIDAD EFECTIVA: 0.486 Tanto x1
 POROSIDAD: 0.501 Tanto X1
 CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO: 16.68 cm
 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K): 0.65 cm/hr
 TIEMPO: 1 Horas
 SATURACIÓN EFECTIVA S_e : 0.3 Tanto x1

Este modelo requiere estimaciones de la Conductividad Hidráulica (K), de la Porosidad (n) y de la Cabeza de Succión del Suelo en el Frente Mojado, esto lo podemos hacer mediante la siguiente tabla

Figura 35. Recorte de página Panel de datos de la herramienta virtual Método de Green-Ampt.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados.

RESULTADOS

CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO: 0.015 Tanto x1
 CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTE MOJADO: 0.3402 Tanto x1
 $F(t)=kt$ CALCULADO
 F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE): 0.65 cm

INFILTRACIÓN ACUMULADA

INFILTRACIÓN ACUMULADA F: 3.16331 cm
 TASA DE INFILTRACION: 1.81601 cm/hr

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO

INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO): 5 cm/hr

 TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO: 0.16958 Horas
 PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA: 0.8479 cm

Perfiles de humedad del suelo antes, durante y después del encharcamiento.

Copyright © 2012-2012 Hydrovlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura 36 Recorte de página Panel de Resultados de la herramienta virtual Método de Green-Ampt.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados tabulados se los muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 22. Resultados tabulados de la Herramienta Virtual Método de Green-Ampt.

Dato.	Valor.	Unidad.
Variación en el contenido de humedad	0.34	Tanto x1
Infiltración acumulada	3.62	cm
Tasa de infiltración	1.81	cm/hora
Tiempo de encharcamiento	10.5	horas
Profundidad de infiltración.	10.5	cm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.4 Comparación de resultados

Como se muestra en las tablas de resultados tabuladas respectivamente a cada caso de estudio (tablas 20, 21 y 22), podemos determinar que los resultados son los mismos en todos los casos; algunos resultados difieren de forma mínima por el número de decimales con el que se haya trabajado.

3.1.4 Método de Horton.

3.1.4.1 Ejemplo resuelto de la bibliografía utilizada.

Se tomó el Ejemplo Resuelto 6.4 página 170 del libro GEOHIDROLOGÍA. Autor: Jorge Athala y Alberto Olvera

Datos:

Tabla 23. Datos ejemplo resuelto 6.4.

Datos	Valores	Unidades
Infiltración Inicial f_0	4.50	pulg/hr
Infiltración Final f_c	0.40	pulg/hr
Parámetro del suelo que controla la capacidad de infiltración k	0.35	Horas ⁻¹
Tiempos del evento de infiltración	0.17, 0.50, 1.00, 2.00, 6.00	Horas

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del volumen de agua infiltrado, mediante la integración de la curva de infiltración dada por la ecuación de Horton para este problema.

resolviendo la ecuación de Horton para cada valor de t dado:

b) El volumen infiltrado (en pulgadas sobre la cuenca) se determina dibujando la curva de capacidad de infiltración con los resultados obtenidos anteriormente y calculando el área bajo dicha curva.

integrando para el intervalo $t_1 = 0$ y $t_2 = 6$ hr:

$$\text{Volumen infiltrado} = V_{\text{inf.}} = \int_{t_1}^{t_2} f \, dt$$

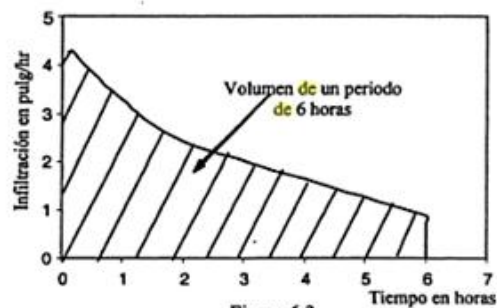


Figura 6.3
Curva de resultados de la capacidad de infiltración.

$$V_{\text{inf.}} = \int_{t_1}^{t_2} [0.4 + 4.1(e^{-0.35t})] dt$$

$$V_{\text{inf.}} = \left[0.4t + \left(\frac{4.1}{-0.35} \right) e^{-0.35t} \right]_{t_1=0}^{t_2=6}$$

$$V_{\text{inf.}} = \left[2.4 - \left(\frac{4.1}{0.35} \right) e^{-2.1} \right] - \left[0 - \left(\frac{4.1}{0.35} \right) e^0 \right]$$

$$V_{\text{inf.}} = 12.68 \text{ pulg sobre la cuenca}$$

Figura 37. Recorte de página. Ejercicio Resuelto 6.4 página 170.
Fuente: (Athala Molano & Olvera Arizmendi, 2006).

Resultados:

Tabla 24. Resultados tabulados del Ejercicio 4.2.1 Autor: Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays.

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de infiltración.	12.68	pulg

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.2 Ejemplo resuelto en el Software Microsoft Excel 2010.

Para esta etapa se desarrolló una hoja de cálculo, que requiere el ingreso de los mismos datos del ejemplo resuelto del libro Geohidrología, Autor: Jorge Athala y Alberto Olvera.

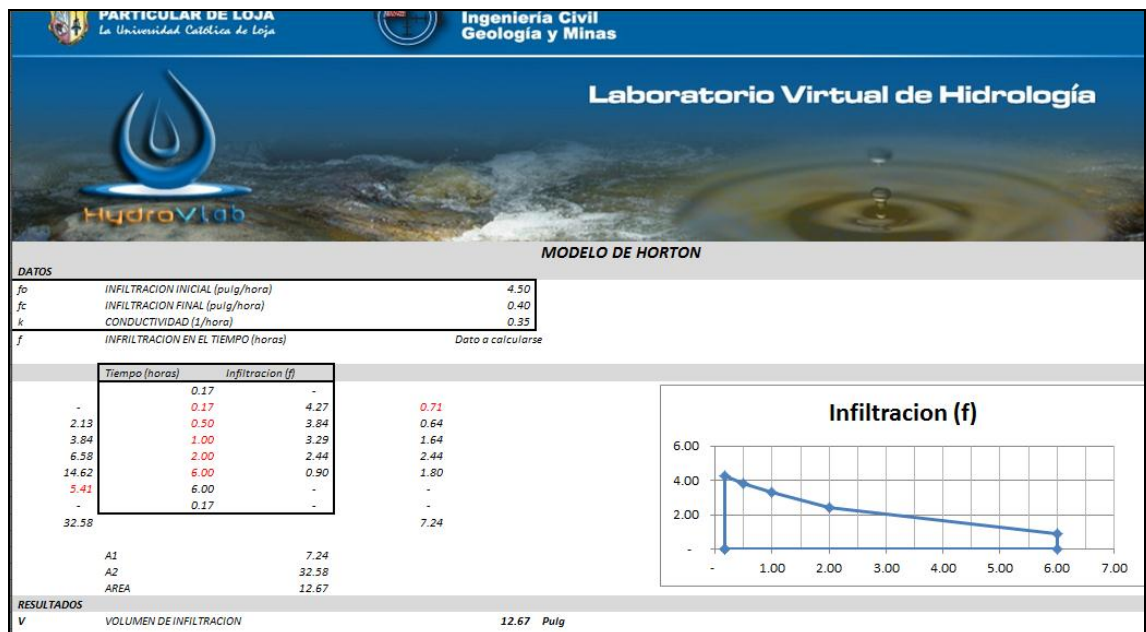


Figura 38. Recorte de página. Hoja de cálculo Método de Horton.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Tabla 25. Resultados tabulados. Hoja de cálculo Método de Horton.

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de infiltración.	12.67	pulg

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.3 Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.

Para continuar con el análisis se ingresan los datos de infiltración inicial, final, constante que controla la capacidad de infiltración; y los tiempos en los cuales se mide este evento; Esta herramienta virtual se denomina Infiltración Método de

Horton. Se tiene el objetivo de comparar los resultados anteriores; tanto del ejemplo resuelto como del ejemplo desarrollado en la hoja de cálculo del método mencionado; con los resultados de este programa.

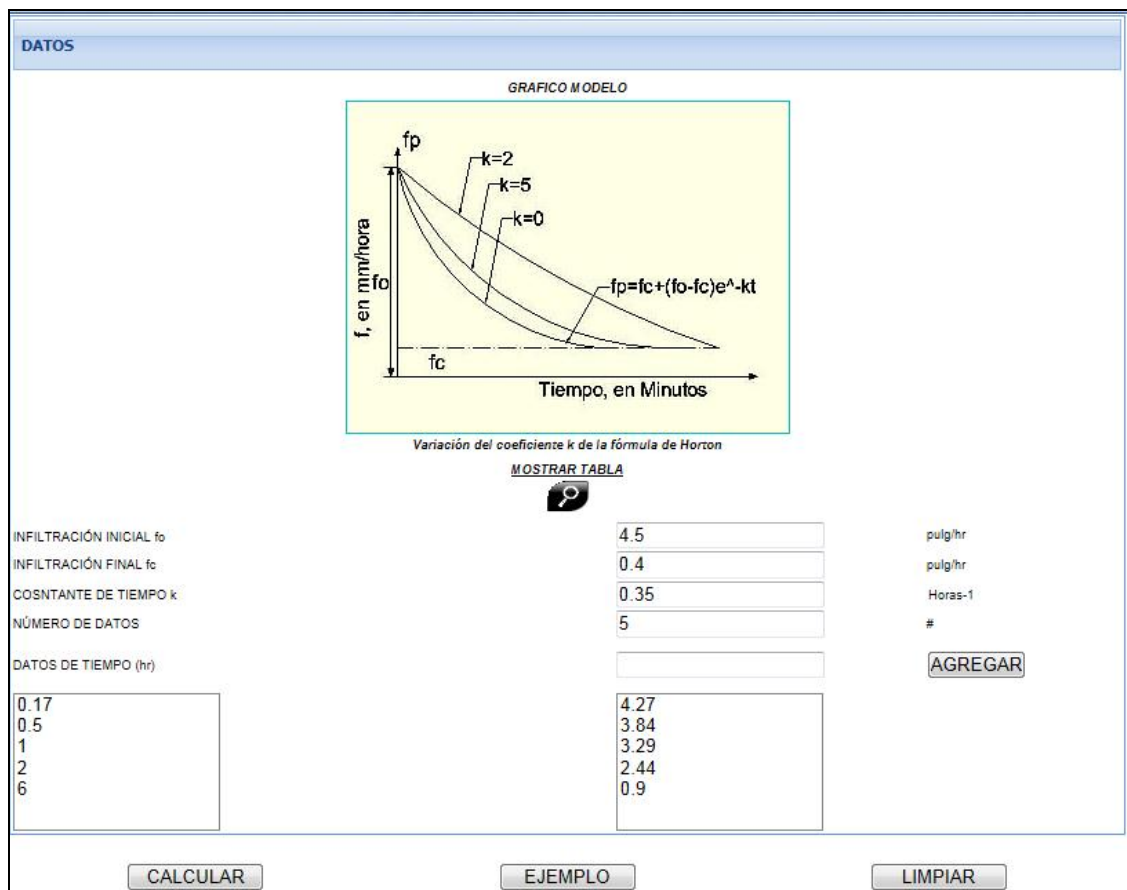


Figura 39. Recorte de página. Panel o virtual Método de Horton.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados:

Los resultados emitidos por la herramienta son los siguientes:

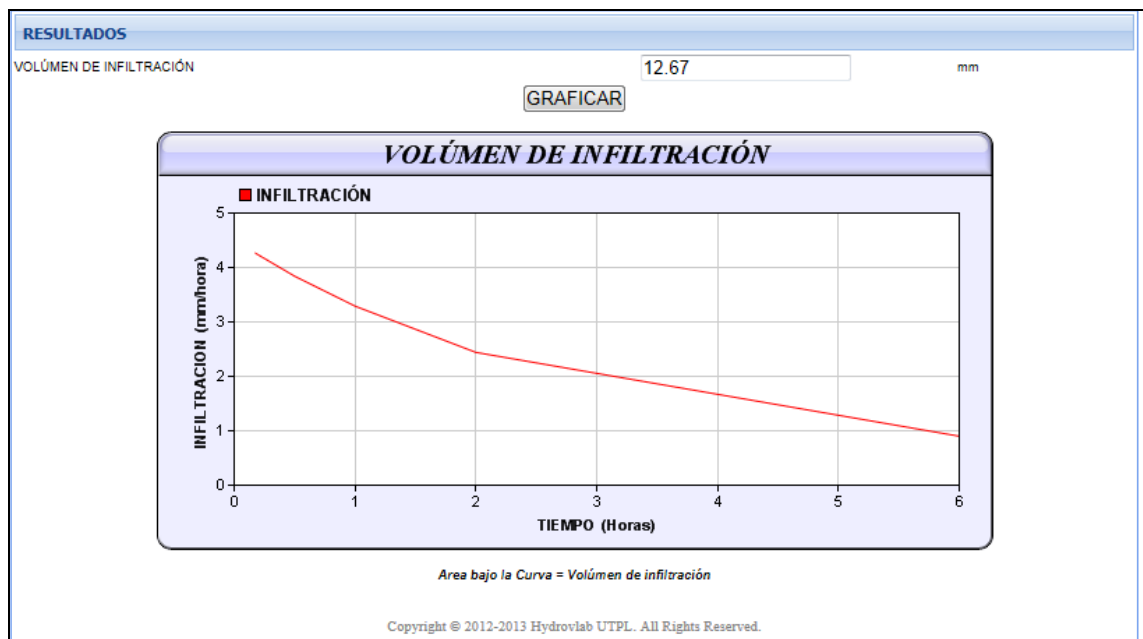


Figura 40. Recorte de página. Panel de Resultados de la Herramienta virtual Método de Horton.

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor visualización de los resultados los mostramos tabulados.

Tabla 26. Resultados tabulados. Hoja de cálculo Método de Horton.

Dato.	Valor.	Unidad.
Volumen de infiltración.	12.67	pulg

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.4 Comparación de resultados

Si comparamos las tablas 22, 23 y 24; que muestran los resultados de los diferentes procesos de cálculo del mismo problema, podemos deducir que son los mismos, con una pequeña diferencia que se da por el número de decimales que se ha usado en cada método de cálculo según el programa utilizado.

3.1.5 Método número de la curva.

Este programa es una adaptación del programa Lluvia Escorrentía, ubicado en el Hidrovlab en la ubicación: ["http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/lluviaEscorrentia/hefectousosuelo.aspx?idioma=es-ES"](http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlexperimentos/simulaci%C3%B3n/lluviaEscorrentia/hefectousosuelo.aspx?idioma=es-ES).

Por tal motivo la comprobación se realizara mediante la lectura de la Tabla incluida en la herramienta y la aplicación web adaptada.

3.1.5.1 Ejemplo resuelto mediante tablas y ecuaciones.

Se ingresan los datos de área de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce, Precipitación total; además de las condiciones de la cuenca como: uso y cobertura, tratamiento del suelo, pendiente del terreno, tipo de suelo y humedad antecedente.

Datos:

Tabla 27. Datos ejemplo resuelto Número de la curva

Datos	Valores	Unidades
Área cuenca	45.00	km ²
Longitud del cauce principal	9.00	km
Volumen de Agua	0.011	m/m
Conductividad Hidráulica	200	mm

Fuente: Elaboración propia.

Resultados.

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno	Tipo de suelo				
			A	B	C	D	
Sin cultivo	Surcos rectos	----	77	86	91	94	
Cultivos en surcos	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91	
		< 1	67	78	85	89	
	Contorneo	> 1	70	79	84	88	
		< 1	65	75	82	86	
	Terrazas	> 1	66	74	80	82	
		< 1	62	71	78	81	
Cereales	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88	
		< 1	63	75	83	87	
	Contorneo	> 1	63	74	82	85	
		< 1	61	73	81	84	
	Terrazas	> 1	61	72	79	82	
		< 1	59	70	78	81	
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89	
		< 1	58	72	81	85	
	Contorneo	> 1	64	75	83	85	
		< 1	55	69	78	83	
	Terrazas	> 1	63	73	80	83	
		< 1	51	67	76	80	
Pastizales	-----	> 1	68	79	86	89	
		< 1	39	61	74	80	
	Contorneo	> 1	47	67	81	88	
		< 1	6	35	70	79	
Pradera permanente	-----	< 1	30	58	71	78	
Bosques naturales	Muy ralo	-----	----	56	75	86	91
	Ralo	-----	----	46	68	78	84
	Normal	-----	----	36	60	70	77
	Espeso	-----	----	26	52	62	69
	Muy espeso	-----	----	15	44	54	61
Caminos	de terracería	-----	----	72	82	87	89
	de superficie dura	-----	----	74	84	90	92

Figura 41. Recorte de página. Tabla herramienta número de la curva.
Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene un valor de 77 para la humedad antecedente AMCII; para corregir el CN para la humedad antecedente AMCI. Usamos la Tabla 7. Donde se debe interpolar y llegamos al resultado de CN=58

A partir de los datos obtenidos de las tablas y con la ecuación 15 se determina la precipitación efectiva

Pe= 76.7 mm.

3.1.5.2 Ejemplo resuelto en la herramienta desarrollada.

Datos y resultados obtenidos herramienta virtual “Infiltración Número de la Curva”. En este ejemplo colocamos los mismos datos que los de la Tabla 15 y de la Figura 40 a través de las ayudas de la herramienta desarrollada.

INFILTRACION NÚMERO DE LA CURVA

[DESCARGAR MANUAL](#)
[VIDEO TUTORIAL](#)

DATOS DE ENTRADA

ÁREA DE LA CUENCA Ac (Km ²)	<input type="text" value="25"/>
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL L (Km)	<input type="text" value="9"/>
PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE J (m / m)	<input type="text" value="0.011"/>
PRECIPITACIÓN TOTAL Pt (mm)	<input type="text" value="200"/>

DETERMINAR EL NÚMERO DE LA CURVA (CN)

VER TABLA CN ►

USO DE LA TIERRA Y COBERTURA

Tratamiento del suelo

Surcos rectos
 Contorneo
 Terrazas
 No definido

CN1 SUELOS SECOS

PRECIPITACIÓN EFECTIVA Pe (mm)

RETENCIÓN SUPERFICIAL (mm)

Pendiente del terreno (%)

> 1
 < 1
 No definido

CN2 SUELO INTERMEDIO

Tipo de suelo

Tipo A
 Tipo B
 Tipo C
 Tipo D
 CN3 SUELO HÚMEDO

Figura 42. Recorte de página herramienta virtual “Infiltración Número de la Curva”. Fuente: Elaboración propia.

3.1.5.3 Comparación de resultados.

Para cada ejemplo en este modelo de infiltración se puede determinar que se obtienen los mismos resultados ya sea al interpolar de las tablas o mediante la herramienta virtual.

3.2 Análisis de resultados.

Para poder llegar a deducciones respecto a los resultados mostrados por cada una de las herramientas virtuales, debemos colocar datos extremos que muestren la coherencia entre la base teórica utilizada y los resultados emitidos por cada herramienta.

3.2.1 Infiltración media o índice de infiltración F_i (φ).

En este método, el resultado de infiltración es un valor promedio; por tal motivo no se puede hacer una medición del comportamiento del fenómeno de infiltración durante un tiempo determinado.

3.2.2 Infiltración método número de la cuenca.

Al igual que el método de infiltración media, este método emite un valor promedio; y como se señaló anteriormente, aquí tampoco se puede hacer una evaluación del comportamiento del fenómeno de infiltración.

En este método interviene mucho la apreciación que se pueda dar de la cuenca.

3.2.3 Infiltración método de Richard-Phillips.

En la Tabla 28 se muestra un resumen de resultados de 6 ejemplos resueltos por el método de infiltración de Richard-Phillips, los cuales sirven para entender el comportamiento del modelo matemático al variar diferentes datos.

Tabla 28. Resultados de varios ejemplos resueltos por el modelo "Richard-Phillips"

Datos:	EJ 1	EJ 2	OBS	EJ 3	OBS	EJ 4	OBS	EJ 5	OBS	EJ 6	OBS
Seccion transversal (cm2)	40	40		40		40		100	A	100	
Tiempo de saturación (Horas)	0.25	0.5	A	1	A	0.25		0.25		0.25	
Volumen de agua (cm3)	100	100		100		100		100		100	
Conductividad Hidráulica (cm(hr))	0.4	0.4		0.4		0.4		0.4		0.3	D
Tiempo aplicado (Horas)	0.5	0.5		0.5		1	A	0.5		0.5	
Resultados:											
Adsorción	5	3.53	D	2.5	D	5	M	2	D	2	D
Infiltración (cm)	3.74	2.7	D	1.98	D	5.4	A	1.61	D	1.56	D
A. - Aumentó; D. - Disminuyó; M. - Se Mantuvo											

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 28 en la columna 2 y 3 se muestra la variación (aumento) en el tiempo de saturación se puede observar una disminución en los resultados (adsorción e infiltración.)

En la columna 5 de la Tabla 28 se muestra el aumento del tiempo de infiltración y por tal motivo se ha elevado el valor de la infiltración como es lógico. Pero no existe aumento en la adsorción, porque este parámetro depende del tiempo de saturación.

En la Tabla 28 en la columna 9 se indica que aumenta la sección trasversal o área donde ocurre el fenómeno de infiltración; también se observa una disminución en los resultados (infiltración y adsorción); pues no ha variado el volumen de agua y eso demuestra claramente como la ley de continuidad mantiene su valía.

En la columna 11 de la Tabla 28 se indica que el parámetro variado es la conductividad hidráulica, que tiene una relación directamente proporcional a la capacidad de infiltración.

3.2.4 Infiltración método de Green-Ampt.

Se resolvieron algunos ejercicios para medir el comportamiento de la infiltración a través de la variación de factores trascendentes de este método. Por tal motivo a continuación se muestran tablas de datos y resultados emitidos por el programa luego de cambiar factores como conductividad hidráulica o saturación efectiva.

Tabla 29. Resultados ejemplos resueltos por el modelo de "Green-Ampt".

Datos.	EJ 1	EJ 2	OBS. EJ 3	OBS. EJ 4	OBS. EJ 5	OBS. EJ 6	OBS.				
Porosidad (tanto x1):	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486				
Porosidad Efectiva (tanto x1):	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501	0.501				
Cabeza de succión del frente mojado (cm):	16.680	16.680	16.680	16.680	50.000	16.680	16.680				
Conductividad Hidráulica (cm/hr):	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650				
Tiempo (Horas):	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000				
Saturación Efectiva (tanto x1):	0.300	0.900	0.999	0.9999	0.3000	0.3000	0.3000				
Intensidad de la lluvia(cm/hr):	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	5.000				
Resultados.											
Contenido residual de humedad del suelo (tanto x1):	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015				
Cambio en el contenido de humedad cuando pasa el frente mojado (tanto x1):	0.340	0.049	<i>D</i>	0.00049	<i>D</i>	0.000050	<i>D</i>	0.340200	<i>M</i>	0.340200	<i>M</i>
Infiltración acumulada (cm):	3.160	1.490	<i>D</i>	0.686	<i>D</i>	0.066	<i>D</i>	5.142	<i>A</i>	3.160	<i>M</i>
Tasa de infiltración (cm/hr):	1.816	1.001	<i>D</i>	0.658	<i>D</i>	0.655	<i>D</i>	2.800	<i>A</i>	1.816	<i>M</i>
Tiempo de encharcamiento (Horas):	10.530	1.505	<i>D</i>	0.015	<i>D</i>	0.0015	<i>D</i>	31.5900	<i>A</i>	0.1690	<i>D</i>
Profundidad de agua infiltrada (cm):	10.530	1.505	<i>D</i>	0.015	<i>D</i>	0.0015	<i>D</i>	31.5900	<i>A</i>	0.8400	<i>D</i>
<i>A - AUMENTÓ; D - DISMINUYÓ; M - SE MANTUVO</i>											

Fuente: Elaboración propia.

En la columna 2, 3, 5 y 7 de la Tabla 29 se varía únicamente la saturación efectiva; los resultados muestran notablemente que disminuyen todos los valores a excepción del contenido residual de humedad del suelo que es un valor independiente del fenómeno de infiltración; sin embargo, es un valor constante del tipo del suelo.

De la Tabla 29, columna 9, se observa que el dato cambiado en este ejemplo es la cabeza de succión del frente mojado; de los resultados se observa que los valores han aumentado; lo que significa que todos estos valores son directamente proporcionales al dato variado en la Tabla.

Para el ejemplo 6 resuelto en este modelo obtenemos aumento de la intensidad de lluvia; donde los resultados han disminuido en el tiempo de encharcamiento y la profundidad de infiltración.

3.2.5 Infiltración método de Horton.

Para analizar la variación de la capacidad de infiltración en la herramienta "Método de Horton" se colocó valores de diferentes tipos de suelo con diferentes constantes de tiempo según el tipo de suelo. A partir de la Tabla 30, se puede corroborar lo indicado por la teoría, que la capacidad de infiltración disminuye a través de una curva exponencial.

Tabla 30. Resultado ejemplos resueltos por el modelo de "Horton".

Datos:	EJ 2	OBS EJ 3	OBS EJ 4	OBS EJ 5	OBS EJ 6	OBS				
Infiltración inicial (mm/hr):	280.00	AG	900.00	AH	325.00	T	210.00	AAD	670.00	AAH
Infiltración final (mm/hr):	220.00	AG	290.00	AH	20.00	T	25.00	AAD	30.00	AAH
Constante del suelo k (cm-1):	1.60	AG	0.80	AH	1.80	T	2.00	AAD	1.40	AAH
Número de datos:	5.00		5.00		5.00		5.00		5.00	
Tiempos: (Horas)	f (mm/hr)		f		f		f		f	
	0.17	265.71		822.43		244.60		156.68		534.45
	0.5	246.96		698.09		144.00		93.06		347.81
	1	232.11		564.09		70.42		50.04		187.82
	2	222.45		413.16		28.33		28.39		68.92
	6	220.00		295.02		20.01		25.00		30.14
Resultados:										
Volumen de infiltración (mm):	1 316.54		2 471.75		263.78		222.98		605.97	
AG.- AGRICLOA DESNUDO; AH.- AGRICOLA HERBOSO; T.-TURBA; AAD.-ARENO ARCILLOSO DESNUDO; AAH.-ARENO ARCILLOSO HERBOSO										

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1 Conclusiones.

Del presente trabajo de investigación y su etapa de prueba se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- ✚ Se pudo determinar que en el modelo de Green-Ampt que a mayor intensidad de lluvia menor es el volumen de infiltración obtenido.
- ✚ La herramienta “Infiltración Modelo de Green-Ampt”, demuestra que a medida que la saturación tiende a uno, el volumen de infiltración y la tasa de infiltración tienden a ser el mismo valor que el de la conductividad hidráulica. Por tal motivo, la menor infiltración que puede ocurrir luego que el suelo se ha saturado es la conductividad hidráulica.
- ✚ En base a los valores obtenidos en el análisis de resultados del método “Infiltración Modelo de Green-Ampt”; se observa que el valor de la tasa de infiltración y la infiltración acumulada están fuertemente influenciados por el valor de la cabeza de succión del frente mojado; se concluye que cuando el usuario no tiene valores reales de ensayos de suelo y opta por estimar los valores de la Tabla de ayuda de la herramienta virtual; éste debe tener mucho cuidado en la selección del mismo debido a que el rango en que se encuentra este valor es muy extenso.
- ✚ En el modelo de infiltración media se determina que hay un único valor que satisface la condición de que el área del Hietograma desde la altura Φ

hacia arriba es igual a la altura de precipitación efectiva; el margen de error es muy pequeño para esta herramienta (0.001)

- ✚ En el modelo de Richard-Phillips se llega a la conclusión que a mayor saturación presenta menor infiltración. Además disminuye la adsorción de agua en el suelo.
- ✚ En la herramienta virtual “Infiltración Modelo Número de la curva” se demuestra que a mayor número de la curva (CN), la precipitación efectiva es mayor.
- ✚ La herramienta virtual “Infiltración Modelo de Horton” está diseñada para determinar la capacidad de infiltración a través del tiempo. En la etapa de análisis se realizó un ejemplo con cada tipo de suelo que tiene la tabla de ayuda en el programa; donde se demostró que con suelos del mismo tipo pero con cobertura diferente (herbosa) existe mayor infiltración; sin embargo la capacidad de infiltración disminuye más lentamente.

4.2 Recomendaciones.

Se realizó una rigurosa etapa de prueba de cada una de las herramientas virtuales implementadas; se realizan las siguientes recomendaciones:

- ✚ El usuario de estas herramientas de aplicación hidrológica, tenga conocimientos básicos de los modelos que se exponen; y además se aconseja que sean leídos los manuales de usuario; de esta manera se asegura el buen uso de estas aplicaciones web.

- ✚ Se recomienda que para un mejor entendimiento del método y eficaz utilización de las herramientas, se vean los videos tutoriales anexados a cada uno de los programas de infiltración implementados.
- ✚ Se recomienda que se refresque la página web si se ha dejado de utilizar una herramienta por más de 15 minutos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- Athala Molano, J., & Olvera Arizmendi, A. (2006). *Geohidrología*. Naucalpan: Facultad de estudios superiores acatlán.
- Chávarri Velarde, E. (2004). *CLASE VIII INFILTRACIÓN*. Recuperado el 1 de Febrero de 2013, de Universidad Agraria La Molina: http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase_viii_infiltración_def.pdf
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW-Hill.
- FCEFYN. (s.f.). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPÍTULO_1.pdf
- HYDROVLAB; Universidad Técnica Particular de Loja; Pontificia Universidad Católica del Ecuador; Universidad Nacional de Chimborazo; CEDIA;. (S/D de S/M de 2010). *Laboratorio Virtual de Hidrología "HYDROVLAB"*. Recuperado el 30 de Abril de 2012, de <http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec>
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería .
- Nave Marcela R., A. P. (s.f.). Ajustes del Modelo de Horton Mediante datos de infiltración obtenidos en el Piedemonte Mendocino. *Manejo Ecológico de Cuencas, INIGEA*.
- Oñate Valdivieso, F. (s.f.). *Fronate*. Recuperado el 1 de Enero de 2013, de <http://www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/Hidrología.pdf>
- Pontificia Universidad Católica Del Perú. (s.f.). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. Lima: CONCYTEC.
- Reina, T. M. (2008). *FCEFYN* . Recuperado el 1 de Abril de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPÍTULO_1.pdf
- Seegerer, C. D., & Villodas, R. (S/D de S/M de 2006). *Hidrología I*. Cuyo: Universidad Nacional de Cuyo.
- Wikipedia, C. d. (25 de Mayo de 2013). *HTML*. Recuperado el 26 de Mayo de 2013, de <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=HTML&oldid=67303342>
- Wikipedia, C. d. (11 de Marzo de 2013). *Lisímetro*. Recuperado el 25 de Marzo de 2013, de <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Lis%C3%ADmetro&oldid=64791529>

Wikipedia, C. d. (10 de Mayo de 2013). *Microsoft Visual Studio*. Recuperado el 16 de Mayo de 2013, de http://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio.

Wikipedia, C. d. (26 de Mayo de 2013). *Página web*. Recuperado el 27 de Mayo de 2013, de http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A1gina_web&oldid=67174561.

Wikipedia, C. d. (27 de Mayo de 2013). *Sitio web*. Recuperado el 29 de Mayo de 2013, de http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sitio_web&oldid=67198460

Wikipedia, C. d. (27 de Abril de 2013). *Visual Basic .NET*. Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual_Basic_.NET&oldid=66508540.

ANEXO

MANUAL MÉTODO ÍNDICE DE INFILTRACIÓN Φ

Preparado por:

Byron Geovanny Rivadeneira Erazo.

PhD. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso



Cálculo de la Infiltración por el Método Índice de Infiltración Φ

Laboratorio Virtual de Hidrología www.hydrovlab.utpl.edu.ec

Universidad Técnica Particular de Loja

Ecuador - 2013



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

ÍNDICE

1. DISCLAMER.....	3
2. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.	4
2.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).	4
2.1.1 Descargar manual.	4
2.1.2 Agregar.	4
2.1.3 Tiempo (Horas).....	4
2.1.4 Calcular.	4
2.1.5 Ejemplo.....	4
2.1.6 Calcular Fi.	4
2.1.7 Calculo Automático.....	5
2.1.8 Limpiar.	5
3. DATOS DE ENTRADA	5
4. CALCULAR.	6
4.1 CALCULO 1.....	6
4.1.1 Volumen de escurrimiento directo.	6
4.1.2 Altura de precipitación efectiva.	7
4.2 CALCULO 2.....	7
5. GRAFICA.....	8
6. RESULTADOS	8
7. MENSAJES DE ALERTA.	8
8. BIBLIOGRAFÍA:.....	11



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

1. DISCLAMER.

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé a la presente herramienta y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven del uso inadecuado de la misma. El mismo que ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta "Infiltración Método de Horton" surgen inconvenientes, por favor informe sobre el problema a: fronate.v@gmail.com, o geovannybyron@gmail.com.

MANUAL MÉTODO ÍNDICE DE INFILTRACIÓN Φ

2. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.

2.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).

A continuación se describe la función de cada uno de los botones que existen en el programa.

2.1.1 Descargar manual.

Sirve para descargar el manual de usuario del programa en formato pdf. Su botón se representa con el icono.

DESCARGAR MANUAL

2.1.2 Agregar.

Sirve para agregar los datos de las alturas de precipitación del Hidrograma que se deben ingresar y que está directamente relacionado con el dato "Número de Datos"; ejemplo si en la casilla número de datos está un valor de 5, el usuario debe ingresar 5 datos de alturas de precipitación en mm.

A continuación mostramos el icono correspondiente al botón.

AGREGAR

2.1.3 Tiempo (Horas).

Sirve para determinar los tiempos de cada altura de precipitación ingresada del hidrograma. Se lo observa de la siguiente manera.

TIEMPO (HORAS)

2.1.4 Calcular.

Este botón permite calcular el volumen de escurrimiento directo y la altura de precipitación efectiva. El botón se muestra de la siguiente manera.

CALCULAR

2.1.5 Ejemplo.

Carga un ejemplo para que el usuario pueda usar el programa con datos correctamente ingresados y sirva de guía al mismo tiempo para el usuario. Se lo muestra de la siguiente forma.

EJEMPLO

2.1.6 Calcular Fi.

Este botón determina si la altura del índice fi impuesto es correcta. Se lo observa de la siguiente manera.

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

CALCULAR F

2.1.7 Calculo Automático.

Permite determinar automáticamente la altura del índice Fi. Y tiene la siguiente visualización.

CALCULO AUTOMATICO

2.1.8 Limpiar.

Limpia todos los datos que se ingresaron en caso que hay existido algún error. Se lo muestra de la siguiente manera.

LIMPIAR

3. DATOS DE ENTRADA

Se procede a ingresar los parámetros de la cuenca además de datos de un hidrograma un hietograma como: área de la cuenca, caudal y tiempo del hidrograma, además las alturas de precipitación del hietograma; el número de datos de altura de precipitacion que se debe ingresar para construir un hietograma es el mismo que el valor que indica en el dato "NUMERO DE DATOS DE HIETOGRAMA".

Como a manera de ejemplo se tomará los siguientes valores:

DATOS DE ENTRADA

Área de la cuenca	=	36	Km ²
Número del datos de hietograma	=	6	
Coordenadas hidrograma Caudal	=	6.0, 10.0, 16.0	m ³ /s
Coordenadas hidrograma Tiempo	=	1.0, 8.0, 1.0	Horas
Intervalos de tiempo	=		1 Hr
Alturas de precipitación	=	5.35, 2.07, 2.79, 4.45, 2.2, 0.6	mm

Estos valores se los puede cargar directamente en:

EJEMPLO

Luego de hacer click en este botón tenemos los datos de entrada:

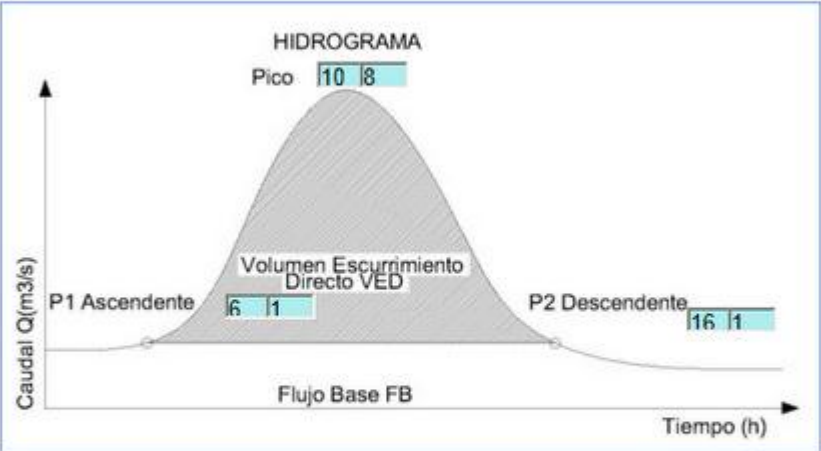
BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

DATOS

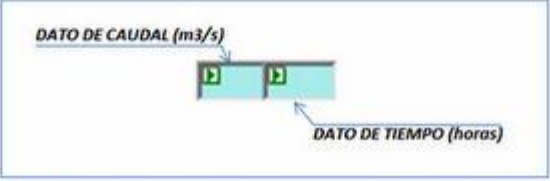
ÁREA CUENCA: Km²

NUMERO DE DATOS DE HIETOGRAMA:

HIDROGRAMA



DATO DE CAUDAL (m³/s)



DATO DE TIEMPO (horas)

En el hidrograma tienen que ser colocados los puntos necesarios que indica en el esquema.

INTERVALOS DE TIEMPO: horas

INGRESO HP HIETOGRAMA:

TIEMPO (HORAS)

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px;">1</td><td style="width: 80%;"></td></tr> <tr><td>2</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td></tr> </table>	1		2		3		4		<p>HP (mm)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px;">5.35</td><td></td></tr> <tr><td>3.07</td><td></td></tr> <tr><td>2.79</td><td></td></tr> <tr><td>4.45</td><td></td></tr> </table>	5.35		3.07		2.79		4.45	
1																	
2																	
3																	
4																	
5.35																	
3.07																	
2.79																	
4.45																	

Figura No. 1 Panel que contiene los datos de entrada

4. CALCULAR.

Se realizará en dos etapas que se describe a continuación.

4.1 CALCULO 1.

En esta etapa la herramienta determina el volumen de escurrimiento directo (m^3/s) y la altura de precipitación efectiva (mm).

4.1.1 Volumen de escurrimiento directo.

Es el escurrimiento directo producido por la precipitación.

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

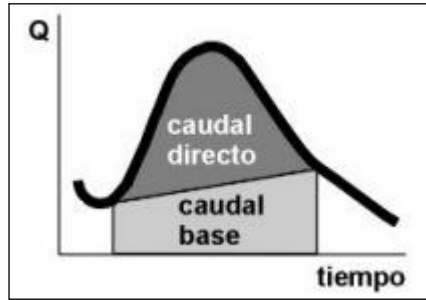


Figura No. 2 Hidrograma, Caudal base y Volumen de escurrimiento directo

4.1.2 Altura de precipitación efectiva.

$$H_{pe} = \frac{V_{ed}}{A_c}$$

- H_{pe} - Altura de precipitación efectiva m²
- V_{ed} - Volumen de escurrimiento directo m³
- A_c - Área de la cuenca m²

4.2 CALCULO 2.

En esta etapa se determina la altura del índice (Ø) mediante tanteos, lo podemos hacer de forma manual y presionar el botón "Calcular Fi"; si la altura asumida no es correcta aparecerá el siguiente mensaje: "NO EL ÍNDICE FI ES INCORRECTO"; y si la altura que se ingreso es la adecuada mostrara "OK EL ÍNDICE FI ES CORRECTO"

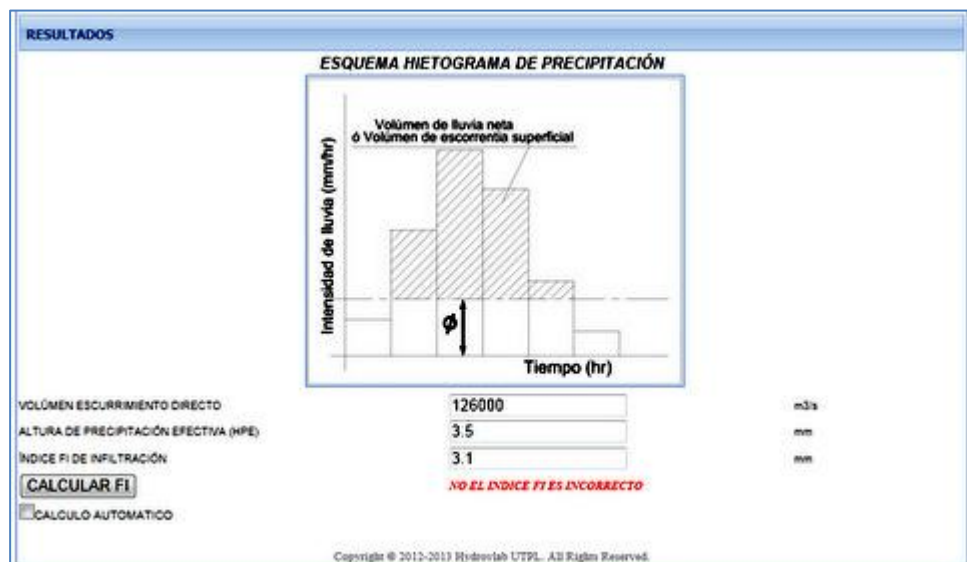


Figura No. 3 Resultados del índice Fi Incorrecto.

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

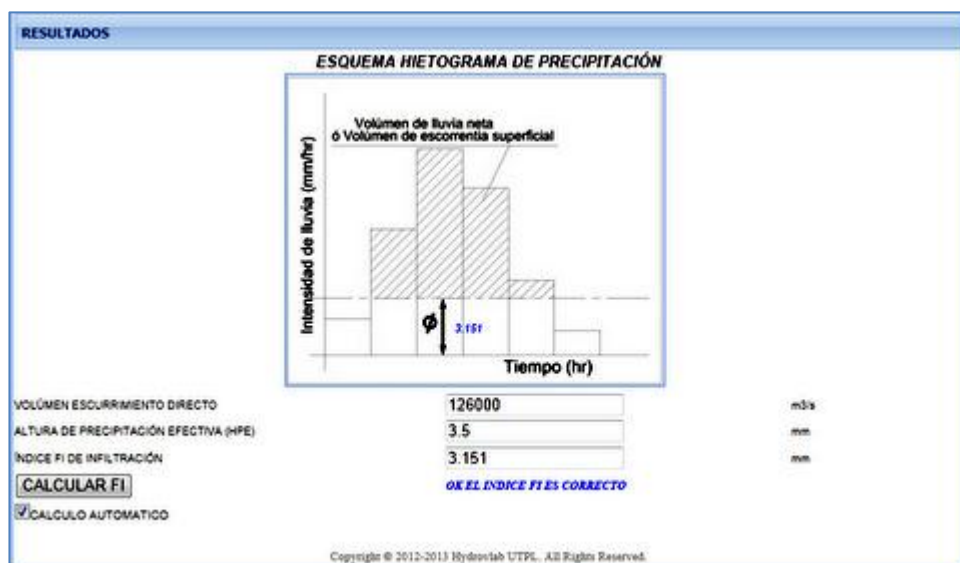


Figura No. 4 Resultados del índice Fi Correcto

5. GRAFICA.

El índice fi se determina mediante tanteos. Se traza una línea horizontal imaginaria y se suman las alturas de precipitación del hietograma desde la línea horizontal hacia arriba, donde la sumatoria de estas alturas de precipitación debesi peoro ser igual a la altura de precipitación efectiva.

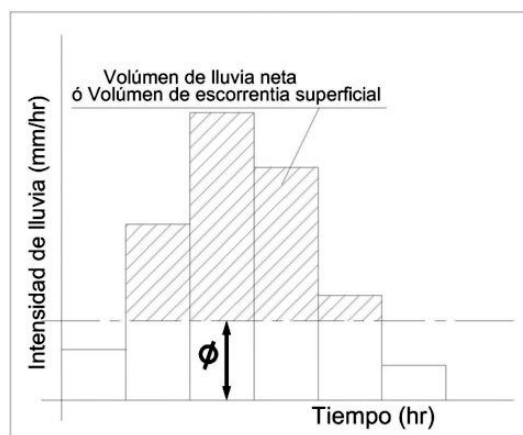


Figura No. 5 Resultados. Gráfica Hietograma índice Φ

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para este ejemplo son los mostrados a continuación:

Volumen de escurrimiento directo	126000	m ³ /s
Altura de precipitación efectiva	3.50	mm
Índice de infiltración Fi (Φ)	3.151	mm

7. MENSAJES DE ALERTA.

El programa tiene incorporado ayudas de utilización, por tal motivo en caso de ingresar mal los datos obtendremos una serie de mensajes de alerta que describimos a continuación.

Si no ingresamos alturas de precipitación del Hietograma y presionamos el botón agregar, no se

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

puede realizar los cálculos adecuadamente, pues para construir un Hietograma se requieren alturas de precipitación y tiempos, por tal motivo se desplegará un mensaje como el mostrado en la Figura No.6:

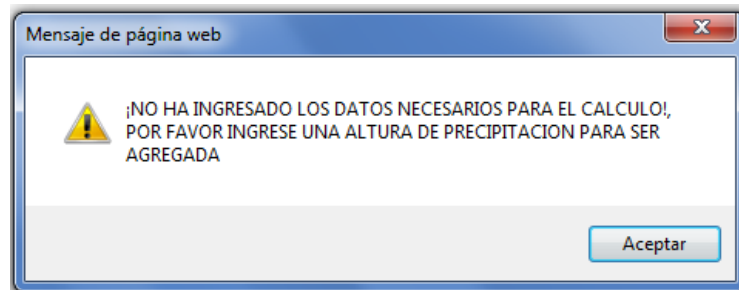


Figura No. 6 Error: No hay datos para ser agregados

Si presionamos el check box "TIEMPO (HORAS)" y no se ha ingresado ha ingresado alturas de precipitación del Hietograma, el programa nos guía emitiendo un mensaje de alerta como el siguiente:

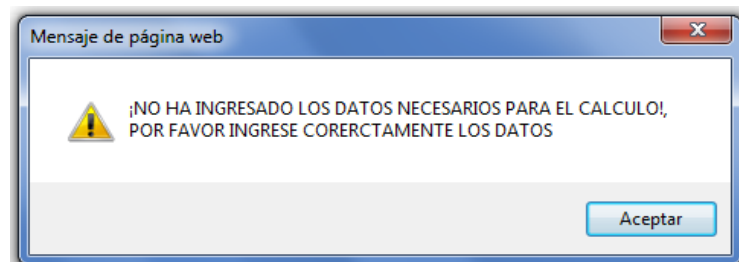


Figura No. 7 Error: Tiempo (Horas)

Para poder hacer la etapa de cálculo debemos presionar el botón "CALCULAR"; pero para esta etapa deben estar ingresados todos los datos; si no es así se mostrara un mensaje de alerta como el mostrado a continuación:

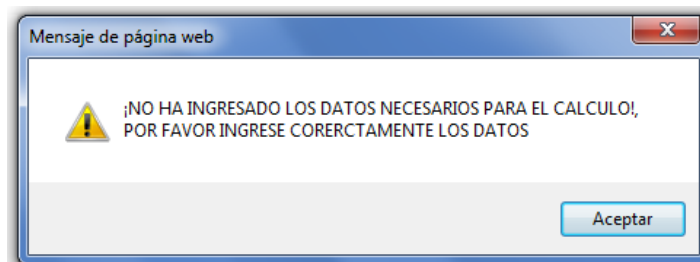


Figura No. 8 Error: No se puede Calcular si no hay datos.

Si se desea agregar un número excedido de alturas de precipitación ("NUMERO DE DATOS DE HIETOGRAMA" > datos "INGRESO HP PRECIPITACIÓN"). Obtendremos el siguiente mensaje:

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

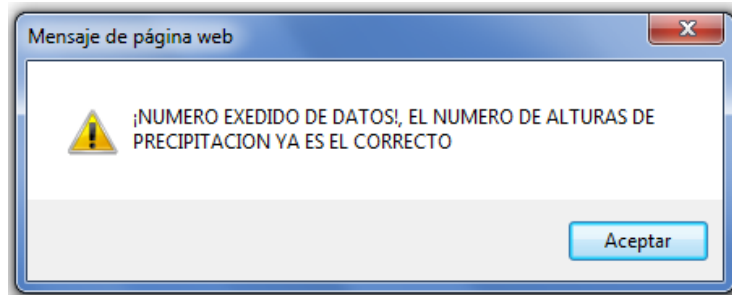


Figura No. 9 Error: Numero de datos excedidos

Si se desea calcular pero no hemos ingresado un numero de alturas de precipitacion de Hietograma ("NUMERO DE DATOS DE HIETOGRAMA" < datos "INGRESO HP PRECIPIRACION"). Se despliega un mensaje como la figura No.10

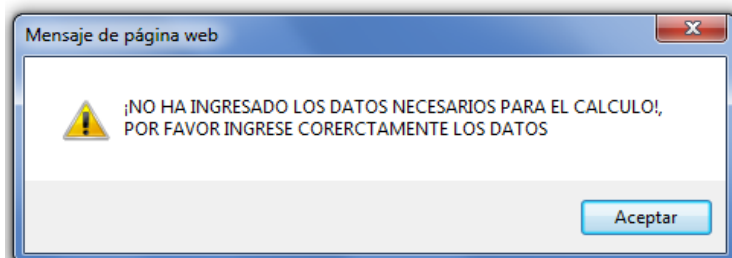


Figura No. 10 Error: Numero de datos incompletos

Si no se asumió un valor de fi inicial estimado por el usuario entonces obtendremos un mensaje de alerta como el de la figura No. 11

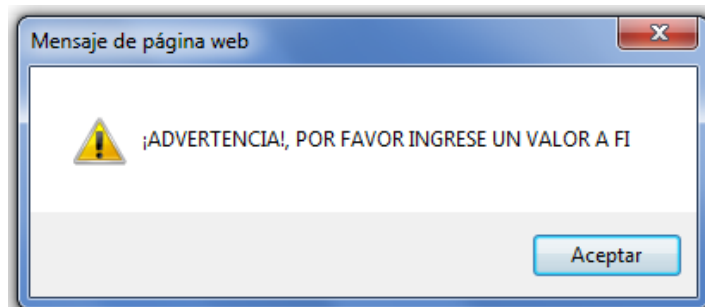


Figura No. 11 Error: Numero de datos excedidos

Si se desea realizar el cálculo automático del índice fi; y no se ha ingresado todos los datos requeridos se desplegara una ventana de alerta como la siguiente:

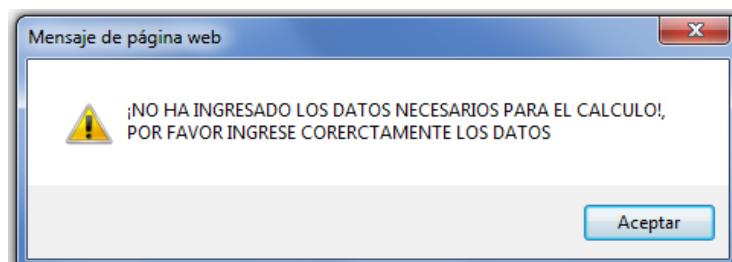


Figura No. 12 Error: Numero de datos excedidos

8. BIBLIOGRAFÍA:

- ✚ FCFyN. (2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPITULO_1.pdf
- ✚ Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- ✚ Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de Canales Abierto*. Mexico: Diana.
- ✚ Oñate Valdivieso, F. R. (2013). *Fronate*. Recuperado el 25 de Febrero de 2013, de www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf

MANUAL

INFILTRACION – MÉTODO NÚMERO DE LA CUENCA

Preparado por:

Byron Rivadeneira Erazo.

Dr. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso



Infiltración – Método número de la cuenca

Laboratorio Virtual de Hidrología www.hydrovlab.utpl.edu.ec

Universidad Técnica Particular de Loja

Ecuador - 2010



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

ÍNDICE

1. DISCLAMER	3
2. DATOS DE ENTRADA	4
3. DETERMINAR EL NÚMERO DE LA CURVA	4
4. INFILTRACIÓN.	7
5. BIBLIOGRAFÍA:	7



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

1. DISCLAMER

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé a la presente herramienta y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven del uso inadecuado de la misma. Esta herramienta ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta "Infiltración – Método número de la cuenca" surgen inconvenientes, por favor informe sobre el problema a: fronate@gmail.com o geovannybyron@gmail.com.

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

MANUAL MÉTODO INFILTRACIÓN NÚMERO DE LA CURVA

2. DATOS DE ENTRADA

Se procede a ingresar datos de las características morfológicas y geométricas de la cuenca; estos parámetros son: área de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce y precipitación total.

Como a manera de ejemplo se toma los siguientes valores:

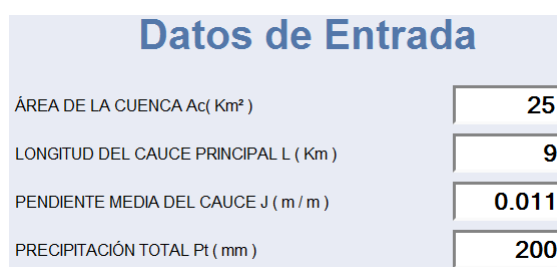
DATOS DE ENTRADA

ÁREA DE LA CUENCA (Ac)	=	25	Km ² .
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L)	=	9	Km.
PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE (J)	=	0.011	m/m.
PRECIPITACIÓN TOTAL (Pt)	=	200	mm.

Estos valores se los puede cargar directamente en:

EJEMPLO

Luego de hacer clic en este botón, tenemos:



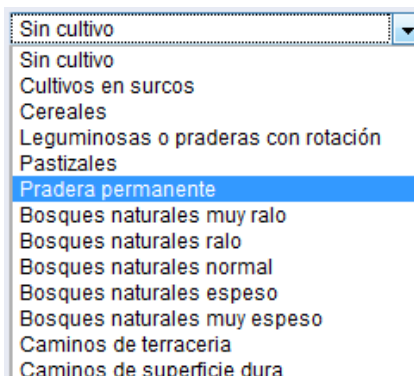
Datos de Entrada

ÁREA DE LA CUENCA Ac(Km ²)	<input type="text" value="25"/>
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL L (Km)	<input type="text" value="9"/>
PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE J (m / m)	<input type="text" value="0.011"/>
PRECIPITACIÓN TOTAL Pt (mm)	<input type="text" value="200"/>

Figura 1. PANEL QUE CONTIENE LOS DATOS DE ENTRADA.

3. DETERMINAR EL NÚMERO DE LA CURVA

Para determinar el número de la curva (CN) primero se selecciona el radio-botón "uso de la tierra y cobertura" cargado en la lista.



Sin cultivo

- Sin cultivo
- Cultivos en surcos
- Cereales
- Leguminosas o praderas con rotación
- Pastizales
- Pradera permanente**
- Bosques naturales muy ralo
- Bosques naturales ralo
- Bosques naturales normal
- Bosques naturales espeso
- Bosques naturales muy espeso
- Caminos de terraceria
- Caminos de superficie dura

Figura 2. LISTA DEL USO DE LA TIERRA Y COBERTURA.

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

El Botón “Ver tabla CN” muestra la tabla para diferente “uso de la tierra y cobertura” (Fig.3), que se han cargado en la lista. (Fig. 2).

Ver tabla CN

De acuerdo a la selección que se haga en “uso de la tierra y cobertura” se habilitarán y deshabilitarán las opciones de: tratamiento del suelo, pendiente del terreno (%) y tipo de suelo.

En el ejemplo cargado ya tenemos marcadas las opciones de: (Fig.4)

Uso de la tierra y cobertura: Sin cultivo

Tratamiento del suelo: Surcos rectos

Pendiente del terreno (%): No definido

Tipo de suelo: Tipo A

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	---	77	86	91	94
Cultivos en surcos	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91
		< 1	67	78	85	89
	Contorneo	> 1	70	79	84	88
		< 1	65	75	82	86
	Terrazas	> 1	66	74	80	82
		< 1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88
		< 1	63	75	83	87
	Contorneo	> 1	63	74	82	85
		< 1	61	73	81	84
	Terrazas	> 1	61	72	79	82
		< 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89
		< 1	58	72	81	85
	Contorneo	> 1	64	75	83	85
		< 1	55	69	78	83
	Terrazas	> 1	63	73	80	83
		< 1	51	67	76	80
Pastizales	-----	> 1	68	79	86	89
		< 1	39	61	74	80
	Contorneo	> 1	47	67	81	88
		< 1	6	35	70	79
Pradera permanente	-----	< 1	30	58	71	78
Bosques naturales	Muy ralo	-----	56	75	86	91
	Ralo	-----	46	68	78	84
	Normal	-----	36	60	70	77
	Espeso	-----	26	52	62	69
	Muy espeso	-----	15	44	54	61
Caminos	de terracería	-----	72	82	87	89
	de superficie dura	-----	74	84	90	92

Figura 3. TABLA DE CN PARA DIFERENTE USO DE LA TIERRA Y COBERTURA. FUENTE: “FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE”, APARICIO (1992), PÁG. 188

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

DETERMINAR EL NÚMERO DE LA CURVA (CN)	Ver tabla CN ►	
USO DE LA TIERRA Y COBERTURA	Sin cultivo ▼	
Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno (%)	Tipo de suelo
<input checked="" type="radio"/> Surcos rectos	<input type="radio"/> > 1	<input checked="" type="radio"/> Tipo A
<input type="radio"/> Contorneo	<input type="radio"/> < 1	<input type="radio"/> Tipo B
<input type="radio"/> Terrazas	<input checked="" type="radio"/> No definido	<input type="radio"/> Tipo C
<input type="radio"/> No definido		<input type="radio"/> Tipo D

Figura 4. SELECCIÓN DE LAS OPCIONES PARA DETERMINAR CN PARA EL “USO DE LA TIERRA Y COBERTURA” = “SIN CULTIVO”

El “Tipo de suelo” a seleccionar depende del grupo hidrológico al que pertenece en función de la textura del suelo (Tabla 1).

- A:** muy permeable.
- B:** permeable
- C:** impermeable
- D:** muy impermeable.

Tabla 1. GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO.

Tipo de Suelo	Textura del Suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla : Suelos muy permeables
B	Arenas finas y limos: Suelos permeables
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla: Suelos impermeables
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana: Suelos muy impermeables.

Fuente: “FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE”, APARICIO (1992), PÁG. 189

A continuación se selecciona una humedad de suelo al que pertenece en relación con la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante los 5 días precedentes (I_5) al evento:

Tabla 2. HUMEDAD ANTECEDENTE.

CN I	Suelos secos; Si $I_5 < 2.5$ cm, hacer corrección (Tabla 3.4).
CN II	Suelos intermedios; Si $2.5 < I_5 < 5$ cm, no hacer corrección.
CN III	Suelos húmedos; Si $I_5 > 5$ cm, hacer corrección (Tabla 3.4).

Fuente: “FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE”, APARICIO (1992), PÁG. 189

Para determinar CN I y CN III en función de CN II se utiliza las siguientes expresiones:

$$\text{CN I} = \frac{4.2 * \text{CN II}}{10 - 0.058 * \text{CN II}}$$

$$\text{CN III} = \frac{23 * \text{CN II}}{10 + 0.13 * \text{CN II}}$$

BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

El número de curva (CN) resultante estará comprendido entre 0 y 100.

Cuando se haya seleccionado el CN al que pertenece, automáticamente se determina la precipitación efectiva Pe (mm)

PRECIPITACIÓN EFECTIVA Pe (mm) 131

La cual se determina mediante:

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

Donde:

Pe → Precipitación efectiva, (cm).

P → Precipitación total para la duración de tormenta seleccionada y el periodo de retorno establecido, (cm).

CN → Numero de curva o de escurrimiento, (adimensional).

4. INFILTRACIÓN.

Infiltración = Precipitación total – Precipitación Efectiva.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- ✚ FCFyN. (2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPITULO_1.pdf
- ✚ Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrologia de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- ✚ Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de Canales Abierto*. Mexico: Diana.
- ✚ Oñate Valdivieso, F. R. (2013). *Fronate*. Recuperado el 25 de Febrero de 2013, de www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf

MANUAL INFILTRACIÓN POR EL MÉTODO RICHARD-PHILLIP.

Preparado por:

Byron Geovanny Rivadeneira Erazo.

PhD. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso



Infiltración por el Método Richard-Phillips

Laboratorio Virtual de Hidrología www.hydrovlab.utpl.edu.ec

Universidad Técnica Particular de Loja

Ecuador - 2013



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

ÍNDICE

1. DISCLAMER.	3
2. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.	4
2.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).	4
2.1.1 Descargar manual.	4
2.1.2 1.1.2 Calcular.	4
2.1.3 1.1.3 Ejemplo.....	4
2.1.4 1.1.4 Limpiar.....	4
3. DATOS DE ENTRADA.....	4
4. CALCULAR.	5
4.1 3.1.1 Infiltración acumulada.	5
4.2 3.1.2 Adsorción.....	5
4.3 3.1.3 Infiltración Vertical	5
5. GRAFICA.	6
6. RESULTADOS.....	6
7. MENSAJES DE ALERTA.....	6
8. BIBLIOGRAFÍA:	7



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

1. DISCLAMER.

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé a la presente herramienta y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven del uso inadecuado de la misma. El mismo que ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta "Infiltración Método de Richar-Phillips" surgen inconvenientes, por favor informe sobre el problema a: fronate.v@gmail.com, o geovannybyron@gmail.com.

MANUAL INFILTRACIÓN MÉTODO RICHARD-PHILLIPS.

2. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.

2.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).

A continuación se describe la función de cada uno de los botones que existen en el programa.

2.1.1 Descargar manual.

Sirve para descargar el manual de usuario del programa en formato pdf. Su botón se representa con el icono siguiente.

DESCARGAR MANUAL

2.1.2 1.1.2 Calcular.

Este botón permite calcular la infiltración acumulada y la vertical. El botón se muestra de la siguiente manera.

CALCULAR

2.1.3 1.1.3 Ejemplo.

Carga un ejemplo para que el usuario pueda usar el programa con datos correctamente ingresados y sirva de guía al mismo tiempo para el usuario. Se lo muestra de la siguiente forma.

EJEMPLO

2.1.4 1.1.4 Limpiar.

Limpia todos los datos que se ingresaron en caso que hay existido algún error. Se lo muestra de la siguiente manera.

LIMPIAR

3. DATOS DE ENTRADA

Se procede a ingresar los parámetros de influencia donde se encuentra efectuando el fenómeno de infiltración, el tiempo en el que se está saturando al suelo, el volumen de agua que se aplica en este fenómeno, la conductividad hidráulica y el tiempo de infiltración.

Como a manera de ejemplo se tomará los siguientes valores:

DATOS DE ENTRADA.

Sección Transversal	=	40	cm ²
Tiempo de saturación	=	0.3	Hr
Volumen de agua	=	100	cm ³
Conductividad Hidráulica	=	0.4	cm/Hr
Tiempo aplicado	=	0.5	Hr

Estos valores se los puede cargar directamente en:

EJEMPLO

Luego de hacer click en este botón tenemos los datos de entrada:

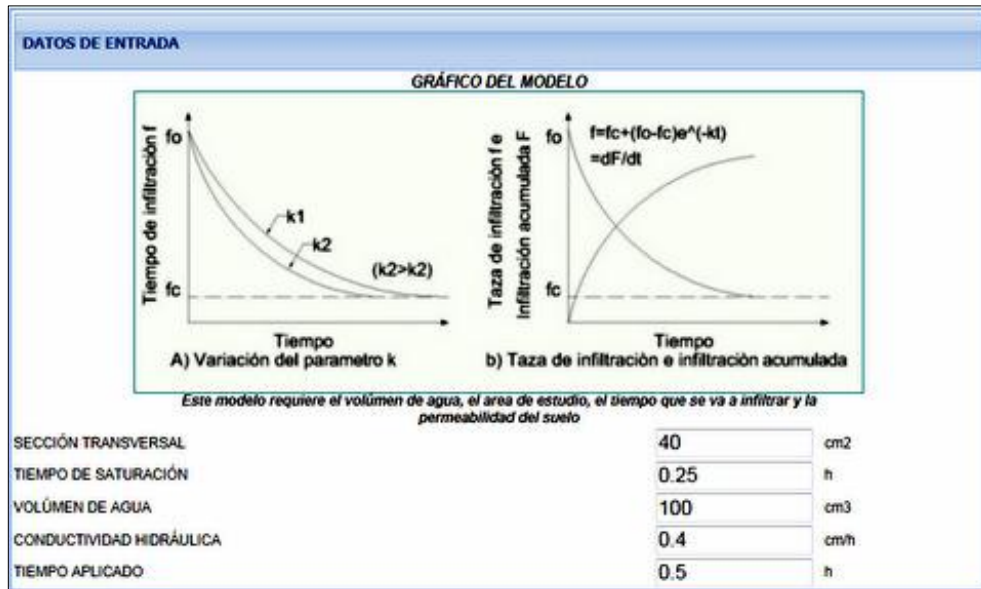


Figura No. 1 Panel que contiene los datos de entrada.

4. CALCULAR.

Este procedimiento permite determinar la infiltración acumulada en el evento, adsorción, y la infiltración vertical.

4.1 3.1.1 Infiltración acumulada.

Se la determina de la relación.

$$Infiltracion_Acumulada = \frac{Volumen_Agua}{Seccion_Transversal \cdot d}$$

4.2 3.1.2 Adsorción.

$$F(t) = St^{0.5}$$

F(t) - Infiltración Acumulada.

S - Adsorción.

t - tiempo

4.3 3.1.3 Infiltración Vertical

$$F(t) = St^{0.5} + kt$$

k - Conductividad Hidráulica.

5. GRAFICA.

La gráfica estática muestra que la infiltración disminuye a medida que transcurre el tiempo del fenómeno, y depende directamente de la permeabilidad.

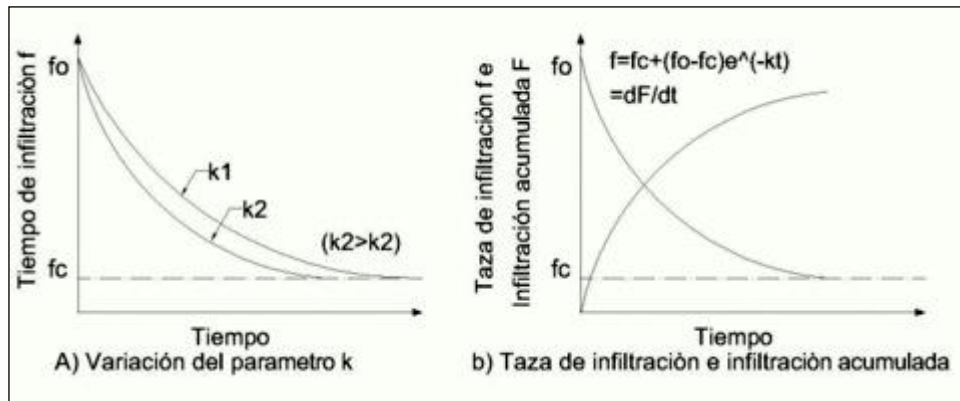


Figura No. 2 Infiltración Modelo de Richards-Phillips

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para este ejemplo son los mostrados a continuación:

Infiltración Acumulada	2.5	cm
Adsorción	5	cm*hr ^{-0.5}
Infiltración Vertical	3.74	cm

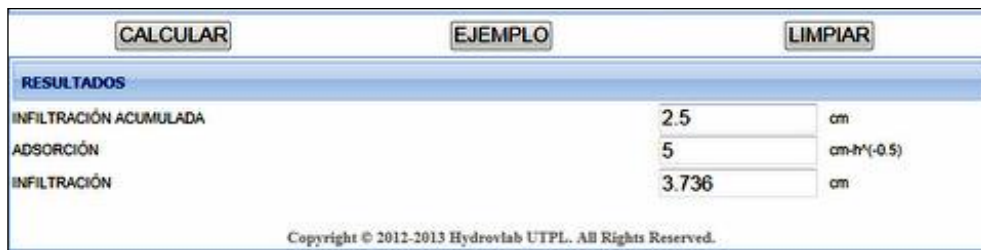


Figura No. 3 Panel de Resultados programa Richard-Phillips

7. MENSAJES DE ALERTA.

Si el usuario presiona el botón “Calcular” y no ha ingresado correctamente y completamente los datos, el programa emite un mensaje de alerta como el que se muestra en la figura No.4.

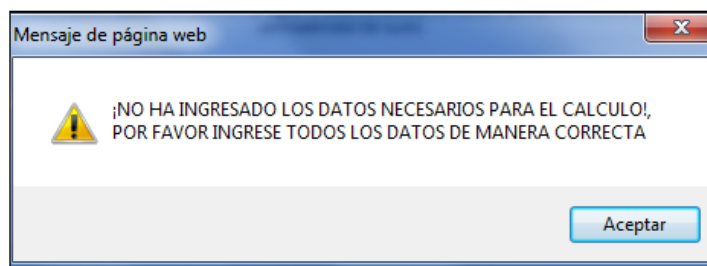


Figura No. 4 Panel de Resultados programa Richard-Phillips

8. BIBLIOGRAFÍA:

- ✚ FCFyN. (2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPITULO_1.pdf
- ✚ Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- ✚ Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de Canales Abierto*. Mexico: Diana.
- ✚ Oñate Valdivieso, F. R. (2013). *Fronate*. Recuperado el 25 de Febrero de 2013, de www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

MANUAL INFILTRACIÓN POR EL MÉTODO DE GREEN-AMPT

Preparado por:

Byron Geovanny Rivadeneira Erazo.

PhD. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso



Infiltración por el Método de Green-Ampt

Laboratorio Virtual de Hidrología www.hydrovlab.utpl.edu.ec

Universidad Técnica Particular de Loja

Ecuador - 2013

ÍNDICE

1. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.	4
1.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).	4
1.1.1 Descargar manual.	4
1.1.2 $F(t)=kt$ CALCULADO.	4
1.1.3 Calcular.	4
1.1.4 Calcular F.	4
1.1.5 Calcular tiempo de encharcamiento.	4
1.1.6 Ejemplo.	4
1.1.7 Limpiar.	4
1.1.8 Mostrar tabla.	5
2. DATOS DE ENTRADA.	5
2.1 Porosidad η	5
2.2 Porosidad Efectiva.	5
2.3 Cabeza de succión en el frente mojado Ψ	5
2.4 Conductividad hidráulica.	5
2.5 Tiempo.	5
2.6 Saturación efectiva.	5
3. CALCULO.	7
3.1 CALCULO 1.	7
3.1.1 Contenido residual de humedad del suelo.	7
3.1.2 Cambio en el contenido de humedad cuando pasa el frente mojado.	7
3.2 CALCULO 2.	8
3.2.1 Infiltración acumulada.	8
3.2.2 Tasa de infiltración.	8
3.3 CALCULO 3.	8
3.3.1 Tiempo de encharcamiento.	9
3.3.2 Profundidad de agua infiltrada.	9
4. GRAFICAS.	9
5. RESULTADOS.	10
6. MENSAJES DE ALERTA.	10
7. BIBLIOGRAFÍA:	11



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

DISCLAMER.

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé a la presente herramienta y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven del uso inadecuado de la misma. El mismo que ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta "Infiltración Método de Green-Ampt" surgen inconvenientes, por favor informe sobre el problema a: fronate.v@gmail.com o geovannybyron@gmail.com

MANUAL INFILTRACIÓN MÉTODO DE GREEN-AMPT.

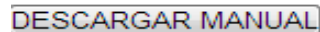
1. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.

1.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).

A continuación se describe la función de cada uno de los botones que existen en el programa.

1.1.1 Descargar manual.

Sirve para descargar el manual de usuario del programa en formato pdf. Su botón se representa con el icono.



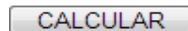
1.1.2 $F(t)=kt$ CALCULADO.

Permite determinar un valor inicial de infiltración equivalente a $k*t$ (Conductividad Hidráulica * tiempo). Se lo muestra de la siguiente forma:

$F(t)=kt$ CALCULADO

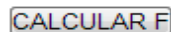
1.1.3 Calcular.

Este botón permite calcular El contenido residual del suelo y el cambio en el contenido de humedad cuando pasa el frente mojado. El botón se muestra de la siguiente manera.



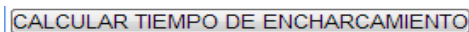
1.1.4 Calcular F.

Al presionar este botón obtendremos, la infiltración acumulada en el periodo de tiempo que dure el fenómeno de infiltración y la taza a la cual se produce la infiltración.



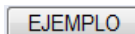
1.1.5 Calcular tiempo de encharcamiento.

Este método (botón) aparece únicamente cuando el usuario ingresa un valor de intensidad de lluvia. Y sirve para obtener el tiempo de encharcamiento y la profundidad de encharcamiento. Se lo observa de la siguiente manera al botón.



1.1.6 Ejemplo.

Carga un ejemplo para que el usuario pueda usar el programa con datos correctamente ingresados y sirva de guía al mismo tiempo para el usuario. Se lo muestra de la siguiente forma



1.1.7 Limpiar.

Limpiar todos los datos que se ingresaron en caso que hay existido algún error. Se lo muestra de la siguiente manera.

LIMPIAR

1.1.8 Mostrar tabla.

Mediante este evento podemos visualizar la tabla “Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varios tipos de suelo”. Se la visualiza de la siguiente manera:



2. DATOS DE ENTRADA

Este programa tiene como objetivo realizar el cálculo de la infiltración en base a las características físicas del suelo “in situ”; con base a este hecho requiere que se ingrese: la porosidad efectiva, la porosidad, la cabeza de succión en el frente mojado, la conductividad hidráulica, el tiempo de infiltración y la saturación efectiva.

2.1 Porosidad η .

Según la ciencia que estudia la naturaleza y composición de los suelos (edafología), la porosidad de un suelo viene dada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total. Para efectos prácticos se calcula a partir de las densidades aparente y real del suelo:

$$\eta = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \cdot 100\%$$

Dónde:

ρ_a - Es la densidad aparente del material.

ρ_m - Es la densidad real del material.

2.2 Porosidad Efectiva.

Se refiere al porcentaje de poros interconectados que permiten la circulación de fluidos. O se denomina como el volumen poroso solamente conectado entre sí.

2.3 Cabeza de succión en el frente mojado Ψ .

Potencial del frente de humedecimiento. En cm

2.4 Conductividad hidráulica.

Físicamente representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Se la dimensiona como velocidad. En cm/hora

2.5 Tiempo.

Se refiere al tiempo que dura el fenómeno de infiltración en horas.

2.6 Saturación efectiva.

Es la relación entre la humedad disponible y el máximo contenido de humedad posible

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

θ - Contenido de humedad.

θ_r - Contenido de humedad residual

η - Porosidad

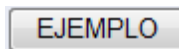
S_e - Saturación efectiva.

$\eta - \theta_r$ - Porosidad efectiva.

DATOS DE ENTRADA

POROSIDAD EFECTIVA θ_e	=	0.486	Tantox1
POROSIDAD η	=	0.501	Tantox1
CABEZA DE SUCCIÓN EN EL FRENTE MOJADO ψ	=	16.68	cm
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA K	=	0.65	cm/hora
TIEMPO	=	1	Horas
SATURACIÓN EFECTIVA S_e	=	0.3	Tantox1

Estos valores se los puede cargar directamente en:



Luego de hacer click en este botón tenemos los datos de entrada:

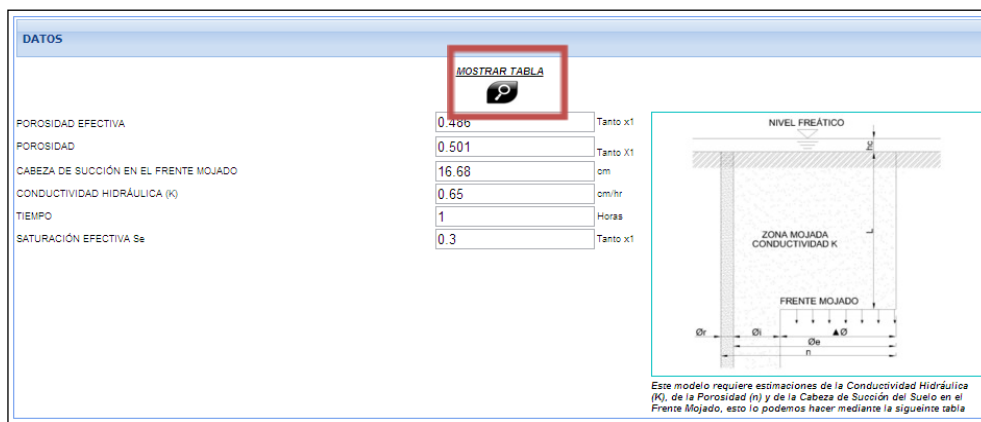


Figura No. 1 Panel que contiene los datos de entrada.

Como ayuda del usuario si no conoce los valores por medio de experimentación, existe una tabla que muestra valores de los rangos en los cuales se encuentran estos según el tipo de suelo.

Para poder acceder a la tabla se debe presionar sobre el botón:



Que tiene un símbolo de lupa y se encuentra señalado con un recuadro de color rojo en la Figura 1.

MOSTRAR TABLA

Parametros de infiltración de Green-ampt para varias clases de suelos					
Casa de suelo	porosidad	Porosidad Efectiva	Cabeza de succión del suelo en el frente mojado ψ (cm)	Conductividad hidráulica k (cm/h)	
	η	θ_e			
1	Arena	0.0437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
0.3	Arena Margosa	0.437 (0.3763-0.506)	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	2.99
	Marga Arenosa	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
	Marga.	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
	Marga Limosa.	0.501 (0.420-0.582)	0.486 (0.394-0.587)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
	Marga	0.938 (0.332-0.464)	0.33 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15
	Marga	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.1
	Marga Limo-	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.374-0.517)	27.3 (5.67-131.50)	0.1
	Arcilla	0.43 (0.370-0.490)	0.321 (0.207-0.435)	23.9 (4.08-140.2)	0.06
	Arcilla Limosa	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.4)	0.05
	Arcilla	0.475 (0.427-0.5232)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.03

Figura No. 2 Tabla Valores aproximados de Porosidad, Porosidad efectiva, Cabeza de succión del frente mojado y conductividad hidráulica, según tipo de suelo.

3. CALCULO.

Se realiza en tres etapas que se describe a continuación.

3.1 CALCULO 1

En esta primera etapa se determina el contenido de humedad residual del suelo, y el cambio en el contenido de humedad cuando pasa el frente mojado.

RESULTADOS	
CONTENIDO RESIDUAL DE HUMEDAD DEL SUELO	0.015 Tanto x1
CAMBIO EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD CUANDO PASA EL FRENTA MOJADO	0.3402 Tanto x1
<input checked="" type="checkbox"/> F(t)=kt CALCULADO	
F(t) VALOR INICIAL (OPCIONAL, PUEDE SER CALCULADO AUTOMATICAMENTE)	0.65 cm

Figura No. 3 Resultados. Volumen de infiltración

3.1.1 Contenido residual de humedad del suelo.

Es la cantidad de agua que permanece en el suelo luego de haberse drenado completamente. (θ_r)

3.1.2 Cambio en el contenido de humedad cuando pasa el frente mojado.

Se lo determina con la siguiente formula.

$$\Delta\theta = (1 - Se)\theta_e$$

$\Delta\theta$ - cambio en el contenido de humedad.

θ_e - Porosidad efectiva.

Se - Saturación efectiva.

3.2 CALCULO 2

Se procede a calcular la infiltración acumulada y la tasa de infiltración. Medidos en cm y cm/hora respectivamente.

INFILTRACIÓN ACUMULADA	
<input type="button" value="CALCULAR F"/>	
INFILTRACIÓN ACUMULADA F	3.16331 cm
TASA DE INFILTRACION	1.81601 cm/hr

Figura No. 4 Resultados. Infiltración acumulada y tasa de infiltración

3.2.1 Infiltración acumulada.

La fórmula para obtener la infiltración producida en un intervalo de tiempo t es la siguiente

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

K- Conductividad hidráulica del suelo.

- Cabeza de presión capilar del frente mojado.
- Diferencia de los contenidos de humedad del suelo inicial y final

F(t)- Infiltración inicial (asumida)

3.2.2 Tasa de infiltración.

Es la velocidad con la que el flujo atraviesa el suelo.

$$f = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F} + 1\right)$$

K- Conductividad hidráulica del suelo.

- Cabeza de presión capilar del frente mojado.
- Diferencia de los contenidos de humedad del suelo inicial y final

3.3 CALCULO 3

En esta etapa se determina la profundidad de agua encharcada y el tiempo de encharcamiento. Para poder realizar este paso de cálculo tenemos que primero colocar un valor de intensidad de lluvia y aparece un botón denominado "CALCULO TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO" así como se muestra en la figura No. 5

TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO	
INTENSIDAD DE LLUVIA (DEBE SER INGRESADO)	1 cm/hr
<input type="button" value="CALCULAR TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO"/>	
TIEMPO DE ENCHARCAMIENTO	10.53842 Horas
PROFUNDIDAD DE AGUA INFILTRADA	10.53842 cm

Copyright © 2012-2012 Hydrovlab UTPL. All Rights Reserved.

Figura No. 5 Resultados. Tiempo de encharcamiento profundidad de agua infiltrada.

3.3.1 Tiempo de encharcamiento.

Durante una lluvia el agua se encharcara en la superficie, solamente si la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo, por tanto el tiempo de encharcamiento es el lapso entre el inicio de la lluvia, y el momento en que el agua en la superficie se comienza a acumular o encharcar.

3.3.2 Profundidad de agua infiltrada.

Es la profundidad de agua que infiltro durante el fenomeno de recarga de la infiltración, esta se da en cm.

4. GRAFICAS.

La primera grafica representa la idealización del modelo matemático que está asumiendo el autor.



Figura No. 6 Gráfica Modelo Infiltración de Green-Ampt.

En el grafico mostrado el eje vertical es la distancia desde la superficie del suelo hasta el frete mojado y simboliza el espesor de suelo afectado por el fenómeno de infiltración. El eje horizontal es el contenido de humedad del suelo.

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right)$$

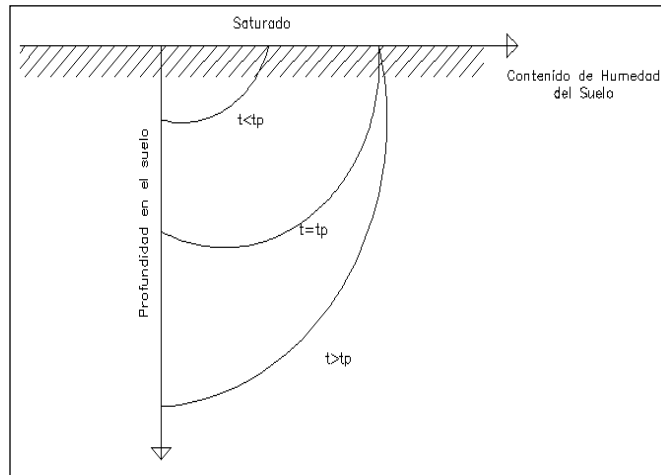


Figura No. 7 Gráfica perfiles de humedad del suelo antes, durante y después que surja el encharcamiento.

Comienza el encharcamiento cuando la intensidad de lluvia excede la tasa potencial de infiltración. Entonces $t=t_p$ y el suelo en la superficie se satura.

Si continua la lluvia y $t>t_p$ la zona de saturación aumenta y comienza la escorrentía superficial del agua que estaba encharcada (altura de encharcamiento muy pequeña)

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos son los siguientes:

F(t) valor inicial	0.65
Infiltración acumulada (F). cm	3.16
Tasa de infiltración (f). cm/hora	1.82
Tiempo de encharcamiento (t). Horas	0.16
Profundidad de agua infiltrada. cm	0.84

F(t) valor inicial 0.65

Infiltración acumulada (F). cm 3.16

Tasa de infiltración (f). cm/hora 1.82

Tiempo de encharcamiento (t). Horas 0.16

Profundidad de agua infiltrada. cm 0.84

El tiempo de encharcamiento y la profundidad de agua infiltrada se da con una intensidad de lluvia de 5 cm/hora.

6. MENSAJES DE ALERTA.

El programa tiene incorporadas ayudas de manejo, con el objetivo de que el programa sea paramétrico y secuencial en el ingreso de datos y obtención de resultados. Si los datos no se ingresan correctamente se desplegarán mensajes de alerta que se describen a continuación.

Si se presiona el botón calcular y no se ha ingresado ningún dato o está faltante cualquier dato de ingreso, se muestra una ventana con el siguiente mensaje.

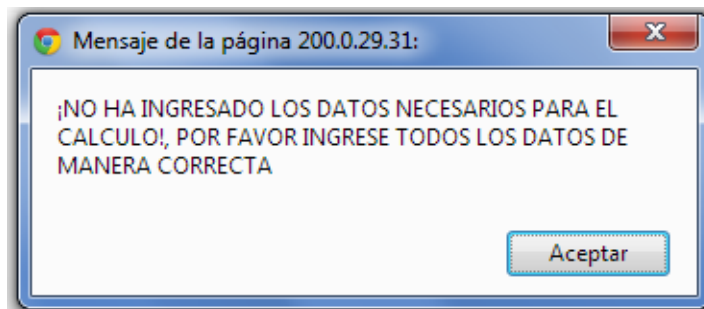


Figura No. 8 Error: Ingreso incompleto de datos.

Si presiona el checkbox “ $F(t)=kt$ CALCULADO” y no se han ingresado los datos el programa no hará la estimación del primer valor de infiltración; en tal caso se desplegará un mensaje de alerta que nos indica lo siguiente:

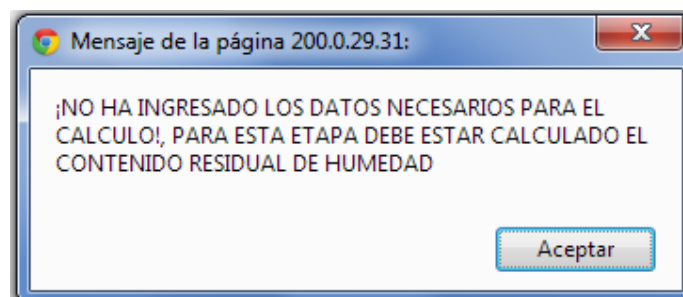


Figura No. 9 Error: Estimación de F inicial.

Si no se han llenado los datos de ingreso y se presiona el botón “CALCULAR F” el programa no puede hacer las iteraciones necesarias para su cálculo y como consecuencia no se puede determinar la infiltración acumulada ni la tasa de infiltración que es el objetivo de este botón. En tal caso se muestra una ventana de alerta como la que se muestra a continuación.

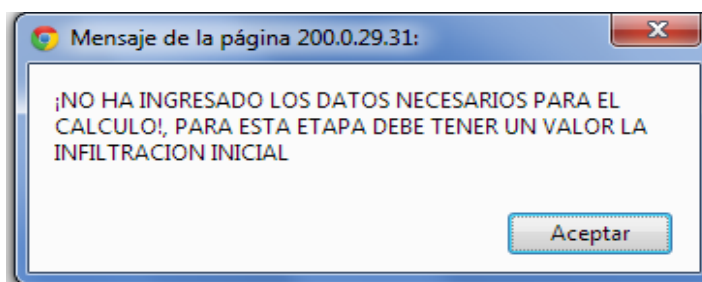


Figura No. 10 Error: Determinación de Volumen y tasa de infiltración.

7. BIBLIOGRAFÍA:

- ✚ FCFyN. (2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova: http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPITULO_1.pdf
- ✚ Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- ✚ Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de Canales Abierto*. Mexico: Diana.
- ✚ Oñate Valdivieso, F. R. (2013). *Fronate*. Recuperado el 25 de Febrero de 2013, de www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf

MANUAL INFILTRACIÓN POR EL MÉTODO DE HORTON

Preparado por:

Byron Geovanny Rivadeneira Erazo.

PhD. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso



Infiltración por el Método de Horton

Laboratorio Virtual de Hidrología www.hydrovlab.utpl.edu.ec

Universidad Técnica Particular de Loja

Ecuador - 2013



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

ÍNDICE

1.	DISCLAMER.	3
2.	PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.	4
2.1	ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).....	4
2.1.1	Descargar manual.	4
2.1.2	Agregar	4
2.1.3	Calcular.	4
2.1.4	Ejemplo.	4
2.1.5	Limpiar.	4
3.	DATOS DE ENTRADA	4
4.	CALCULAR.	6
5.	GRAFICA.....	7
6.	RESULTADOS.....	7
7.	MENSAJES DE ALERTA.	7
8.	BIBLIOGRAFÍA:	9



BYRON GEOVANNY RIVADENEIRA ERAZO

1. DISCLAMER.

El autor no se responsabiliza por la aplicación que se le dé a la presente herramienta y/o por perjuicios directos o indirectos que se deriven del uso inadecuado de la misma. El mismo que ha sido desarrollado con fines investigativos, y su confiabilidad está aún en proceso de evaluación. El uso y aplicación del mismo queda bajo absoluta responsabilidad del usuario.

Si durante la aplicación de la herramienta "Infiltración Método de Horton" surgen inconvenientes, por favor informe sobre el problema a: fronate.v@gmail.com, o geovannybyron@gmail.com

MANUAL INFILTRACIÓN MÉTODO DE HORTON

2. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA.

2.1 ELEMENTOS DE EJECUCIÓN (BOTONES).

A continuación se describe la función de cada uno de los botones que existen en el programa.

2.1.1 Descargar manual.

Sirve para descargar el manual de usuario del programa en formato pdf. Su botón se representa con el icono.

DESCARGAR MANUAL

2.1.2 Agregar

Sirve para agregar los datos de tiempo en horas que se deben ingresar y que está directamente relacionado con el dato "Número de Datos"; ejemplo si en la casilla número de datos está un valor de 5, el usuario debe ingresar 5 datos de tiempo en horas.

A continuación mostramos el icono correspondiente al botón.

AGREGAR

2.1.3 Calcular.

Este botón permite calcular el volumen de infiltración en el periodo de tiempo que ingresamos. El botón se muestra de la siguiente manera.

CALCULAR

2.1.4 Ejemplo.

Carga un ejemplo para que el usuario pueda usar el programa con datos correctamente ingresados y sirva de guía al mismo tiempo para el usuario. Se lo muestra de la siguiente forma

EJEMPLO

2.1.5 Limpiar.

Limpia todos los datos que se ingresaron en caso que hay existido algún error. Se lo muestra de la siguiente manera.

LIMPIAR

3. DATOS DE ENTRADA

Se procede a ingresar los parámetros de infiltración y características propias del suelo como la conductividad hidráulica, además de los datos de tiempo en los cuales se desarrolló el evento de infiltración; el número de datos de tiempo que se debe ingresar es el mismo que el valor que indica en el dato "NUMERO DE DATOS".

Como a manera de ejemplo se tomará los siguientes valores:

DATOS DE ENTRADA

INFILTRACIÓN INICIAL (fo)	=	4.5	
INFILTRACIÓN FINAL (fc)	=	0.4	
CONDUCTIVIDAD (k)	=	0.35	
NUMERO DE DATOS (N)	=	5	
DATOS DE TIEMPO	=	0.17-0.5-1.0-2.0-6.0	Hr

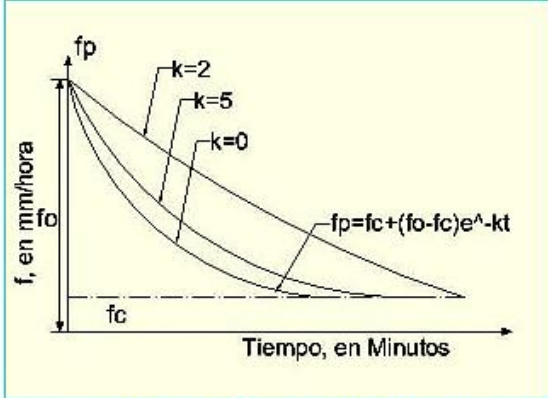
Estos valores se los puede cargar directamente en:

EJEMPLO

Luego de hacer click en este botón tenemos los datos de entrada:

DATOS

GRAFICO MODELO



Efectos Variación del coeficiente k de la fórmula de Horton

MOSTRAR TABLA

INFILTRACIÓN INICIAL fo

INFILTRACIÓN FINAL fo

CONDUCTIVIDAD k

NÚMERO DE DATOS

DATOS DE TIEMPO (hr)

0.17

0.5

1

2

6

(in/h)

(in/h)

cm

#

4.27

3.84

3.29

2.44

0.9

Figura No. 1 Panel que contiene los datos de entrada

Como ayuda del usuario si no conoce los valores por medio de experimentación en un evento de infiltración, existe una tabla que muestra valores de los rangos en los cuales se encuentran estos según el tipo de suelo.

Para poder acceder a la tabla se debe presionar sobre el botón:



Que tiene un símbolo de lupa y se encuentra señalado con un recuadro de color rojo en la Figura 1.

CALORES ORIENTATIVOS DE f_0 , f_c y k DE LA FORMULA DE HORTON			
TIPO DE SUELO	f_0 (mm/hr)	f_c (mm/hr)	k (min ⁻¹)
Agrícola Desnudo	280.00	6-220	1.6
Agrícola Herboso	900.00	20-290	0.8
Turba	325.00	2-20	1.8
Areno-Arcilloso, Desnudo	210.00	2-25	2.0
Areno-Arcilloso, Herboso	670.00	10-30	1.4

Figura No. 2 Tabla Valores aproximados de infiltración según tipo de suelo.

4. CALCULAR.

Se va a calcular el volumen de infiltración a través del tiempo conociendo la capacidad de infiltración del suelo con la siguiente formula.

$$fp = fc + (fo - fc)e^{-kt}$$

Dónde:

fp - Capacidad de infiltración (mm/h)

k - Factor de proporcionalidad llamado también 'parámetro de decrecimiento'

fc - Capacidad de infiltración final

fo - Capacidad de infiltración inicial (para $t=0$).

t - Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración (en minutos).

Para obtener el valor del volumen de infiltración se debe desarrollar la ecuación de capacidad de infiltración con los datos que se ingresó; y el volumen será la integral de la ecuación de 0 a t como se muestra a continuación.

$$F = \int_0^t \frac{fp}{60} dt = \frac{fc \cdot t}{60} + \frac{(fo - fc)}{60 \cdot k} (1 - e^{-kt})$$

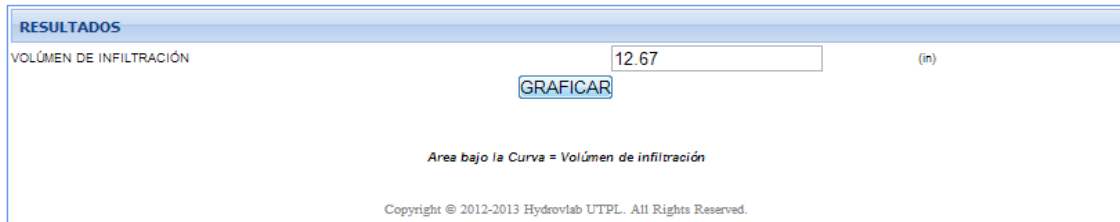


Figura No. 3 Resultados. Volumen de infiltración

5. GRAFICA.



Figura No. 4 Resultados. Gráfica de infiltracion Vs. tiempo.

6. RESULTADOS

El resultado obtenido es el volumen de infiltración acumulada en el tiempo. El valor obtenido para este ejemplo es de 12.67 mm.

Este valor se lo determino mediante el área bajo la curva de infiltración (curva exponencial).

7. MENSAJES DE ALERTA.

El programa tiene incorporado ayudas de utilizacion, por tal motivo en caso de ingresar mal los datos obtendremos una serie de mensajes de alerta que describimos a continuación.

Si el usuario no ingresa datos de tiempo y presiona el boton "Agregar"; no se realizará los calculos adecuadamente, pues la infiltración se da en un tiempo, por tal motivo se desplegará un mensaje como el siguiente:

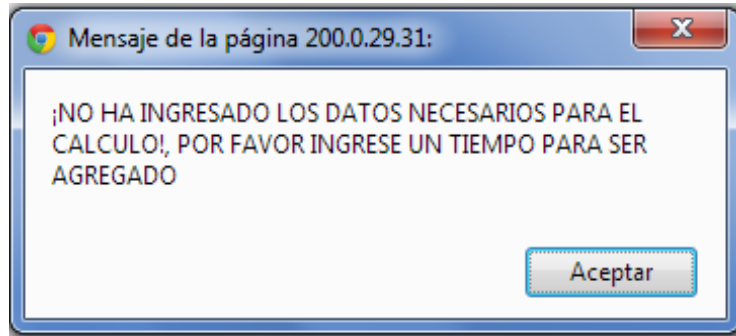


Figura No. 5 Error: No hay datos para ser agregados

Si el usuario presiona el boton calcular y todavia no se ha ingresado ningun dato, el programa emitirá un mensaje de alerta como el siguiente:

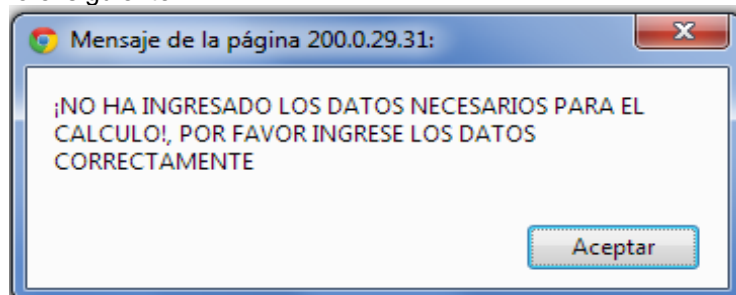


Figura No. 6 Error: El numero de datos agregados es incorrecto

Si el usuario ha ingresado los datos de infiltracion inicial, infiltracion final, conductividad hidraulica y numero de datos; pero en el parámetro de "Datos de tiempo" (Horas) se ha ingresado un valor menor al parámetro "Numero de Datos" el usuario no debe presionar todavia el botón "Calcular". La manera correcta es que debe ingresarse tantos datos de tiempo como indica el parámetro "Número de Datos". Si el usuario ingresa menos datos, se desplegará un mensaje como el mostrado a continuación:

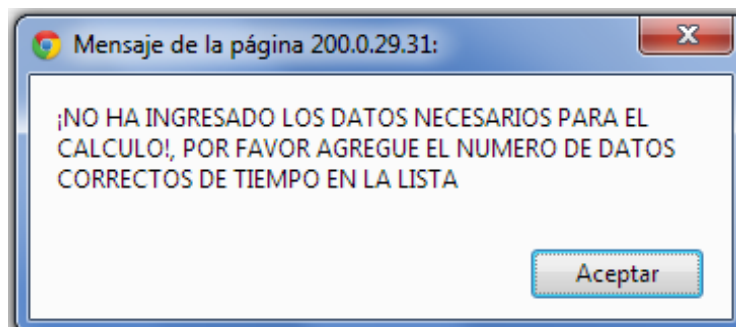


Figura No. 7 Error: No se puede calcular si no hay los datos correctos

Si el usuario ha ingresado todos los datos de tiempo, pero espera seguir agregando valores de tiempo, el programa no ingresará ningun valor; y se desplegará el siguiente mensaje de alerta.

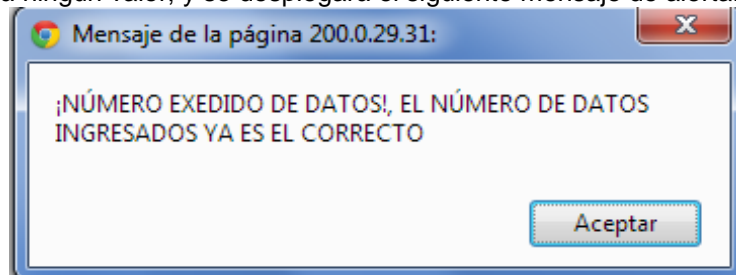


Figura No. 8 Error: Numero de datos excedidos

8. BIBLIOGRAFÍA:

- ✚ FCFyN. (2013). Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Cordova:
http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/reyna/CAPITULO_1.pdf
- ✚ Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- ✚ Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de Canales Abierto*. Mexico: Diana.
- ✚ Oñate Valdivieso, F. R. (2013). *Fronate*. Recuperado el 25 de Febrero de 2013, de www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf