

Simulación de la Infiltración de agua en el Bosque de la Primavera

Análisis de infiltración e inundaciones en micro cuenca del Área Protegida del Bosque de la Primavera, en función de las condiciones físico-químicas del suelo y vegetación.

Daniel de la Torre González

ddltg84@gmail.com

Contenido

Summary:	3
Resumen.	3
Introducción:	3
Definiciones:	3
Marco Teórico:	4
Marco Metodológico:	4
Modelo Propuesto.....	5
Balance Hidrológico en la micro cuenca.....	5
Diagrama de Sistema Dinámico	13
Desglose del diagrama de simulación de sistema ambiental de infiltración de agua pluvial...	14
Resultados:	17
Validación del modelo.....	18
Conclusiones:	20
Bibliografía.....	20

Summary:

The erosion of the earth is important in the reforestation of the woods, for that reason is important meet the mechanic between the all parts of the environmental system of ground water. If somebody make a Geographic Information System GIS can make a study of the capacity of the infiltration water on the earth. This model can be used to analyze the pollution evolution in ground water.

Resumen.

Mediante el uso un modelo dinámico se simula la capacidad de infiltración, según las propiedades fisicoquímicas que se presenten en el suelo y en función a la vegetación existente, mediante la implementación de un modelo matemático que simule la ecuación de Darcy. Con el cual se pudra construir un Sistema de Información Geográfica SIG, con la finalidad de estudiar un espacio determinado y hasta conocer el comportamiento de un contaminante.

Introducción:

Debido a que el Área Natural Protegida del Bosque de la Primavera se encuentra en un espacio de uso urbano, agrícola, forestal y de aprovechamiento recreativo los impactos que se presentan son muy variables y en ocasiones irreversibles. El Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente cuenta con dos predios en el Bosque de la Primavera en los cuales se les han implementados análisis de las condiciones física en la parte superior e inferior de la micro cuenca¹, para estimar la eficiencia de los resultados en los trabajos de conservación de suelos, reforestación, corte de arbustos y mantenimiento a espacios reforestados. Sabiendo que la vegetación tiene un factor muy importante en la infiltración del agua a los mantos freáticos se desarrollará un modelo de simulación del sistema ambiental dinámico con respecto la capacidad de infiltración que se presenta en ambos predios, mediante análisis de estudio de suelo como el coeficiente de infiltración, propiedades físico químicas del suelo, tipo y calidad de la vegetación.

Con los coeficientes de infiltración se genera un primer modelo en el cual se analiza la cantidad de agua que se logra infiltrar, resaltando las características físico químicas del suelo y la el tipo de vegetación que se presenta. Posteriormente se realiza un nuevo levantamiento de coeficientes de infiltraciones y de igual manera se recolectara la características fisicoquímicas y la vegetación existente. Con esta información se realizaran un análisis matemático y estadístico para elaborar un modelo matemático en el que se interpola la información faltante para mejorar los resultados.

Con la finalidad de poder hacer que el modelo elaborado se convierta en un modelo dinámico que logre determinar la importancia de la vegetación en el coeficiente de infiltración debido al cambio radical en las propiedades fisicoquímicas de los espacios áridos y espacios con vegetación. Una vez modelados estos espacios se podrá transpolar a un Sistema de Información Geográfica SIG de la primavera e interpretar un estimado del coeficiente de infiltración por vegetación en espacios con poca pendiente.

Para finalizar este estudio se proyectaran los espacios propensos a inundaciones por saturación de agua en el subsuelo.

Definiciones:

ANPBP: Área Natural Protegida del Bosque de la Primavera.

Medio Permeable: Capacidad de infiltración del agua en una superficie.

¹ Datos como información cartográfica (delimitando arroyos y ríos), condiciones climatológicas, inventarios de flora y fauna, gasómetro de las condiciones del suelo, coeficiente de infiltración, monitoreo de cámaras trampas de fauna, estación climatológicas con resultados cada 10 minutos de las condiciones de velocidad de viento, humedad relativa, temperatura, presión barométrica, radiación.

Marco Teórico:

El ANPBP se localiza en el estado de Jalisco, en los municipios de Tala, Tlajomulco de Zuñiga, El Arenal, Zapopan y al poniente de la zona Metropolitana de Guadalajara. El área de protección de flora y fauna de la primavera es el bosque más cercano a la ciudad de Guadalajara. Esta inserción de dos provincias florísticas: las sierra Madre Occidental y Sierras Meridionales o Eje Neovolcánico Transversal.

Características físicas del ANPBP:

Parámetros Climatológicos: está representado por dos tipos: Templado subhúmedo y semicálido subhúmedo, ambos con lluvias en veranos e invierno. Las temperaturas media anual es de 20.6 °C con una desviación estándar de 6.5 °C. Siendo enero el mes más frío y más cálido Junio.

Características Bióticas: Es un bosque de Encino – Pino del tipo tropical caducifolio, donde existen 5 diferentes especies de pino, 11 especies de encino que cuentan con una altura promedio 5 y 15 metros. También existen tres comunidades vegetales: rupícola; aquellas plantas que se desarrollan sobre las rocas, ruderal; se establecen principalmente en la apertura de caminos, áreas de cultivo y riparios aquella que se establece en los márgenes de los ríos, arroyos permanentes y temporales.

Se estima un promedio de 795 especies de plantas y 255 hongos.

Los fluidos que se infiltran a menudo contiene sales, estas pueden afectar la viscosidad del fluido en la velocidad de circulación del agua a través de los poros del suelo.

Características del medio permeable: la infiltración del agua en el suelo está en función del tamaño de los poros y también está en proporción de la estabilidad de la tormenta o riego. De igual manera está en función del tipo de suelo, es decir si la partícula es fina tipo arcilla el agua no tiene la facilidad de infiltración como es en el bosque de la primavera que está formada de un gran porcentaje de jal, donde sus poros son espaciados y con mayor facilidad de infiltración.

Marco Metodológico:

Mediante un modelo matema se realiza un modelo de simulacion de sistemas ambientales. Este modelo se sedarrolla mediante en analisis de los datos significativos que se presentan en la interaccion de la infiltración, basado en las leyes de la fisica se le pude considerar como un modelo empirico. Mediante un balance de materia se realia un un modelo en el que se distribulle la materia. Para mejorar la calidad del modelo se dividira en modelos más pequeños llamados submodelos. Utilizando el software Vensim PLE se transforma en un

modelo dinamico ya que se analiza la evolucion de las variables mediante el paso del tiempo. Utilizando un sistema metrico para desarrollar un analisis cuantitativo se desarrollan las siguientes variables.

Utilizando la metodología de series de Taylor se desarrolla un modelo de Euler, en el cual se utiliza un incremento (Time Step) de 0.5, la unidad de tiempo se desarrolla en minutos. Únicamente se modelan 60 minutos. Como se presenta en la siguiente imagen, en la ilustración 1 se presentan el resto de las características.

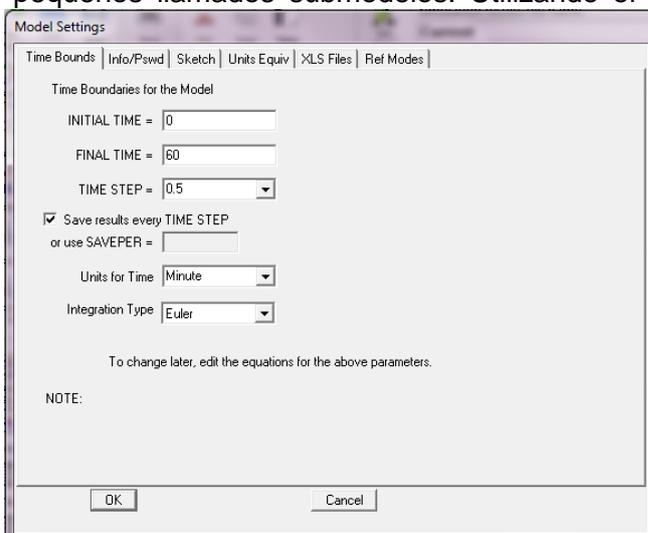
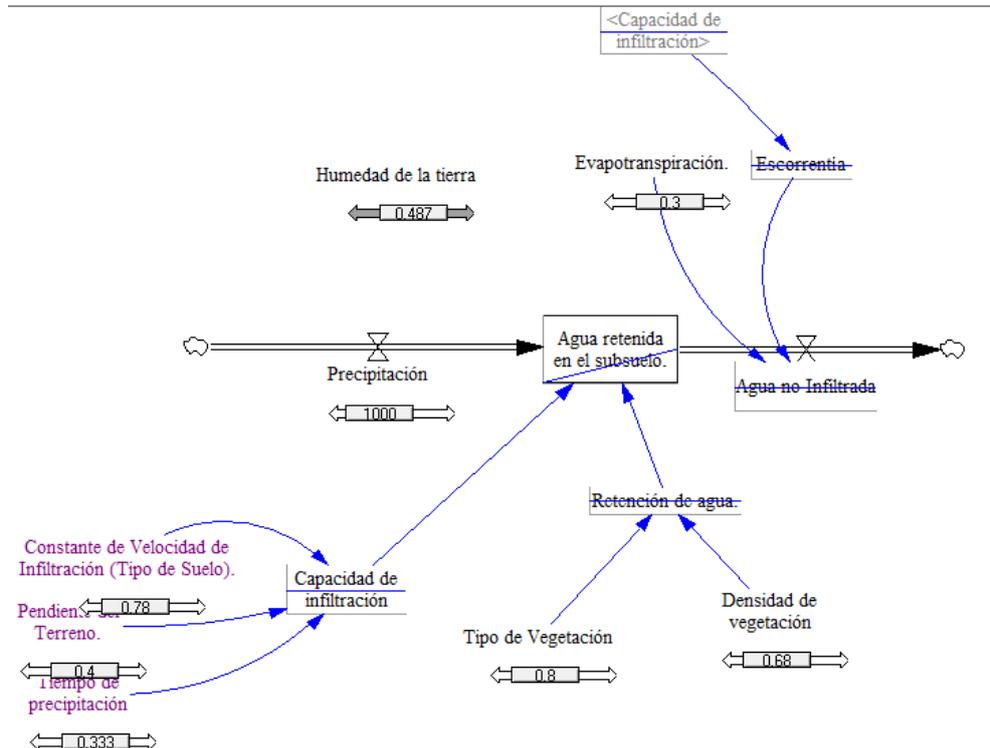


Ilustración 1 Componentes del modelo del software Vensim-PLE.

El modelo matemático utiliza la metodología de Euler debido a que no es un sistema de cuarto orden.

En el modelo 1 se presenta un sistema general del comportamiento del agua, en el cual se simula la infiltración de agua durante la precipitación. Debido a que no se cuentan con datos reales de la precipitación (duración, intensidad, temperatura, velocidad de viento, contaminación atmosférica, etc.) se generaliza la simulación únicamente al momento en el que se presenta la lluvia.

Modelo Propuesto



Haciendo un balance de materia para realizar la simulación de la infiltración de agua en un espacio determinado, se adquiere la primera ecuación:

Modelo 1 Propuesta de Simulación de infiltración de la precipitación al subsuelo general.

Balance Hidrológico en la micro cuenca.

$$\text{Precipitación} + \text{Humedad de la tierra} + \text{Retención de agua} - \text{Agua no infiltrada} = \text{Agua retenida en el subsuelo} \quad \text{Eq. 1}$$

En la Ilustración 1² se presenta el ciclo hidrológico en el cual se aprecia en la parte inferior del lado izquierdo se aprecian las filtraciones.

²La ciencia del Agua EPA <http://water.usgs.gov/gotita/watercyclegraphic.html>



Ilustración 2 Ciclo del Agua.

El líquido que se logra **filtrar** se considera agua retenida en el subsuelo, la cual está constituida por la saturación que existía previamente al evento de la lluvia (manto freático), que se considera como la humedad de la tierra. Esta humedad se considera en un porcentaje presencial, por ser un terreno boscoso se considera elevada (48.7 % de humedad).

Otro factor influyente en la cantidad de agua que se infiltra también conocido como la capacidad de infiltración, la cual está constituida por la constante de velocidad de infiltración. Depende del tipo suelo, debido a que la porosidad de cada suelo es diferente.

La pendiente del terreno interfiere en el tiempo de retención del agua sobre cualquier superficie. Se hacen pruebas para determinar el tiempo de retención, con un instrumento utilizado para simular la saturación de la superficie (como se muestra en la Ilustración 2). Es un método no muy confiable ya que puede variar por la hora del día en que se toma el dato y las condiciones de humedad del suelo, ya sea por estación del año o si existe alguna alteración antropogénica o anormal.



Ilustración 3 Aparato para determinar el tiempo de retención.

Para determinar la **infiltración** se usa la ecuación de la capacidad de infiltración está dada por:

$$I = K * T^n \quad \text{Eq.2}$$

Dónde:

K= Constante de Velocidad de Infiltración.

T= Tiempo de retención del líquido en la parte superior de la superficie (min).

n=Pendiente del terreno.

Un mecanismo de retención del agua en el subsuelo está dado por la capilaridad, es un fenómeno causado por:

- La adhesión; la atracción de las moléculas de agua entre sí.
- La cohesión: la atracción de las moléculas de agua entre sí.

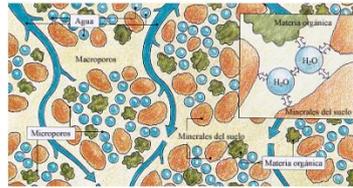


Ilustración 4 Estructura del suelo.

Los componentes de la estructura de los suelos afectan el proceso de retención del agua son:

- Los minerales son materiales orgánicos que forman la estructura y/o agregados.
- Los microporos que contienen los minerales y materia orgánica son los espacios que se saturan de agua y general la absorción y absorción. Entre los microporos hay presencia de aire, agua y facilitan la penetración de las raíces.

La vegetación juega un papel importante en la infiltración del agua al subsuelo, ya que las raíces que existen se hacen paso en los pequeños espacios que hay en el suelo. Según el tipo de vegetación será la profundidad de las raíces. Cuando existen poca agua en el subsuelo se mantiene cohesionada y por ende las raíces les cuesta más trabajo la penetración de las raíces en el suelo. En los suelos secos la mayoría del agua se encuentra en los poros más pequeños y se encuentran muy unidos. Provocando que las raíces de las plantas no puedan hacer uso del agua que se encuentra en el subsuelo.

La **precipitación** es un fenómeno meteorológico el cual varía por la ubicación geográfica, estación del año, cobertura vegetal, frecuencia de la estación, media durante el periodo de la sub-estación.

Los vientos transversales causan macro y microturbulencias alrededor de las plantas provocando una variedad en la evapotranspiración.

Dimensión de poros (mm diámetro)	Descripción de los poros
< 0,0002	Residual
0,0002–0,05	Almacenamiento
> 0,05	Transmisión
> 0,1 a 0,3	Enraizamiento
0,5–3,5	Túneles de lombrices
2–50	Hormigueros y canales

Tabla 1 Dimensiones de los poros.

Los poros que se consideran Residuales son lo que no facilitan el acceso a las raíces por su poco espacio entre partícula y partícula, por lo tanto el agua no puede ser utilizada. Para los poros que almacenan tiene la función de retener el agua en las plantas y puede ser usada por las raíces. Para los poros que tienen un diámetro aproximado de 0.1 a 0.3mm permiten el libre paso de las raíces sin exigir un esfuerzo mayor, por lo tanto es ideal para el crecimiento de la vegetación. De 0.5 a 3.5 mm diámetro entre partículas es considerado que se realiza por la biota que existe en la tierra (lombrices). Para los orificios de 2 a 50 mm se pueden presentar cuando existe la presencia de hormigas.

La **evapotranspiración** se refiere al fenómeno de evaporación de agua que realizan las plantas a través de sus estomas, localizados en las hojas de la misma. La evapotranspiración la realizan tanto las plantas que se encuentran en la cuenca, pero fuera del cuerpo de agua, como las plantas, ríos, lagos, mar y todo cuerpo de agua que este en contacto con la superficie y sol.

La escorrentía que se presente es todo el exceso de agua que se escurre en las cuencas, debido a la lenta infiltración o en su defecto al exceso de agua.

La precipitación se encuentra en función de todo tipo de agua que caiga de las nubes como puede ser granizo, lluvia, rocío o nieve. De tal manera que la podemos representar mediante la ecuación 3.

$$Q_p = P_L A_{sup} \quad \text{Eq. 3}$$

Donde Q_p es el flujo hidrológico durante un tiempo determinado. P_L es la intensidad de precipitación media directa sobre el terreno y A_{sup} se considera el área superficial.

Dado que la medición de la intensidad de precipitación es puntual, es necesario extender la resolución espacial de la lectura para que la intensidad de precipitación de un punto sea representativa de la superficie de un plano sobre el espacio a analizar. En algunos casos, existirán varias estaciones cercanas a la orilla del predio estudiado (o incluso montadas en cualquier espacio), por lo que la intensidad de precipitación se estimará ponderando la información de cada estación meteorológica con respecto a sus respectivas áreas de influencia en que las lecturas son válidas. Estas áreas se obtienen según la construcción de *Polígonos de Thiessen*³ ejemplificados en la Ilustración 5 (McGhee, 1999; Fetter, 2001).

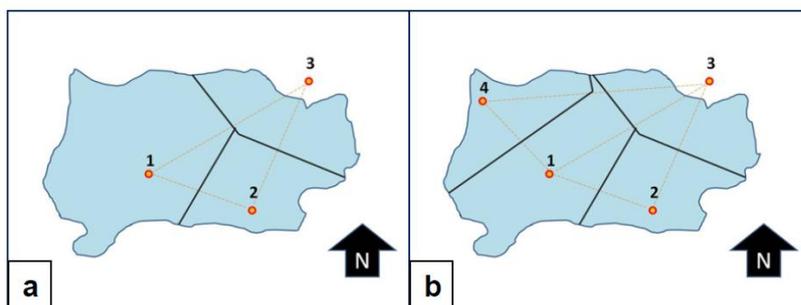


Ilustración 5 Polígonos de Thiessen para representar el área de influencia de las mediciones de precipitación en una estación meteorológica directamente sobre un cuerpo de agua. Nótese que las estaciones meteorológicas pueden incluso estar fuera del espacio a analizar, siempre y cuando se encuentren cercanas a él, y a una altitud razonablemente similar a la del nivel de elevación de su superficie. La forma y superficie de los polígonos depende del número de estaciones meteorológicas, como se muestra en (a) con tres estaciones, y en (b) con cuatro estaciones.

Suponiendo que la superficie del cuerpo de agua se hubiera dividido en m Polígonos de Thiessen, la Precipitación media sobre el espacio a analizar se calcula ponderando las precipitaciones puntuales de cada una de las m estaciones meteorológicas con respecto al área de su respectivo polígono, dando lugar a la ecuación 4.

$$P_L = (\sum(P_m * A_m)) / A_{sup} \quad \text{Eq. 4}$$

Donde se considera la precipitación en función de la intensidad P_m que se registra en una medida en cada una de las estaciones meteorológicas, típicamente un promedio geométrico de las lecturas recabadas a lo largo de mucho tiempo, para un buen cálculo es necesaria la información de 20 años, aunque se recomienda contar con 30 años de información diaria

³ Los Polígonos de Thiessen son figuras geométricas irregulares que resultan en la asignación de áreas de influencia o de validez de las mediciones de precipitación de una estación meteorológica, la cual en realidad corresponde solamente a un punto sobre un plano. Para trazar los polígonos, Fetter (2001) recomienda el siguiente procedimiento: primero se unen las estaciones disponibles entre sí por medio de líneas imaginarias (líneas punteadas en la ilustración 5a). En caso de duda, debe tenerse cuidado en unir estaciones cercanas (tanto en distancia en línea recta como en similitud de altitud), procurando que cada estación esté unida con al menos dos y no más de seis otras estaciones meteorológicas. Una vez que se tienen las líneas imaginarias uniendo las estaciones, se ubica el punto medio de cada línea y se traza un bisector ortogonal cruzando cada uno de dichos puntos medios. Por último, se extienden los bisectores perpendicularmente a las líneas imaginarias hasta intersectar otros bisectores o el borde del contorno de la superficie del cuerpo de agua para formar los polígonos, cuidando que cada polígono encierre a una estación meteorológica diferente.

(McGhe, 1999; Aparicio, 2005). Con esta información es necesario hacer una validación estadística para retirar valores aberrantes.

La estimación del factor k_{perm} se realiza ponderando los valores particulares de los coeficientes k_{Darcy} de acuerdo a la permeabilidad del suelo y su cobertura, siendo que k_{Darcy} es el coeficiente de permeabilidad. Ley de Darcy. La ponderación del parámetro k_{perm} se lleva de acuerdo la siguiente expresión:

$$K_{perm} = (\sum K_{Darcy} A_k) / (\sum A_k) \quad \text{Eq.5}$$

Donde A_k se refiere al área donde es válido el coeficiente particular de permeabilidad de Darcy. El subíndice k sugiere un distinto uso del suelo o cobertura diferente. La determinación de la permeabilidad del suelo usualmente se hace mediante pruebas de *Mecánica de Suelos* en laboratorio, y los datos se analizan usando la Ley de Darcy para determinar el valor de k_{Darcy} (Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez, 1999). Cuando no es posible contar con muestras de suelos para analizar su permeabilidad en el laboratorio, los valores de k_{Darcy} se aproximan usando la Tabla 2, de acuerdo al uso o cobertura del suelo y el tipo de suelo -A, B o C- según la predominancia entre arenas y arcillas en su contenido).

La descripción de los tipos de suelos es la siguiente:

- A) Suelo permeables, principalmente arenoso.
- B) Suelo considerados medianamente permeables, con arenas recubriendo la superficie.
- C) Suelo en el que predomina arcillas.

Uso o cobertura del suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas sin cultivos y desnudas.	0.26	0.28	0.30
Cultivos.	0.24	0.27	0.30
Lagunar y tular.	0.00	0.00	0.00
Pastizal (porcentaje de suelo o pastoreo):			
Más del 75%	0.14	0.20	0.28
Del 50% al 75%	0.20	0.24	0.30
Menos del 50%	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas con edificaciones.	0.26	0.29	0.32
Caminos incluyendo derecho de vía.	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente.	0.18	0.24	0.30

Tabla 2 Coeficientes de permeabilidad de Darcy K_{Darcy} En función de la cobertura y tipo de suelo (CONAGUA⁴, 200).

Para cuando se calcula el valor ponderado del factor K_{perm} , el coeficiente de escurrimiento se calcula de acuerdo con las siguientes expresiones, donde P_{anual} es la precipitación medida anual sobre una cuenca en metros por año. Se presentan dos condicionantes:

- $K_{perm} \leq 0.15 \rightarrow C_{esc} = ((K_{perm})/2) * (P_{anual} - 0.258)$
Eq.6
- $K_{perm} > 0.15 \rightarrow C_{esc} = ((K_{perm})/2) * (P_{anual} - 0.258) + 2/3 * (k_{perm} - 0.150)$
Eq.7

El coeficiente de escurrimiento C_{esc} es usado para indicar que la precipitación recibida sobre un área de captación, sólo una parte del agua queda sobre la superficie del suelo en forma de escorrentía, fluyendo por gravedad hacia la cuenca baja, otra parte de la vegetación es interceptada y retenida por la vegetación del suelo (también conocida como la evaporándose

⁴ Comisión Nacional del Agua de México.

o infiltrándose después), y otra parte más del agua se filtra en el suelo sin necesidad de ser interceptada por la vegetación (McGhee, 1999).

la elección del valor de Cesc tiene una aplicación limitada, pues de acuerdo con Pilgrim & Cordery (1993), sólo deben usarse preferentemente en cuencas con extensiones menores a 25 millones de metros cuadrados (25km²), aun cuando los mismos autores mencionan que estos métodos se han empleado en cuencas de hasta unos 500 millones de metros cuadrados de superficie (500km²). Para reducir el error asociado a la variabilidad de las características del terreno, Fetter (2001) recomienda limitar el uso de estos métodos a cuencas con superficies inferiores a los 80.93 acres, siendo esto igual a casi 81 hectáreas lo cual equivale a unos 8093.7 m² ponderaciones para extender la validez de un dato puntual sobre toda una superficie.

Esto hace que los métodos para estimar el coeficiente de escurrimiento a usar en el Método Racional tengan una utilidad limitada para hacer modelación (D'Urquiza, de Anda & Nelson, 2009) por lo que dichos métodos no son recomendables para un cálculo *determinístico* de los flujos de escorrentías.

La aplicación determinística de variaciones del Método Racional y el Método US SCS es más efectiva al combinarse tecnologías de Sistemas de Información Geográfica [SIG] con software especializados, tales como:

- WMS⁵, el HECHMS14,
- SWAT⁶
- tRIBS⁷

La finalidad de estos paquetes de software es dividir al terreno de una cuenca en una red de múltiples elementos superficiales. En cada sección se le asigna las coberturas reales vegetales, uso de suelo, tipo de suelo para la asignación de un coeficiente de escurrimiento. Aplicando el modelo matemático correspondiente se mejora la estimación de los escurrimientos dados para cada uno de los elementos capturados.

El flujo de salida por **evapotranspiración** es considerado todo el flujo de vapor hacia la atmósfera desde la superficie de las hojas de las plantas, proveniente de las escorrentías superficiales, principalmente cuando las raíces son poco profundas o directamente de un cuerpo de agua en caso de las plantas de acuáticas.

El **flujo de evapotranspiración** desde los terrenos de la cuenca estima el flujo disponible para formar escorrentías, no todos los escurrimientos alcanzan al cuerpo hidrológico, pues éstos sufrirán pérdidas. La presencia de plantas en los terrenos de la cuenca genera evapotranspiración. En ausencia de otras fuentes de agua, las plantas toman agua de la precipitación que cae sobre los terrenos de la cuenca acumulándose para formar escorrentías. Para este cálculo se puede usar el método de Thornthwait,1944; Thornthwaite,1948). Este es un método gráfico, que también se puede resolver analíticamente en función de la temperatura media mensual del aire en la cuenca. Para calcular el Método de Thornthwaite, son necesarios algunos parámetros los cuales están en función del mes, del año y de la latitud geográfica media de la cuenca.

La **irradiación solar** es la combinación específica del mes del año y de la latitud geográfica determinará condiciones, por lo que dependiendo de la combinación anterior, para cada lugar y mes del año existirán diferentes cantidades de luz que las plantas puedan aprovechar para realizar la fotosíntesis, lo que provoca un cambio en la cantidad de agua que se encuentre en el subsuelo.

⁵ *Watershed Modeling System*, del *National Water Research Institute* [NWRI].

⁶ *Hydrologic Modeling System* del *Hydrologic Engineering Center*.

⁷ *Soil and Water Analysis Tool*.

Coefficiente de latitud y mes del año ($\Phi\omega$) ya que cambia la intensidad de la radiación. Aparicio (2005) hace la aclaración que es posible calcularlo mediante valores tabulables (Tabla 3. Valores para el cálculo de $\Phi\omega$ mediante método de Thornthwaite.).

Mes en el Hemisferio Norte		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Mes en el Hemisferio Sur		Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Valor absoluto de la latitud $ \phi $	0°	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
	10°	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.01	1.02	0.98	0.99
	20°	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.97
	30°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
	35°	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
	40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
	45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.05	0.94	0.79	0.75
50°	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70	

Tabla 3 Valores para el cálculo de $\Phi\omega$ mediante método de Thornthwaite.

Sin embargo este método cuenta con la desventaja que solo se puede calcular para algunas latitudes ϕ . Con la Tabla 3 es posible calcular la ecuación 8.

$$\Psi_{\omega} = \varphi_2 * |\phi| + \varphi_1 * |\phi| + \varphi_0 \quad \text{Eq. 8}$$

Donde los parámetros φ_1 dan lugar a la tabla 5 mediante la regresión cuadrática.

Mes en el Hemisferio Norte	Mes en el Hemisferio Sur	φ_2	φ_1	φ_0	Mes en el Hemisferio Norte	Mes en el Hemisferio Sur	φ_2	φ_1	φ_0
Ene	Jul	-5.979E-05	-2.714E-03	1.036E+00	Jul	Ene	6.091E-05	3.371E-03	1.041E+00
Feb	Ago	-3.887E-05	-1.081E-03	9.349E-01	Ago	Feb	3.627E-05	2.153E-03	1.043E+00
Mar	Sep	7.614E-07	-4.023E-04	1.039E+00	Sep	Mar	1.769E-05	7.564E-05	1.011E+00
Abr	Oct	2.705E-05	1.407E-03	1.011E+00	Oct	Abr	-1.879E-05	-1.330E-03	1.038E+00
May	Nov	5.175E-05	3.019E-03	1.043E+00	Nov	May	-4.512E-05	-2.755E-03	1.010E+00
Jun	Dic	7.273E-05	3.046E-03	1.015E+00	Dic	Jun	-1.163E-04	-4.690E-04	1.011E+00

Tabla 4 Parámetros de la Regresión Cuadrática del Coeficiente $\Phi\omega$ en Función de la latitud para distintos meses del año, dependiendo del Hemisferio Norte o al Hemisferio Sur.

Una vez calculado el valor de $\Phi\omega$, puede calcular ψ conocido como **parámetro de Temperatura** para el método de Thornthwaite y para ψ que se conoce como **el factor anualizado** de corrección para el mismo método.

$$\Psi_{\omega} = (T_{\text{mes}} / 5)^{1.1514} \quad \text{Eq. 9}$$

Donde T_{mes} se considera la **temperatura ambiente media** en °C del mes simbolizado por ω . Para realizar la **corrección del parámetro de temperatura** es necesario realizar la sumatoria los 12 factores de cada mes, conocida como el parámetro de corrección de la temperatura.

$$\psi = \sum_{\omega}^{12} \Psi_{\omega} \quad \text{Eq. 10}$$

Para poder calcular la evapotranspiración es necesario determinar el valor del parámetro α conocido como parámetro de **potencia**. Dando lugar a la ecuación 11.

$$\alpha = 6.75 \times 10^{-7} \psi^3 - 7.71 \times 10^{-5} \psi^2 + 1.79 \times 10^{-2} \psi + 4.92 \times 10^{-1} \quad \text{Eq. 11}$$

El flujo máximo esperado de la **evapotranspiración** $Q_{\text{evapotranspiración}}$ desde los terrenos de la cuenca está dado por la ecuación 12:

$$Q_{\text{evapotranspiración}} = ((A_{\text{veg}} * \Phi_{\omega}) / 1875) * (10 (T_{\text{mes}, \omega} / \Psi))^{\alpha} \quad \text{Eq. 12}$$

Donde A_{veg} es el área cubierta por la vegetación en el predio de estudio de la cuenca hidrológica (m^2) y $Q_{\text{evapotranspiración}}$ es el flujo diario máximo esperado de evaporación desde los terrenos de la cuenca para el mes ω analizado (m^3/d).

Diagrama de Sistema Dinámico

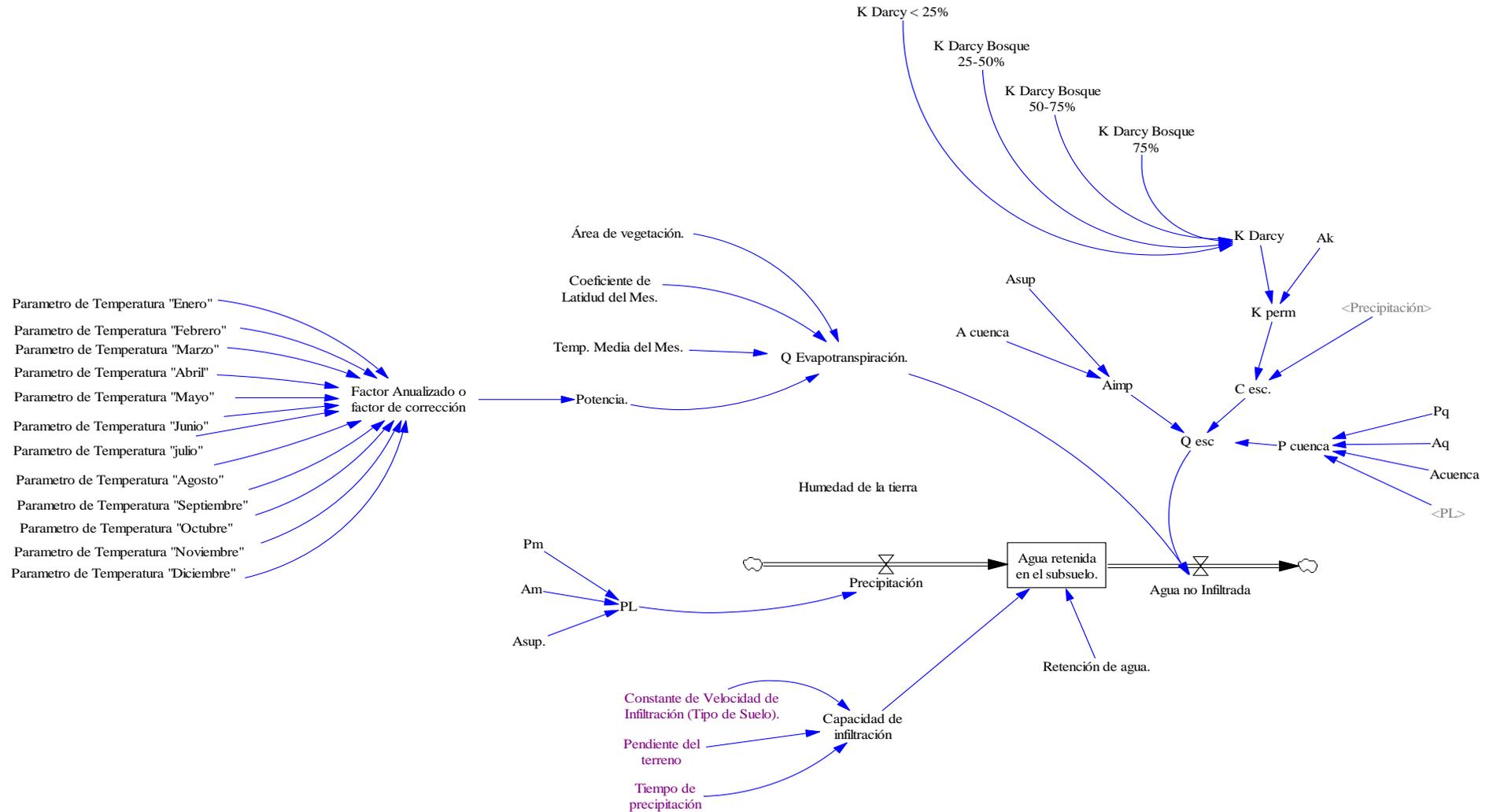
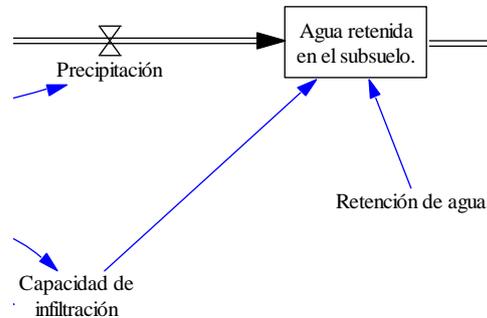


Diagrama 1 Modelo de flujo del Sistema de Simulación Dinámica de la Infiltración de Agua en el mes de Agosto, de un espacio del Área Natural Protegida del Bosque de la Primavera

Desglose del diagrama de simulación de sistema ambiental de infiltración de agua pluvial.

El agua que se retiene en el suelo está constituida por:

- El Flujo de la Precipitación Pluvial.
- La capacidad de Infiltración.
- Retención de agua.



Modelo 2 Constitución de Agua Retenida en el Subsuelo.

La precipitación que se genera en la zona de estudio es calculada mediante el diagrama 2 y la imagen que se constituye por la ecuación 4.

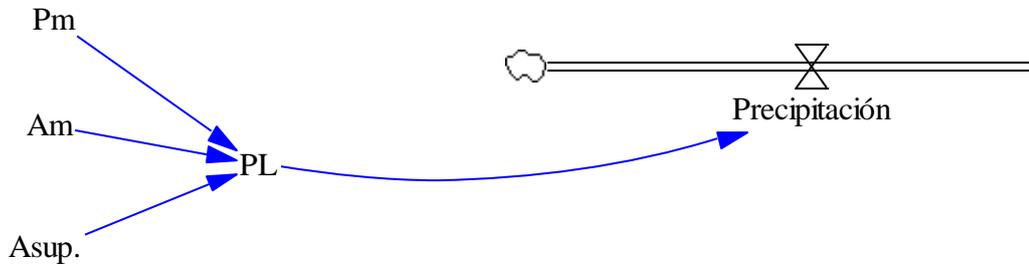


Diagrama 2 Precipitación pluvial.

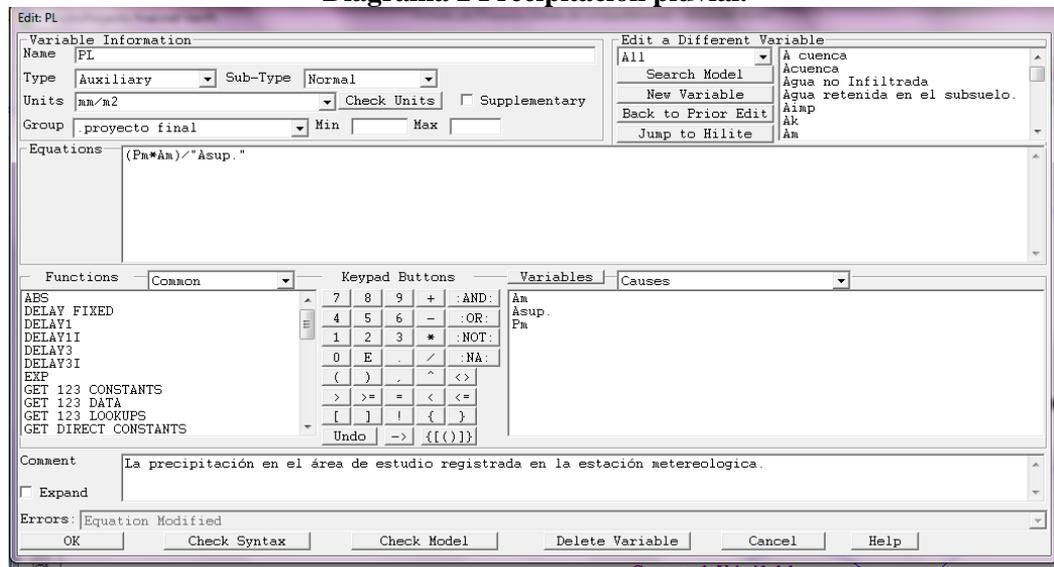
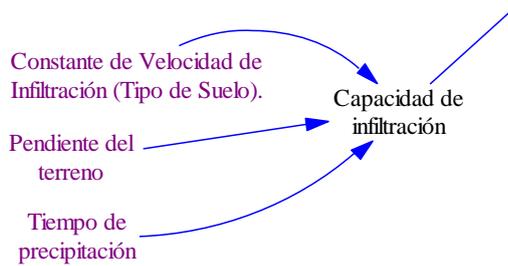


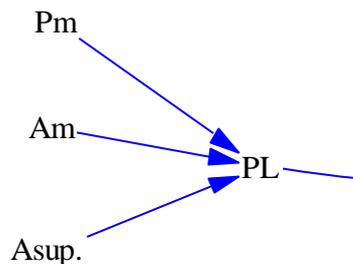
Ilustración 6 Edición de ecuación PL

La **Capacidad de Infiltración** está dada en porcentaje que se logra infiltrar, el cual se constituye de la siguiente operación:
 $1 - (\text{Constante de Velocidad de Infiltración (Tipo de Suelo)} \cdot (\text{Tiempo de precipitación}^{\text{Pendiente del terreno}}))$



Modelo 3 Constitución de Capacidad de Infiltración.

Para la precipitación que se registra en las estaciones meteorológicas se determina la ecuación 2 que está formada en función de la superficie y la precipitación media que se puede registrar. Contar con varias estaciones meteorológicas es un evento primordial para conseguir resultados confiables y significativos. La función de la PL está dada para uno de los polígonos de Thiessen, por la geomorfología de los terrenos es importante analizar donde se colocara cada estación meteorológica y cuantas serán necesarias.

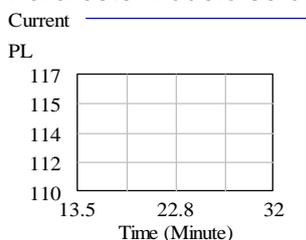


Modelo 4 Precipitación capturada en una estación meteorológica.

Mediante uso de un Sistema de Información Geográfica SIG se puede determinar cuáles son los lugares mas accesibles, confiables y con menos posibilidad de adquirir errores por cuestiones naturales. Como se muestra en el Anexo 5 se debe determinar el espacio en función al uso de suelo.

La **Humedad de la tierra** que se encuentra antes de un evento de precipitación está en función de muchos factores, por esta razón se utiliza como constante de un porcentaje que se encuentra en el manto freático.

En la ecuación 3 se ha presentado el análisis del espacio que está estudiando, esta se deberá interpolar cuando se cuenten con varios puntos de muestreo y distintas características. Ya que la intensidad de la lluvia puede variar mucho por varios factores. Para este modelo se consideran 100 metros cuadrados. Una intensidad



La intensidad de lluvia se ha considerado constante debido a que es aquí donde se debe incluir la función que inserte una tablas, las cuales como ya se nombro en el marco teórico deberá ser una cantidad mínima de 20 años como lo comenta McGhe, debido a que es un una proyección estadística la cual debe contar con una base de datos significativa. Algunos centro de información meteorológica cuentan con esta cantidad de datos, sin embargo por cuestiones técnicas se cortan en algún momento ya que no están en accesos facilites o directos para ser monitoreados constantemente.

Am
 Current: 680
 "Asup."
 Current: 1,000
 Pm
 Current: 150

Gráfico 1 Intensidad de lluvia.

Por lo tanto la precipitación que se logra infiltrar deberá ser una ecuación lineal ascendente, ya que no se están considerando los parámetros de alteraciones reales de una simulación.

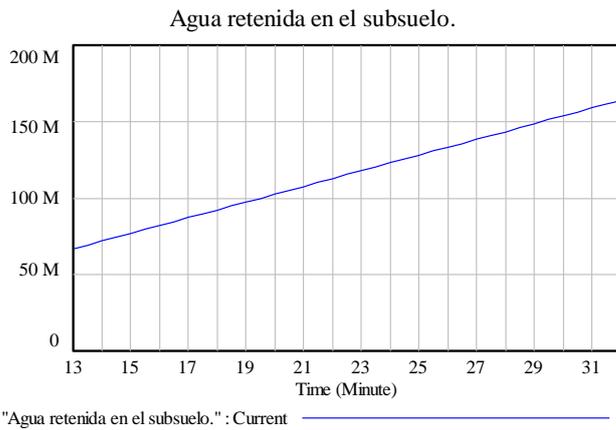
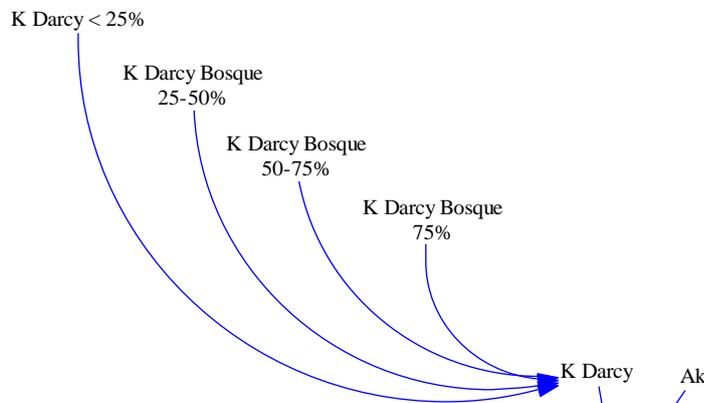
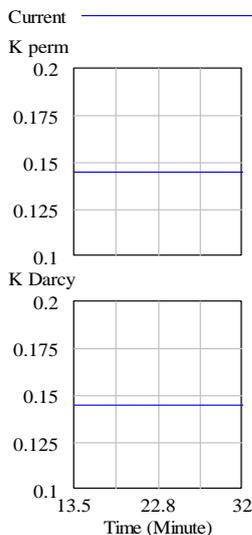


Gráfico 2 Retención de agua.



Modelo 5 Cálculo de constante de Darcy

Debido a que el cálculo de la ecuación de Darcy es un promedio se debe muestrear todos los puntos que se consideren necesarios para homogeneización el tipo de terreno, este varía según las condiciones a las que está expuesto, es decir: tráfico de carros, animales, presencia de hormigas, tipo de vegetación, contacto con seres humanos, campos agrícolas, uso de suelo, etc. Para efectos de un mejor análisis se realiza un cálculo de una constante de Darcy con 4 tipos de terreno, todos boscosos y con porcentajes de vegetación diferentes.



Un buen estudio de campo realizaría análisis cuadrículando el espacio a estudiar con una rejilla de 1 metro cuadrada para cada punto de muestreo. Y así estimando en un espacio pequeño y poco profundos. Sin embargo hacer estudios de mecánica de suelos para determinar la ecuación de Darcy para cada capa sería lo mejor. Pero considerando que son estudios muy costosos se deberá interpolar la información adquirida para un predio.

Para efectos de estipulaciones más regularizadas existen normas para determinar el número de análisis de mecánicas de suelos que se deben realizar según el tamaño de un predio.

Modelo 6 Cálculo de Constante de la Ecuación de Darcy.

Ak
Current: 1.2

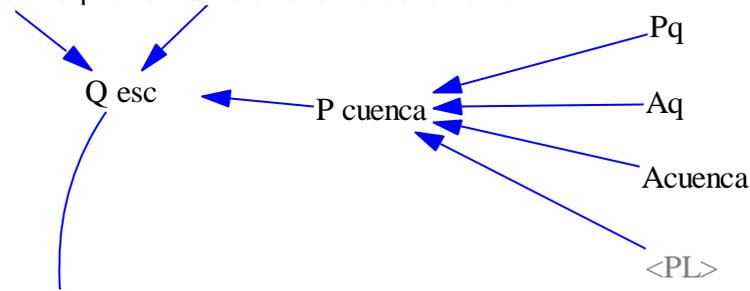
Como se aprecia en el gráfico 2

Se estima un tiempo de 30 minutos para efectos de credibilidad en tanto a la constancia de tiempo de una lluvia.

La cantidad recolectada no se estima en una estación meteorológica sino en toda el área de impacto. Las unidades son metros cúbicos sin embargo hace falta analizar la velocidad de movimiento del agua debajo de la tierra.

Para lo cual se utiliza la ley de Darcy que está en función del tipo de suelo.

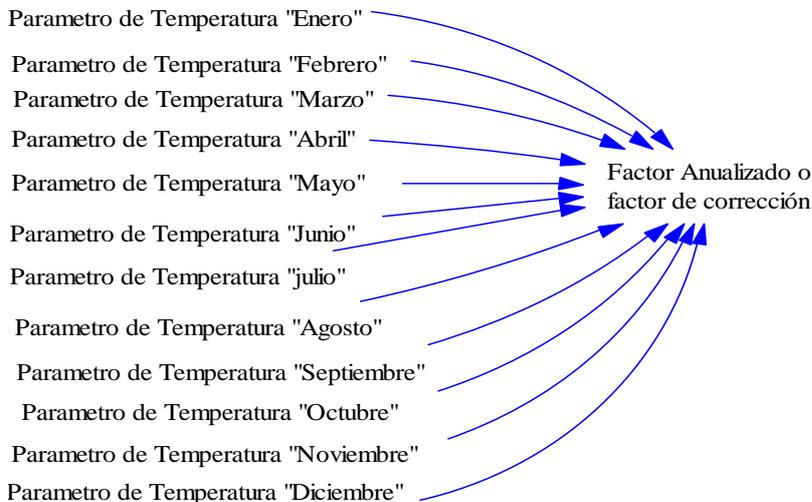
El agua que no logra infiltrarse está constituida por el **flujo de evapotranspiración** y **flujo de escorrentía** y toda el agua que no se logra infiltrar por la saturación por la **humedad de la tierra** que presenta previamente al evento de la lluvia.



Modelo 7 Flujo de escurrimiento Q esc.

El flujo de la escorrentía está constituido por la ecuación de precipitación de la cuenca, la constante del coeficiente de escurrimiento está en función del tipo de terreno. Es aquí donde el proceso de muestreo del tipo de suelo es muy importante para definir varias constantes de escurrimiento que se puedan interpolar. Ya que este modelo no deja de ser una simulación ambiental y entre mayor sea la cantidad de datos y con mayor exactitud se encuentren tomados de mejor calidad será la modelación.

La evapotranspiración es igual de compleja por tal razón solo se hace un análisis burdo al estimar la cantidad de agua pudiera evaporar la temperatura de la región por la radiación solar. Se considera que en todo el terreno hay efecto evaporación al mismo tiempo que de precipitación, lo cual indica que antes de la lluvia deberá haber una gran cantidad de radiación solar para poder lograrse esto. Generando un factor anualizado o factor de corrección constante de 86.5 el cual se adquiere mediante todas las temperaturas del año.



Modelo 8 Calculo estadístico del factor Anualizado o Factor de Corrección

Resultados:

Por lo tanto al modelo se está realizando una medicación que acerca más a la realidad la simulación de este sistema. A la intensidad de la precipitación se le está considerando que llueve en los tiempos: 0-10 minutos constantes, dejando de llover gradualmente hasta los 15 minutos. Deja de llover hasta el minuto 19.5 y dejando de llover al 24.5 gradualmente hasta el 25 y por último se repetiría el ciclo en el minuto 29.5, pero sin embargo como el tiempo de finalización es en el minuto 30 no es suficiente para que se dé lugar la operación que da lugar a la intensidad de lluvia. Generando un pico de 100 mililitros por metro cuadrado. Este fenómeno se representa en el gráfico 3.

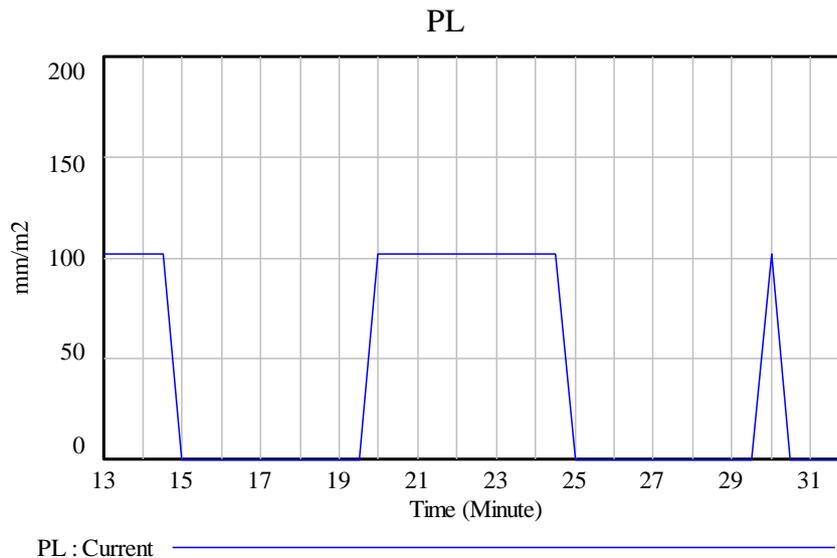


Gráfico 3 Intensidad de lluvia corregida.

Validación del modelo.

Aplicando el mismo tipo de función (Puls Tranin) para la evapotranspiración, genera un grafico en el que se puede apreciar que la evapotranspiración se va efectuando por etapas, y no constante mente. Es decir solo cuando el sol sale se efectúa una transpiración. Que es inverso al momento de la lluvia.

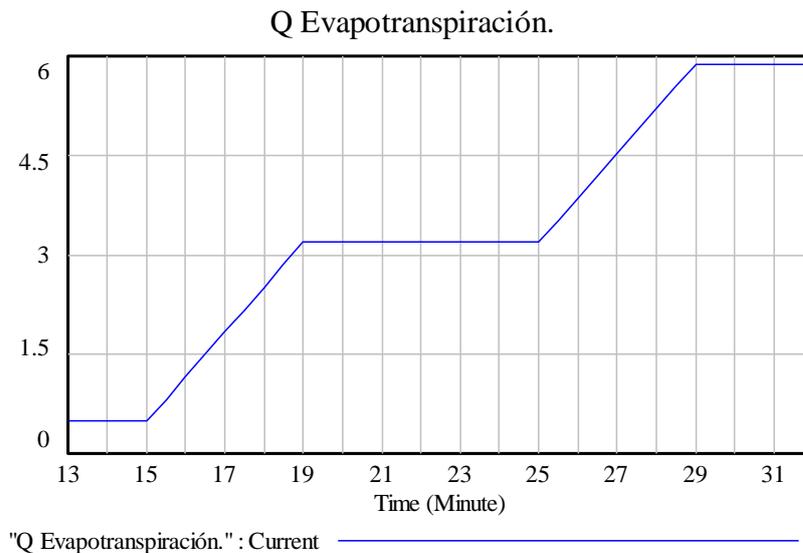
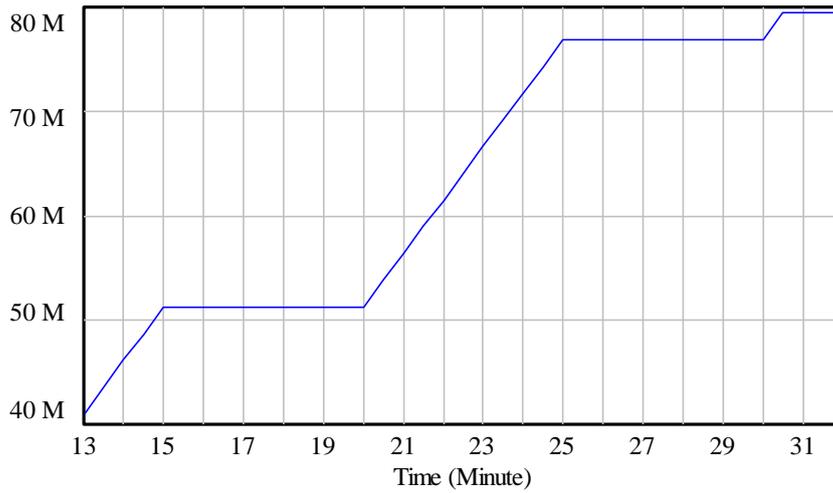


Gráfico 4 Evapotranspiración

Del minuto 0 al 15 no hay una evapotranspiración, sino hasta el minuto 15 comienza y termina en el tiempo 19 que comienza la lluvia de nuevo, para detenerse hasta el tiempo 25 e iniciar en ese instante hasta el pico final y se mantiene nublado posteriormente.

Por último el agua que se acumula en el subsuelo es acumulativa por lo que genera los bloques se aumento en la acumulación de agua.

Agua retenida en el subsuelo.

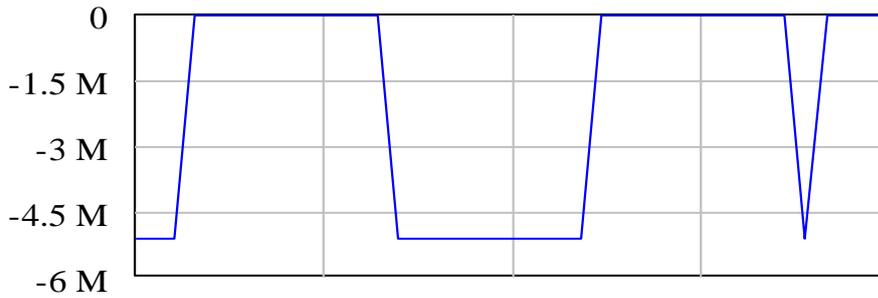


"Agua retenida en el subsuelo." : Current

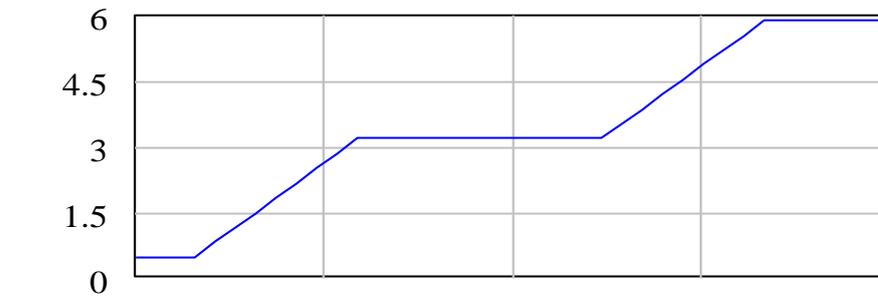
Gráfico 5 Acumulación de agua.

Current

Agua no Infiltrada



"Q Evapotranspiración."



Q esc

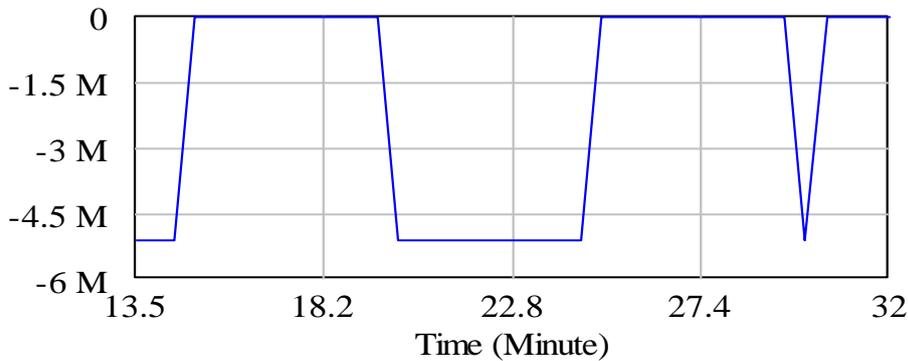


Gráfico 6 comparativo de Agua No Infiltrada - Evapotranspiración - Escorrentia

Conclusiones:

La capacidad de retención de agua del suelo en un espacio específico está en función de la profundidad del suelo, los espacios que se encuentren en el subsuelo, el tamaño de las partículas de los minerales y materia orgánica, ya que entre más grandes sean los poros el agua tiene la libertad de circular. De tal manera que entre más pequeñas sean las partículas mayor será la retención del agua pero menor será la facilidad de penetración de las raíces lo que provocara que su aprovechamiento sea mínimo.

Cuando los sustratos son de grano pequeño la ecuación de Darcy ayuda a que no se pueda infiltrar el agua, provocando un fenómeno de impermeabilidad y saturando el nivel freático rápidamente. De esta manera el proceso escorrentía aumenta provocando el lavado de minerales sea constante y las tierras se vuelvan infértiles, dando como consecuencia una erosión en el suelo y evitando que la vegetación crezca y se desarrolle.

La pendiente juega un factor muy importante para la infiltración ya está en función del tiempo de retención. El cual permite que se llenen los espacios vacíos por el líquido. Se debe considerar la temperatura de la zona ya que este factor influye en varios aspectos, la viscosidad del agua para infiltrarse y la evapotranspiración que pudiera generar la vegetación y la radiación solar.

El viento deberá integrarse en el proceso ya que la precipitación de una zona está en función del tiempo que llueve y la cantidad que llueve.

Es importante saber identificar los procesos más importantes que alteran el fenómeno estudiado. Ya que el análisis puede ser concreto y tan detallado como se pueda y quiera describir. Depende de la inversión de tiempo que se pueda realizar, los estudios que se puedan comprar, la información que el equipo de trabajo pueda recabar. Sin embargo haciendo un estudio minuciosos y bien planeado se puede llegar a representar y simular las variables que se desean estudiar.

Este modelo es una representación muy burda debido a que las características de un sistema hidrológico deben ser monitoreadas constantemente. Con una cantidad mínima de 20 años todos los días. Los puntos de muestreo para calcular la ecuación de Darcy que define la velocidad de infiltración, en puntos estratégicos por la geomorfología de un terreno.

La herramienta de vensim es únicamente para simular desarrollar un estudio de los puntos que le interesa a un estudio ya que los factores que constituyen un sistema ambiental son infinitos y la mayoría no son predecibles por ser fenómenos naturales. Sin embargo **utilizando un modelo matematico bien estructurado y con buenos fundamentos la simulación de un sistema es bastante representativa.**

Bibliografía

Chavarri, E. Clase VIII Infiltración. Universidad Nacional Agraria La Molina. Curso: Hidrología Aplicada. 10/05/04

Durkiza, A. Instituto Tecnología de Estudios Superiores. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA CALIDAD DEL AGUA EN CUERPOS HIDROLÓGICOS SUPERFICIALES, 4. Balance Hidrológico de Cuerpos de Agua de tipo Lenticos.

FAO, Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible. http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sm/soil_moisture.pdf 21/12/13

Gayosa, J. Guía de conservación de suelos Forestales. Proyecto Certificación del Manejo Forestal en la Region Octava, Decima y Duodecima. Valdivia 1999

Osuna, E. ESTIMACION DE LA SORBILIDAD E INFILTRACION USANDO DATOS DE SIMULACION DE LLUVIA PARA TRES TIPOS DE SUELOS DE LA ZONA SEMIARIDA DE MEXICO. Terra Volumen 16 Número 4, 1998

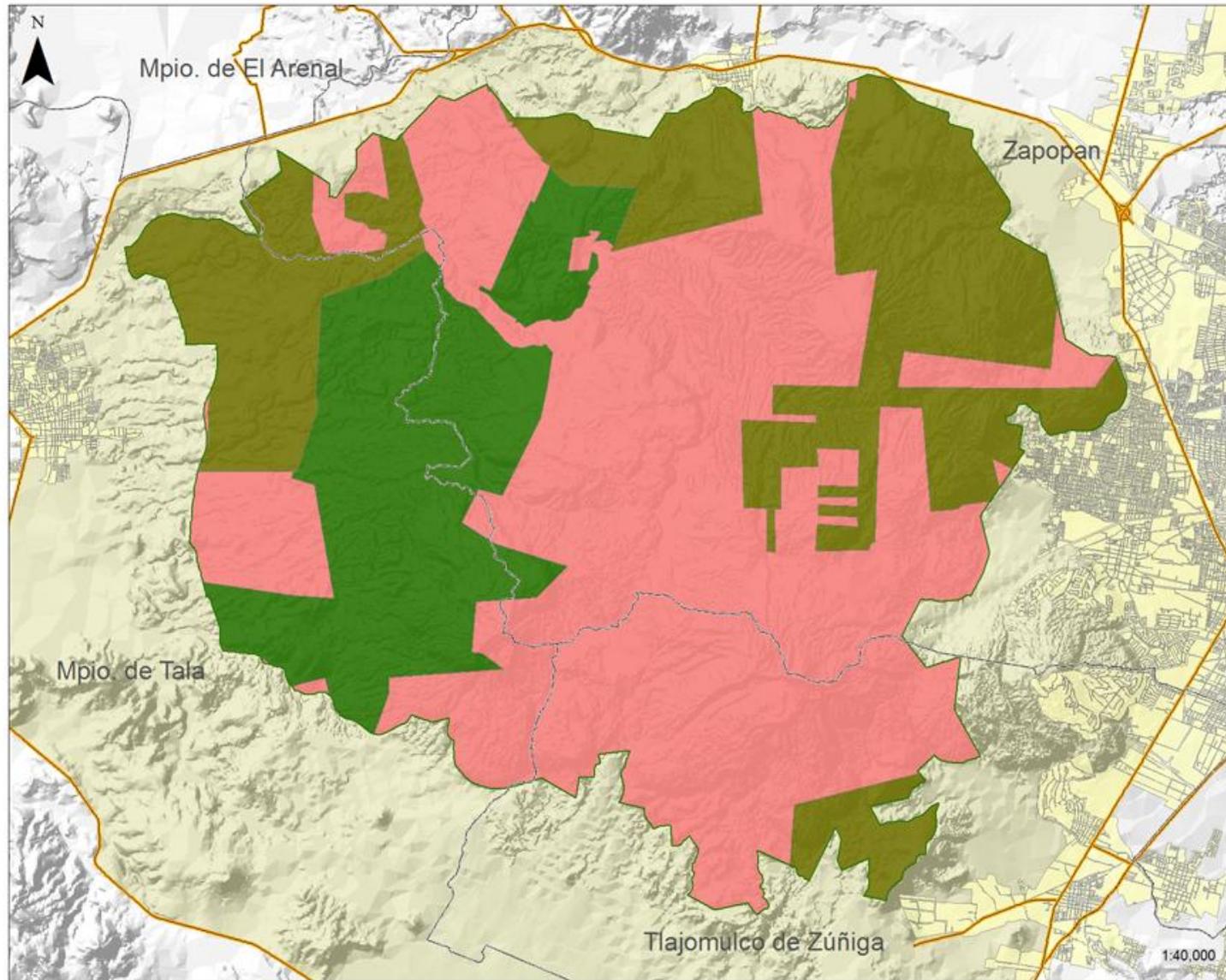
SEMARNAT Programa de manejo áreas de Protección de Flora y Fauna la Primavera. Impresión 2000,

http://www.conanp.gob.mx/qu_hacemos/pdf/programas_manejo/primavera.pdf

Salas Garcia 2011 Modelo Numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca. [http://satori.geociencias.unam.mx/28-1/\(11\)Salas.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/28-1/(11)Salas.pdf)

Ruiz Frías Ana. Desarrollo de un modelo de simulación para evaluar el horizonte de contaminación con cobre de bosques esclerófilos. Santiago de Chile 2001 http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2001/ruz_a/pdf/ruz_a.pdf

Anexo 1 Carta Topográfica del Área Natural del Bosque de la Primavera.



Comité Técnico para la Administración del Bosque La Primavera
 Sistema de Información Geográfico
 Dirección Ejecutiva

BOSQUE LA PRIMAVERA

PROPIEDAD GENERAL DE LA TIERRA DENTRO DEL ANP

SIMBOLOGÍA

- Municipios de Jalisco
- Perímetro del APFF La Primavera
- Carreteras
- Casco Urbano

TIPO DE PROPIEDAD

- Propiedad Ejidal o Comunal
- Particular
- Propiedad Pública o Estatal

RELACIÓN DE PORCENTAJE

- 28 %
- 54 %
- 18 %

0 495 990 1380 2175 3165
 Kilómetros

**ÁREA DE SIG E INFORMACIÓN TERRITORIAL
 MAYO DE 2012**

Elaboración propia con base en el Sistema Geográfico Municipal 2010, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Proyección Cartográfica: UTM
 Datum: WGS84, Zona 13N

Elaboró: Geop. Juan Pablo Valdez Gamboa

Dinámica de Sistemas

<http://www.dinamica-de-sistemas.com/>

Vensim

<http://www.atc-innova.com/>

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



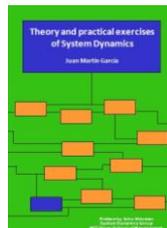
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)