FINAL REPORT

Covering period (December 1992 - December 1997)
Submitted to the Office of the Science Advisor
U S Agency for International Development

TEPETATE RECLAMATION USING EROSION PREDICTION TECHNOLOGY

Principal Investigator
Dr José Luis OROPEZA MOTA
Grantee Institution
Colegio de Postgraduados en Ciencias Agricolas

Collaborator
Héctor M Arias Rojo
Institution CIDESON

Collaborator
Dr Leonard J Lane
Institution USDA- ARS (Tucson, Arizona)

Collaborator
Collaborator Dr Darrell Norton
Institution USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory

Project Number 11 453
Grant Number PSTC-936-5600-523-11 453
AID Grant Project Officer Earth Sciences Project 11 453
Project Duration 20-08-1992 to 31-12-1997

Montecillo, México December 31 1997

EXECUTIVE SUMMARY

In Central Mexico and others Developing Countries (DC's) of latin american located in volcanic areas, have poor shallow soils underlying a hard layer, locally named tepetate in Central Mexico, which has the potential for agricultural activities Despite severe limitations, tepetates have been reclaimed for agricultural activities in Mexico, since prehispanic times Unfortunately, those experiences have not been extrapolated due to the variability of tepetate

Since two of the severe limitations in tepetates are erosion and low productivity, control erosion and increase productivity are the main goal, a proposal is made with the following objectives (1) to establish a methodology to analyze reclamation techniques using erosion models, (2) to validate a physically-based erosion model, and (3) to select the best management practices in the reclamation process

Soil reclamation and the selection of best management practices in most DC's are usually made on trial-error approaches The use of mathematical models can be of great use, providing the effects of the variables are represented by mathematical relationships The USDA Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB) and Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) evaluates the effects of erosion and productivity through sound mathematical reasonings, which include lists of agricultural implements and crops This is the first occasion that a physically based erosion model is applied to the reclamation of tepetates, and the selection of management practices

RESUMEN EJECUTIVO

En el Centro de Mexico y en otros países en vías de desarrollo de américa latina localizados en áreas volcanicas, se presentan suelos erosionados, pobres, delgados y con horizontes endurecidos, llamados localmente tepetates, los cuales ofrecen un alto potencial para desarrollar actividades agricolas A pesar de las severas limitaciones físicas, los tepetates han sido rehabilitados para incorporarlos a las actividades agricolas en Mexico desde tiempos prehispánicos Desafortunadamente, estas experiencias no han sido extrapoladas debido a la variabilidad del tepetate

Dado que dos de las mas severas limitaciones en los tepetates es la erosion y la baja productividad, por lo tanto, nuestra meta principal es incrementar la productividad con los siguientes objetivos (1) determinar una metodología que analize las tecnicas de rehabilitacion mediante el uso de modelos de erosion, (2) validar mediante una base física el modelo de erosion, y (3) seleccionar la mejor practica de manejo durante el proceso de rehabilitacion

La rehabilitación de suelos y la seleccion de la mejor practica de manejo en la mayoria de los paises en vías de desarrollo usualmente se realizan a prueba y error De ahi que el uso de modelos matematicos puede ser entonces de gran ayuda, siempre que el efecto de las variables se represente por relaciones matematicas Los modelos de erosion proporcionados por el USDA, Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB) and Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) evaluan directamente el efecto de la erosion y la productividad con resultados claros y razonables procedimientos analiticos, los cuales incluyen una lista de implementos agrícolas y cultivos Esta es la primera ocasion que un modelo fisico de erosion se aplica para la rehabilitacion de tepetates y para la seleccion de practicas de manejo

REPORTE FINAL

Período cubierto (Agosto de 1992 – Diciembre de 1997)
Submitted to the Office of the Science Advisor
U S Agency for International Development

REHABILITACIÓN DE TEPETATES Y USO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR EROSIÓN HÍDRICA

Investigador Principal
Dr José Luis OROPEZA MOTA
Institución responsable
Colegio de Postgraduados en Ciencias Agricolas

Colaborador
Hector M Arias Rojo
Institución CIDESON

Colaborador
Dr Leonard J Lane
Institución USDA- ARS (Tucson, Arizona)

Colaborador
Dr Darrell Norton
Institucion USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory

Numero de Proyecto 11 453
Numero de control PSTC-936-5600-523-11 453
AID Grant Project Officer Earth Sciences Project 11 453
Duracion del proyecto 20-08-1992 to 31-12-1997

Montecillo, México Diciembre 31 1997

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	1
INDICE GENERAL	2
RESUMEN EJECUTIVO	3
INTRODUCCION	3
ANTECEDENTES	4
OBJETIVOS GENERALES	5
OBJETIVOS PARTICULARES	5
LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	6
CLIMA	6
DESCRIPCION DE SUELO	6
VEGETACION	8
MATERIALES	10
METODOLOGIA	13
Caracteristicas fisicas de la lluvia y parametros de erosionabilidad	13
Escurrimiento superficial y caracteristicas fisicas del suelo	18
Escurrimiento, perdida de suelo y perdida de nutrimentos	22
HIDROGRAMAS Y SEDIGRAMAS	27
CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFIA	30
APENDICE	33
Descripcion de formulas utilizadas por el modelo matematico de simulacion de erosion hidrica SWRRB	34

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo economico de la **U S Agency for International Development (USAID)** bajo el contrato Grant Number PSTC-936-5600-523-11 453 a quien expreso mi mas sincero agradecimiento Asimismo, deseo hacer patente la atencion y eficiente colaboracion del trabajo ejecutivo y administrativo de la Coordinadora de las oficinas de U S Agency for International Development (USAID) en la ciudad de Mexico, **Sra. Patricia A. de Santos** Asi como la colaboracion del Oficial Financiero, AID/México C P Enrique Reynosa Fierro, a la Senior Program Office, AID/Mexico, Sra Teresa Esquivel Fernández y la Sra Nora Tellez

En el Colegio de Postgraduados y durante el desarrollo de la investigación se tuvo la colaboracion y participacion en el registro de la información de campo del MC Jose Donaldo Rios Berber, la Ing Elsa Huerta Martinez, Ing Elibeth Torres Benites, Ing Agustin Navarro Bravo, Ing Jose Salazar Lopez, MC Demetrio Salvador Fernandez Reynoso y del Ing Virginio Bernabe Antonio y de los Técnicos de Campo Sr Elias Carrillo Carrillo, Sr Juan Hinojosa Martinez, Sr Anacleto Sanchez Hidalgo y el trabajo secretarial y administrativo de la Sra Salustia Chavez Espinoza Todos los investigadores y trabajadores de apoyo mencionados pertenecen al Area de Fisica de Suelos de la Especialidad de Edafologia del Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agricolas de Montecillo, Edo de Mexico A todos ellos, mi más alto reconocimiento, agradecimiento y consideración

De igual forma, deseo agradecer la atención de las autoridades del Colegio de Postgraduados del Director General, Dr Angel Lagunes Tejeda, del Secretario Academico Dr Alfonso Larqué Saavedra y del Secretario Administrativo MC Jorge L Tovar Salinas Asimismo, la colaboracion de la Jefe del Departamento de Proyectos Externos C P Estela Sandoval Cornejo, de la C P Enriqueta Santamaria de la Torre y la C Maria de los Angeles Diaz Ayala Subjefe de Proyectos Externos y a todas aquellas personas de la administracion central del Colegio de Postgraduados que gentilmente colaboraron y apoyaron la realizacion del proyecto

Atentamente
Dr José Luis Oropeza Mota

Rehabilitación de tepetates y uso de modelos matemáticos para predecir erosión hídrica

J L Oropeza Mota, J D Ríos Berber, D S. Fernández Reynoso, E Torres Benites y E. Huerta Martínez Area de Fisica de Suelos, Especialidad de Edafologia, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados Km 35 5 Carretera Mexico-Texcoco Montecillo, Edo de Mexico CP 56230

Palabras clave Modelo matematico, erosion hidrica, relacion lluvia escurrimiento-perdida de suelo-perdida de nutrientes, produccion de sedimentos, rehabilitacion de tepetates

RESUMEN

El 80 % (1 575,415 2 km²) de los suelos de Mexico son de origen volcanico, una gran parte de los mismos 1 5 % (30,700 km²) presentan dentro de sus perfiles horizontes endurecidos llamados localmente tepetates La erosion de los tepetates es del orden de 25 ton/ha/año en tierras de cultivo y de mas de 80 ton/ha/año en tierras de uso forestal y otras formas especiales de erosion, tales como carcavas La rehabilitacion de tepetates con fines agricolas se remonta a la epoca prehispanica y en la actualidad, esta accion, presenta una gran demanda por los nucleos de poblacion rural mas marginados y densamente poblados del Eje Neo-volcanico de Mexico

El objetivo de esta investigacion es llegar a determinar los parametros que inducen la erosionabilidad en un tepetate tipo T3 a traves de los efectos asociados de la lluvia natural y sus escurrimientos, evaluar las tasas de desprendimiento y deposicion de los sedimentos de acuerdo al uso, manejo, longitud y grado de pendiente De la misma manera, se evaluara el efecto conjunto de la produccion de los sedimentos (sedigrama) y el escurrimiento superficial (hidrograma) en el tiempo La informacion resultante sera utilizada para validar el modelo matematico de erosion hidrica **SWRRB** (A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management)

RESUME

Eightv % (1 575,415 2 km^2) of soils of Mexico are of volcanic origin, a great part of this type of soils 1 5% (30 700km^2) present in theirs profiles idurated formations called locally tepetates Erosion in tepetates is of the order of 25 t/ha/year in agricultural land and more of 80 t/ha/year in bare soils and the others specials forms of erosion such as gallies Tepetate reclamation in order to induce agricultural practices dates back to prehispanic times and actually, this action has a great demand by the more margin rural people of Central of Mexico

The objective of this research is reach to determined the parameters to lead the erodibility in tepetates type t3 through the associate effects of the natural rainfall and theirs runoffs, to evaluate the detach and deposition rate in accordance with use, management and slope Also, we will evaluate the effect of the sediment yield and runoff The results made use to validate the mathematical model SWRRB (A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management)

INTRODUCCION

La mayor parte de los suelos del centro de Mexico son de origen volcanico, ondulados y altamente susceptibles a la erosion hidrica Se ha estimado que esta ultima afecta un 80 % del territorio nacional, situacion similar a la de otros paises de America Latina y del Caribe Asi, la casi totalidad de los suelos de origen volcanico exponen a la superficie sus materiales subyacentes llamados en el eje neovolcanico mexicano localmente ' tepetates"

Los tepetates son suelos que dentro de sus perfiles presentan horizontes endurecidos que pueden estar situados a profundidades variables **Zebrowski, (1992)** Se estima que los tepetates en el Centro de Mexico cubren una superficie de 30,700 km^2 y su grado de afectacion por la erosion hidrica ha sido tal, que las capas superiores de suelo se han perdido totalmente, poniendo al descubierto horizontes endurecidos profundos dando como resultado la aparicion de areas completamente erosionadas

Desde el punto de vista agricola, los tepetates son suelos muy susceptibles a la erosion hidrica presentan materiales cementantes que inducen a la formacion de costras y a su endurecimiento presentan un regimen complejo de infiltracion y percolacion, un sistema de drenaje interno deficiente producen altas tasas de escurrimiento superficial, por su dureza son suelos dificiles de laborear pobres en materia organica y nutrimentos, presentan bajos niveles de retencion de agua disponible para las plantas y por consecuencia bajos rendimientos en su productividad **Oropeza-Mota, (1995)**

La alta produccion de sedimentos generada en los tepetates, ocasiona ademas, una serie de problemas secundarios, entre los cuales cabe mencionar el azolvamiento de las obras de infraestructura hidraulica y su consiguiente perdida de la capacidad de almacenamiento, alteracion en la morfologia y estabilidad en la red de drenaje de los rios, encostramiento y ensalitramiento de los suelos por la presencia de materiales cementantes, carbonato y sodio, destruccion y alteracion de la ecologia natural de los rios y zonas bajas en general, contaminacion de las aguas de escurrimiento superficial por sedimentos, deslizamiento de taludes y formacion de flujos superficiales dificiles de controlar en los terrenos de ladera

Desde el punto de vista social, los tepetates son terrenos marginales que limitan drasticamente las posibilidades de desarrollo agricola, ganadero y forestal y cobran mayor interes precisamente cuando las parcelas de los agricultores se encuentran enclavadas en este tipo de material volcanico de dificil manejo y baja productividad **Oropeza-Mota, (1994)**

Actualmente, el crecimiento demografico y la presion urbana en el centro de Mexico ha propiciado que muchos productores agricolas pobres y marginados, se vean obligados a explotar las tierras altas y de ladera, donde la combinacion de los suelos altamente erosionables, practicas inadecuadas de labranza y lluvias intensas, han creado extensas zonas de erosion que muestran un drenaje fuertemente disectado por carcavas profundas Dado que estas tierras casi siempre son de temporal deficiente, una vez erosionadas, los productores las abandonan y emigran a los grandes centros de poblacion en busca de mejores oportunidades

Desde 1989, en el Colegio de Postgraduados de Montecillo, Estado de Mexico se han implementado algunas investigaciones para determinar las tecnicas mas adecuadas en la rehabilitacion de tepetates para su incorporacion a la agricultura, **Oropeza-Mota, (1991)**

Los resultados obtenidos muestran que los tepetates pueden ser productivos cuando se les aplica practicas adecuadas de manejo y conservacion La produccion en maiz fue de 3 8 ton/ha bajo condiciones de temporal, cuando en areas similares la produccion fue unicamente de 0 7 ton/ha Cuando los tepetates se operan bajo condiciones de riego ellos pueden alcanzar producciones de mas de 5 ton/ha (la produccion actual bajo condiciones de riego en el area considerada es de 4 5 ton/ha)

ANTECEDENTES

Desde la epoca prehispanica, los antiguos mexicanos trataron de incorporar los tepetates a la actividad agricola utilizando abonos organicos y mezclas de tierra de monte Aun cuando los tepetates presentan una pobre fertilizacion para incorporarlos a la produccion agricola, son muy duros, y algunos de ellos de dificil manejo y altamente erosionables, 25 ton/ha/año en terrenos agricolas y mas de 80 ton/ha/año en carcavas y otras formas especiales de erosion **Oropeza-Mota, et al (1995)** Tradicionalmente, la recuperacion de tepetates en Mexico consiste en lo siguiente 1) subsuelo para reducir la dureza del material, 2) aplicacion de un barbecho y dos pasos de arado para propiciar la infiltracion de agua, 3) aplicacion de fertilizantes organicos y minerales, y ocasionalmente, 4) la aplicacion de practicas de conservacion para el control de la erosion La rehabilitacion de los tepetates puede ser inadecuada si la erosion no se controla

Desde el punto de vista tecnico, para la incorporacion de tepetates a la productividad agricola pecuaria o forestal, es necesario evaluar primeramente su tasa de erosionabilidad y los problemas que confronta la mecanica del proceso erosivo, sus practicas de manejo y tomar en cuenta la variabilidad de los materiales que lo integran, para posteriormente calcular los costos de inversion y rehabilitacion, lo cual implica tiempo, trabajo y altos costos de operacion

El primer problema a resolver en la rehabilitacion de los tepetates evaluar sus las caracteristicas fisicas e hidrologicas es decir, la evaluacion de la tasa de descarga y el control de los escurrimientos superficiales dentro de la parcela agricola, esto se logra midiendo las caracteristicas fisicas de la lluvia e hidraulicas del escurrimiento superficial, la retencion y distribucion de la humedad aprovechable en los tepetates y la tasa de erosion y deposicion de las particulas de suelo en relacion con los cambios de uso y manejo del suelo y la evaluacion de la perdida de nutrimentos (nitrogeno y fosforo) El metodo utilizado para su cuantificacion consiste en medir las entradas y salidas de agua (lluvia-escurrimiento-erosion-sedimentacion), analizar la calidad de las aguas de escurrimiento, medir la infiltracion y el movimiento de agua dentro del suelo

El segundo problema consiste en planear, diseñar y determinar los movimientos de tierra con maquinaria pesada para roturar y conformar la pendiente natural de terreno, lo que ocasiona un enorme grado de complejidad y un alto costo

Un tercer problema consiste en proponer los cultivos y establecer practicas de conservacion agricolas especificas de manejo, fertilizacion y manejo de abonos organicos Estas practicas requieren informacion de campo y componentes especificos de manejo de cultivos e insumos, asi como determinar las caracteristicas edafologicas y climaticas, las cuales demandan largos periodos de tiempo en evaluacion y costos de implementacion **Oropeza-Mota, (1990)**

Una de las herramientas que pueden ser utilizadas para ayudar a resolver los problemas citados es el uso de modelos matematicos hidrologicos y de erosion, debido a que pueden proporcionar evaluaciones cuantitativas capaces de guiar a las mejores soluciones y decisiones sobre el manejo de los tepetates **Williams, (1984)** El modelo que sera considerado en nuestro proyecto de investigacion es el **SWRRB** (Simulator for Water Resources in Rural Basins) **Arnold et al (1990), Arnold et al (1991)**

OBJETIVOS GENERALES

1 Rehabilitar (roturar y conformar) tepetates e instrumentar con equipo hidrologico 22 parcelas de escurrimiento de 44 m^2 a fin de llevar a cabo registros hidrologicos continuos de entradas (lluvias) y salidas (escurrimientos, perdidas de suelo y nutrimentos)

2 Generar la informacion necesaria para determinar en cada evento de lluvia natural la relacion lluvia-escurrimiento-perdida de suelo-perdida de nutrimentos entre parcelas, y su relacion con su uso y manejo

3 Evaluar los efectos de las coberturas natural y artificial en los tepetates sobre los sistemas de manejo y tipos de explotacion agricola y pecuaria que aseguren un buen almacenamiento de agua en el suelo, el movimiento dentro del mismo y un escurrimiento superficial controlado

4 Conocer los regimenes hidricos del suelo y las tasas de erosion existentes a traves de la calibracion y la validacion del modelo matematico **SWRRB** a fin de predecir un balance hidrologico en las parcelas y llevar a cabo un mejor control de los escurrimientos superficiales y caudales maximos

OBJETIVOS PARTICULARES

Los objetivos particulares que se persiguen al manejar pequeñas parcelas individuales de escurrimiento son

1 Determinar parametros especificos de erosionabilidad en los tepetates necesarios para la validacion de los modelos matematicos propuestos

2 Establecer practicas experimentales de manejo para controlar las tasas de escurrimiento superficial y produccion de sedimentos en los tepetates

3 Manejo de la vegetacion a nivel de cultivo

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

El experimento se localiza a 10 km de la ciudad de Texcoco en el area comunal de San Miguel Tlaixpan, Edo de Mexico entre los meridianos 98° 47' 55" de longitud Oeste y 19° 29' 53" de latitud Norte al Oriente de la Cuenca de Mexico, la altura media sobre el nivel del mar es de 2,255 m y cubre una superficie total de evaluacion de aproximadamente 1,000 m² incluyendo calles y 22 lotes individuales de escurrimiento de 44 m² El sitio experimental limita al norte con La Purificacion, al sur con San Pablo Ixayoc, al este con la comunidad de Santa Catarina del Monte y al oeste con el Molino de Flores Ver plano de localizacion en la figura 1

CLIMA

De acuerdo con la clasificacion Kopen modificada por Garcia, (1981), este sitio corresponde a la parte media de la Sierra Nevada de la cuenca de Mexico con un clima C(Wo)(w)b(i') templado subhumedo La temperatura media anual es de 14 7 °C y fluctua entre 12 °C en el invierno (diciembre y febrero) y 18 °C en el verano (junio y agosto) La precipitacion esta distribuida desde de mayo hasta octubre, y es en promedio de 620 mm al año, sin embargo, desde 1993 hasta 1996 se han registrado precipitaciones anuales desde 420 mm hasta 794 mm El porcentaje de lluvias invernales es inferior a 6 % del total anual El regimen de temperatura es isotermico (Peña y Zebrowsky, 1993)

DESCRIPCION DE LOS SUELOS

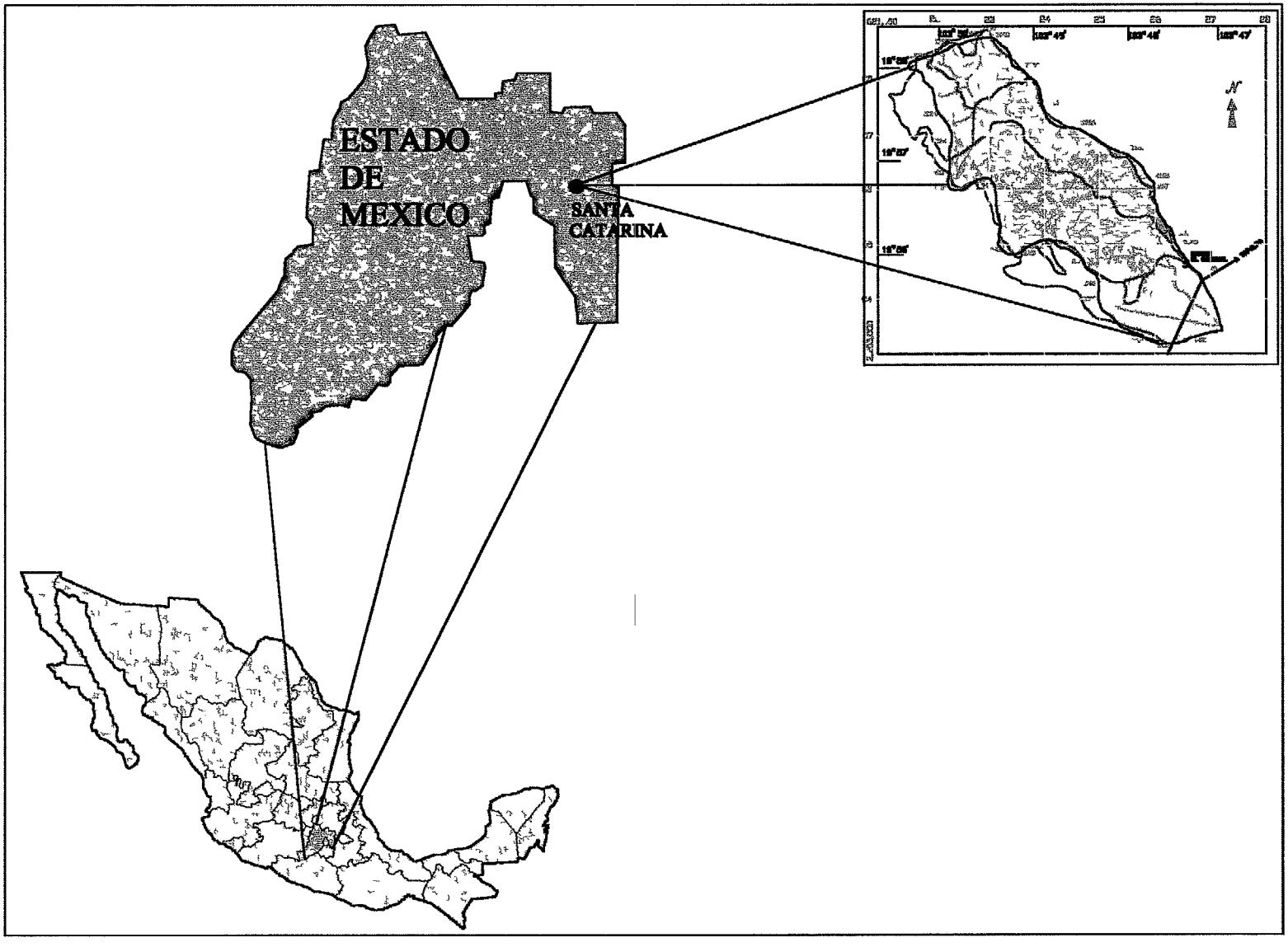
Tres perfiles de suelo que representan la serie San Miguel Tlaixpan fueron seleccionados lo mas cercano posible del area experimental Los perfiles de suelos fueron seleccionados debido a que son los mas representativos del tepetate clasificado como tipo T_3 La informacion general de los tepetates tipo T_3 se presentan en el cuadro 1

Cuadro 1 Clasificacion, factores de erosionabilidad y contenido de materia organica de los tepetates tipo T_3 en San Miguel Tlaixpan

Series	Clasificacion	Factores de erosion K (MJ mm/ha h)	A (Ton/ha/año)	Materia Organica (%)
San Miguel Tlaixpan	<u>Andisols</u> **Placaquand** Suelo que tiene fragmentos de un duripan en alguno de sus horizontes La profundidad del es de 0 10 m	0 037	12 5	0 2 - 0 4
	Duripand Este suelo tiene un regimen de humedad ustico Sus horizontes presentan estratos endurecidos e impenetrables por herramientas convencionales	0 043	14 0	0 1 - 0 3
	Lithic Haplaquand Suelo que tiene estratos endurecidos con una mezcla de lava Son suelos tipicos del area con mezcla de arcilla y limo Son muy susceptibles a la erosion hidrica	0 032	17 8	0 1 - 0 3

K = Factor erosionabilidad del suelo, A = Produccion media anual de sedimentos en el area de acuerdo con la Ecuacion Universal de Perdida de Suelo

PLANO No. 1. LOCALIZACION DEL SITIO EXPERIMENTAL SAN MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO.



6a

Los tepetates tipo T_3 de la region de Texcoco, Mexico son suelos que presentan horizontes endurecidos de origen volcanico localizados a diferentes profundidades, aparentemente, los materiales originales estan constituidos por proyecciones piroclasticas bajo forma de lluvia ardiente El tamaño de particulas corresponde a ceniza volcanica alterada en arcilla y limo fino Las observaciones de este material con microscopio optico indican que se trata de una toba fina compuesta de minerales angulosos y una distribucion porfiro-esqueletica, matriz fina y densa

El area del experimento se encuentra en una zona con afloramientos de tepetate, de acuerdo con la clasificacion FAO-UNESCO el suelo predominante es un litosol-regosol eutrico, que significa una zona completamente erosionada Esta clasificacion define al suelo como una toba andesitica con presencia de cuarzo feldespatos y vidrios volcanicos Su textura es migajon-arenosa, con estructura columnar fuetemente desarrollada, que al romperse origina bloques gruesos extremadamente duros (Ortiz y Canalo, 1977)

Estos suelos fueron estudiados tambien por Peña y Zebrowsky, (1993) quienes hicieron referencia del sitio experimental en su perfil 30, del cual indican que se localiza al pie de monte a 2,555 msnm con afloramiento de tobas y material aluvial Señalan una erosion hidrica muy severa con presencia de carcavas, pedestales y pinaculos hasta de 5 metros de altura, que indican el nivel original del suelo El material superficial de color amarillo se clasifica como tepetate T_3 el cual es la base de nuestro estudio

Las propiedades fisicas muestran que se trata de un material arcilloso muy erosionable con un comportamiento duro al estado seco, altamente poroso con baja retencion de agua, su conductividad hidraulica es muy lenta, pero se comporta como suelo friable y plastico al estado humedo Al roturarse, el tepetate se fragmenta en fisuras de retraccion alcanzando una porosidad total de 48 a 55 % posteriormente la porosidad se pierde por sellamiento, permitiendo velocidades de infiltracion hasta de 15 mm/hr y altas tasas de escurrimiento superficial **Oropeza-Mota, (1994)** En los cuadros 2 y 3 se presentan las caracteristicas fisicas y quimicas mas importantes del sitio, referido al perfil 30 levantado por Peña y Zebrowsky, (1993)

Cuadro 2 Caracteristicas fisicas del suelo correspondientes al perfil 30 del sitio experimental San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Mexico

		Textura							
Profundidad (cm)	Horizontes identificados	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Dap (g/cm³)	Dr (g/cm³)	2 5	4 2	Resistencia (kg/cm²)
0-25	Coluvial	59 6	11 9	28 5	1 57	2 64	27 0	17 7	10
25-69	Vertica	49 9	7 4	42 7	1 84	-	38 9	28 7	34
69-87	Masiva (1)	49 2	17 2	33 7	1 63	2 38	32 7	24 6	54
87-124	Masiva (2)	26 0	27 5	46 5	1 15	2 43	31 0	25 0	72
124-150	Tepetate T_2 a	54 0	18 9	27 1	1 25	2 49	31 5	22 4	26
150-200	Arcilla gris	21 0	11 8	67 1	1 24	-	42 8	33 2	13
200-220	Tepetate T_2 b (1)	49 3	16 7	34 0	1 68	2 49	33 1	25 4	53
220-235	Tepetate T_2 b (1)	50 2	24 0	25 8	1 26	2 29	27 9	22 4	153
235-260	Paleosuelo	49 5	14 0	36 5	1 19	2 53	33 6	25 7	113
260-420	Paleosuelo	50 8	15 0	34 2	1 30	2 45	31 6	22 9	80
420-460	Tepetate T_3	52 8	17 7	31 5	1 66	2 48	30 6	22 3	51

Tomado de Peña y Zebrowsky (1993) Dap = Densidad aparente Dr = Densidad real pF= Capacidad de retencion a 2 5 y 4 2

Cuadro 3 Caracteristicas quimicas del suelo correspondientes al perfil 30 del sitio experimental San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Mexico

Profundidad (cm)	Horizontes identificados	pH	$CaCO_3$	BI (meq/100g) K	Na	Ca	Mg	BI	CIC meq	SB %	C %	N %	P ppm
0-25	Coluvial	6 9	0 51	0 55	0 55	8 20	7 20	16 5	18	93	0 65	0 06	2 5
25-69	Vertica	7 0	0 02	1 10	1 00	11 30	11 20	24 6	28	88	0 40	0 05	2 5
69-87	Masiva (1)	7 5	0 60	1 40	0 90	10 20	10 70	23 2	23	100	0 10	0 04	2 5
87-124	Masiva (2)	7 6	0 30	1 20	0 70	8 40	9 10	19 4	22	88	0 04	0 04	2 5
124 150	Tepetate T_2 a	7 5	0 80	1 20	0 80	7 80	8 10	17 9	22	81	0 07	0 04	2 5
150-200	Arcilla gris	7 6	0 30	1 60	1 10	13 60	16 30	32 6	35	93	0 04	0 04	2 5
200-220	Tepetate T_2 b (1)	7 7	0 70	1 50	1 10	12 50	14 40	29 5	32	92	0 04	0 02	2 5
220-235	Tepetate T_2 b (1)	7 8		9 40	0 83	7 60	10 50	28 2	25	100	0 01	0 05	2 5
235-260	Paleosuelo	7 6	0 10	1 60	0 90	11 00	12 20	25 7	26	99	0 12	0 03	2 5
260-420	Paleosuelo	7 3	0 50	1 40	0 90	10 20	9 60	22 1	17	100	0 07	0 02	2 5
420-460	Tepetate T_3	7 7	0 20	1 50	0 90	7 80	8 20	18 4	15	100	0 04	0 02	2 5

Tomado de Peña y Zebrowsky (1993) CIC = Capacidad de intercambio cationico SB = Saturacion de bases

Las principales unidades de suelo y las fases liticas del sitio experimental y de la cuenca hidrologica del rio Coxcacoaco se presentan en los planos 2 y 3

VEGETACION

La vegetacion en el area de estudio, y en general de toda la cuenca del rio Coxcacoaco la podemos dividir en tres pisos altitudinales de vegetacion con el objeto de distinguir su diversidad, condiciones ecologicas y comunidades floristicas **Oropeza-Mota, (1980)** (ver plano 4)

Parte baja (2 250 a 2,400 msnm) En este piso la vegetacion nativa ha sido totalmente destruida, dedicandose la mayor parte del area a la agricultura de temporal y regadio En este piso se pueden distinguir cultivos de maiz, frijol, haba, cebada, trigo y algunas hortalizas No obstante, aun se observa la siguiente vegetacion ruderal y arvense constituida por

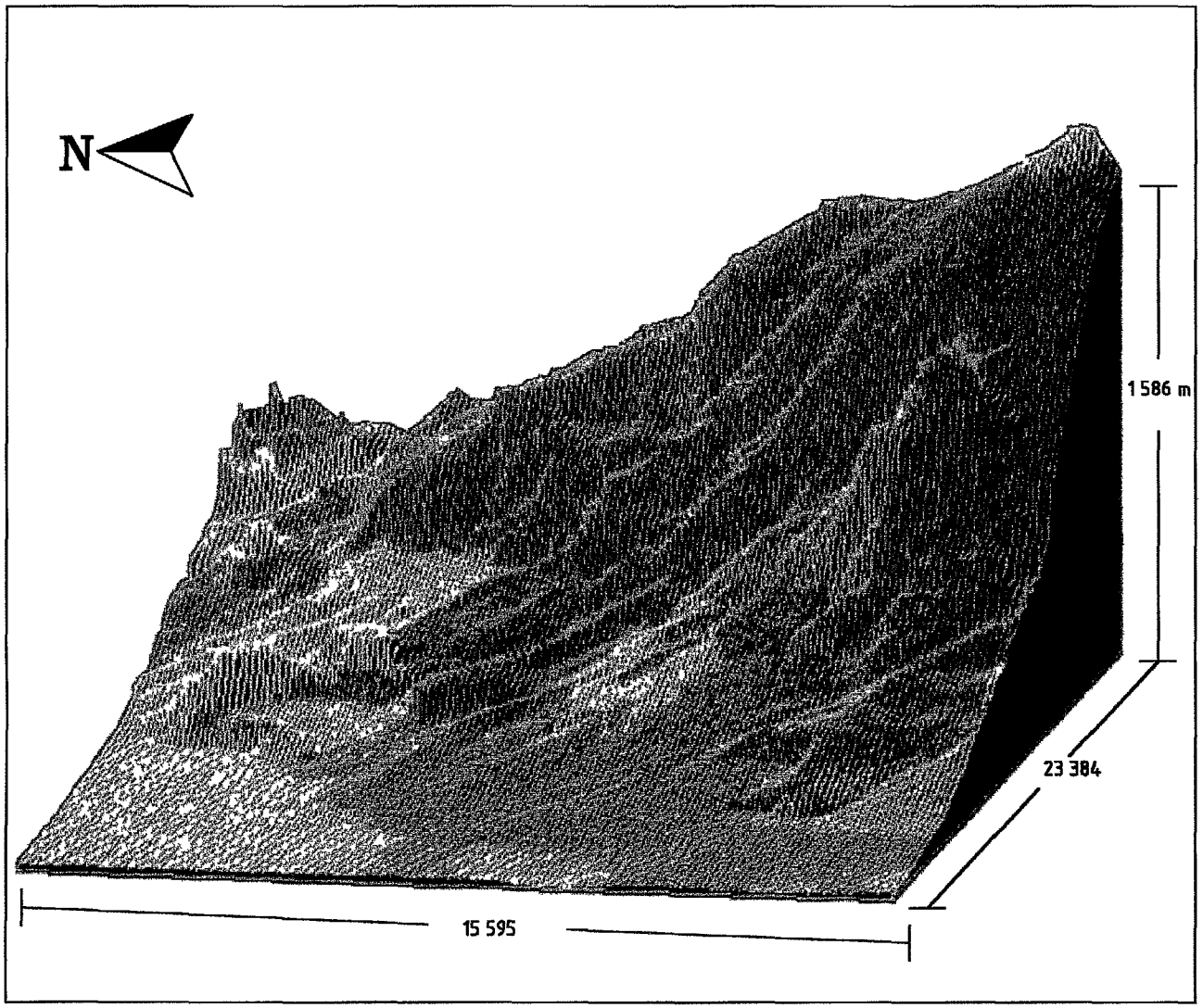
Nombre cientifico	Nombre comun
Zaluzania augusta	Cenicilla
Lepidium virginicum	Lentejilla
Mimosa biuncifera	Uña de gato
Gvmmosperma glutinosum	Tatalencho
Schinus molle	Piru o pirul
Wingandia caracasana	Tabaquillo
Amaranthus hytbridus	Quelite ceniso
Brassica camprestris	Nabo silvestre
cvnodon dactylon	Pasto pata de gallo
Cosmos bipinnatus	Girasol morado

Parte media (2 400 a 2,800 msnm) La vegetacion de este piso pertenece es arbustiva de hoja caduca tales como gramineas, leguminosas cactaceas, amarilidaceas, liliaceas y compuestas, entre las que podemos citar a las siguientes

Nombre cientifico	Nombre comun
Hilaria cenchroides	Espiga negra
Bouteloua radicosa	Navaja
Bouteloua hirsuta	Navaja belluda
Bouteloua simplex	Zacate agua
Stevia serrata	Jarilla
Aristida adscencionis	Zacate belludo
Muhlenbergia repens	Zacate hueco
Salix oxylepis	Sauce
Crataegus Mexicana	Tejocote
Senecio angulifolius	Senecio
Agave atrovirens	Maguey
Quercus microphylla	Encino enano
Opuntua streptacantha	Nopal tuna roja
Gvmmosperma glutinosum	Tatalencho
Pinus leiophylla	
Pinus montezumae	
Pinus pseudostrobus	
Pinus rudis	
Cupressus lindleyi	Cedro blanco
Juniperus monticola f compacta	Enebro
Juniperus flacida	Enebro
Alnus jorullensis	Aile
Salix bon plandiana	Sauce
Fraxinus udhei	Fresno
Buddleia	Tepozan
Taxodium mucronatum	Ahuehuete o sabino
Senecio salignus	Jarillo
Schinus molle	Piru o Pirul
Prunus capuli	Capulin

Parte alta (2,800 a 4,000 msnm) La vegetacion dominante de esta piso contempla al bosque de *Abies religiosa* que se localiza hasta alturas de 3 500 m Otras especies de bajo y alto porte son

Nombre cientifico	Nombre comun
Symphoricarpus microphyllus	Perlilla
Eupatorium glabratum	Hierba del golpe
Senecio barba-johannis	Senecio enano
Acaena alongata	Pegarropa o cardillo
brachypodium mexicanum	Santillan
Abies religiosa	Oyamel
Garrya laurifolia	Cuachichic
Pinus hartweggii	Pino de altura



LEYENDA

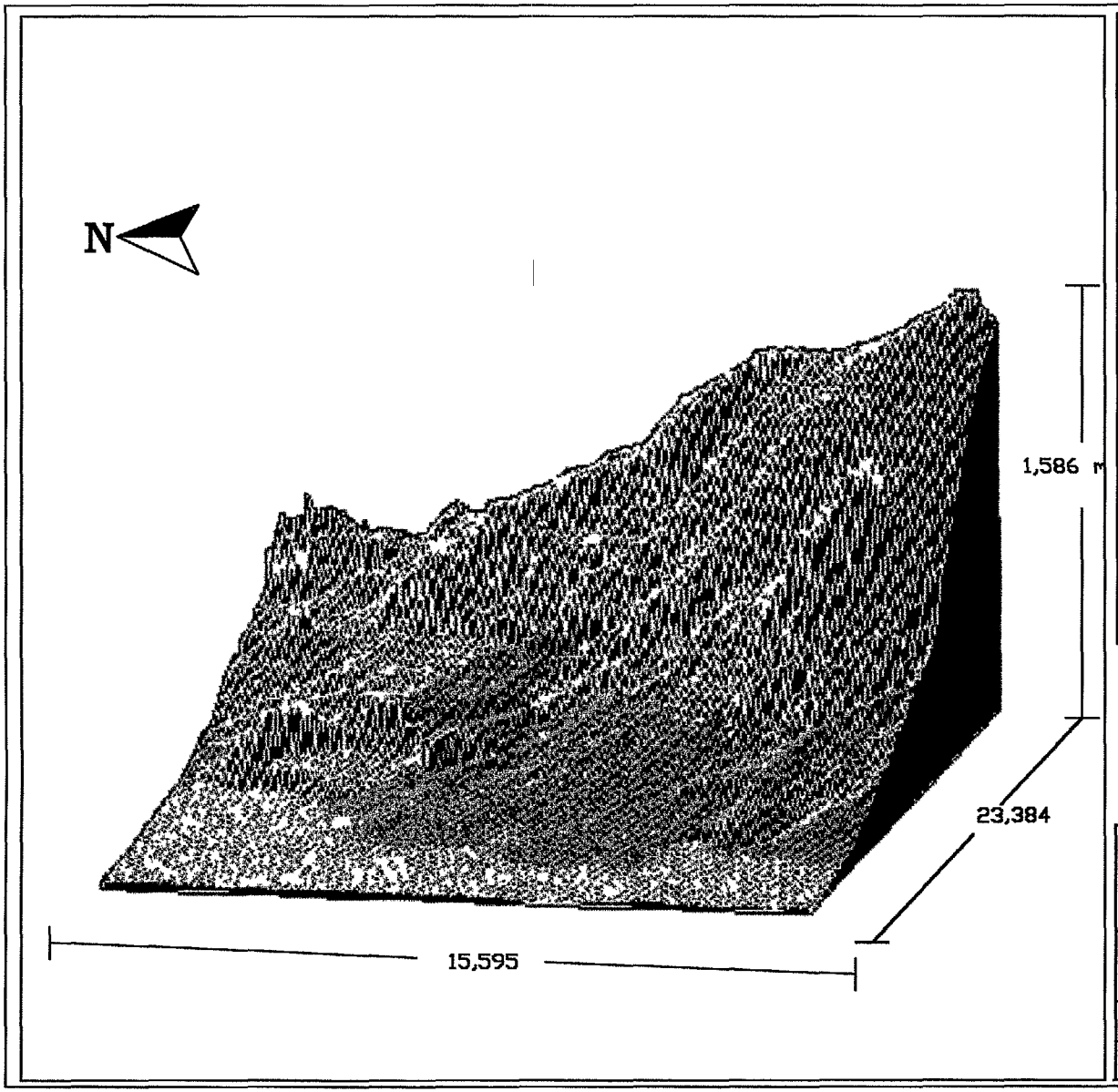
CLASE	SUPERFICIE (%)	UNIDAD DE SUELO
Bd	2 35	Cambisol districo
Be	15 48	Cambisol eutrico
Bh	15 97	Cambisol haplico
Hc	4 28	Feozem calcarico
Hh	20 18	Feozem haplico
I	9 90	Litosol
Re	2 05	Regosol eutrico
Th	3 15	Andosol humico
Tm	0 53	Andosol molico
Vc	5 90	Vertisol cromico
Vp	9 80	Vertisol pelico

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES
ESPECIALIDAD EN EDAFOLOGIA
AREA DE FISICA DE SUELOS

PLANO No. 2: UNIDADES DEL SUELO
CUENCA DEL RIO COXCOACACO

Fecha. Mayo, 1998
Superficie. 54,807 ha

PROYECTO:
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA



LEYENDA

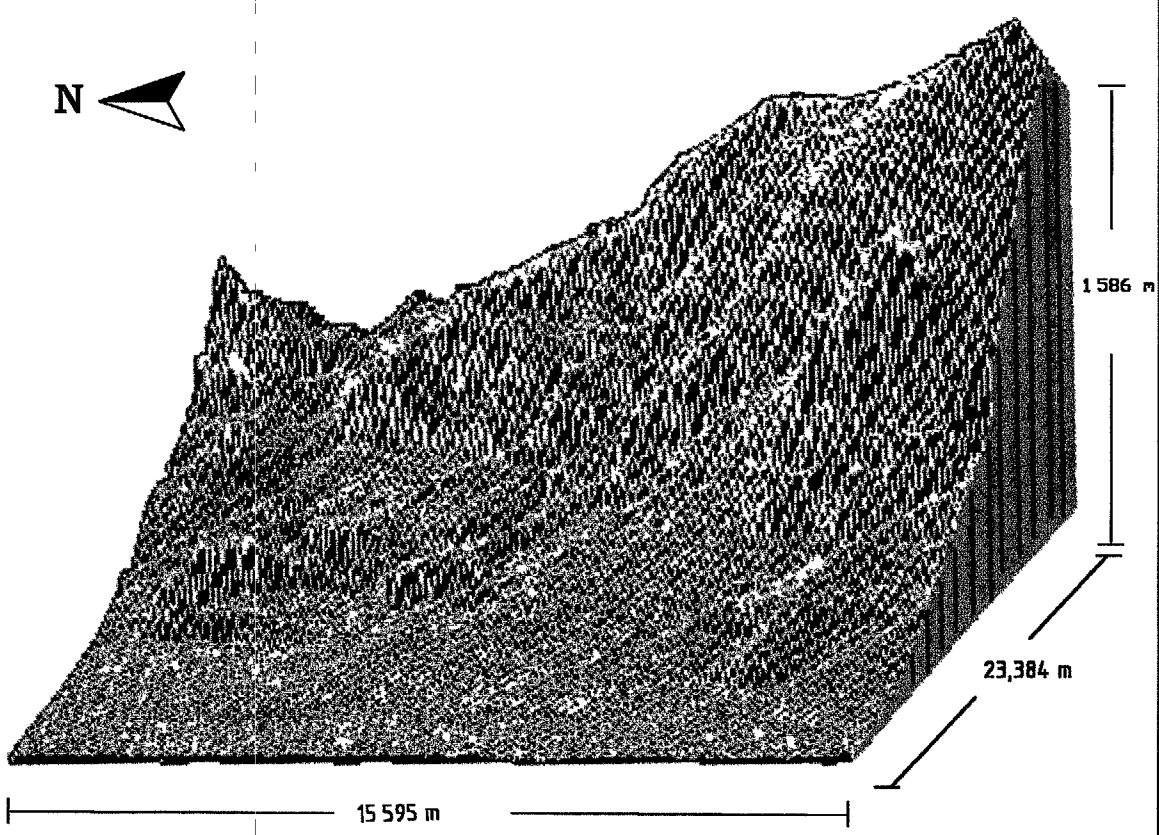
SUPERFICIE (%)	FASES FISICAS
21 63	Dúrica
1 86	Dúrica profunda
10 33	Lítica
10 29	Lítica profunda
48 16	Sin fase
7 73	Litosol

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES
ESPACIALIDAD EN EDAFOLOGIA
AREA DE FISICA DE SUELOS

PLANO No. 3 FASES FISICAS
CUENCA DEL RIO COXCOACACO

Fecha. Mayo 1998
Superficie:34 807 ha

PROYECTO:
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA



LEYENDA

TIPO SUPERFICIE USO DEL SUELO (%)	
21 52	Forestal denso
8 69	Forestal ralo
11 46	Reforestación
38 54	Agrícola
11 94	Pastizal
6 04	Erosión
1 81	Urbano

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES
ESPECIALIDAD EN EDAFOLOGIA
AREA DE FISICA DE SUELOS

PLANO No 4 USO DEL SUELO
CUENCA DEL RIO COXCOACACO

Fecha: mayo, 1998

Superficie: 34 807 ha

PROYECTO
DR. JOSE LUIS OROPEZA MOTA

26

MATERIALES

1 Vertedores tipo LH con capacidad de 2 l/seg y canal de llegada (22)
2 Limnigrafos de registro diario Stevenson FW-1 (22)
3 Pluviografo de registro diario tipo Rossbach (1)
4 Pluviometro de cubeta tipo A (1)
5 Cobertometro de espejos y miras moviles (1)
6 Lotes de escurrimiento equipados de 2 x 22 = 44 m^2 (22)
7 Infraestructura hidrologica para los 22 lotes de escurrimiento
8 Reactivos quimicos
9 Tinacos receptores de escurrimiento y sedimentos (44)
10 Transito, estadales y balizas
11 Cuatro trabajadores de campo
12 Laboratorio de Fisica de Suelos

METODOLOGIA

En el area de tepetates de San Miguel Tlaixpan, Edo de Mexico, se construyeron 22 parcelas de escurrimiento de 2 x 22 m = 44 m^2, cubriendo una superficie de 968 m^2 El area de influencia pertenece a la Cuenca del Rio Coxcoacaco situada en la zona oriente de la cuenca de Mexico

Para obtener las caracteristicas fisicas de la lluvia, del escurrimiento superficial y los parametros de erosionabilidad en el sitio experimental, se instalo un pluviografo de vuelta diaria y un pluviometro Ademas, cada uno de los 22 lotes de escurrimiento se instrumento con un vertedor tipo LH, con capacidad maxima de 2 l/seg, un limnigrafo de vuelta diaria y 2 tinacos de lamina galvanizada para almacenar conjuntamente, en cada evento de lluvia el escurrimiento superficial y los sedimentos transportados

La precipitacion y el escurrimiento superficial fueron medidos en cada evento de lluvia, y se llevo un registro continuo de las entradas (precipitacion) y salidas (escurrimiento, sedimentos, nutrimentos y materia organica) en cada lote de escurrimiento Con base en la informacion anterior, se analizaron los patrones de precipitacion, (hora de inicio y termino del evento duracion, cantidad, intensidad, energia cinetica, EI_{30}) caracteristicas fisicas del escurrimiento superficial (hora de inicio y termino, duracion, cantidad, tiempo al pico, escurrimiento maximo y esfuerzo hidraulico, coeficiente de escurrimiento, profundidad y velocidad del escurrimiento), perdida de suelo y nutrimentos mayores (nitrogeno, fosforo)

Para la determinacion de las caracteristicas fisicas de la lluvia y del escurrimiento superficial, los pluviogramas y limnigramas fueron digitalizados y procesados de manera individual mediante el programa de computo electronico SIMPLE (Sistema Integral Modular para lecturas de Pluviogramas y Limnigramas Especiales), desarrollado en el Area de Fisica de Suelos del Programa de Edafologia del Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agricolas de Montecillo, Mexico **Oropeza-Mota y Salazar, (1976)** Igualmente, la perdida de suelo y nutrimentos que resultaron de cada evento de lluvia, fueron determinados en el laboratorio del Area de Fisica de Suelos y Aguas por los metodos tradicionales

Los tratamientos considerados en el experimento son 7, con 3 repeticiones y cuatro efectos, ver cuadros 4 y 5 sobre los lotes de escurrimiento, repeticiones, diseño, manejo de los tratamientos y caracteristicas topograficas de los lotes respectivamente

Cuadro 4 Descripcion de las caracteristicas, efectos y manejo de tratamientos en los lotes de escurrimiento

		MANEJO DE LOS LOTES									
Tratamiento	Lotes	Roturado		Remocion		Malla		Cultivo		Estiercol	
		Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
T1	3, 9, 11	x		x		x			x		x
T2	2, 5, 7	x			x	x			x		x
T3	1, 8, 10	x		x			x		x		x
T4	4, 6, 12	x			x		x		x		x
T5	13 15	x			x		x	x		x	
T5	14, 16	x			x		x	x			x
T6	17, 20, 22		x		x		x		x		x
T7	18, 19, 21		x		x	x			x		x

Cuadro 5 Pendiente (S_0) y factor pendiente (S) de los lotes de escurrimiento

Lotes	Pendiente (%)	Factor (S)	Lotes	Pendiente (%)	Factor (S)
1	4 69	0 6968	12	4 75	0 4272
2	4 59	0 4102	13	6 77	0 6703
3	4 54	0 4051	14	6 77	0 6703
4	4 63	0 4144	15	6 61	0 6489
5	4 77	0 4293	16	6 61	0 6489
6	4 77	0 4293	17	8 56	0 9297
7	4 79	0 4315	18	8 47	0 9157
8	4 68	0 4197	19	8 29	0 8879
9	4 77	0 4293	20	8 45	0 9126
10	4 63	0 4144	21	9 22	1 0361
11	4 79	0 4315	22	8 68	0 9487

S= Factor por grado de pendiente de la Ecuacion Universal de Perdida de Suelo

Con el proposito de tener unidades experimentales uniformes con excepcion de los lotes testigos, todos los lotes fueron roturados a una profundidad de 40 cm, nivelados y laboreados La pendiente del terreno se uniformizo a 4 54 y 4 79 % La pendiente del terreno correspondiente a lotes con tepetates naturales y no alterados variaron entre 6 77 y 9 22 %

Efecto de la malla Se utilizo malla de plastico del numero 12 (malla de mosquitero), para medir el efecto que produce la energia cinetica de la gota de lluvia al momento de impactarse contra el suelo y para amortiguar y reducir la erosion por salpimiento en el lote

Efecto de la remocion La remocion del tepetate consiste en utilizar aperos de labranza manuales para remover al suelo y uniformizar el tamaño de los agregados entre 3 y 4 cm, para luego exponerlos a la agresividad de la lluvia y determinar la erosion maxima

Efecto sin remocion El efecto sin remocion se refiere al tepetate que no fue removido sino unicamente roturado y nivelado El laboreo manual se evito no hubo uniformidad en el tamaño de los agregados El tamaño de los agregados vario entre 3 y 8 cm luego fueron expuestos a la agresividad de la lluvia para determinar la erosion maxima

Efecto del cultivo El lote de escurrimiento fue sembrado de manera tradicional con cebada (*Hordeum vulgare*) En este lote no se utilizo la malla plastica debido a la cobertura natural de la vegetacion Con el proposito de observar el efecto de la materia organica en el tepetate, dos de los cuatro lotes sembrados con cebada, fueron abonados con 20 ton/ha de estiercol vacuno, lo que equivale a 88 kg de estiercol por lote

Los datos de lluvia, escurrimiento, sedimentos y nutrimentos observados serviran de base para determinar los parametros de erosionabilidad y validar los modelos matematicos **SWRRB** (A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management) para simular y predecir el volumen de escurrimiento y la produccion de sedimentos **Oropeza-Mota, (1990)** Los datos observados en el campo y calculados a traves de los modelos **SWRRB** seran comparados

La eficiencia sobre los datos observados directamente en campo y los calculados por el modelo se llevara a cabo utilizando el Coeficiente de Eficiencia (EF) propuesto por **Nash, (1988)**, citado por **Oropeza-Mota, (1990)** y **Oropeza-Mota, (1995)** que se escribe como sigue

$$EF = \frac{F_{obs}^2 - s^2}{F_{obs}^2}$$

donde

EF = Coeficiente de eficiencia (en %)
F_{obs} = Varianza independiente del modelo
s^2 = Varianza residual

$$F_{obs}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}\right)^2}{N}$$

donde

Q_{obs} = Escurrimiento observado (en mm)
N = Numero de eventos observados
$\bar{Q}_{obs}$ = Media de los escurrimientos observados (en mm)

El coeficiente de eficiencia EF se interpreta como la proporcion de la varianza del escurrimiento observado Q_{obs} explicado por el modelo Si, EF = 1 el ajuste es perfecto, contrariamente, si, EF < 0, el escurrimiento calculado por el modelo es peor que el simple escurrimiento medio

El cultivo sera evaluado midiendo la altura y la cobertura vegetal de plantas al azar en tramos de observacion fijos mediante el metodo del cobertometro de espejos y mirillas moviles para los cultivos del trigo, maiz y frijol, cada 10 dias respectivamente Con base en la informacion anterior se obtendran curvas de desarrollo vegetativo, las cuales se relacionaran con las perdidas de suelo y la energia cinetica de la lluvia ocurridas en la misma epoca y de esta manera definir las practicas de manejo del suelo

Los cultivos alternativos seran seleccionados usando analisis climatologico Estos cultivos se compararan con informacion local sobre su uso o intento de uso Utilizando la Ecuacion Universal de Perdidas de Suelo modificada (**RUSLE**), se calcularan las posibles combinaciones de estos cultivos con objeto de reducir el valor del factor de manejo de cultivos, C a un nivel aceptable (erosion permisible) **Rios (1989)**

De igual forma se determinara el tamaño optimo su distribucion y la estabilidad de los agregados del suelo El metodo de determinacion sera a traves del Rugosimetro Electronico de Agregados (**REA**) diseñado por el Laboratorio de Erosion de la Universidad de Purdue West Lafayette, Indiana El REA sera utilizado cada 10 dias en una repeticion y en tramos de observacion previamente determinados Los datos resultantes seran comparados con la perdida de suelo y los volumenes de escurrimiento

La descripcion general del modelo hidrologico y de erosion, **SWRRB** (Simulator for Water Resources in Rural Basins) se describe en forma completa en el apendice de este trabajo, y se explica ademas la manera en que cada uno de sus parametros y variables intervienen en el proceso fisico Se presentan tambien cuadros y volores en general utiliuzados en la simulacion

RESULTADOS

Caracteristicas fisicas de la lluvia y parametros de erosionabilidad

La lluvia provoca erosion por salpicamiento, destruye y disgrega los agregados del suelo en elementos finos haciendolos facilmente transportables por el escurrimiento, asimismo, favorece que la superficie del suelo se inunde, provocando el sellamiento de los poros, limitando la infiltracion, aumentando la tasa de escurrimiento y propiciando la perdida de suelo y nutrimentos

Con el proposito de evaluar la influencia de la cantidad de lluvia y de su intensidad sobre la erosion en los tepetates, primeramente, todos los eventos de lluvia ocurridos durante los años 1994, 1995 y 1996 fueron agrupados y clasificados por su cantidad y por su intensidad media (agresividad de la lluvia) La informacion se presenta en la figura 1

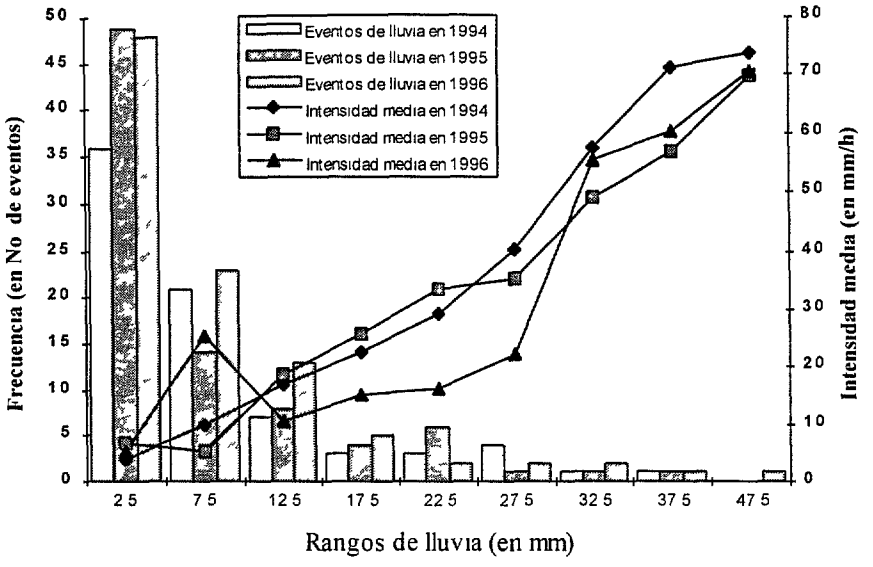


Figura 1 Distribucion grafica de la frecuencia de eventos de lluvia ocurridos y clasificacion por su cantidad e intensidad media, durante los años 1994, 1995 y 1996

El registro de lluvias fue de unicamente 7 meses, periodo que cubre los meses de abril a octubre, relativo al desarrollo vegetativo del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) De acuerdo con la figura 1 el numero total de eventos de lluvia para los años 1994 1995 y 1996 fueron de 76, 84 y 75 con una precipitacion total de 623, 511 y 518 mm respectivamente Los intervalos medios de clase de la cantidad de lluvia variaron de 2 5 hasta 47 2 mm, con intensidades medias entre los rangos observados de 3 75 y 73 8 mm/h

Otras caracteristicas fisicas de la lluvia registradas en el periodo indicado fueron la distribucion mensual de la cantidad total de lluvia y su relacion con dos de sus parametros de agresividad para causar erosion, es decir, su energia cinetica total (EC_t) y el producto de esta con la intensidad de la lluvia en 30 minutos (EI_{30}) Los parametros de agresividad anteriores fueron seleccionados debido a que son los que mayormente influyen sobre la destruccion y desgaste de los agregados del suelo los que inducen a la compactacion y formacion de costras y los de mayor sensibilidad a la erosion La distribucion de estos parametros se presenta en las figuras 2, 3, 4 y 5 para los años 1994, 1995 y 1996

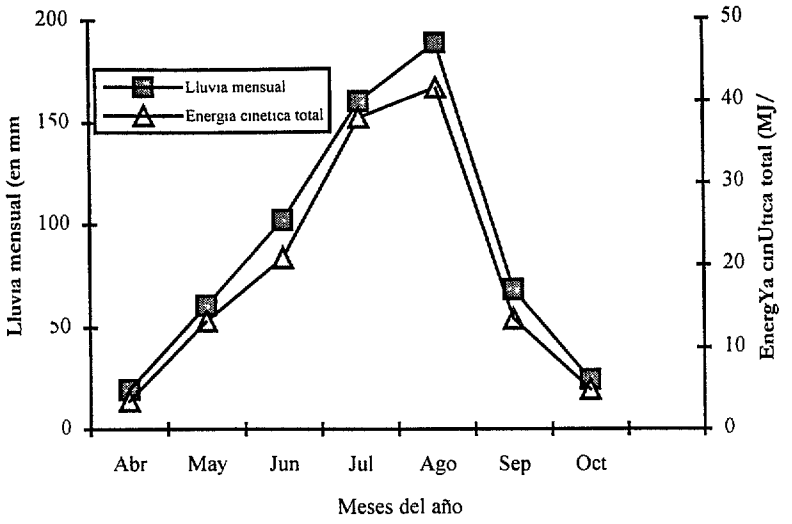


Figura 2 Representacion grafica de la distribucion de la lluvia mensual y su energia cinetica total (EC_t) durante 1994

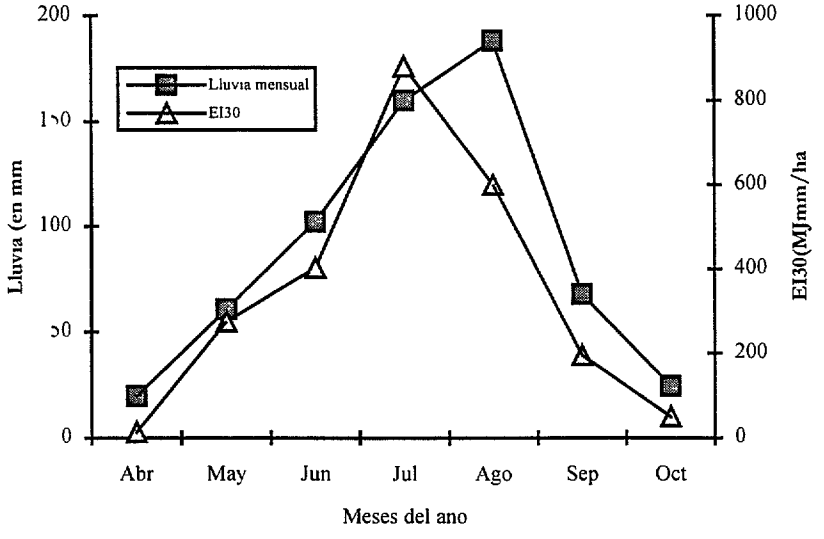


Figura 3 Representacion grafica de la distribucion de la lluvia mensual y su indice de erosionabilidad (EI_{30}) durante 1994

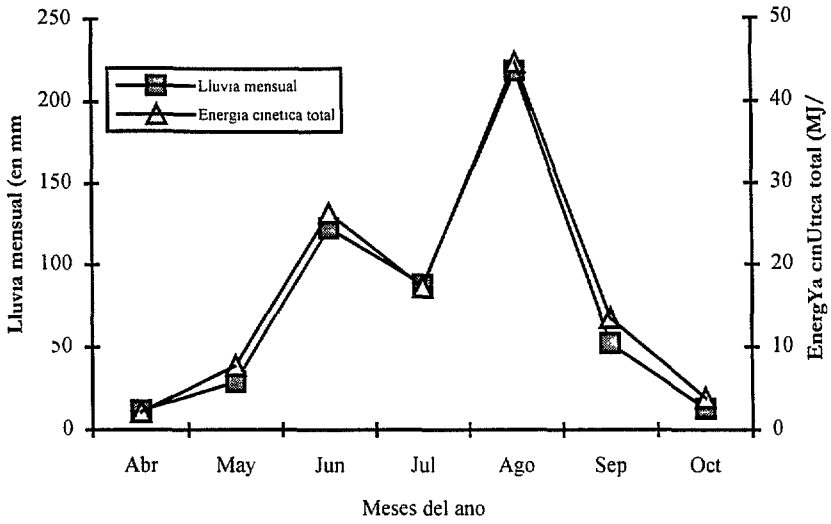


Figura 4 Representacion grafica de la lluvia mensual y su energia cinetica (EC_t) durante 1995

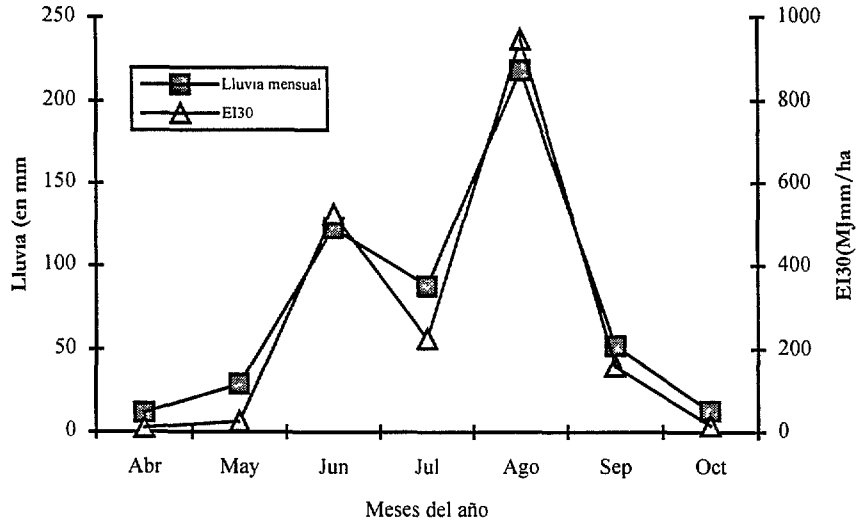


Figura 5 Representacion grafica de la lluvia mensual y su indice de erosionabilidad (EI_{30}) durante 1995

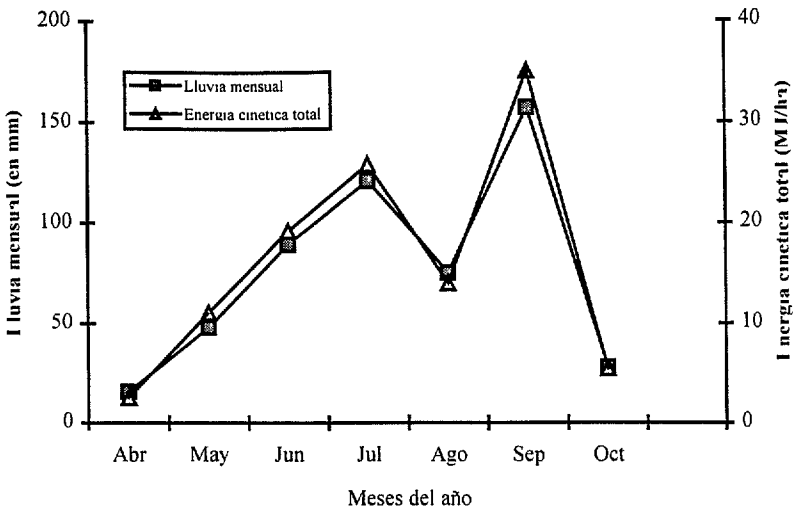


Figura 6 Representacion grafica de la lluvia mensual y su energia cinetica total (EC_t) durante 1996

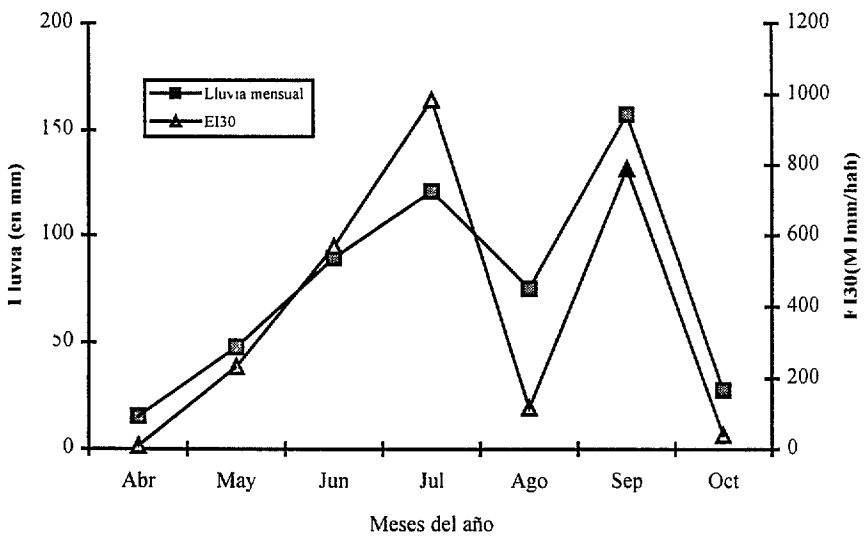


Figura 7 Representacion grafica de la lluvia mensual y su indice de erosionabilidad EI_{30} durante 1996

La accion de la lluvia sobre el suelo depende de su cantidad y de su intensidad, lo que hace evidente que una lluvia de alta intensidad de solo 10 mm provoque mas daños que una lluvia de baja intensidad de 30 mm Las figuras 2, 3, 4, 5, 6, y 7 muestran que los meses mas lluviosos y de mayor agresividad son julio y agosto para los tres años considerados en el sitio experimental

Escurrimiento superficial y caracteristicas fisicas del suelo

El escurrimiento superficial se produce cuando el tepetate no puede absorber toda el agua de lluvia que recibe, dando origen a distintas formas de pequeños canalillos Una vez que la accion dispersiva de la gota de lluvia produce el desprendimiento de las particulas individuales del suelo el escurrimiento se encarga de transportar los elementos finos, nutrimentos y materia organica del suelo disminuyendo de esta manera su potencial productivo, fisico y biologico Posteriormente los sedimentos son depositados agua abajo si la pendiente disminuye o encuentra un obstaculo de otra forma, pueden alcanzar la red de drenaje del rio y llegar hasta el lago de Texcoco

En las figuras 6 y 7 se presenta de manera general la variacion mensual de la cantidad de lluvia escurrimiento superficial y la perdida de suelo que tuvo lugar durante el periodo de abril a octubre para los años 1994 y 1995

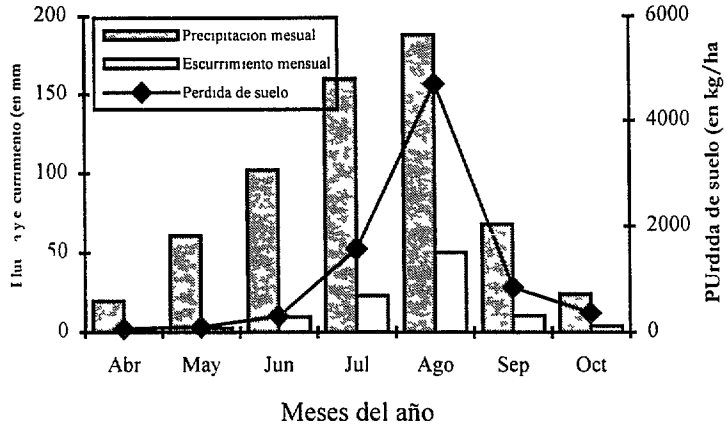


Figura 8 Representacion grafica de los valores mensuales de lluvia, del escurrimiento superficial y la perdida de suelo durante 1994

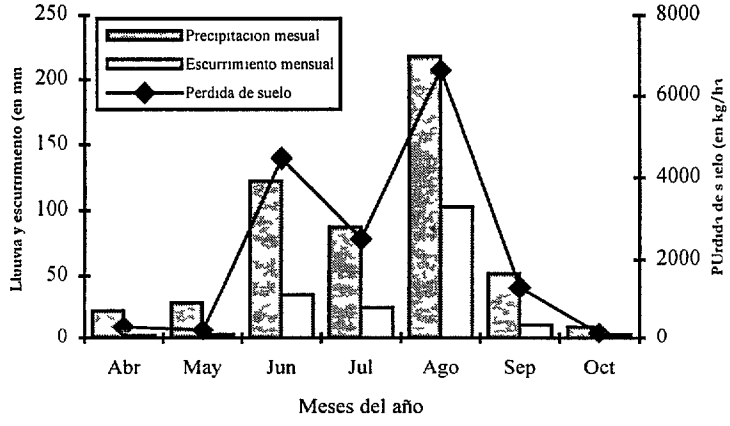


Figura 9 Representacion grafica de los valores mensuales de lluvia del escurrimiento superficial y de la perdida de suelo durante 1995

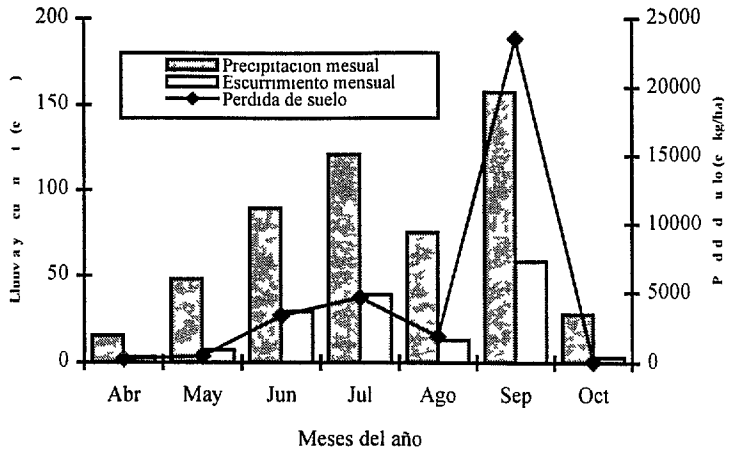


Figura 10 Representacion grafica de los valores mensuales de lluvia, del escurrimiento superficial y la perdida de suelo durante 1996

De manera mas objetiva las figuras 8 y 9 muestran la variacion total del escurrimiento superficial y la perdida de suelo por tratamiento y por lote de escurrimiento para los años 1994 y 1995

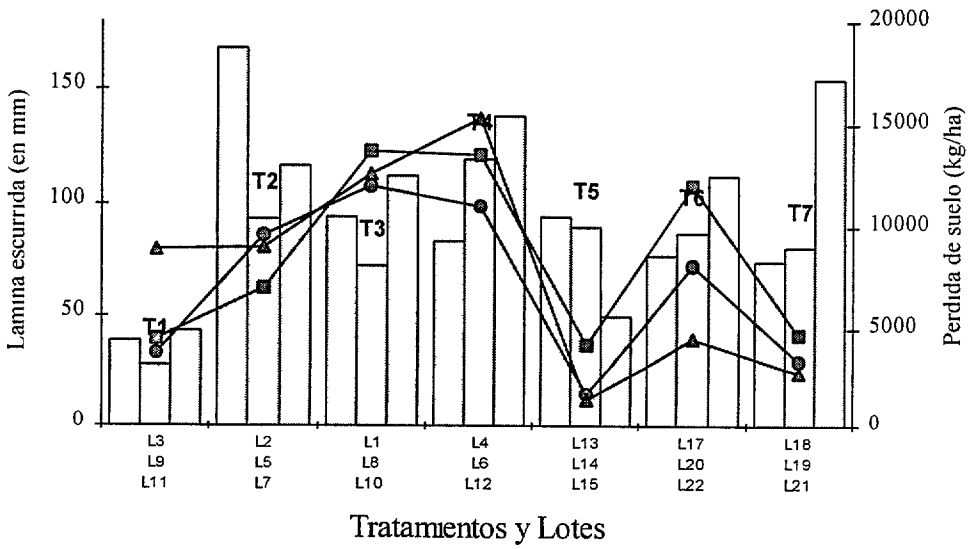


Figura 11 Presentacion grafica de la lamina escurrida y la perdida de suelo resultante de cada tratamiento y por lote de escurrimiento durante el año 1994

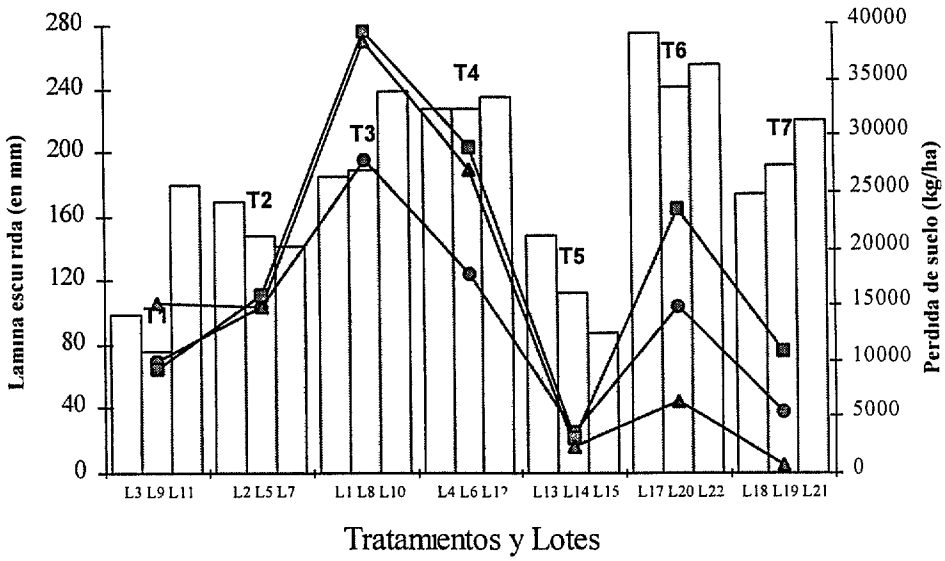


Figura 12 Presentacion grafica de la lamina escurrida y la perdida de suelo resultante de cada tratamiento y por lote de escurrimiento durante el año 1995

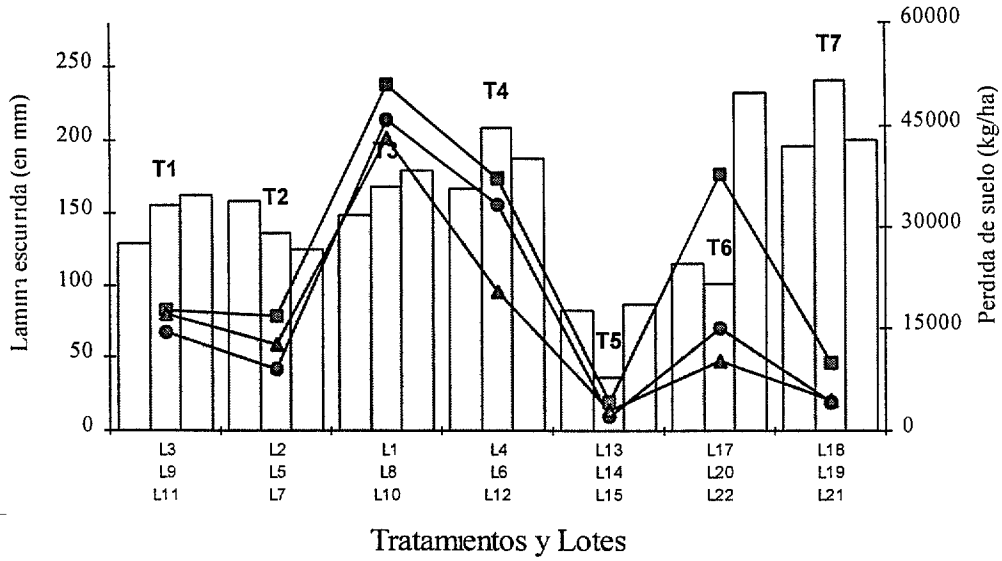


Figura 13 Presentacion grafica de la lamina escurrida y la perdida de suelo resultante de cada tratamiento y por lote de escurrimiento durante el año 1996

Las graficas 11, 12 y 13 muestran que en todos los tratamientos y en cada repeticion, los lotes presentaron altas tasas de escurrimiento superficial Lo anterior se debe a que los tepetates presentan bajo porcentaje de porosidad y generalmente, la mayor parte de los poros se encuentran sellados por elementos finos del suelo

A continuacion, en las figuras 14, 15 y 16, presentamos los resultados correspondientes a la perdida de suelo total por tratamiento y por lote para los tres años de evaluacion

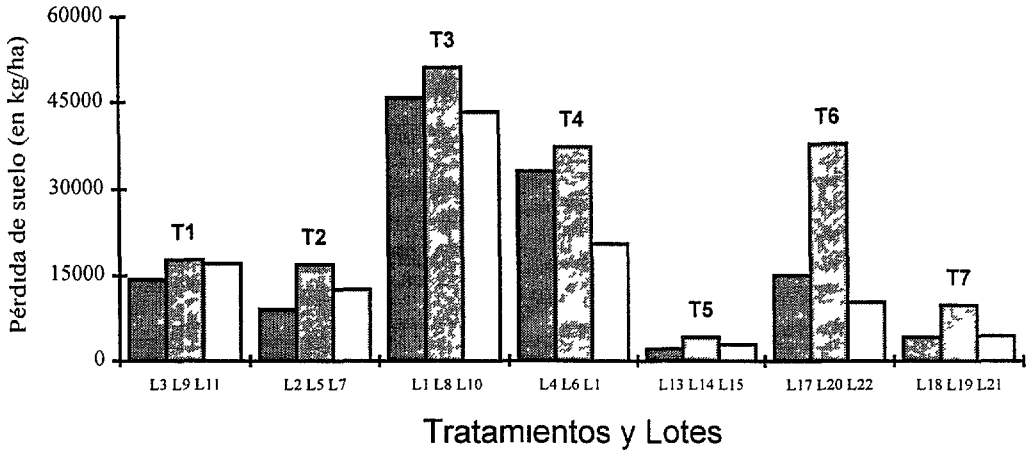


Figura 14 Representacion grafica de la perdida de suelo en los lotes de escurrimiento correspondiente a los 7 tratamientos y sus repeticiones durante 1994

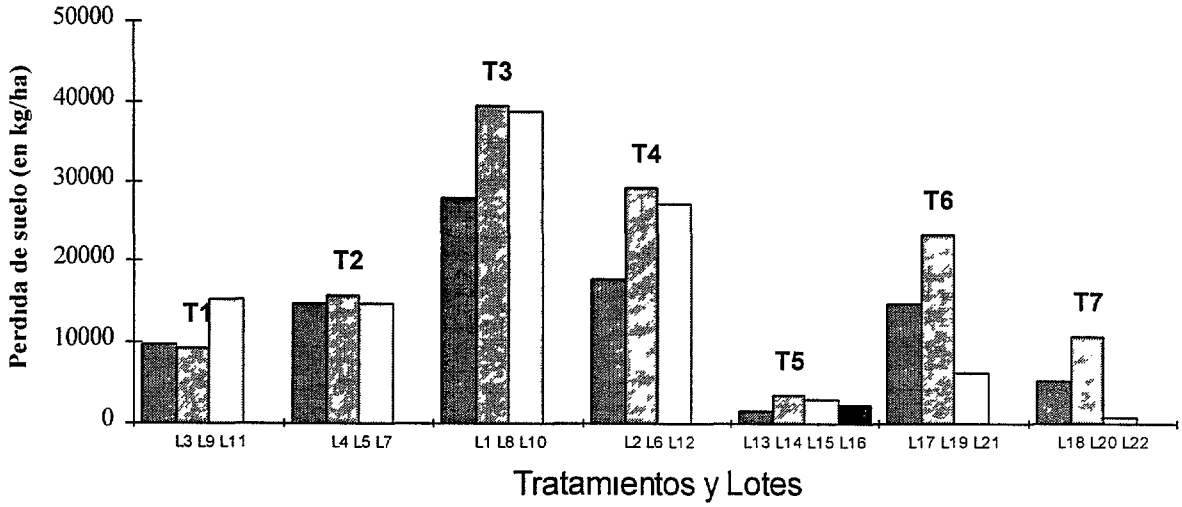


Figura 15 Representacion grafica de la perdida de suelo en los lotes de escurrimiento correspondiente a los 7 tratamientos y sus repeticiones durante 1995

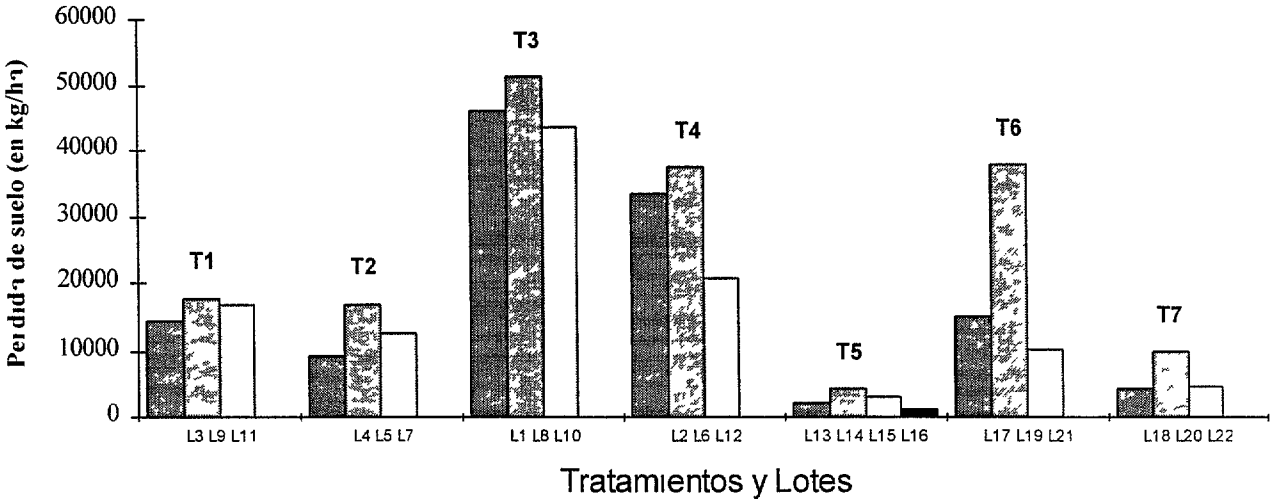


Figura 16 Representacion grafica de la perdida de suelo en los lotes de escurrimiento correspondiente a los 7 tratamientos y sus repeticiones durante 1996

Las graficas 10 y 11 muestran que la perdida de suelo por tratamiento y por lote, para los dos años de evaluacion resulto ser muy consistente, lo que nos permite aseverar que hubo consistencia experimental en los tratamientos y en su manejo No obstante, la diferencia en perdida de suelo entre 1994 y 1995 fue muy significativa, ya que las perdidas de suelo de 1995 se multiplicaron por 2 con respecto a las de 1994 Las diferencias en cantidad de suelo perdido se debe al incremento de la energia cinetica total de la lluvia en 1995 no obstante la diferencia en el numero de eventos y la cantidad de la lluvia Esta misma observacion la detectamos en las figuras 3 y 5

Escurrimiento, perdida de suelo y perdida de nutrimentos

Los tepetates naturales expuestos a la erosion son suelos que producen altas tasas de escurrimiento superficial y generalmente son pobres en nitrogeno y fosforo total y materia organica Se ha reportado que la baja fertilidad es la principal limitante de los tepetates para su reincorporacion agricola Algunos experimentos desarrollados sobre tepetate, muestran que el suministro de nitrogeno y fosforo son los elementos que se encuentran, en general, en niveles inferiores a la demanda que ejercen los cultivos

A continuacion, los cuadros 6, 7 y 8 presentan las tasas de escurrimiento superficial, la perdida de nutrientes totales anuales (nitrogeno y fosforo total) y la perdida de suelo total anual por tratamiento y por lote para los años 1994, 1995 y 1996 Su representacion grafica se presentan en las figuras 17 a la 22 respectivamente

Cuadro 6 Resultados del escurrimiento superficial medido y calculado por el modelo SWRRB perdida de nitrogeno total perdida fosforo total y perdida total de suelo medido y calculado por tratamiento y por lote registrados durante el año 1994

T	Lotes	Q_{obs} (en mm)	Q_{cal} (en mm)	N (kg/ha)	P (en kg/ha)	A_{obs} (en kg/ha)	A_{cal} (en mm)
T1	3	33 50	37 15	4 41	0 94	3 819 73	4 129 11
	9	21 65	28 40	4 31	1 13	4 531 52	4 618 79
	11	43 77	47 10	4 58	1 00	8 881 13	8 913 45
T2	2	168 65	171 45	3 15	1 16	9 610 65	10 114 78
	5	93 94	97 05	3 29	1 13	7 003 39	7 310 40
	7	117 42	122 35	3 10	1 25	8 970 57	9 112 61
T3	1	94 62	100 81	6 34	1 78	12 004 42	11 845 09
	8	72 59	81 29	6 01	1 89	13 748 60	14 281 37
	10	112 43	124 64	6 18	1 86	12 567 73	11 955 93
T4	4	83 30	91 45	5 16	2 23	10 955 90	10 751 10
	6	120 06	127 37	5 20	1 94	13 451 71	13 879 23
	12	138 49	141 64	4 99	1 74	15 348 94	15 873 19
T5	13	94 88	103 31	1 02	0 64	1 699 04	2 981 64
	14	89 87	91 37	0 88	0 71	4 244 83	3 750 41
	15	46 99	47 07	0 97	0 56	1 391 51	2 561 88
	16		114 81				12 846 91
T6	17	77 44	81 55	2 23	1 09	8 142 04	7 132 16
	20	87 01	94 16	2 17	1 17	12 002 34	11 102 55
	22	112 22	117 89	2 08	1 03	4 549 60	5 141 44
T7	18	75 11	90 11	1 91	1 92	3 371 76	3 811 22
	19	81 32	97 23	1 81	1 99	4 672 05	4 639 00
	21	155 09	169 12	1 93	1 73	2 798 99	2 917 81

Q_{obs} = Escurrimiento superficial (en mm) N = Perdida de nitrogeno total (en kg/ha)
Q_{cal} = Escurrimiento superficial (en mm) P = Perdida de fosforo total (en kg/ha)
A_{obs} = Pérdida total de suelo (en kg/ha) A_{cal} = Perdida total de suelo (en kg/ha)

Cuadro 7 Resultados del escurrimiento superficial medido y calculado por el modelo SWRRB perdida de nitrogeno total perdida fosforo total y perdida total de suelo medido y calculado por tratamiento y por lote registrados durante el ano 1995

T	Lotes	Q_{obs} (en mm)	Q_{cal} (en mm)	N (kg/ha)	P (en kg/ha)	A (en kg/ha)	A_{cal} (en kg/ha)
T1	3	99 01	112 28	3 29	1 35	9 883 20	10 119 13
	9	76 17	81 45	2 35	1 14	9 175 69	9 294 71
	11	179 98	207 64	4 86	1 46	15 289 52	15 544 38
T2	2	169 35	161 31	3 84	1 54	14 783 15	15 284 17
	5	148 84	164 99	3 31	1 13	15 911 95	16 191 37
	7	141 77	160 11	3 68	1 26	14 878 28	15 267 11
T3	1	184 39	207 34	5 64	2 12	27 805 38	28 522 13
	8	188 89	203 38	5 97	2 84	39 481 52	40 171 55
	10	238 30	224 28	7 73	3 28	38 593 38	39 651 11
T4	4	226 92	231 19	5 85	3 92	17 822 97	18 124 15
	6	226 67	247 17	5 43	3 14	29 025 87	29 138 25
	12	234 13	251 14	6 49	3 45	27 033 99	27 294 00
T5	13	72 30	109 11	1 01	0 42	1 471 22	1 761 43
	14	148 83	171 22	1 43	0 73	3 533 77	3 650 11
	15	113 20	137 00	0 99	0 53	3 076 35	3 164 05
	16	87 148	100 11	0 87	0 79	2 293 10	2 746 21
T6	17	274 92	281 55	2 54	1 19	14 912 91	14 992 91
	20	240 64	291 61	2 13	1 73	23 478 42	24 009 64
	22	255 08	277 15	2 03	1 96	6 269 79	6 841 03
T7	18	173 83	190 14	2 25	1 52	5 349 12	5 184 26
	19	191 84	217 33	2 59	1 98	10 902 63	11 331 72
	21	218 90	229 93	2 35	1 64	6 269 79	6 611 94

Q_{obs} = Escurrimiento superficial (en mm) N = Perdida de nitrogeno total (en kg/ha)
Q_{cal} = Escurrimiento superficial (en mm) P = Perdida de fosforo total (en kg/ha)
A_{obs} = Perdida total de suelo (en kg/ha) A_{cal} = Perdida total de suelo (en kg/ha)

Cuadro 8 Resultados del escurrimiento superficial medido y calculado por el modelo SWRRB perdida de nitrogeno total perdida fosforo total y perdida total de suelo medido y calculado por tratamiento y por lote registrados durante el año 1996

T	Lotes	Q (en mm)	Q_{cal} (en mm)	N (Kg/ha)	P (en kg/ha)	A (en kg/ha)	A_{cal} (en kg/ha)
T1	3	128 80	131 50	3 71	1 10	14 353 37	14 418 11
	9	155 66	159 28	2 64	1 17	17 765 92	17 983 19
	11	161 87	170 09	4 41	1 32	17 058 41	17 324 81
T2	2	158 78	163 56	3 72	1 63	9 109 72	10 181 67
	5	136 29	138 37	3 18	1 59	16 898 18	16 283 54
	7	123 97	128 71	3 73	1 61	12 608 87	12 834 76
T3	1	148 05	152 31	5 82	3 35	45 784 64	45 824 37
	8	168 43	170 83	6 16	3 41	51 102 07	51 621 30
	10	179 78	186 91	7 93	3 27	43 302 24	43 672 91
T4	4	166 72	170 33	6 09	3 07	33 150 42	33 411 53
	6	208 18	215 37	5 64	3 15	37 158 23	37 161 25
	12	187 00	190 78	6 63	3 29	20 493 00	20 531 18
T5	13	83 19	90 44	0 93	0 32	2 103 41	2 643 28
	14	36 55	43 34	0 83	0 49	4 214 09	4 350 17
	15	86 27	90 37	1 03	0 5 3	2 930 92	3 137 46
	16	71 10	78 77	0 79	0 43	1 189 09	1 346 37
T6	17	114 83	121 49	2 28	1 83	15 006 38	15 192 98
	20	101 28	113 81	2 09	1 79	37 662 59	38 108 17
	22	231 83	244 26	2 01	1 80	10 283 63	10 134 00
T7	18	196 37	201 87	2 56	2 02	4 203 18	5 114 64
	19	241 05	253 87	2 52	1 99	9 801 14	10 131 92
	21	200 47	213 58	2 47	1 96	4 466 82	4 434 37

Q_{obs} = Escurrimiento superficial (en mm) N = Perdida de nitrogeno total (en kg/ha)
Q_{cal} = Escurrimiento superficial (en mm) P = Pérdida de fosforo total (en kg/ha)
A_{obs} = Perdida total de suelo (en kg/ha) A_{cal} = Perdida total de suelo (en kg/ha)

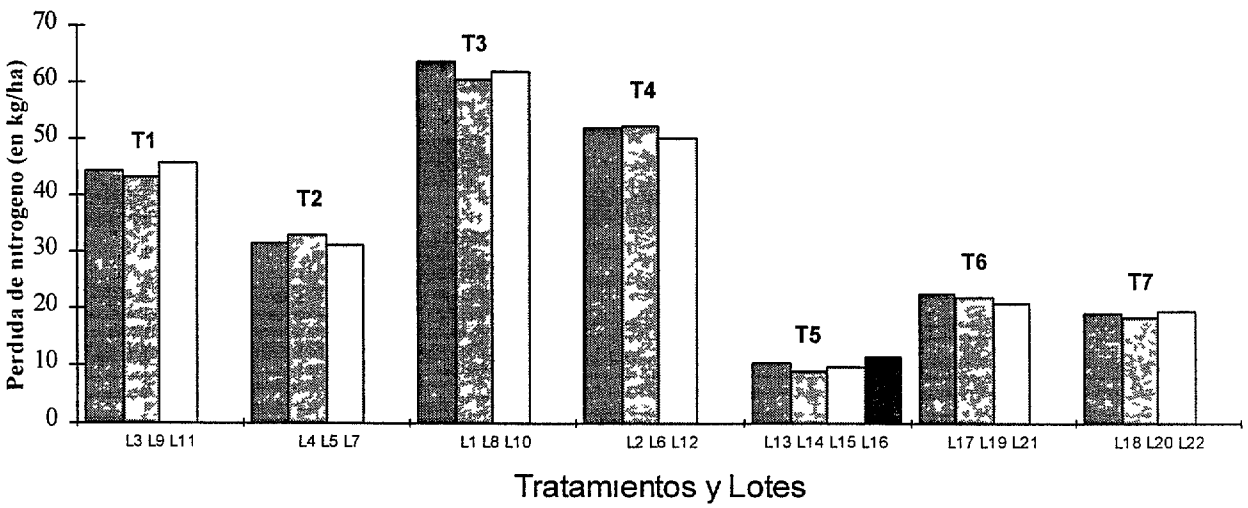


Figura 17 Representacion grafica de la perdida de nitrogeno por tratamiento y por lote durante el año 1994

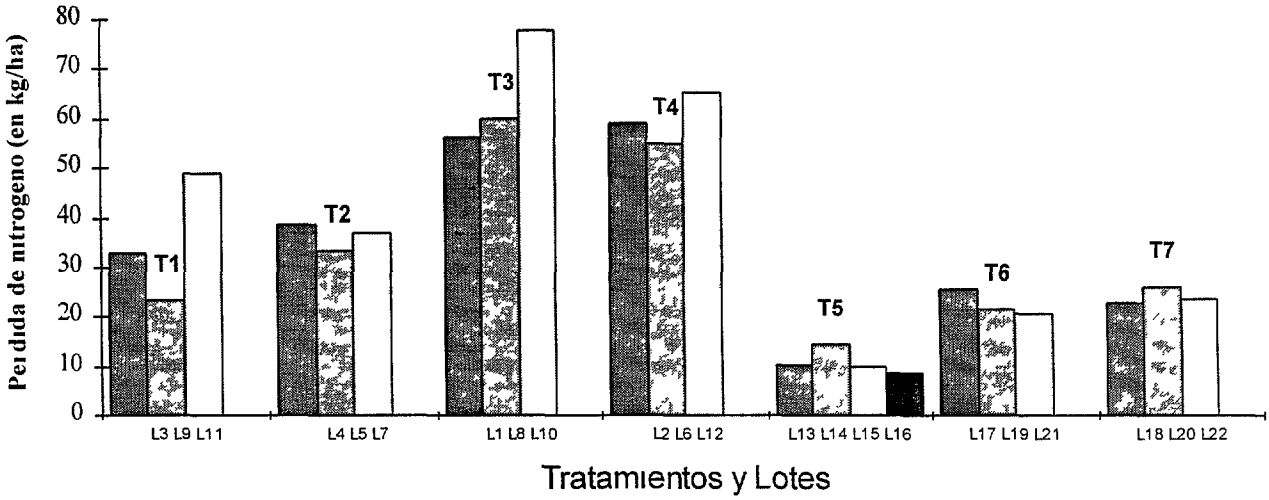


Figura 18 Representacion grafica de la perdida de nitrogeno por tratamiento y por lote durante el año 1995

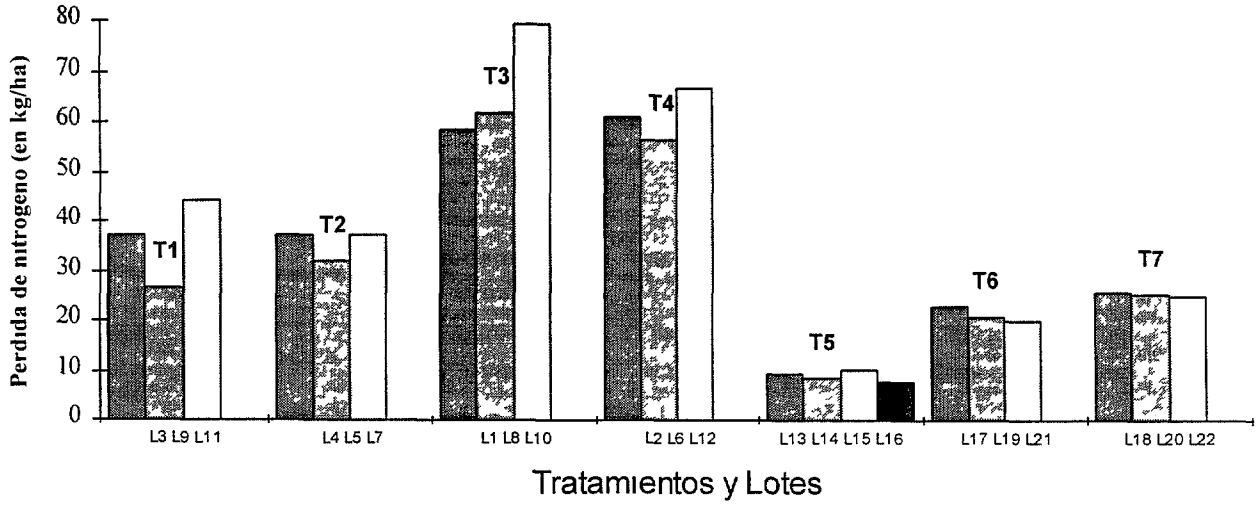


Figura 19 Representacion grafica de la perdida de nitrogeno por tratamiento y por lote durante el año 1996

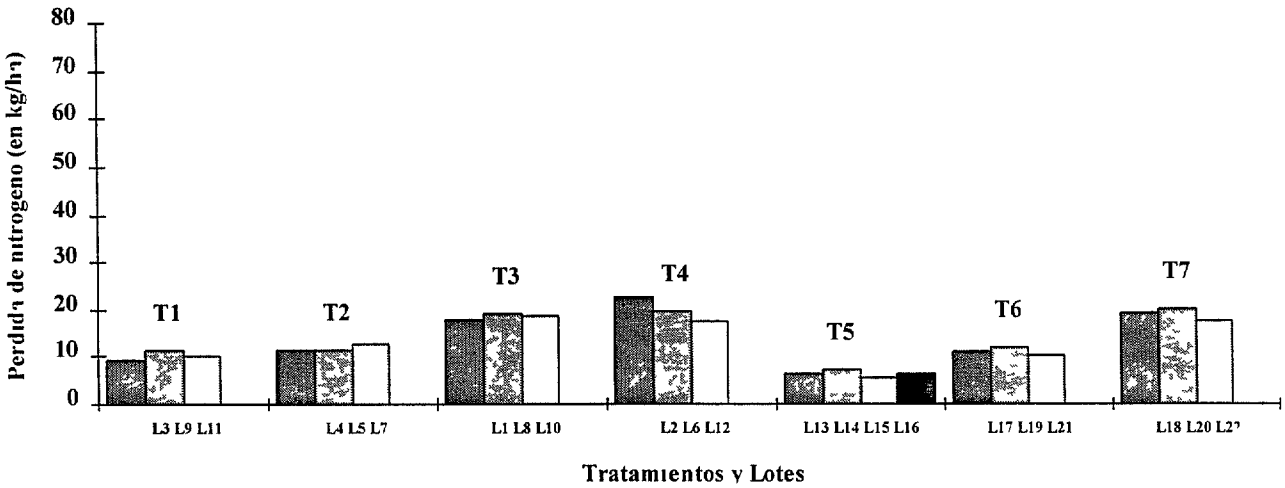


Figura 20 Representacion grafica de la perdida de fosforo por tratamiento y por lote durante el año 1994

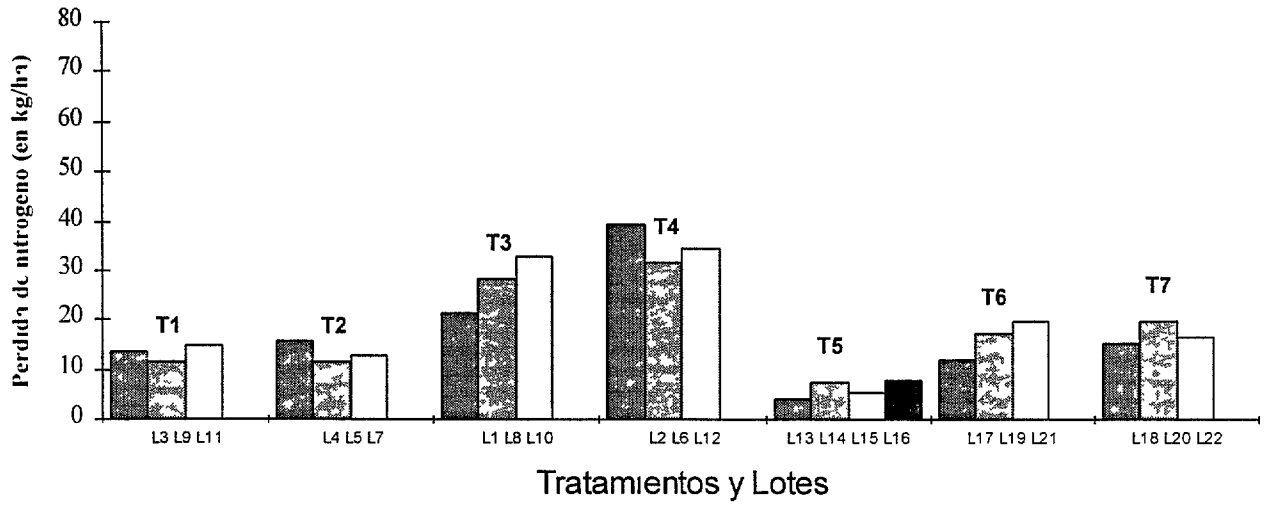


Figura 21 Representacion grafica de la perdida de fosforo por tratamiento y por lote durante el año 1995

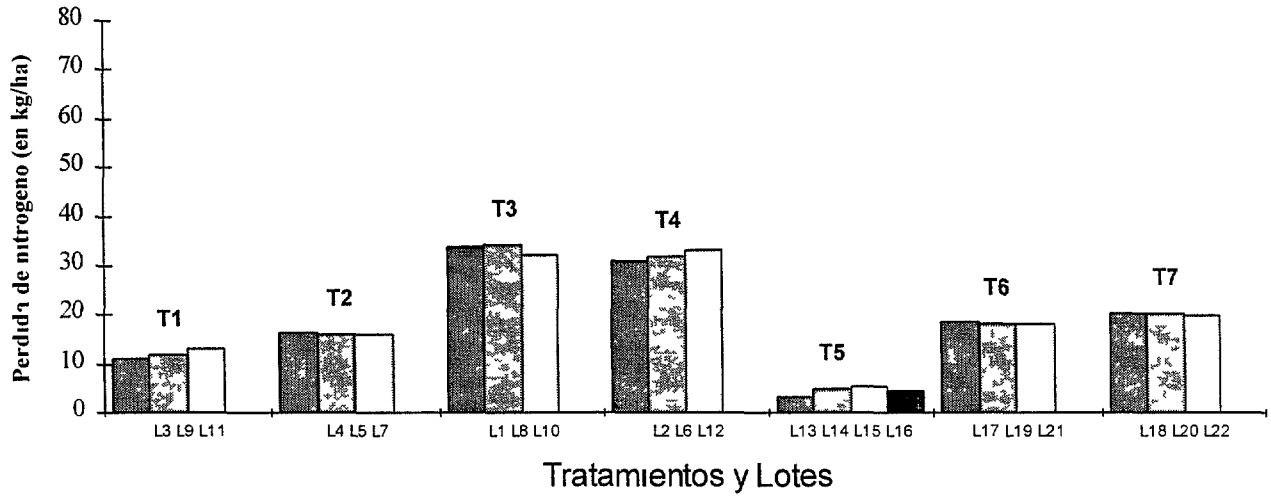


Figura 22 Representacion grafica de la perdida de fosforo por tratamiento y por lote durante el año 1996

A pesar de la baja fertilidad que la literatura reporta para los tepetates, durante los tres años de evaluacion de nuestro experimento, los tepetates T3 presentaron una enorme perdida de nutrimentos arrastrados por el escurrimiento superficial, lo que hace pensar que el origen del nitrogeno provenga de la lluvia, ya que en el experimento no se utilizo ningun tipo de fertilizacion mineral, unicamente, los lotes 13 y 15 del tratamiento T5 fueron abonados con 20 t/ha de estiercol vacuno, lo que equivale a 88 kg de estiercol por lote Sin embargo, las mayores perdidas de nitrogeno y fosforo ocurrieron en los lotes 1, 8 y 10 representados por el tratamiento T3 y los lotes 4 6 y 12 representados por el tratamiento T4 respectivamente De igual manera, las mayores tasas de escurrimiento y perdida de suelo fueron muy coincidentes para los mismos lotes y tratamientos

Hidrogramas y sedigramas

Durante el desarrollo del experimento, algunos eventos de lluvia y escurrimiento fueron muestreados a fin de observar el comportamiento del escurrimiento y la perdida de suelo A continuacion se presenta en modo grafico la lluvia, el escurrimiento superficial medido y la produccion de sedimentos distribuidos en el tiempo que transcurrio el evento de lluvia ocurrido el 14 de agosto de 1995 Las caracteristicas de la evolucion de lluvia, el escurrimiento superficial y la produccion de sedimentos se presentan en los cuadros 9 y 10 respectivamente Asimismo, en la figura 23 se muestra la distribucion grafica de la evolucion del escurrimiento y la produccion de los sedimentos Es importante hacer notar que esta informacion se registro para el lote 20 del tratamiento T6 no roturado, sin remocion, sin malla y sin cultivo

Cuadro 9 Caracteristicas de la lluvia ocurrida el 14 de agosto de 1995 para el lote 20 del tratamiento T6, no roturado, sin remocion, sin malla y sin cultivo

Fecha	Inicio (h min)	Final (h min)	D_{ll} (min)	L_{ll} (mm)	I_{30} (mm/h)	EC_t (MJ/ha)	EI_{30} (MJ mm/ha h)
140895	13 29	19 26	388	23 97	32 18	5 51	177 35

D_{ll} = Duracion del evento de lluvia L_{ll} = Lamina llovida, I30 = Intensidad de la lluvia en 30 minutos, Ec_t = Energia cinetica total EI_{30} = Indice de erosionabilidad de Wishmeier

Cuadro 10 Caracteristicas del escurrimiento superficial ocurrido el 14 de agosto de 1995 para el lote 20 del tratamiento T6 no roturado, sin remocion, sin malla y sin cultivo

Inicio (h min)	Final (h min)	D_e (min)	T_p (min)	Q_{max} (L/s)	Ve (L)	Le (mm)	CE	A (kg/ha)
14 12	18 44	272	166	0 431	609 74	13 86	0 58	1,185 91

T_p = Tiempo al pico, D_e = Duracion del escurrimiento, Ve = Volumen escurrido, Le = Lamina escurrida, CE = Coeficiente de escurrimiento A = Perdida de suelo

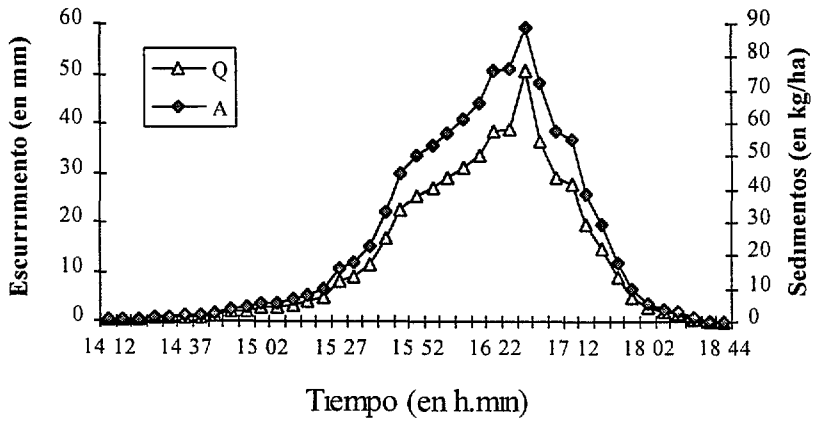


Figura 23 Comportamiento grafico del hidrograma (Q) y del sedigrama (A) durante el evento de lluvia registrado el 14 de agosto de 1995

La grafica de la figura 23 muestra que para el lote 20 del tratamiento T6 no roturado, sin remocion sin malla y sin cultivo, la produccion de sedimentos (sedigrama) resulto ser superior al escurrimiento superficial (hidrograma) durante la evolucion del evento Lo anterior ya ha sido reportado por **Fenton, (1980)** y **Larson et al (1985)** y otros autores Sin embargo, otros registros similares realizados en lotes distintos mostraron fuertes diferencias entre la produccion de sedimentos y el escurrimiento para lluvias de menor magnitud

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigacion seran de utilidad practica para la roturacion de los tepetates ademas de prover un punto de partida para estudios futuros sobre control de erosion hidrica y rehabilitacion de tepetates

Considerando un registro de lluvias de unicamente 7 meses, el numero total de eventos de lluvia para los años 1994, 1995 y 1996 fueron de 76, 84 y 75 con una precipitacion total de 623, 511y 518 mm respectivamente Los intervalos medios de clase de la cantidad de lluvia variaron de 2 5 hasta 47 2 mm con intensidades medias entre los rangos observados de 3 75 y 73 8 mm/h

Otras caracteristicas fisicas de la lluvia registradas en el periodo indicado fueron la distribucion mensual de la cantidad total de lluvia y su relacion con dos de sus parametros de agresividad la energia cinetica total (EC_t) y el producto de esta con la intensidad en 30 minutos (EI_{30}) Los parametros de agresividad anteriores fueron seleccionados debido a que son los que mayormente influyen sobre la destruccion y desgaste de los agregados del suelo, los que inducen a la compactacion y formacion de costras y los de mayor sensibilidad a la erosion

Todos los tratamientos y sus repeticiones presentaron altas tasas de escurrimiento superficial Lo anterior se debe a que los tepetates presentan bajo porcentaje de porosidad y generalmente, la mayor parte de los poros se encuentran sellados por elementos finos del suelo El coeficiente de escurrimiento presento invariablemente alta correlacion con la perdida de suelo, esta correlacion fue consistente a lo largo de los tres años de observacion

La perdida de suelo por tratamiento y por lote, para los dos años de evaluacion resulto ser muy consistente, lo que nos permite aseverar que hubo consistencia experimental en los tratamientos y en su manejo No obstante, la diferencia en perdida de suelo entre 1994, 1995 y 1996 fue muy significativa, ya que las perdidas de suelo de 1995 se multiplicaron por 2 con respecto a las de 1994, y las del 1996 se multiplicaron por 2 respecto a las de 1995 Las diferencias en cantidad de suelo perdido se debe al incremento de la energia cinetica total de la lluvia en 1995 y 1996, no obstante la diferencia en el numero de eventos y la cantidad de la lluvia, de 623, 511 y 518 mm respectivamente

Probablemente la perdida mas severa en la productividad a largo plazo a partir de la erosion de los tepetates es la perdida en la capacidad de retencion de agua disponible para la planta Debido al sellamiento y/o taponamiento de los poros del suelo por particulas finas, se incrementa el escurrimiento y la perdida en la capacidad de retencion de agua disponible son mas severas en los tepetates naturales que en los roturados

Puesto que la lluvia y el escurrimiento varian a lo largo de los lotes, resulta dificil estimar una perdida de rendimiento general para esta serie experimental Los valores en el rendimiento de la cebada son estimaciones precisas y, por lo tanto, aportan considerables resultados Es importante hacer notar que la produccion de cebada en los lotes con adicion de materia organica fue ligeramente mayor en contraste en contraste con los lotes sin materia organica, lo que hace pensar que 6 meses es muy poco tiempo para que esta se mineralice en el suelo

Durante los tres años de evaluacion de nuestro experimento, los tepetates presentaron una enorme perdida de nutrimentos arrastrados por el escurrimiento superficial lo que nos permite pensar que el origen del nitrogeno provenga de la lluvia, ya que en el experimento no se utilizo ningun tipo de fertilizacion mineral, unicamente, los lotes 13 y 15 del tratamiento T5 fueron abonados con 20 t/ha de estiercol vacuno, lo que equivale a 88 kg de estiercol por lote Sin embargo las mayores perdidas de nitrogeno y fosforo ocurrieron en los lotes 1, 8 y 10 representados por el tratamiento T3 y los lotes 4, 6 y 12 representados por el tratamiento T4 respectivamente

El modelo SWRRB utilizado en este experimento para validar y comparar los escurrimientos superficiales y la perdida de suelo medidos y calculados resulto tener una alta consistencia en la simulacion El coeficiente de eficiencia propuesto por Nash resulto ser de 96, 94 y 96 % Lo anterior nos permite aseverar que el modelo puede ser utilizado para predecir con amplio margen de seguridad la relacion lluvia-escurrimiento-perdida de suelo

La produccion y concentracion de sedimentos en los tepetates resulto ser muy variable, pero fuertemente correlacionada con la cantidad de escurrimiento y la energia cinetica total de la lluvia La accion de la lluvia sobre el suelo a su vez depende de su cantidad y de su intensidad, lo que hace evidente que una lluvia de alta intensidad de solo 10 mm provoque mas daños que una lluvia de baja intensidad de 30 mm

Dado que los tepetates presentan una estructura masiva, durica y consolidada la roturacion, remocion de agregados y razamiento con maquinaria pesada es el unico medio para poner a esta clase de suelos en productividad Luego de la roturacion y razamiento, los tepetates responden fuertemente a los fertilizantes minerales de nitrogeno y fosforo y posteriormente a la adicion de materia organica tales como compostas y estiercoles 20 toneladas de estiercol vacuno seco por hectarea es suficiente para alcanzar una produccion de maiz y cebada por arriba de la media nacional aun durante el primer año de roturacion Con el objeto de estabilizar y controlar la erosion hidrica en los tepetates de uso agricola, las superficies razadas y/o niveladas deberan tener una pendiente maxima permisible del 3 por ciento y una longitud no mayor de 150 metros

BIBLIOGRAFIA

1 ARNOLD J G , J R WILLIAMS, and A D NICKS 1990 **SWRRB a bassin scale simulation model for soil and water resources management** Texas A&M University Press College Station

2 ARNOLD J G , J R WILLIAMS, R H GRIGGS, and N B SAMMONS 1991 **SWRRBWQ a bassin scale model for assessing managment Impacts on water quality** Texas A&M University Press College Station

3 FENTON, T E 1980 **Soil erosion in the Corn belt problems and solutions** Proc of Quaternary Geology and Geomorfological Symp Soil Erosion Geol Soc Am , Atlanta, GA 17-20 Nov 1980

4 LANGDALE, G W , and W D SHRADER 1982 **Soil erosion effects on soil productivity of cultivate cropland** p 41-51 In Determinants of soil loss tolerance Spec Pub 45 American Society of Agronomy, Madison, WI

5 LARSON, W E , T E FENTON , E L SKIDMORE , and C M BENBROOK 1985 **Effects of soil erosion on soil properties as related to crop productivity and classification** Soil Erosion and Crop Productivity ASA-CSSA-SSSA,677 South Segoe Road, Madison,WI 53711,USA

6 OROPEZA-MOTA, J L 1990 **Modelizacion del escurrimiento, materiales en suspension y concentracion de nitratos en cuencas agricolas** XXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo Comarca Lagunera Nov 4-9/90

7 OROPEZA-MOTA, J L 1990 **Simulation des ecoulements des cours d'eau dans le petits bassins versants ruraux** These de doctorat Gembloux, Belgique Faculte des Sciences Agronomiques

8 OROPEZA-MOTA, J L 1992 **Evaluacion de la relacion erosion-escurrimiento en pequeñas cuencas agricolas a partir del modelo de simulacion MOPEAU** XXV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo Acapulco, Gro Nov 9-14/92

9 OROPEZA MOTA, J L , NORTON D AND B FIGUEROA-SANDOVAL 1994 **Comparison of runoff and erosion from natural and reclaimed tepetate from the semiarid area east of Mexico City** Water Research and Management in Semiarid Environments Symposium USDA-ARS-SWRC Tucson, Az

10 OROPEZA MOTA, J L E HUERTA MARTINEZ and J D RIOS BERBER 1995 **Water erosion evaluation of tepetates in relation to reclamation and productivity** Special Issue Water Management in Semiarid Environments Journal of Soil and Water Conservation Volume 50, Number 5 pp 523-526

11 OROPEZA-MOTA, J L , M HERNANDEZ, P HEILMAN, L J LANE and H M ARIAS-ROJO 1995 **Evaluating land management system effects on tepetate lands in Central Mexico with a decision support system** Preconference Proceedings First International Conference on Multiple Objective Decision Support Systems for Land, Water and Environmental Management Concepts, Approaches, and applications University of Hawaii Honolulu, Hawaii, USA July 23-28 World Association of Soil and Water Conservation WASWC

12 OROPEZA-MOTA, J L 1995 **Modelacion del escurrimiento superficial en terrenos agricolas con pendiente** Palabras clave Modelo de simulacion MOPEAU, Lluvia diaria Escurrimiento superficial, Humedad del suelo, Terreno agricola con pendiente Revista TERRA Organo Cientifico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo ISSN 0187-5779 Division II, Volumen 13, Octubre-Diciembre de 1995 Numero 4 pp 454 - 463 Montecillo, Mex

13 SWANSON, E R, and D E MACCALLUM 1969 **Income effects of rainfall on erosion control J Soil and Water Conservation** 24 56-59

14 USDA-SCS 1972 **National Engeneering Hanbook, Hydrology Section 4** USDA-SCS

15 WINDING, L P, R B JONES, and G M SHAFER 1965 **Variations of soil morphological properties within Miami, Celina, and Crosby mapping units in west-central Ohio** Soil ci Soc Am Proc 29 711-717

16 WILLIAMS, J R, C A JONES, and P T DYKE 1984 **A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity** Trans ASE 27 129-144

INDICE

Descripción de las fórmulas utilizadas por el modelo matemático de simulación de erosión hídrica SWRRB

Uso de Modelos Matemáticos de Erosión Hídrica para la Optimización de la Rehabilitación de Tepetates con Fines Agrícolas

J L. Oropeza Mota, J D Ríos Berber, Demetrio S Fernández Reynoso, Elibeth Torres Benites y Elsa Huerta Martínez Area de Fisica de Suelos, Especialidad de Edafologia, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados Km 35 5 Carretera México-Texcoco Montecillo, Edo de Mexico CP 56230

Descripción de las fórmulas utilizadas por el modelo matemático de simulación de erosión hídrica SWRRB

La descripcion de los componentes del modelo SWRRB y las relaciones matematicas para simular los procesos, tratadas a continuacion, fueron traducidas a partir del manual de referencia (Arnold y Williams, 1994)

I - HIDROLOGIA

El componente hidrologico del modelo, se basa en la ecuacion de balance hidrico

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^{t} (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \qquad 1$$

donde

sw_t = Contenido de agua en el suelo del dia **t**, en mm
sw = Contenido de agua en el suelo del dia anterior en mm
R_i = Precipitacion del dia **i**, en mm
Q_i = Escurrimiento superficial del dia **i**, en mm
ET_i = Evapotranspiracion, del dia **i**, en mm
P_i = Percolacion del dia **i**, en mm
QR_i = Escurrimiento supsuperficial lateral para todo el perfil en el dia **i**, en mm
t = Tiempo, en dias

El contenido del agua en el suelo **SW** se considera como la cantidad de humedad dentro de la zona radical, menos el contenido de agua a punto de marchitez (1500 kPa o 15 bar para muchos suelos y cultivos)

Debido a que el modelo mantiene un balance hidrico de manera continua, para su aplicacion en cuencas grandes y complejas se divide en subcuencas, para diferenciar la **ET** de los cultivos, suelos, etc Asi, el escurrimiento se calcula por separado para cada subcuenca y se transita para obtener el escurrimiento total de la cuenca Esto incrementa la precision y da mejor descripcion fisica del balance hidrico

1 - Escurrimiento superficial

El modelo de escurrimiento simula los escurrimientos superficiales y los gastos maximos, que se producen por la lluvia diaria El volumen de escurrimiento se estima con la tecnica modficada de las curvas numericas, propuesta por el Servicio de Conservacion del Suelo (SCS) (USDA-SCS, 1972) El uso de datos de precipitacion diarios es particularmente importante para la tecnica de las curvas numericas debido a que en muchas localidades, los datos de precipitacion son incrementos de tiempo de menos de un dia no existen Tambien, las manipulaciones de los datos de precipitacion y los calculos de escurrimiento son mas eficientes para datos tomados diariamente que en intervalos mas cortos

El modelo cuenta con dos opciones para estimar el gasto maximo la formula racional modificada y el metodo TR-55 del SCS (USDA-SCS, 1986) La ecuacion racional cuenta con un elemento de tipo estocastico que permite la simulacion real del gasto maximo con base en la lluvia diaria y la intensidad de la lluvia mensual

a - Volumen de escurrimiento

El escurrimiento superficial se determina con la lluvia diaria y el metodo de las curvas numericas propuesto por el SCS (USDA-SCS, 1972)

$$Q_i = \frac{(R_i - 0.2\ s_i}{R_i + 0.8\ s_i} \qquad \text{si } R_i > 0.2\, s_i$$

$$Q = 0.0, \qquad \text{si } R_i \quad 0.2\, s_i \qquad (2)$$

donde

Q_i = Escurrimiento superficial del dia i, en mm
R_i = Precipitacion del dia **i**, en mm
s_i = Potencial de retencion del dia **i**, en mm

El potencial de retencion o infiltracion potencial (**s**), varia (1) entre cuencas debido al tipo, uso, manejo y pendiente del suelo, (2) con el tiempo, debido a los cambios en el contenido de agua en el suelo El potencial de retencion (**s**), se relaciona con el numero de curva (**CN**) segun la siguiente ecuacion (USDA-SCS, 1972)

$$s_i = 254 \left(\frac{100}{CN_2} - 1 \right) \qquad 3$$

donde

s_i = Potencial de retencion del dia i, en mm
CN_2 = Numero de curva para la condicion hidrologica media (adimensional)

La constante, 254 en la ecuacion 3 proporciona un valor de (s) en mm La introduccion de CN_2 es una forma de estandarizar y normalizar a (s) para que varie entre 0 y 100 El valor de CN_2 se obtiene facilmente del manual de hidrologia del SCS (USDA-SCS 1972) (Ver tabla en el Apendice IV) Este cuadro considera el tipo, uso y manejo del suelo

Debido a que el valor de CN_2 fue calculado para una pendiente del 5%, la siguiente ecuacion ajusta el valor para otras pendientes

$$CN_{2S} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2)[1 - 2\exp(-13\ 86S)] + CN_2 \qquad 4$$

donde

CN_{2s} = Valor medio de CN_2 ajustado por pendiente
CN_3 = Numero de curva para la condicion de humedad 3 (humeda)
S = Pendiente promedio de la cuenca en, en m/m

El valor de CN_1, es el numero de curva para la condicion humeda y el CN_2 para la condicion seca, los valores asociados a CN_2 estan tabulados en el manual de hidrologia del SCS Para propositos de calculo, CN_1 y CN_3 se relacionaron con CN_2 segun las siguientes ecuaciones

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2\ 533 - 0\ 0636(100 - CN_2)]} \qquad 5$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0\ 00673(100 - CN_2)] \qquad 6$$

Las fluctuaciones en el contenido de agua del suelo provocan que el potencial de retencion (s) cambie de acuerdo a la ecuacion

$$s_i = s_1 \left(1 - \frac{FFC}{FFC + \exp[w_1 - w_2(FFC)]} \right)$$

7

donde

s_i = Potencial de retencion del dia i, en mm
FFC = Fraccion de la capacidad de campo, en mm/mm
s_1 = Valor del potencial de rentencion s asociado con CN_1 en mm
w_1, w_2 = Parametros de forma

FFC se calcula con la ecuacion

$$FFC = \frac{SW - WP}{FC - WP} \qquad 8$$

donde

FFC = Fraccion de la capacidad de campo, en mm/mm
SW = Contenido de agua del suelo en la zona radical en mm
WP = Contenido de agua a punto de marchitez (1500 kPa para muchos suelos) en mm
FC = Contenido de agua a capacidad de campo (33 kPa para muchos suelos), en mm

Los valores de W_1 y W_2 se obtienen a partir de la solucion simultanea de la ecuacion 7 suponiendo que $s=s_2$ cuando FFC=0 6 y $s=s_3$, cuando (SW-FC)/(PO-FC)=0 5

$$w_1 = \ln\left(\frac{60}{1-\frac{s_2}{s_1}} - 60\right) + 60W, \qquad 9$$

$$w_2 = \frac{\ln\left(\frac{60}{1-\frac{s_2}{s_1}} - 60\right) - \ln\left(\frac{POFC}{1-\frac{s_3}{s_1}} - POFC\right)}{POFC - 60} \qquad 10$$

donde

w_1 w_2 = Parametros de forma
s_1 = Valor del potencial de retencion s asociado con CN_1, en mm

s_2 = Valor del potencial de retencion s asociado con CN_2, en mm
s_3 = Valor del potencial de retencion s asociado con CN_3 en mm

La relacion de capacidad de campo-porosidad, POFC, se calcula con la ecuacion

$$POFC = 100 + 50 \left(\frac{\sum_{i=1}^{M} (PO_i - FC_i)}{\sum_{i=1}^{M} (FC_i - WP_i)} \right) \qquad 11$$

donde

POFC = Relacion de porosidad-capacidad de campo
PO = Porosidad de la capa de suelo l
FC = Contenido de agua a capacidad de campo para la capa de suelo l (33 kPa) en mm
WP = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo l (1500 kPa) en mm
M = Numero de capas de suelo

Las ecuaciones 9 y 10 aseguran que CN_1 corresponde con el punto de marchitez y que el numero de curva no exceda de 100

El valor de **FFC** obtenido de la ecuacion 8, representa el contenido de agua distribuido uniformemente en el primer metro de suelo La estimacion del escurrimiento se puede mejorar si se conoce la distribucion de la humedad en el suelo segun su profundidad Por ejemplo, si el agua esta concentrada cerca de la superficie del suelo provocara un mayor escurrimiento, que si este mismo volumen estuviera distribuido uniformemente en el primer metro de suelo Igualmente un suelo con una distribucion uniforme de agua en su perfil provocara un mayor escurrimiento que un suelo seco Debido a que el modelo SWRRB estima en forma diaria el contenido de agua para cada capa de suelo, es necesario conocer la distribucion de la profundidad de mojado El efecto de la distribucion de la profundidad de mojado sobre el escurrimiento, se expresa por una funcion ponderada de la profundidad

$$FFC^* = \frac{\sum_{i=1}^{M} FFC_i \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i}}{\sum_{i=1}^{M} \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i}} \quad , \quad Z \geq 10\,\text{m} \qquad 12$$

donde

FFC* = Valor de FFC ponderado por profundidad para usarlo en la ecuacion 7
Z = Profundidad hasta el fondo de la capa de suelo l, en m
M = Numero de capas de suelo

La ecuacion 12 hace cumplir dos funciones (1) reduce el efecto de las capas inferiores debido a que FFC , se divide entre Z y (2) proporciona una mejor ponderacion de las capas gruesas de suelo que de las capas delgadas, debido a que FFC se multiplica por el grosor de la capa

Si la temperatura en la segunda capa de suelo es menor a 0° C (suelo congelado) el potencial de retencion se simplifica a la ecuacion

$$s_f = 0.1 s_i \qquad 13$$

donde

s_f = Potencial de retencion del suelo congelado, en mm
s_i = Potencial de retencion del dia i en mm

La ecuacion 13, incrementa el escurrimiento en suelos congelados, pero permite una infiltracion mas significativa, cuando los suelos estan secos

b - Gasto maximo

El modelo SWRRB contiene dos metodos para estimar el gasto maximo, la formula racional modificada y el metodo TR-55 del SCS (USDA-SCS, 1986)

Método de la ecuacion racional la formula de la ecuacion racional modificada es

$$q_p = \frac{(\rho)(r_i)(A)}{360} \qquad 14$$

donde
q_p = Gasto maximo generado por el escurrimiento del dia i, en $m^3 s^{-1}$
r = Coeficiente de escurrimiento que expresa las caracteristicas de infiltracion de la cuenca
r_i = Intensidad de la lluvia del dia i, para una lluvia con una duracion igual al tiempo de concentracion de la cuenca, en $mm\ h^{-1}$
A = Area de drenaje, en ha

El coeficiente de escurrimiento puede ser calculado para cada tormenta si la cantidad de precipitacion y el escurrimiento son conocidos

$$\rho_i = \frac{Q_i}{R_i} \qquad 15$$

donde

ρ_i = Coeficiente de escurrimiento del dia i

$\mathbf{R_i}$ = Precipitacion del dia i, en mm

$\mathbf{Q_i}$ = Escurrimiento superficial del dia i, en mm

Debido a que $\mathbf{R_i}$ es un valor introducido y $\mathbf{Q_i}$ se calcula con la ecuacion 1, ρ puede ser calculado directamente La intensidad de precipitacion del dia i puede ser expresada con la relacion

$$r_i = \frac{R_{tc}}{t_c} \qquad 16$$

donde

$\mathbf{r_i}$ = Intesidad de la lluvia del dia i, para el tiempo de concentracion de la cuenca, en mm h^{-1}

$\mathbf{R_{tc}}$ = Cantidad de precipitacion durante t_c, en mm

$\mathbf{t_c}$ = Tiempo de concentracion de la cuenca, en h

El valor de $\mathbf{R_{tc}}$ se estima en relacion al $\mathbf{R_i}$ total Generalmente $\mathbf{R_{tc}}$ y $\mathbf{R_{24}}$ (una duracion de 24 horas es apropiada para un modelo de frecuencia diaria) son proporcionales para varias frecuencias Asi

$$R_{tc} = a\, R_{24} \qquad 17$$

donde

$\mathbf{R_{tc}}$ = Cantidad de precipitacion durante t_c, en mm

a = Parametro adimensional, que expresa la proporcion de la precipitacion total que ocurre durante $\mathbf{t_c}$

$\mathbf{R_{24}}$ = Cantidad de lluvia en 24 horas, en mm

La ecuacion del escurrimiento maximo se obtiene al sustituir las ecuaciones 15, 16 y 17 en la ecuacion 14

$$q_p = \frac{(\alpha)(Q_i)(A)}{360(t_c)} \qquad 18$$

donde

$\mathbf{q_p}$ = Gasto maximo generado por Qi, en $m^3\, s^{-1}$

a = Parametro adimensional, que expresa la proporcion de la precipitacion total, que ocurre durante $\mathbf{t_c}$

$\mathbf{Q_i}$ = Escurrimiento superficial del dia i, en mm

A = Area de drenaje en ha
$\mathbf{t_c}$ = Tiempo de concentracion de la cuenca en h

El tiempo de concentracion puede ser estimado con la suma de los tiempos de flujo en la superficie del terreno y el cauce

$$t_c = t_{cc} + t_{cs} \qquad 19$$

donde
$\mathbf{t_c}$ = Tiempo de concentracion de la cuenca, en h
$\mathbf{t_{cc}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h
$\mathbf{t_{cs}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial en h

El $\mathbf{t_{cc}}$, puede ser calculado con la ecuacion

$$t_{cc} = \frac{L_c}{V_c} \qquad 20$$

donde
$\mathbf{t_{cc}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce, en h
$\mathbf{L_c}$ = Longitud promedio del cauce de la cuenca, en km
$\mathbf{v_c}$ = Velocidad promedio en el cauce, en m s^{1}

La longitud promedio del cauce puede ser estimada con la siguiente ecuacion

$$L_c = \sqrt{(L)(L_{ca})} \qquad 21$$

donde
$\mathbf{L_c}$ = Longitud promedio del cauce de la cuenca, en km
L = Longitud del cauce desde el punto mas distante hasta la salida de la cuenca, en km
$\mathbf{L_{ca}}$ = Distancia a lo largo del cauce desde la salida hasta el centroide de la cuenca, en km

La velocidad promedio se estima con la ecuacion de Manning y al suponer un cauce trapezoidal con taludes de 2 1 y una relacion ancho del fondo-profundidad de 10 1 La sustitucion de esos valores estimados y los supuestos da como resultado

$$t_{cc} = \frac{\overline{(L)(L_{ca})}\,(n)^{0.75}}{0.489\,(q_c)^{0.25}\,(\sigma)^{0.375}} \qquad 22$$

donde
$\mathbf{t_{cc}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h
L = Longitud del cauce desde el punto mas distante hasta la salida de la cuenca, en km
$\mathbf{L_{ca}}$ = Distancia a lo largo del cauce desde la salida hasta el centroide de la cuenca, en km

n = Coeficiente de rugosidad de Manning
$\mathbf{q_c}$ = Gasto promedio, en $m^2\ s^{1}$
σ = Pendiente promedio del cauce, en m m^{1}

Suponiendo que L_{ca}=0 5L y al convertir las unidades (**L** de m a km, $\mathbf{t_{cc}}$ de s a h, y $\mathbf{q_c}$ de $m^3\ s^{1}$ a mm h^{1}) se obtiene la ecuacion

$$t_{cc} = \frac{1\ 75(L^*)(n)^{0\ 5}}{(q_c^* A)^{0\ 25}(\sigma)^{0\ 3\ 5}} \qquad 23$$

donde
$\mathbf{t_{cc}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h
L = Longitud del cauce desde el punto mas distante hasta la salida de la cuenca, en km
n = Coeficiente de rugosidad de Manning
$\mathbf{q^*_c}$ = Gasto promedio, en mm h^{1}
A = Area de drenaje, en ha
= Pendiente promedio del cauce, en m m^{1}

El gasto promedio se obtiene del gasto promedio estimado en una cuenca de area unitaria (1 hectarea) y la relacion

$$q_c^* = q_o^* A^{0\ 5} \qquad 24$$

donde
$\mathbf{q^*_c}$ = Gasto promedio, en mm h^{1}
$\mathbf{q^*_o}$ = Gasto promedio estimado en una hectarea, en mm h^{1}
A = Area de drenaje, en ha

El gasto promedio del area unitaria se estima con la ecuacion

$$q_o^* = \frac{Q_i}{DUR} \qquad 25$$

donde
$\mathbf{q^*_o}$ = Gasto promedio estimado en una hectarea, en mm h^{1}
$\mathbf{Q_i}$ = Escurrimiento superficial del dia i, en mm
DUR = Duracion de la precipitacion, en h

La duracion de la precipitacion (**DUR**), se calcula con la ecuacion

$$DUR = \frac{4\ 605}{-2\ \ln(1 - alphasub0\ 5)} \qquad 26$$

donde

DUR = Duracion de la precipitacion, en h

$a_{0.5}$ = Cantidad maxima de precipitacion durante 0 5 h respecto a la precipitacion total del dia

El valor de alfa se calcula con la ecuacion 17 usando $R_{0.5}$ en lugar de R_{tc} La ecuacion 26 se deriva del supuesto que la intensidad de la lluvia se distribuye exponencialmente Los detalles del procedimiento para la estimacion de alfa y **DUR** se dan en la seccion de erosion hidrica

Al sustituir la ecuacion 25 en la ecuacion 23 se obtiene la ecuacion final para t_{cc}

$$t_{cc} = \frac{1.75 (L^*)(n)^{0.75}}{(q_o^*)^{0.25}(A)^{0.125}(\sigma)^{0.375}} \qquad 27$$

donde

t_{cc} = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h
L^* = Longitud del cauce desde el punto mas distante hasta la salida de la cuenca en km
n = Coeficiente de rugosidad de Manning
q^*_o = Gasto promedio estimado en una ha en mm h^{-1}
A = Area de drenaje, en ha
s = Pendiente promedio del cauce, en m m^{-1}

En forma similar se estima t_{cs}

$$t_{cs} = \frac{\lambda}{v_s} \qquad 28$$

donde

t_{cs} = Tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial en h
λ = Longitud superficial de la pendiente en m
v_s = Velocidad del escurrimiento en la superficie, en m s^{-1}

Con la aplicacion de la ecuacion de Manning para una faja de un metro de ancho cuesta abajo, y con el supuesto de que el escurrimiento se concentra en un pequeño cauce trapezoidal con taludes 1 1 y una relacion ancho del fondo-profundidad de 5 1 se obtiene la ecuacion para estimar la velocidad

$$v_s = \frac{0.8375\, d^{0.666}\, s^{0.5}}{n} \qquad 29$$

donde

v_s = Velocidad del escurrimiento en la superficie, en m s^{-1}
d = Profundidad del escurrimiento, en m
s = Pendiente de la superficie del terreno, en m m^{-1}
n = Coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie

La profundidad del flujo promedio **d**, se puede calcular de la ecuacion de Manning en funcion del gasto

$$d = \left(\frac{q_o \bullet n}{5\ 025\ s^{0\ 5}} \right)^{0\ 3\ 5} \qquad 30$$

donde

d = Profundidad del escurrimiento, en m
$\mathbf{q_o}$ = Gasto promedio en $m^3\ s^{-1}$
n = Coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie
s = Pendiente de la superficie del terreno en m m^{-1}

Al sustituir las ecuaciones 29 y 30 en la ecuacion 28 se tiene que

$$t_{cc} = \frac{0\ 0216\ (\lambda \bullet n)^{0\ 5}}{(q_o^*)^{0\ 5}\ (s)^{0\ 3\ 5}} \qquad 31$$

donde

$\mathbf{t_{cs}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial, en h
λ = Longitud superficial de la pendiente en m
n = Coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie (Ver tabla 5 en el Apendice V)
$\mathbf{q^*_o}$ = Gasto promedio estimado en una ha, en mm h^{-1}
s = Pendiente de la superficie del terreno en m m^{-1}

Para evaluar apropiadamente a alfa, se debe considerar la variacion en todos los patrones de precipitacion Para algunas tormentas de corta duracion, la mayor parte o toda la lluvia ocurre durante $\mathbf{t_c}$ lo que provoca que alfa se aproxime a su limite superior (1 0) Otras tormentas de intensidad uniforme hacen que alfa se aproxime a un valor minimo El resto de los patrones hacen que los valores de alfa sean los mas altos que en el patron uniforme debido a que $\mathbf{r_{tc}}$ es mas grande que $\mathbf{r_{24}}$ para todos los patrones excepto el uniforme Al sustituir los productos de intensidad y tiempo en la ecuacion 17, se obtiene una expresion para el valor minimo de alfa,

$$\alpha_{mn} = \frac{t_c}{24} \qquad 32$$

donde

$\mathbf{a_{mn}}$ = Valor minimo de alfa
$\mathbf{t_c}$ = Tiempo de concentracion de la cuenca, en h

Por lo que alfa fluctua entre los limites

$$\frac{t_c}{24} \leq \alpha \leq 1\ 0$$

Aunque los limites estan acotados, el valor de alfa asignado es muy incierto, principalmente cuando la precipitacion diaria y las cantidades de escurrimiento son proporcionadas por una simulacion Asi, alfa se genera de una distribucion triangular con un rango para la base de $t_c/24$ a 1 0

El pico de la distribucion de alfa cambia para cada mes debido a las diferencias estacionales en las intensidades de la precipitacion

Metodo TT-55 El metodo TR-55 del SCS para la estimacion del gasto maximo esta descrito con detalle en USDA-SCS (1986), y aqui, se presentan solo las ecuaciones principales El gasto maximo depende de la distribucion y cantidad de la lluvia el numero de curva de escurrimiento, y el tiempo de concentracion como se expresa en la ecuacion

$$q_p = (q_p^*)(R_i) \qquad 33$$

donde

$\mathbf{q_p}$ = Gasto maximo generado por $\mathbf{Q_i}$ en una ha en mm h^{1}

$\mathbf{q^*_p}$ = Gasto maximo por unidad de lluvia en una ha, en mm h^{1} mm^{1}

$\mathbf{R_i}$ = Cantidad de lluvia de la tormenta del dia i, en mm

En USDA-SCS (1986) dispone de un grupo de curvas para la estimacion de $\mathbf{q^*_p}$ que dan la distribucion de la lluvia (Tipo I, IA, II o III del SCS) el numero de curva de escurrimiento y el tiempo de concentracion de la cuenca Las curvas que relacionan a $\mathbf{q^*_p}$, $\mathbf{t_c}$, y **CN** han sido ajustadas a un polinomio de septimo grado para su uso computacional

El tiempo de concentracion se estima con la ecuacion

$$t_c = t_{cc} + t_{cs} + t_{sf} \qquad 34$$

donde

$\mathbf{t_c}$ = Tiempo de concentracion de la cuenca, en h

$\mathbf{t_{cc}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h

$\mathbf{t_{cs}}$ = Tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial en h

$\mathbf{t_{sf}}$ = Tiempo de concentracion del escurrimiento en el cauce a traves de valles en h

El componente del tiempo de concentracion en cauces se calcula con la ecuacion

$$t_{cc} = \frac{(L - \lambda - L_{sf})\,n}{3\ 6\ d^{0\ 6^-}\ \sigma^{0\ 5}} \qquad 35$$

donde

t_{cc} = Tiempo de concentracion para el escurrimiento del cauce en h
L = Longitud del cauce desde el punto mas distante hasta la salida de la cuenca, en km
λ = Longitud superficial de la pendiente, en km
L_{sf} = Longitud de la planicie, en km
n = Coeficiente de rugosidad de Manning
d = Profundidad media del flujo en el cauce, en m
= Pendiente del cauce, en m m ^{1}

El componente del tiempo de concentracion a traves de valles t_c se estima con la ecuacion

$$t_{sf} = \frac{L_{sf}}{V_{sf}} \qquad 36$$

donde
t_{sf} = Tiempo de concentracion del flujo en el cauce a traves de valles, en h
L_{sf} = Longitud del valle, en km
v_{sf} = Velocidad del flujo superficial promedio, en km h ^{1}

donde v_{sf} se estima con la ecuacion

$$v_{sf} = 17\ 7\ S^{0\ 5} \qquad 2\ 19\ \text{km}\times\text{h}^{1} \qquad 37$$

donde
v_{sf} = Velocidad del flujo superficial promedio, en km h ^{1}
S = Pendiente del flujo superficial, en m m ^{1}

La longitud del flujo superficial, L_{sf} se estima con las ecuaciones

L_{sf} = 0 05 L > 0 1 km
L_{sf} = L - 0 05 0 05 < L < 0 1 km
L_{sf} = 0 0 L < 0 05 km

38

Note que t_{sf} esta forzada menos de 0 1 h cuando S=0 001, y t_{sf} es generalmente insignificante El componente de tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial se estima con la ecuacion

$$t_{cs} = \frac{0\ 0913\,(\lambda \bullet n)^{0\ 8}}{s^{0\ 4}\,R_i^{0\ 5}} \qquad 39$$

donde
t_{cs} = Tiempo de concentracion para el escurrimiento superficial, en h
l = Longitud superficial de la pendiente, en m
n = Coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie
S = Pendiente del flujo superficial, en m m ^{1}
R_i = Cantidad de lluvia de la tormenta del dia i, en mm

2 Percolacion

El componente percolacion en el modelo SWRRB, simula el movimiento del agua almacenada en el suelo y el flujo por agrietamiento, para predecir el movimiento del flujo a traves de cada capa de suelo Una vez que el agua se ha percolado por debajo de la zona radical, esta se pierde de la cuenca (convirtiendose en agua subterranea o bien aparece como escurrimiento subsuperficial aguas abajo de la cuenca)

La tecnica de movimiento para el almacenamiento de agua se basa en la ecuacion

$$SW_i = SW_{oi} \exp\left(- \frac{\Delta t}{TT_i} \right) \qquad 40$$

donde

SW_i = Contenido de agua en el suelo al final del dia, en la capa **i** en mm
SW_{oi} = Contenido de agua en el suelo al inicio del dia en la capa **i**, en mm
Dt = Intervalo de tiempo (24 h), en h,
TT_i = Tiempo de recorrido a traves de la capa **i**, en h

Asi la percolacion puede ser calculada al sustraer SW del SW_0

$$O_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(- \frac{\Delta t}{TT_i} \right) \right] \qquad 41$$

donde

0_i = Velocidad de percolacion en la capa i, en mm d^{-1}
SW_{oi} = Contenido de agua en el suelo al inicio del dia en la capa **i**, en mm
Δt = Intervalo de tiempo (24 h), en h,
TT_i = Tiempo de recorrido a traves de la capa **i** en h

El tiempo de recorrido, **TT_i**, es calculado para cada capa de suelo, con una funcion de almacenamiento de tipo lineal

$$TT_i = \frac{SW_i - FC_i}{H_i} \qquad 42$$

donde

TT_i = Tiempo de recorrido a traves de la capa **i**, en h
SW_i = Contenido de agua en el suelo al final del dia en la capa **i**, en mm
FC_i = Contenido de agua a capacidad de campo menos el contenido de agua a punto de marchitez permanente para la capa **i**, en mm
H_i = conductividad hidraulica en la capa i en mm h^{-1}

La conductividad hidraulica varia desde el valor de la conductividad a saturacion, hasta cerca de cero a capacidad de campo

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i} \right)^{\beta i} \qquad 43$$

donde

H_i = Conductividad hidraulica en la capa **i**, en mm h^{-1}
SC_i = Conductividad saturada para la capa **i**, en mm h^{-1}
SW_i = Contenido de agua en el suelo al final del dia en la capa **i** en mm
UL_i = Maximo de almacenamiento de agua del suelo (porosidad total menos el contenido de agua a 1500 kPa) en la capa **i**, en mm

La conductividad saturada **SC_i** hace que **H_i** se aproxime a cero conforme **SW_i** se aproxima a **FC_i** La ecuacion para estimar **b** es

$$\beta i = \frac{-2\ 655}{\mathrm{Log}_{10}\left(\frac{FC_i}{UL_i} \right)} \qquad 44$$

La constante -2 65 de la ecuacion anterior, asegura que sea H_i=0 002SC_i, a capacidad de campo

El flujo a traves de una capa de suelo puede ser afectado por una capa inferior de suelo saturada Si la capa inmediata inferior a la considerada esta saturada, el flujo no podra ocurrir El efecto del contenido de agua correspondiente a la capa inferior se expresa mediante la ecuacion

$$O_{ci} = O_i \sqrt{1 - \frac{SW_{i+1}}{UL_{i+1}}} \qquad 45$$

donde

O_{ci} = Velocidad de percolacion para la capa **i** corregida para el contenido de agua en la capa **i+1** en mm d^{-1}
O_i = Percolacion en la capa **i** calculada con la ecuacion 41
SW_{i+1} = Contenido de agua en el suelo al final del dia en la capa **i+1** en mm
UL_{i+1} = Maximo almacenamiento de agua del suelo (porosidad total menos el contenido de agua a 1500 kPa) en la capa **i+1**, en mm

El modelo de flujo en grietas, permite simular la percolacion de la lluvia infiltrada, aun cuando el contenido de agua del suelo sea menor de la capacidad de campo Cuando el suelo esta seco y agrietado, la lluvia infiltrada puede fluir a traves de las grietas de una capa sin formar parte del agua de la capa de suelo sin embargo, la porcion que llega a formar parte del agua almacenada en la capa, no puede percolarse hasta que el agua almacenada exceda la capacidad de campo

El flujo en grietas, se simula con relaciones similares a las usadas para estimar la percolacion (por encima de la capacidad de campo) La cantidad de agua percolada causada por el flujo en grietas se estima con la ecuacion

$$O_i = O_{i-1}\left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{TT_{ci}}\right)\right] \qquad 46$$

donde

O_i = Velocidad de percolacion en la capa **i**, en mm d^{-1}
O_{i+1} = Flujo desde la capa superior en mm d^{-1} (**R-Q** para la primer capa)
Dt = Intervalo de tiempo (24 h), en h
TT_{ci} = Tiempo de recorrido del flujo por agrietamiento en la capa **i** en h

El tiempo de recorrido del flujo por agrietamiento es estimado con la ecuacion

$$TT_{ci} = \frac{O_{i-1}}{\zeta_i} \qquad 47$$

donde

TT_{ci} = Tiempo de recorrido del flujo por agrietamiento en la capa **i** en h
O_{i+1} = Flujo desde la capa superior en mm d^{-1}
ζ_i = Factor adimensional del suelo que expresa el grado de agrietamiento para la capa **i**

El factor **z_i** varia entre cero y uno y expresa el grado de agrietamiento en funcion del contenido de agua y la fraccion de arcilla en el suelo

$$\zeta_i = 0.01\,(CLA)_i\left(1 - \frac{SW}{SW + \exp(7.0 - 0.11\,SW)}\right) \qquad 48$$

donde

ζ_i = Factor adimensional del suelo que expresa el grado de agrietamiento para la capa **i**
CLA_i = Contenido de arcilla en la capa de suelo **i**
SW = Contenido de agua en el suelo, en mm

La percolacion tambien es afectada por la temperatura del suelo Si la temperatura de una capa en particular es de 0 ^{0}C o menor no se permite la percolacion en esa capa El agua puede sin embargo, percolar en la capa como se establecio en las ecuaciones 41 y 46

Debido a que el intervalo de tiempo de un dia es relativamente pequeño para el movimiento del agua a traves de los suelos, es deseable dividir el movimiento del agua en varias partes Esto es necesario debido a que las velocidades del flujo son dependientes del contenido de agua del suelo el cual esta continuamente cambiando Por ejemplo, si el suelo estuviera extremadamente humedo

las ecuaciones 41, 42, y 43 prodrian enormemente sobreestimar la percolacion, si solamente se considerara un solo recorrido, que usara la cantidad completa de (SW_i-FC_i) Para superar este problema, el SWRRB divide cada flujo que entra a la capa en secciones de 4 mm de recorrido Al dividir el flujo de entrada en secciones de 4 mm y transitando cada seccion en forma individual a traves de todas las capas, la relacion del contenido de agua de la capa inferior (ecuacion 43) permite sea adecuada El efecto del contenido de agua de la capa inferior no puede ser realmente calculado transitando todas las entradas de una capa antes de entrar a la proxima

3 - Escurrimiento subsuperficial lateral

El modelo cinematico de almacenamiento desarrollado por Sloan et al , (1983) utiliza la ecuacion de continuidad de la materia con el perfil completo de suelo como volumen de control La ecuacion de continuidad de la materia en forma de diferencia finita para el modelo cinematico de almacenamiento es

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = i\,L - \frac{q_{lat1} + q_{lat2}}{2} \qquad 49$$

donde

S = Volumen de agua drenable almacenado en la zona saturada en m m^{-1} (contenido de agua por encima de la capacidad de campo)

t = Tiempo, en horas

q_{lat} = Flujo lateral, en m^3 h^{-1}

i = Agua que entra a la zona saturada, en m^2 h^{-1}

L = Longitud de la pendiente, en m

Los subindices 1 y 2 se refieren al inicio y al final del periodo de tiempo respectivamente El estrato saturado perpendicular a la pendiente es

$$H_o = \frac{2\,S}{\theta_d\,L} \qquad 50$$

donde

H_o = Espesor saturado perpendicular a la pendiente en m

q_d = Porosidad de drenaje o avenamiento del suelo en m m^{-1}

S = Volumen de drenaje o avenamiento del agua almacenada en m m^{-1}

L = Longitud de la pendiente, en m

El volumen de agua drenable almacenado **S**, es actualizado diariamente en el modelo de la cuenca El flujo lateral en la salida de la pendiente es dado por

$$q_{lat} = H_o\,v\,w \qquad 51$$

donde

q_{lat} = Flujo lateral, en m^3 h^{-1}

H_o = Espesor saturado perpendicular a la pendiente en m

v = Velocidad del flujo en la salida, en m h^{1}
w = Ancho de la pendiente en m

La velocidad en la salida se estima con

$$v = K_s \sin(a) \qquad 52$$

donde
v = Velocidad del flujo en la salida, en m h^{1}
$\mathbf{K_s}$ = Conductividad saturada, en m h^{1}

De la combinacion de las ecuaciones 50 y 52 con la 51, se tiene que

$$q_{lat} = 0\ 024 \frac{2\ S\ K_s \sin(\alpha)}{\theta_d\ L} \qquad 53$$

donde
$\mathbf{q_{lat}}$ = Flujo lateral en mm d^{1}
S = Fraccion de drenaje o avenamiento del agua almacenada, en m m^{1}
$\mathbf{K_s}$ = Conductividad saturada, en m h^{1}
a = Pendiente del terreno, en m m^{1}
$\mathbf{q_d}$ = Porosidad de drenaje o avenamiento del suelo, en m m^{1}
L = Longitud de la pendiente, en m

Si la zona saturada se eleva por encima de la ultima capa de suelo se permite que el agua fluya a la capa de arriba (regrese a la superficie a la capa de suelo superior) La cantidad de flujo hacia arriba se estima a partir de $\mathbf{K_s}$ y la longitud de la pendiente saturada

$$q_{sat} = \frac{\mathbf{24} K_s L_s}{L} \qquad 54$$

donde
$\mathbf{q_{sat}}$ = Flujo ascendente, en m d^{1}
$\mathbf{K_s}$ = Conductividad saturada, en m h^{1}
$\mathbf{L_s}$ = Longitud de la pendiente saturada en m
L = Longitud de la pendiente, en m

La mayoria de los modelos hidrologicos comprensibles dividen el perfil del suelo en capas multiples, y permiten la percolacion de una capa de suelo a la proxima y de la capa de suelo del fondo a mas abajo del perfil del suelo (como recarga al acuifero superficial) Si se consideran capas multiples, el modelo es aplicado a cada capa de suelo en forma independientemente, dando inicio en la capa superior

4 - Evapotranspiracion (ET)

El modelo ofrece dos opciones para estimar la evaporacion potencial, Hargreaves y Samani (1985), y Priestley-Taylor (1972) El metodo de Priestley-Taylor requiere la radiacion solar y la temperatura del aire como entradas El metodo de Hargreaves requiere solamente la temperatura del aire

El modelo calcula la evaporacion de los suelos y de las plantas en forma separada, como fue descrito por Ritchie (1972) La evaporacion potencial del agua del suelo se estima como una funcion de la evaporacion potencial y del indice de area foliar (LAI area de las hojas de la planta respecto al area de la superficie del suelo) La evaporacion actual del agua del suelo se estima con funciones exponenciales de la profundidad del suelo y el contenido de agua La evaporacion del agua de la planta se simula como una funcion lineal de la evaporacion potencial y el indice de area foliar

5 - Evaporacion potencial

El metodo de Priestley-Taylor (1972) estima la evaporacion potencial basado en la temperatura y radiacion

$$E_o = 1\ 28\left(\frac{h_o}{HV}\right)\left(\frac{\delta}{\delta+\gamma}\right) \qquad 55$$

donde

E_o = Evaporacion potencial, en mm
δ = Pendiente de la curva de presion de vapor a saturacion en kPa °C ^{1}
γ = Constante psicrometrica, en kPa °C ^{1}
h_o = Raciacion solar neta, en MJ m ^{2}
HV = Calor latente de vaporizacion, en MJ kg ^{1}

El calor latente de vaporizacion se estima en funcion de la temperatura como

$$HV = 2\ 50 - 0\ 0022\ T \qquad 56$$

donde

HV = Calor latente de vaporizacion, en MJ kg ^{1}
T = Temperatura media diaria del aire, en °C

La presion de vapor a saturacion tambien se estima en funcion de la temperatura media diaria del aire, con la ecuacion

$$\exp\left[54\ 88 - 5\ 03\ln(T+273) - \frac{6791}{T+273}\right] \qquad 57$$

donde

e_a = Presion de vapor a saturacion, en kPa

T = Temperatura media diaria del aire, en °C

La pendiente de la curva de la presion de vapor a saturacion se estima con la ecuacion

$$\delta = \left(\frac{e_a}{T+273}\right)\left(\frac{6791}{T+273} - 5\ 03\right) \qquad 58$$

donde

δ = Pendiente de la curva de presion de vapor a saturacion en kPa °C ^{1}

$\mathbf{e_a}$ = Presion de vapor a saturacion, en kPa

T = Temperatura media diaria del aire, en °C

La constante psicrometrica se calcula con la ecuacion

$$\gamma = 6\ 6 \times 10^{4}\ PB \qquad 59$$

donde

γ = Constante psicrometrica en kPa °C ^{1}

PB = Presion barometrica, en kPa

La presion barometrica se estima en funcion de la elevacion con la ecuacion

$$PB = 101 - 0\ 0115\ ELEV + 5\ 44 \times 10^{7}\ ELEV^{2} \qquad 60$$

donde

PB = Presion barometrica, en kPa

ELEV = Elevacion del sitio sobre el nivel del mar, en m

La radiacion solar maxima posible se calcula con las ecuaciones

$$RAMX = 30\left(1 + 0\ 033\cos\left[\frac{2\pi}{365}(i + 88\ 2)\right]\left[XT\sin\left(\frac{2\pi}{360}LAT\right)\sin(SD) + \cos\left(\frac{2\pi}{360}LAT\right)\cos(SD)\sin(XT)\right]\right) \qquad 61$$

$$XT = \cos^{1}\left[-\tan\left(\frac{2\pi}{360}LAT\right)\tan(SD)\right] \quad , \quad 0 \quad XT \quad p \qquad 62$$

donde

RAMX = Radiacion solar maxima diaria a medio de mes, en MJ m ^{2}

LAT = Latitud del sitio, en grados

SD = Angulo de declinacion solar, en radianes

i = Dia juliano del año

El angulo de declinacion solar se calcula con la ecuacion

$$SD_i = 0\ 4102 \sin\left[\frac{2\pi}{365}(i - 80\ 25)\right] \qquad 63$$

donde

SD_i = Angulo de declinacion solar del dia juliano **i**, en radianes

i = Dia juliano del año

La radiacion neta se estima con la ecuacion

$$h_{oi} = RA_i\ (1 - AB_i) \qquad 64$$

donde

h_{oi} = Radiacion solar neta del dia **i**, en MJ m^{2}

RA_i = Radiacion solar del dia **i**, en MJ m^{2}

AB_i = Albedo del dia **i** (adimensional)

El metodo de Hargreaves y Samani (1985) estima la ET potencial en funcion de la radiacion extraterrestre y la temperatura del aire El Metodo de Hargreaves fue modificado para su uso en el modelo SWRRB mediante el incremento del exponente de diferencia de temperatura de 0 5 a 0 6 Tambien, la radiacion extraterrestre es sustituida por RAMX (radiacion solar maxima posible en la superficie de la tierra) y el coeficiente es ajustado de 0 0023 a 0 0032 con fines de conservacion

La ecuacion modificada es

$$E_o = 0\ 0032 \left(\frac{RAMX}{HV}\right)(T + 17\ 8)\ (T_{mx} - T_{mn})^{0\ 6} \qquad 65$$

donde

E_i = Evaporacion potencial, en mm

RAMX = Radiacion solar maxima diaria a medio de mes en MJ m^{2}

HV = Calor latente de vaporizacion, en MJ kg^{1}

T = Temperatura media diaria del aire, en °C

T_{max} = Temperatura maxima diaria del aire, en °C

T_{min} = Temperatura minima diaria del aire, en °C

Ambos metodos estiman el albedo y consideran el suelo, cultivo, y la cubierta de nieve Si existe una cubierta de nieve con un contenido de agua de 5 mm o mas, el valor del albedo se fija en 0 6 Si la cubierta de nieve es menor de 5 mm y no hay un cultivo establecido, el albedo del suelo es el valor adoptado Cuando los cultivos estan creciendo, el albedo se determina con la ecuacion

$$AB = 0\ 23\ (1\ 0 - EA) + (AB_s)(EA) \qquad 66$$

donde

AB = Albedo

0 23 = Albedo para las plantas

AB_s = Albedo del suelo (Ver tabla 9)

EA = Indice de cubierta del suelo

El valor de **EA** varia de 0 a 1 0 de acuerdo a la ecuacion

$$EA = \exp(-0\ 05\ CV) \qquad 67$$

donde

EA = Indice de cubierta del suelo

CV = Suma de la biomasa de la parte aerea y los residuos del cultivo, en t ha^{1}

6 - Evaporacion del suelo y de la planta

El modelo calcula la evaporacion de los suelos y de las plantas en forma separada y utiliza un plantemiento similar al de Ritchie (1972)

$$_{p} = \frac{(E_o)(LAI)}{3\ 0} \qquad 0 \quad LAI \quad 3\ 0 \qquad 68$$

$$E_p = E_o, \qquad LAI > 3\ 0 \qquad 69$$

donde

E_p = Tasa de evaporacion del agua de la planta predicha, en mm d^{1}

E_o = Cantidad de evaporacion potencial, en mm d^{1}

LAI = Indice de area foliar (adimensional)

Si existen restricciones en el abastecimiento del agua en el suelo, la evaporacion del agua en la planta se reducira como se describira en la seccion de crecimiento vegetal de este capitulo

La evaporacion potencial del agua del suelo es simulada y considera la cubierta del suelo de acuerdo a la siguiente ecuacion

$$E_s = (E_o)\ (EA) \qquad 70$$

donde

E_s = Tasa de evaporacion potencial del agua del suelo, en mm d^{1}

E_o = Cantidad de evaporacion potencial, en mm d^{1}

EA = Indice de cubierta del suelo

La evaporacion potencial del agua del suelo se reduce durante los periodos de alta demanda de agua por la planta segun la ecuacion

$$E_s^* = \min\left[E_s, \frac{(ESUBs)(E_o)}{E_s + E_p}\right] \qquad 71$$

donde

$\mathbf{E^*_s}$ = Evaporacion potencial reducida del agua del suelo en mm d^{1}

$\mathbf{E_s}$ = Tasa de evaporacion potencial del agua del suelo en mm d^{1}

$\mathbf{E_o}$ = Cantidad de evaporacion potencial, en mm d^{1}

$\mathbf{E_p}$ = Tasa de evaporacion del agua de la planta predicha, en mm d^{1}

Cuando E_P es baja $E^*_s \rightarrow E_s$ pero conforme E_P se aproxima a E_o, $E^*_s \rightarrow E_s/(1+EA)$

La evaporacion del agua del suelo actual se estima con base en los primeros 0 2 m del suelo y la cubierta de nieve si esta existe Si se tienen 5 mm o mas de contenido de agua en forma de nieve, el albedo se fija en 0 6 y EA en 0 5 para estimar E_o evaporandose la nieve a esa razon Cuando toda la nieve se ha evaporado, comienza la evaporacion del agua del suelo

La evaporacion depende de la profundidad del suelo y del contenido de agua de acuerdo a la ecuacion

$$EV = E_s^*\left[\frac{Z}{Z + \exp(2\ 374 - 0\ 00713\ Z)}\right] \qquad 72$$

donde

$\mathbf{EV_z}$ = Evaporacion total del agua del suelo a la profundidad z en mm

$\mathbf{E^*_s}$ = Evaporacion potencial reducida del agua del suelo en mm d^{1}

Z = Profundidad del suelo, en mm

Los coeficientes de la ecuacion 72 se fijan de modo que den $EV=0\ 5*E^*_s$ cuando Z=10 mm y $EV=0\ 95*E^*_s$ cuando Z=100 mm

La evaporacion potencial del agua del suelo para una capa se estima de la diferencia entre los **EV** de las capas colindantes

$$SEV_i = EV_{z(i)} - EV_{z(i\ 1)} \qquad 73$$

donde

$\mathbf{SEV_i}$ = Evaporacion potencial del suelo de la capa **i**, en mm

$\mathbf{EV_{z(i)}}$ = Evaporacion total del agua del suelo a la profundidad **z** en la capa **i**, en mm

$\mathbf{EV_{z(i\ 1)}}$ = Evaporacion total del agua del suelo a la profundidad **z** en la capa **i-1** en mm

La estimacion de la distribucion en profundidad de la evaporacion del agua del suelo, se

puede reducir de acuerdo a la siguiente ecuacion si el agua del suelo esta limitada para una capa

$$SEV_s^* = SEV_i \exp\left[\frac{2\ 5\,(SW_i - FC_i)}{FC_i - WP_i}\right] \quad , \qquad SE_i < FC_i \qquad 74$$

$$SEV_i^* = SEV_i, \qquad SW_i\ ^3\ FC_i \qquad 74$$

donde

SEV $_i$ = Evaporacion ajustada del suelo de la capa **i**, en mm
SEV$_i$ = Evaporacion potencial del suelo de la capa **i**, en mm
SW$_i$ = Contenido de agua en el suelo al final del dia en la capa i en mm
FC$_i$ = Capacidad de campo menos el contenido de agua a punto de marchitez para la capa i en mm
WP$_i$ = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo i (33 kPa) en m

Por ultimo un ajuste en la evaporacion asegura que el suministro de agua en el suelo sea adecuado para satisfacer la demanda

$$SEV_i^* = \min\,(SEV_i^*, SW_i - b_w WP_i) \qquad 75$$

donde

SEV $_i$ = Evaporacion ajustada del suelo de la capa **i**, en mm
SW$_i$ = Contenido de agua en el suelo al final del dia, en la capa i en mm
WP$_i$ = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo i (33 kPa), en mm

El valor de $\mathbf{b_w}$ puede variar de 0 a 1 0 en los primero 0 5 m del suelo y se fija en 1 0 por debajo de 0 5 m de profundidad De esta forma, el modelo SWRRB puede ajustarse para permitir que los primeros 0 5 m se sequen a cualquier fraccion del punto de marchitez

7 - Deshielo

Si la nieve esta presente, esta puede derretirse cuando la temperatura de la segunda capa de suelo excede los 0 °C La nieve se derrite en funcion de la temperatura de la capa de nieve segun la ecuacion

$$SML = T\,(1\ 52 + 0\ 54\ SPT), \qquad 0 \quad SML \quad SNO \qquad 76$$

donde

SML = Velocidad de derretimiento de la nieve en mm×d ^{1}
SNO = Cantidad de agua en forma de nieve, en mm
T = Temperatura media diaria del aire, en °C
SPT = Temperatura de la capa de nieve, en °C

La temperatura de la capa de nieve se estima con la ecuacion

$$SPT = \min [T_s, T(2)] \quad (77)$$

donde

SPT = Temperatura de la capa de nieve, en °C

T_s = Temperatura de la parte superior de la capa de nieve en °C

T(2) = Temperatura en el centro de la capa de suelo 2 en °C

Las ecuaciones para la estimacion de **T_s** y **T(2)** se presentan en la seccion de temperatura del suelo El deshielo es tratado de la misma forma que la precipitacion para la estimacion del volumen de escurrimiento y percolacion, pero la energia de la precipitacion e fija en 0 0 u el gasto maximo se estima suponiendo una precipitacion distribuida uniformemente para una duracion de 24 horas

8 - Perdidas por filtracion en cauces

Muchas cuencas de regiones semiaridas tienen cauces aluviales que pierden grandes cantidades de agua de la corriente (Lane, 1982) Las extracciones, o perdidas por filtracion, reducen los volumenes de escurrimiento conforme avanza la corriente El capitulo 19 del Manual de Hidrologia de SCS (USDA, 1983), por Leonard J Lane describe un procedimiento para la estimacion de las perdidas por filtracion para las corrientes efimeras Este procedimiento es usado en el modelo SWRRB cuando los datos del cauce se conocen (ancho, profundidad, rugosidad, etc) Este metodo estima las perdidas por filtracion en la ausencia de datos de entrada y salida del flujo bajo el supuesto de que no existen aportaciones de flujo lateral o extracciones El procedimiento se basa en ecuaciones de regresion que permiten estimar las perdidas por filtracion para cauces similares de longitud y ancho variables

Del analisis de los datos observados resultan las ecuaciones de regresion

$$a_r = -0\ 001831\ (CHK)\ DU \quad (78)$$

$$k_r = \frac{-1\ 09 \ln(1\ 0 - 0\ 2649)(CHK)(DU)}{P_m} \quad (79)$$

$$b_r = e^{k} \quad (80)$$

donde

a_r = Interceptada de la ecuacion de regresion para las perdidas por filtracion para un cauce unitario, en m^3

CHK = Conductividad hidraulica efectiva del aluvion del cauce, en $mm \times h^{1}$

DU = Duracion del flujo en la corriente, en h

k_r = Factor de disminucion, en $mm \times h^{1}$

P_{in} = Volumen del flujo de entrada, en m^3

b_r = Pendiente de la ecuacion de regresion por unidad de cauce

Los parametros de la ecuacion de regresion son

$$a_x = [a_r (1 - b_r)] (1\ 0 - b_r L_c) \qquad 81$$

$$b_x = e^{2\ 0 4 k_r} L_c w \qquad 82$$

$$P_o = -\frac{a_x}{b_x} \qquad 83$$

donde

a_x = Valor de la interceptada de la ecuacion de regresion para las perdidas por filtracion, en $mm \times km^{1}$

a_r = Interceptada de la ecuacion de regresion para las perdidas por filtracion para un cauce unitario, en m^3

b_r = Pendiente de la ecuacion de regresion por unidad de cauce

w = Ancho promedio del flujo, en m

L_c = Longitud de alcance, en km

P_o = Volumen de entrada para un cauce unitario, en m^3

La ecuacion para la prediccion del volumen despues de las perdidas **Q_1**, es

$$Q_1 = 0 \qquad P_{in} < P_o$$

$$Q_1 = -a_x + b_x P_{in} \qquad P_{in} > P_o \qquad 84$$

Las perdidas por filtracion son calculadas dos veces para cada subcuenca Primero se calculan las perdidas que ocurren dentro de la subcuenca El volumen del flujo de entrada **P**, se supone que es igual al escurrimiento superficial de la subcuenca La duracion del flujo se estima de

$$DU = \frac{(Q\ ,)(A)}{18\ \ q_p} \qquad 85$$

donde

DU = Duracion del flujo en la corriente, en h

Q_i = Lamina de escurrimiento superficial del dia **i** en mm

A = Area de drenaje, en ha

q_p = Gasto maximo generado por Q_i, en $m^3 \times s^{-1}$

Luego, se calculan las perdidas que ocurren desde la salida de la subcuenca, hasta la salida de la cuenca La ecuacion para la prediccion de la descarga maxima despues de las perdidas **q_{pl}** es

$$q_{pl} = 0 \qquad Q_i = 0$$

$$q_{pl} = \frac{12\ 1\ a_x}{DU - (1\ 0 - b_x)\ P_m + b_x\ q_p} \qquad Q_i > 0 \qquad 86$$

donde

q_{pl} = Gasto maximo ajustado por las perdidas por filtracion en $m^3 \times s^{-1}$

a_x = Valor de la interceptada de la ecuacion de regresion para las perdidas por filtracion, en $mm \times km^{-1}$

DU = Duracion del flujo en la corriente, en h

P_m = Volumen del flujo de entrada, en m^3

q_p = Gasto maximo generado por Q_i, en $m^3 \times s^{-1}$

Q = Lamina de escurrimiento superficial, en mm

La duracion del flujo desde las subcuenca hasta la salidad de la cuenca se estima con la ecuacion 86 usando **Q_1** y **q_{p1}**, y se repite el procedimiento El volumen y el gasto maximo despues de las perdidas son

$$Q_1 = Q_i - TL$$

$$q_{pl} = \frac{(Q_1)(A)}{1\ 8\ DU} \qquad 87$$

donde

Q_1 = Lamina de escurrimiento superficial ajustado paa las perdidas por filtracion, en mm

Q_i = Lamina de escurrimiento superficial del dia **i** en mm

TL = Perdidas por filtracion, en mm

q_{pl} = Gasto maximo ajustado por las perdidas por filtracion en $m^3 \times s^{-1}$

A = Area de drenaje, en ha

DU = Duracion del flujo en la corriente, en h

Las variables del clima necesarias para el manejo del modelo SWRRB son la precipitacion, temperatua del aire, y radiacion solar Si se dispone de datos de precipitacion diaria, estos pueden alimentarse directamente al modelo SWRRB En caso contrario el componente climatico del modelo puede simular la precipitacion diaria y la temperatura La radiacion solar es siempre simulada Un conjunto de variables climaticas se pueden simular para toda la cuenca o para cada subcuenca La descripicion de los modelos usados para la simulacion de la precipitacion, temperatura, y radiacion solar se menciona a continuacion

1 - Precipitación

El modelo de precipitacion SWRRB desarrollado por Nicks (1974), es un modelo de cadena de Markov de primer orden, Asi al modelo se le proporcionan las probabilidades mensuales de tener precipitacion Para cualquier dia, la entrada debe incluir informacion en cuanto a si el dia previo fue seco o humedo Un numero aleatorio (0-1) es generado y se compara con la probabilidad humedad-sequia apropiada Si el numero aleatorio es menor o igual ala probabilidad humedad-sequia, la precipitacion ocurre en ese dia Los numeros aleatorios mayores que la probabilidad humedad-sequia indican que no hay precipitacion Debido a que la condicion humedad-sequia del primer dia se introduce, el proceso puede ser repetido hasta el proximo dia y asi sucesivamente durante el periodo de simulacion

En caso de que las probabilidades humedad-sequia no esten disponibles, pueden ser sustituidas por el numero mensual promedio de dias lluviosos La probabilidad de un dia humedo se calcula directamente con el numero de dias humedos

$$PW = \frac{NWD}{ND} \qquad 88$$

donde

PW = Probabilidad de un dia humedo
NWD = Numero de dias lluviosos
ND = Numero de dias, en un mes

La probabilidad de un dia humedo despues de un dia seco se puede estimar como una fraccion de PW

$$P(W/D) = \beta \bullet PW \qquad 89$$

donde

P(W/D) = Probabilidad de un dia humedo despues de un dia seco
β = Fraccion usualmente en el rango de 0 6 a 0 9
PW = Probabilidad de un dia humedo

La probabilidad de un dia humedo seguido de un dia humedo puede ser calculada

directamente con la ecuacion

$$P(W/W) = 1\ 0 - b \times PW \qquad 90$$

donde

P(W/W) = Probabilidad de un dia humedo despues de un dia humedo
b = Fraccion usualmente en el rango de 0 6 a 0 9
PW = Probabilidad de un dia humedo

Cuando **b** → 1 0, los dias humedos no afectan la probabilidad de lluvia, P(W/D)=P(W/W)=PW Bajos valores de **b** afectan significativamente los dias humedos, **b** → 0 0, P(W/D) → 1 0 De esta forma **b** controla el intervalo entre los eventos de precipitacion pero no tiene efecto en el numero de dias humedos Para muchas localidades, **b** = 0 75 estima satisfactoriamente a P(W/D) Aunque las ecuaciones 90 y 91 pueden dar probabilidades ligeramente diferentes a aquellas estimadas a partir de los registros de lluvia, garantizan una simulacion correcta del numero de eventos de lluvia

Cuando un evento de precipitacion ocurre, la cantidad de lluvia diaria se determinaa traves de una funcion de distribucion normal asimetrica

$$R_i = \left(\frac{\left[\left(SND_i - \frac{SCF_k}{6\ 0} \right) \left(\frac{SCF_k}{6\ 0} \right) + 1 \right]^3 - 1}{SCF_k} \right) RSDV_k + \overline{R}_k \qquad 92$$

donde

$\mathbf{R_i}$ = Cantidad de lluvia durante el dia **i**, en mm
$\mathbf{SND_i}$ = Desviacion estandar normal para el dia **i**
$\mathbf{SCF_k}$ = Coeficiente de sesgo o asimetria del mes k
$\mathbf{RSDV_k}$ = Desviacion estandar de la precipitacion diaria del mes **k**, en mm
$\mathbf{R_k}$ = Precipitacion media diaria en el mes **k**, en mm

Si no se dispone de la desviacion estandar y el coeficiente de sesgo (coeficiente de asimetria), el modelo simula la precipitacion diaria con el uso de una distribucion exponenacial modificada

$$R_i = \frac{[-\ln(\mu)]^{\zeta} R_k}{\int_{0\ 0}^{1\ 0} [-\ln(\chi)]^{\zeta}\, dx} \qquad 93$$

donde

$\mathbf{R_i}$ = Cantidad de lluvia durante el dia **i**, en mm

μ = Numero aleatorio uniforme (0 0 - 1 0)

$\mathbf{R_k}$ = Precipitacion media diaria en el mes **k**, en mm

χ = Numero aleatorio uniforme (0 0 - 1 0)

ξ = Parametro usualmente en el rango de 1 0 a 2 0

El valor mas grande de **z**, indica eventos de lluvia extremos Un valor de 1 3 da resultados satisfactorios en muchos lugares de los Estados Unidos El denominador de la ecuacion 93 asegura que la precipitacion media simulada a largo plazo es correcta El exponencial modificado es usualmente un sustituto satisfactorio y requiere solamente la precipitacion diaria promedio mensual como
entrada

Si la precipitacion es simulada para cada subcuenca, la cantidad calculada con las ecuaciones 92 o 93 supone ser la media, en se dia de todos los pluviografos El centro de la tormenta estara localizado en un rectangulo con limites fijados a una distancia de 100 kilometros de las coordenadas maximas y minimas (X, Y) de los sitios de medicion de lluvia de la cuenca Asi, el centro de la tormenta podria localizarze en la cuenca o tan lejos como 100 km en cualquier direccion desde la cuenca Cada centro de la tormenta esta definido con dos numeros aleatorios, uno para el eje X y otro para el eje Y La precipitacion para cada evento se calcula con una funcion de reduccion de area (Nicks y Igo, 1980)

$$RF = \frac{1 - (AO)(DUR)^{0\ 148}}{337\ 5 + 1\ 09\ AO} \qquad 94$$

donde

RF = Cociente adimensional de reduccion de la precipitacion para las sucuencas (0 - 1)

DUR = Duracion de la lluvia, en h

AO = Area circular para el ajuste de lluvia para las subcuencas, en km^2

El area circular, **AO**, se calcula con la distancia entre el lugrar de la medicion y el centro de la tormenta para calcular el diametro

$$AO = 0\ 7854\ (X_c - X_i)^2 + (Y_c - Y_i)^2 \qquad 95$$

donde

AO = Area circular para el ajuste de lluvia para las subcuencas en km^2

$\mathbf{X_c,Y_c}$ = Coordenadas del centro de la tormenta, en km

$\mathbf{X_i,Y_i}$ = Coordenadas de lo sitios de medicion de la lluvia, en km

Finalmente, la precipitacion es generada para cada medicion segun la ecuacion

$$R_i = \frac{(RF_i)(R)(N)}{\sum_{i=1}^{N} RF_i} \qquad 96$$

donde

R_i = Precipitacion medida durante el dia i, en mm

RF_i = Factor adimensional de reduccion

R = LLuvia media diaria, en mm

N = Numero de subcuencas

La precipitacion diaria es distribuida entre la lluvia y la nevada, a traves de una combinacion de la temperatura del aire maxima diaria T_{mx} y la temperatura del suelo de la capa superficial $T(1)$ Si el promedio de T_{mx} y $T(1)$ es 0 °C o menor, la precipitacion es una nevada, o de lo contrario, es lluvia

2 - Temperatura del aire y radiacion solar

El modelo desarrollado por Richardson (1981) fue seleccionado para usarse en el modelo SWRRB debido a que este simula la temperatura y radiacion, las cuales estan mutuamente correlacionadas con la lluvia La temperatura del aire diaria maxima y minima y la radiacion solar son generados a partir de una distribucion normal multivariada

El modelo de generacion multivariado utilizado, implica que la temperatura maxima, temperatura minima, y la radiacion solar estan distribuidos normalmente y que la correlacion serial de cada variable puede ser descrita por un modelo lineal autorregresivo de primer orden Los detalles del modelo de generacion multivariado fueron descritos por Richardon (1981) la estructura de dependencia de la temperatura maxima diaria, temperatura minima, y radiacion solar fue descrita por Richardson (1982)

El modelo de temperatura requiere los promedios mensuales de las temperaturas maxima y minima y sus desviaciones estandar como entradas Sino se dispone de las desviaciones estandar, los minimos y maximos mensuales extremos observados a largo plazo pueden ser sustituidos El modelo estima la desviacion estandar como 0 25 de la diferencia entre el extremo y la media para cada mes Por ejemplo

$$SDTMX_k = 0\ 25\ (TE_{mx\,k} - T_{mx\,k}) \qquad 97$$

donde

$SDTMX_k$= Desviacion estandar de la temperatura diaria maxima del mes k

$TE_{mx\,k}$ = Temperatura maxima extrema diaria

$T_{mx\,k}$ = Temperatura maxima promedio diaria para el mes k

El modelo de radiacion solar usa la aproximacion extrema extensivamente Asi, solamente los promedios mensuales de la radiacion solar diaria se requieren como entradas La ecuacion para la estimacion de la desviacion estandar es

$$SIDRA_k = 0\ 25\ (RAMX_k - RA_k) \qquad 98$$

donde

$SIDRA_k$= Desviacion estandar de la radiacion solar diaria del mes **k**, en $MJ \times m^2$
$RAMX_k$= Radiacion solar maxima diaria a la mitad del mes k, en $MJ \times m^2$
RA_k = Radiacion solar media diaria para el mes k, en $MJ \times m^2$

La temperatura maxima y la radiacion solar tienden a disminuir en los dias lluviosos Por lo que es necesario ajustar la temperatura maxima promedio y la radiacion solar a la baja, para la simulacion de las condiciones de los dias lluviosos Para $\mathbf{T_{mx}}$ esto se raliza al suponer que los valores de un dia humedo son menores que los valores de un dia seco mediante alguna fraccion de $T_{mx} - T_{mn}$

$$TW_{mx\,k} = TD_{mx\,k} - \Omega_T\,(T_{mx\,k} - T_{mn\,k}) \qquad 99$$

donde
$TW_{mx\,k}$= Temperatura maxima diaria promedio para los dias humedos, en el mes **k**, en °C
$TD_{mx\,k}$= Temperatura maxima diaria promedio para los dias secos, en el mes **k**, en °C
Ω_T = Factor de proporcion que varia de 0 0 a 1 0
$T_{mx\,k}$ = Temperatura maxima promedio diaria en el mes **k**, en °C
$T_{mn\,k}$ = Temperatura minima promedio diaria en el mes **k**, en °C

Al asignar W_T = 1 0 se tienen las mas altas desviaciones en los dias humedos y si W_T = 0 0 se ignora el efecto del dia humedo Los datos observados indican que W_T usualmente se encuentra entre 0 5 y 1 0

Debido a que la ecuacion 99 da valores de temperatura maxima promedio mas bajos en dias humedos, una ecuacion asociada es necesaria para incrementar ligeramente la temperatura maxima promedio en los dias secos El desarrollo se toma directamente de la ecuacion de continuidad

$$(T_{mx\,k})\,(ND_k) = (TW_{mx\,k})\,(NWD_k) + (TD_{mx\,k})\,(NDD_k) \qquad 100$$

donde
$T_{mx\,k}$ = Temperatura maxima promedio diaria en el mes **k**, en °c
ND_k = Numero de dias del mes **k**
$TW_{mx\,k}$= Temperatura maxima diaria promedio para los dias humedos, en el mes k, en °C
NWD_k = Numero de dias humedos en el mes **k**
$TD_{mx\,k}$= Temperatura maxima diaria promedio para los dias secos, en el mes **k**, en °C
NDD_k = Numero de dias secos del mes **k**

La ecuacion deseada se obtiene al sustituir la ecuacion 99 en la ecuacion 100 y despejando para **TD**

$$TD_{mx\,k} = T_{mx\,k} + \left(NWDSUB \frac{k}{ND_k} \right) \Omega_T\,(T_{mx\,k} - T_{mn\,k})$$

101

donde
$\mathbf{TD_{mx\,k}}$ = Temperatura maxima diaria promedio para los dias secos, en el mes **k**, en °C
$\mathbf{T_{mx\,k}}$ = Temperatura maxima promedio diaria en el mes **k**, en °c
$\mathbf{NWD_k}$ = Numero de dias humedos en el mes **k**
$\mathbf{ND_k}$ = Numero de dias del mes **k**
Ω_T = Factor de proporcion que varia de 0 0 a 1 0
$\mathbf{T_{mn\,k}}$ = Temperatura minima promedio diaria en el mes **k**, en °C

El uso de la ecuacion de continuidad garantiza que los valores simulados a largo plazo de la temperatura maxima promedio concuerden con los valores de entrada de $\mathbf{T_{mx}}$

El metodo de ajuste de la radiacion solar para dias humedos y secos es similar al metodo de ajuste para la temperatura maxima La radiacion en dias humedos es una fraccion de la radiacion de una dia seco

$$RAW_k = \Omega_R\, RAD_k \qquad 102$$

donde
$\mathbf{RAW_k}$ = Radiacion solar diaria promedio en los dias humedos del mes **k**, en MJ×m^2
Ω_R = Factor de proporcion que varia de 0 0 a 1 0
$\mathbf{RAD_k}$ = Radiacion solar diaria promedio en los dias secos del mes **k**, en MJ×m^2

Un valor de W_R de 0 5 da resultados satisfactorios para muchos lugares La ecuacion del dia seco se desarrolla mediatne la sustitucion de la temperatura por la radiacion en la ecuacion 101 y sustituyendo la ecuacion 102 para RAW Entonces

$$RAD_k = \frac{(RA_k)(ND_k)}{\Omega_R(NWD_k) + NDD_k} \qquad 103$$

Donde
$\mathbf{RAD_k}$ = Radiacion solar diaria promedio en los dias secos del mes **k** en MJ×m^2
$\mathbf{RA_k}$ = Radiacion solar diaria promedio del mes **k**, en MJ×m^2
$\mathbf{ND_k}$ = **Numero de dias del mes k**
Ω_R = **Factor de proporcion que varia de 0 0 a 1 0**
$\mathbf{NWD_k}$ = Numero de dias humedos en el mes **k**
$\mathbf{NDD_k}$ = Numero de dias secos del mes **k**

III - Produccion de sedimentos

La produccion de sedimentos es calculada para cada subcuenca con la Ecuacion Universal de Perdida de Suelos Modificada (EUPSM) (Williams y Berndt, 1977)

$$Y = 11\ 8\ (V\ q_p)^{0\ 56}\ (K)\ (C)\ (PE)\ (LS) \qquad 104$$

donde

Y = Produccion de sedimento en la subcuenca, en t
V = Volumen de escurrimiento superficial de la subcuenca, en m^3
$\mathbf{q_p}$ = Gasto maximo de la subcuenca, en $m^{3\times}s^{1}$
K = Factor de erosionabilidad del suelo, en $t\times h\times ton^{1}\times pie^{1}\times pulg^{1}$
C = Factor adimensional de manejo del cultivo
PE = Factor adimensional de practicas del control de la erosion
LS = Factor adimensional de longitud de la pendiente e inclinacion

El factor **LS**, se calcula con la ecuacion (Wishmeier y Smith, 1978)

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22\ 1}\right) SUPx\iota\ (65\ 41\ S^2 + 4\ 565\ S + 0\ 065) \qquad 105$$

donde

LS = Factor adimensional de longitud de la pendiente e inclinacion
λ = Longitud superficial de la pendiente, en m
ξ = Parametro adimensional del factor LS de la EUPSM
S = Pendiente de la superficie del terreno, en $m\times m^{1}$

El exponente **x**, varia con la pendiente y se calcula en el SWRRB con la ecuacion

$$\xi = 0\ 6\ [1 - \exp(-35\ 835\ S)\ ] \qquad 106$$

donde

ξ = Parametro adimensional del factor LS de la EUPSM
S = Pendiente de la superficie del terreno, en $m\times m^{1}$

El factor manejo del cultivo, **C**, es evaluado en todos los dias cuando hay escurrimiento segun la ecuacion

$$C = \exp[(-0\ 2231 - CVM)\ \exp(-0\ 00115\ CV) + CVM] \qquad 107$$

donde

C = Factor adimensional de manejo del cultivo
CVM = Valor minimo de C
CV = Cubierta del suelo (biomasa de la parte aerea + residuos), en $kg\times ha^{1}$

El valor de **CVM**, se estima a partir del promedio anual del factor **C**, con la ecuacion

$$CVM = 1\ 463 \ln(CVA) + 0\ 1034 \qquad 108$$

donde
CVM = Valor minimo de C
CVA = Valor medio de C

El valor de **CVA**, para cada cultivo se determina a partir de la metodologia de Wischmeier y Smith (1978), de la Tabla 12 en el Apendice VIII se proporcionan los valores correspondientes para algunos cultivos Los valores de **K** por diferentes metodos se presentan en el Apendice IX, y los factores **PE** pueden ser estimados para cada subcuenca egun la informacion contenida en las tablas 17, 18 y 19 (Apendice X)

IV - Nutrientes

La produccion de nutrientes en la subcuenca y el ciclo de los nutrientes fueron tomados del modelo EPIC (Williams et al , 1984) y modificados en lo necesario para incluirlos en el modelo SWRRB El modelos SWRRB permite llevar a cabo calculos simultaneos de nutrientes para cada subcuenca y movimiento de agua, sedimentos, y nutrientes desde las salidas de las subcuencas hasta la salida total de la cuenca

1 - Nitrogeno

a- Perdida de nitratos en el escurrimiento superficial

La cantidad de NO_3-N en el escurrimiento se estima para cada subcuenca y para la primer capa de suelo (10 mm de groso) solamente La cantidad total de agua que sale de la capa es la suma del escurrimiento, flujo subsuperficial lateral, y percolacion

$$QT = Q_i + O_1 + QR_1 \qquad 109$$

donde
QT = Perdida total de agua en la primera capa, en mm
$\mathbf{Q_i}$ = Lamina de escurrimiento del dia **i**, en mm
$\mathbf{O_1}$ = Percolacion de la primera capa, en mm
$\mathbf{QR_1}$ = Flujo lateral de la primera capa, en mm

La cantidad de NO_3-N perdido con **QT** es

$$VNO3 = (QT)\ (C_{NO3}) \qquad 110$$

donde
VNO3 = Cantidad de NO_3-N perdida en la primera capa
QT = Perdida total de agua de la primera capa, en mm
$\mathbf{C_{NO3}}$ = Concentracion de NO_3-N en la primera capa

Al final del dia, la cantidad de NO_3-N que queda en la capa es

$$WNO3 = WNO3_O - (QT)\,(C_{NO3}) \qquad 111$$

donde

WNO3 = Peso de NO_3-N contenido en la capa al final del dia, en $g \times m^3$

$WNO3_o$ = Peso de NO_3-N contenido en la capa al inicio del dia, en $g \times m^3$

QT = Perdida total de agua de la primera capa en mm

C_{NO3} = Concentracion de NO_3-N en la primera capa

La concentracion de NO_3-N puede ser estimada al dividir el peso de NO_3-N entre el volumen de agua almacenada

$$C_{NO3} = C_{NO}3 - C_{NO}3\left(\frac{-QT}{PO_1 - WP_1}\right) \qquad 112$$

donde

C'_{NO3} = Concentracion de NO_3-N al final del dia

C_{NO3} = Concentracion de NO_3-N en la primera capa

QT = Perdida total de agua de la primera capa, en mm

PO_1 = Porosidad de la capa de suelo 1

WP_1 = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo 1, en mm

La ecuacion 112 es una aproximacion por diferencia finita a la ecuacion exponencial

$$C_{NO3} = C_{NO}3 - \exp\left(\frac{-QT}{PO_1 - WP_1}\right) \qquad 113$$

donde

C'_{NO3} = Concentracion de NO_3-N al final del dia

C_{NO3} = Concentracion de NO_3-N en la primera capa

QT = Perdida total de agua de la primera capa, en mm

PO_1 = Porosidad de la capa de suelo 1

WP_1 = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo 1, en mm

Asi, **VNO3** puede ser calculada pora cualquier valor de **QT** mediante la integracion de la ecuacion 113

$$VNO3 = WNO3\left[1 - \exp\left(\frac{-QT}{PO_1 - WP_1}\right)\right] \qquad 114$$

donde

VNO3 = Cantidad de NO_3-N perdida en la primera capa

WN03 = Peso de NO_3-N contenido en la capa al final del dia, en $g \times m^3$

QT = Perdida total de agua de la primera capa, en mm

PO_1 = Porosidad de la capa de suelo 1

WP_1 = Contenido de agua a punto de marchitez para la capa de suelo 1, en mm

La concentracion promedio de **QT** del dia es

$$C_{NO}3 = VNO\frac{3}{QT} \qquad 115$$

donde

C_{NO3} = Concentracion de NO_3-N en la primera capa
VNO3 = Cantidad de NO_3-N perdida en la primera capa
QT = Perdida total de agua de la primera capa, en mm

Las cantidades de NO_3-N contenidas en el escurrimiento, flujo lateral, y percolacion con los productos del volumen de agua y la concentracion de la ecuacion 115

b - Lixiviacion de nitratos

La lixiviacion y el flujo subsuperficial lateral en las capas inferiores son tratados con el mismo planteamiento utilizado en la capa superior excepto que el escurrimiento superficial no se considera

c - Transporte de nitrogeno organico por los sedimentos

Una funcion factorial desarrollada por McElroy et al (1976) fue modificada por Williams y Hann (1978) para su aplicacion a eventos individuales de escurrimiento, la cual es utilizada para estimar las perdidas de nitrogeno organico de cada subcuenca La funcion factorial es

$$YON = 0\ 001\ (Y)\ (CON)\ (ER) \qquad 116$$

donde

YON = Perdida en el escurrimiento de nitrogeno organico en la salida de la subcuenca, en $kg \times ha^{1}$
Y = Produccion de sedimentos, en $t \times ha^{1}$
CON = Concentracion de nitrogeno organico en la capa de suelo superficial, en $g \times t^{1}$
ER = Proporcion de enriquecimiento

El valor de **CON** se introduce al modelo y es constante durante la simulacion La proporcion de enriquecimiento es la concentracion de nitrogeno organico en el sedimento dividida por la del suelo Las proporciones de enriquecimiento estan logaritimicamente relacionadas con la concentracion de sedimento como lo describe Menzel (1980) Se desarrollo para el modelo SWRRB una relacion de concentracion de sedimentos y enriquecimiento para un evento individual al considerar los limites superior e inferior El limite superior de la proporcion de enriquecimiento es el inverso de la tasa de entrega de sedimentos Al excederse el inverso de la tasa de entrega implica que mas nitrogeno organico abandona la cuenca que el que es removido por el suelo La tasa de entrega se estima para cada evento de escurrimiento al utilizar la ecuacion

$$DR = \left(\frac{q_P}{r_{ep}}\right)^{0\ 56} \qquad 117$$

donde

DR = Tasa de entrega de sedimentos (produccion de sedimentos de la subcuenca dividido por el grosor de la lamina de erosion)

$\mathbf{q_p}$ = Gasto maximo generado por Q_i, en mm×h^{-1}

$\mathbf{r_{ep}}$ = Intensidad maxima de la lluvia en exceso, en mm×h^{-1}

La ecuacion 117 esta basada en la estimacion de la produccion de sedimentos de la EUPSM (Williams, 1975) La intensidad de la lluvia en exceso no puede ser evaluada directamente debido a que el modelo hidrologico solo predice la cantidad de escurrimiento diario total Un estimador de la intensidad de lluvia puede ser obtenido con la ecuacion

$$r_{ep} = r_p - f \qquad 118$$

donde

$\mathbf{r_{ep}}$ = Intensidad maxima de la lluvia en exceso, en mm×h^{-1}

$\mathbf{r_p}$ = Intensidad maxima de la lluvia, en mm×h^{-1}

f = Infiltracion promedio, en mm×h^{-1}

La infiltracion promedio se puede calcular con la ecuacion

$$f = \frac{R_i - Q_i}{DUR} \qquad 119$$

donde

f = Infiltracion promedio, en mm×h^{-1}

$\mathbf{R_i}$ = Cantidad de lluvia durante el dia i, en mm

$\mathbf{Q_i}$ = Lamina de escurrimiento del dia i, en mm

DUR = Duracion de la lluvia, en h

El procedimiento para la estimacion de la duracion de la lluvia es proporcionado por Williams et al , (1984)

$$DUR = \frac{4\,605 \quad R_i}{r_p} \qquad 120$$

donde

DUR = Duracion de la lluvia, en h

$\mathbf{R_i}$ = Cantidad de lluvia durante el dia i, en mm

r_p = Intensidad maxima de la lluvia, en mm×h^{1}

El limite inferior de la tasa de enriquecimiento es 1 0, la distribucion del tamaño de la particula de los sedimentos es la misma que la del suelo Asi 1 ER 1/DR La ecuacion logaritmica que estima la tasa de enriquecimiento es

$$ER = x_1 c_a^{x_2} \qquad 121$$

donde
ER = Proporcion de enriquecimiento
C_a = Concentracion de sedimentos, en g×m^{3}
x_1,x_2 = Parametros para los limites superior e inferior

Para alcanzar una tasa de enriquecimiento de 1 0, la concentracion de sedimentos debera ser muy alta A la inversa, una concentracion de sedimentos muy baja provocaria que la tasa de enriquecimiento se aproxima a 1/DR La solucion simultanea de la ecuacion 121 en sus limites supone que la concentracion de sedimentos varia de 500 a 250,000 g×m^{3} dando

$$x_2 = \frac{\log\left(\frac{1}{DR}\right)}{2\ 699} \qquad 122$$

$$x_1 = \frac{1}{(0\ 25)^{x_2}} \qquad 123$$

donde
x_1,x_2 = Parametros para los limites superior e inferior
DR = Tasa de entrega de sedimentos (produccion de sedimentos de la subcuenca dividido por el grosor de la lamina de erosion

d - Absorcion del cultivo

Con un enfoque de suministro y demanda se estima el consumo de nitrogeno La demanda de nitrogeno del cultivo diaria (dia i) se puede calcular con la ecuacion

$$UND_i = (C_{NB})_i B_i - (C_{NB})_{i\ 1} B_{i\ 1} \qquad 124$$

donde
UND_i = Demanda de nitrogeno del cultivo para el dia i, en kg×ha^{1}
C_{NBi} = Concentracion optima de nitrogeno para el cultivo del dia i
$C_{NBi\ 1}$ = Concentracion optima de nitrogeno para el cultivo del dia i
B_i = Valor acumulado de nitrogeno al dia i, en kg×ha^{1}
$B_{i\ 1}$ = Valor acumulado de nitrogeno al dia i-1, en kg×ha^{1}

La concentracion optima de nitrogeno del cultivo se calcula en funcion de la etapa de crecimiento con la ecuacion

$$C_{NB} = 4\ 0\ (bn) + 1\ 54\ (bn)\ \exp(-bn\ B_1) \qquad 125$$

donde

C_{NB} = Concentracion optima de nitrogeno para el cultivo
bn = Parametro del cultivo que expresa la concentracion de nitrogeno
B_1 = Fraccion de la etapa de crecimiento

El valor de **B_1** se estima en funcion de las unidades de calor

$$B_{1,i} = \sum_{k=1}^{i} \frac{HUI}{PHU} \qquad 126$$

donde

$B_{1,i}$ = Fraccion de la etapa de crecimiento
HUI = Unidades calor diarias (arriba de la temperatura base del cultivo), en °C
PHU = Unidades calor potenciales hasta la madurez del cultivo en °C

Se permite que el cultivo tome nitrogeno de cualquier capa de suelo que tenga raices La absorcion comienza en la capa superior y continua hasta abajo hasta que la demanda diaria sea satisfecha o hasta que todo el nitrogeno se halla agotado Si el suelo no puede satisfacer la demanda diaria de nitrogeno de las leguminosas, el deficit es atribuido a la fijacion de nitrogeno

2 - Fosforo

a - Perdida de P soluble en el escurrimiento superficial

El planteamiento del modelo SWRRB se basa en el concepto de distribucion de plaguicidas en solucion y sedimentos como lo describe Leonard y Wauchope (Knisel, 1980) Debido a que el fosforo esta en su mayor parte asociado con los sedimentos, la ecuacion del escurrimiento de P soluble se puede expresar en forma simple

$$YSP = \frac{0\ 01\ \ (C_{LPP})\ (Q)}{k_d} \qquad 127$$

donde

YSP = Fosforo soluble perdido en el escurrimiento, en kg×ha^{1}

C_{LPP} = Concentracion de fosforo AP en la capa de suelo, en g×t^{1}
Q = Lamina de escurrimiento, en mm
k_d = Concentracion de P en el sedimento respecto al del agua, en m^3×t^{1}

El valor de **C_{LPP}** se introduce al modelo y permanece constante El valor de **k_d** usado en el

modelo SWRRB es 175

b - Transporte de P por los sedimentos

El transporte de P en los sedimentos se simula con una funcion factorial como se describe para el transporte de nitrogeno organico La funcion factorial de P es

$$YP = 0\ 01\ (Y)\ (C_P)\ (ER) \qquad 128$$

donde

YP = Perdida de P en la fase de sedimento en el escurrimiento, en kg×ha^{1}
Y = Produccion de sedimentos, en t×ha^{1}
C_P = Concentracion de P en la capa de suelo superior en g×t^{1}
ER = Proporcion de enriquecimiento

3 - Aplicacion de fertilizante

Las fechas y dosis de aplicacion de N y P son introducidas al modelo La cantidad total de N y P que se aplica en la primera capa de suelo puede ser transportada por el agua y los sedimentos, o bien ser lixiviada o absorbida por el cultivo

V - PLAGUICIDAS

La tecnologia del modelo GLEAMS (Leonard et al , 1987) fue incluida dentro del modelo SWRRB para la simulacion del transporte de plaguicidas por el escurrimiento, percolacion, evaporacion del suelo, y sedimentos Los plaguicidas pueden ser aplicados en cualquier epoca y dosis al follaje de la planta o a al suelo a cualquier profundidad Cuando se aplica el plaguicida, hay una fuga a la atmosfera Asi, la cantidad que llega al suelo o a las plantas se expresa con la ecuacion

$$PAPE = (PAPR)\ (PAEF) \qquad 129$$

donde

PAPE = Cantidad efectiva de plaguicida aplicada, en kg×ha^{1}
PAPR = Cantidad actual de plaguicida aplicada, en kg×ha^{1}
PAEF = Factor de eficiencia de aplicacion

Para determinar que cantidad de plaguicida llega al suelo, la cantidad de suelo cubierto por las plantas se estima con la ecuacion

$$GC_i = \frac{[1 - ERCDOTFC\ (1\ 33\ LAI_{i\,m} - 2)]}{2} \qquad 130$$

donde

GC_i = Fraccion del suelo que esta cubierto por las plantas el dia i
ER = Proporcion de enriquecimiento

FC = Contenido de agua a capacidad de campo, en mm
LAI_i = Indice de area foliar en el dia i

Por lo tanto, la cantidad de plaguicida que llega a las plantas se calcula con la ecuacion

$$FP = (GC)\ (PAPE) \qquad 131$$

donde
FP = Cantidad de plaguicida que es interceptada por las plantas
GC = Fraccion del suelo que esta cubierto por las plantas
PAPE = Cantidad efectiva de plaguicida aplicada, en $kg \times ha^{-1}$

El plaguicida restante cae al suelo y es simplemente la diferencia entre la cantidad efectiva aplicada y la cantidad interceptada por las plantas

$$GP = PAPE - FP \qquad 132$$

donde
GP = Cantidad de plaguicida que llega al suelo
PAPE = Cantidad efectiva de plaguicida aplicada, en $kg \times ha^{-1}$
FP = Cantidad de plaguicida que es interceptada por las plantas

El plaguicida que queda en el follaje de la planta puede ser lavado por la lluvia Se supone que la fraccion de plaguicida que es potencialmente desprendible es lavado de las plantas una vez que una cantidad de umbral de lluvia se excede El modelo utiliza un valor umbral de 2 5 mm y las fracciones de lavado potencial para varios plaguicidas han sido estimadas (Leonard et al , 1987) Las ecuaciones apropiadas para el calculo del lavado y la adicion de este al suelo son

$$WO = (WOF)\ (FP) \qquad R_i \geq 2\ 5\ mm$$

$$WO = 0\ , \qquad R_i < 2\ 5\ mm \qquad 133$$

$$GP = GP + WO \qquad 134$$

$$FP = FP - WO \qquad 135$$

donde
WO = Cantidad de plaguicida lavado de las plantas por una sola tormenta
WOF = Fraccion lavada de una plaguicida en particular (ver tabla 21 en el Apendice XIII)
FP = Cantidad de plaguicida que es interceptada por las plantas
GP = Cantidad de plaguicida que llega al suelo
R_i = Cantidad de lluvia durante el dia i, en mm

El plaguicida en las plantas y el suelo se pierde del sistema con base en las siguientes ecuaciones de disminucion

$$GP = (GP_o) \exp(-0\ 693) \qquad 136$$

$$FP = (FP_o) \exp(-0\ 693) \qquad 137$$

donde

GP = Cantidad final de plaguicida en el suelo
GP_0 = Cantidad inicial de plaguicida en el suelo
HLS = Periodo de vida media del plaguicida en el suelo en dias
FP = Cantidad final de plaguicida que es interceptada por las plantas
FP_0 = Cantidad inicial de plaguicida que es interceptada por las plantas
HLP = Periodo de vida media de los residuos de plaguicida en el follaje, en dias

Los valores **HLP** y **HLS** han sido establecidos para varios plaguicidas (Leonard et al , 1987) ver Tabla 21 en el Apendice XIII

Otra forma en que los plaguicidas se pueden perder en los primeros 10 mm de suelo, es a traves de la lixiviacion El componente de lixiviacion del modelo GLEAMS es utilizado aqui con una ligera modificacion El cambio en la cantidad de plaguicida contenido en los primeros 10 mm se expresa como una funcion del tiempo, concentracion y cantidad de infiltracion segun la funcion

$$\frac{dGP}{dt} = (PSTC_w)(f) \qquad 138$$

donde

GP = Cantidad de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**
$PSTC_w$ = Concentracion del plaguicida en el agua, en $g \times t^{1}$
f = Flujo de agua a traves de la zona, en $mm \times h^{1}$

La cantidad total de plaguicida contenida en los primeros 10 mm es la suma de lo adsorbido y movilizado

$$GP = 0\ 01\ (PSTC_W)\ (sw) + 0\ 1\ (PSTC_S)\ (BD) \qquad 139$$

donde

GP = Cantidad de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**
$PSTC_w$ = Concentracion del plaguicida en el agua, en $g \times t^{1}$
SW = Cantidad de agua lamacenada en los primeros 10 mm de suelo, en mm
$PSTC_s$ = Concentracion del plaguicida en el suelo, en $g \times t^{1}$
BD = Densidad del suelo, en $t \times m^{3}$

La relacion de la concentracion del plaguicida adsorbido con la concentracion del plaguicida del agua ha sido estimada para varios plaguicidas (Leonard et al , 1987) y se expresa mediante la ecuacion

$$K_d = \frac{PSTC_s}{PSTC_w} \qquad 140$$

donde

K_d = Constante de distribucion de plaguicida, (ver Tabla 21 en el Apendice XIII)
$PSTC_s$ = Concentracion del plaguicida adsorbido por el suelo en $m^3 \times t^{1}$
$PSTC_w$ = Concentracion del plaguicida en el agua del suelo, en $m^3 \times t^{1}$

Al sustituir la ecuacion 140 en la ecuacion 139 se tiene que

$$GP = 0\ 01\ (PSTC_w)\ (SW) + 0\ 1\ (PSTC_w)\ (K_d)\ (BD) \qquad 141$$

donde

GP = Cantidad de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**
$PSTC_w$ = Concentracion del plaguicida en el agua, en $g \times t^{1}$
SW = Cantidad de agua lamacenada en los primeros 10 mm de suelo en mm
K_d = Constante de distribucion de plaguicida
BD = Densidad del suelo en $t \times m^{3}$

Al resolver la ecuacion 141 para $PSTC_w$ se obtiene

$$PSTC_w = \frac{GP}{0\ 01\ SW + 0\ 1\ (k_d)\ (BD)} \qquad 142$$

Al sustituir **$PSTC_w$** de la ecuacion 142 en la ecuacion 138 se obtiene

$$\frac{dGP}{dt} = \frac{(GP)(f)}{0\ 01\ SW + 0\ 1\ (k_d)\ (BD)} \qquad 143$$

donde

GP = Cantidad de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**
f = Flujo de agua a traves de la zona, en $mm \times h^{1}$
SW = Cantidad de agua lamacenada en los primeros 10 mm de suelo, en mm
K_d = Constante de distribucion del plaguicida
BD = Densidad del suelo, en $t \times m^{3}$

Reacomodando la ecuacion 143 e integrando se obtiene la ecuacion que expresa la cantidad de plaguicida en funcion de la cantidad de agua que fluye a traves de la zona

$$GP = GP_o \exp\left(\frac{-f}{0\ 01\ SW + 0\ 1\ (k_d)\ (BD)}\right) \qquad 144$$

donde

GP = Cantidad final de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**
GP_o = Cantidad inicial de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo t
f = Flujo de agua a traves de la zona, en $mm \times h^{1}$

SW = Cantidad de agua almacenada en los primeros 10 mm de suelo en mm
K_d = Constante de distribucion del plaguicida
BD = Densidad del suelo, en t×m^{3}

Para obtener la cantidad de plaguicida lixiviado por l cantidad de agua **f**, **GP** se resta a **GP_0** con la ecuacion

$$PSTL = GP_o\left[1 - \exp\left(\frac{-f}{0\ 01\,SW + 0\ 1\,(k_d)\,(BD)}\right)\right] \qquad 145$$

donde
PSTL = Cantidad de plaguicida lixiviado por **f**
GP_0 = Cantidad inicial de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo t
f = Flujo de agua a traves de la zona, en mm×h^{1}
SW = Cantidad de agua almacenada en los primeros 10 mm de suelo, en mm
K_d = Constante de distribucion del plaguicida
BD = Densidad del suelo, en t×m^{3}

La concentracion del plaguicida en la percolacion se calcula con la ecuacion

$$PSTC_L = \min\left[\frac{PSTL}{f}, PSO1\right]$$

$$\text{PSTL} = (\text{O})\,(\text{PSTC}_\text{L}) \qquad 146$$

donde
$PSTC_L$ = Concentracion del plaguicida en la percolacion en g×m^{3}
PSTL = Cantidad de plaguicida lixiviado por **f**
f = Flujo de agua a traves de la zona, en mm×h^{1}
PS01 = Solubilidad del plaguicida
O = Velocidad de percolacion, en mm×d^{1}

La perdida del plaguicida en el escurrimiento superficial se estima con una modificacion de la ecuacion 145 que incluye un coeficiente de sustraccion

$$PSTQ = GP_o\left[1 - \exp\left(\frac{-(Q)\,(ab)}{0\ 01\,SW + 0\ 1\,(ab)\,(k_d)\,(BD)}\right)\right] \qquad 147$$

donde
PSTQ = Perdida de plaguicida en el escurrimiento superficial en kg×ha^{1}
GP_0 = Cantidad inicial de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo t
Q = Lamina de escurrimiento superficial, en mm
ab = Coeficiente de sustraccion
SW = Cantidad inicial de agua almacenada, en mm
k_d = Coeficiente de distribucion, en m^{3}×t^{1}
BD = Densidad del suelo, en t×m^{3}

La secuencia de calculo es

1 - Capa de suelo 1, la lixiviacion se estima primero sustituyendo 0 para **f** en las ecuaciones 145 y 146 Luego **PSTL** se remueve de la capa 1 y se coloca en la capa 2 Las siguientes perdidas en el escurrimiento y flujo lateral se estiman simultaneamente mediante la sustitucion de Q+QR por **Q** en la ecuacion 147 La concentracion promedio seobtiene al dividir el resultado de PSTQ entre Q+QR Las perdidas individuales se estiman para el escurrimiento ($Q \times PSTC_{Q+QR}$) y flujo lateral ($QR \times PSTC_{Q+QR}$) Finalmente, estas perdidas son removidas de la capa 1

2 , Capas de suelo 2-M, las perdidas por lixiviacion y flujo lateral se estiman simultaneamente mediante la sustitucion de O_1+QR_1 por **f** en la ecuaciones 145 y 146 Las perdidas individuales se calculan como en (1) ($QR_1 \times PSTC_1$) y ($O_1 \times PSTC_1$), substraidos de la capa 1 y $O_1 \times PSTC_L$ es adicionado a la capa 1+1 El proceso se repite en cada capa hasta el fondo del perfil del suelo

La cantidad total de plaguicida perdido en el escurrimiento se estima al sumar la fraccion soluble calculada con la ecuacion 147 a la cantidad que es adsorbida en el sedimento El plaguicida producto de la fase de adsorcion se calcula con la relacion de enriquecimiento La ecuacion de la relacion de enriquecimiento es

$$PSTY = (Y)\,(PSTC_s)\,(ER)\,(0\ 001) \qquad 148$$

donde

PSTY = Plaguicida adsorbido en los sedimentos en $kg \times ha^{1}$

Y = Produccion de sedimentos en $t \times ha^{1}$

$PSTC_s$ = Concentracion del plaguicida adsorbido por el suelo

ER = Proporcion de enriquecimiento (concentracion del plaguicida en los sedimentos dividida entre la concentracion del plaguicida en los primeros 10 mm de suelo) calculada con la ecuacion 121

La concentracion de plaguicida en el suelo se calcula al sustituir la ecuacion 140 en la ecuacion 142 y resolviendo para **$PSTC_s$**

$$PSTC_s = \frac{(K_d)(GP)}{0\ 01\,SW + 0\ 1\,(K_d)(BD)} \qquad 149$$

donde

$PSTC_s$ = Concentracion del plaguicida adsorbido por el suelo

K_d = Coeficiente de distribucion, en $m^3 \times t^{1}$

GP = Cantidad final de plaguicida en los primeros 10 mm para el tiempo **t**

SW = Cantidad de agua almacenada en los primeros 10 mm de suelo, en mm

BD = Densidad del suelo, en $t \times m^{3}$

Las capas de suelo son con bajos volumenes de almacenamiento tienen potenciales de lixiviacion altos no solamente debido a que la percolacion es mayor sino tambien debido a que el desplazamiento del volumen de almacenamiento es mayor (concentracion mas alta) Los plaguicidas con valores de **k_d** bajos y alta solubilidad son transportados rapidamente en el agua A la inversa los plaguicidas son altos valores de **k_d** son adsorbidos pro las particulas de suelo y viajan con los

sedimentos

VI - Temperatura del suelo

La temperatura diaria promedio del suelo, se simula en el centro de cada capa de suelo La ecuacion basica de la temperatura del suelo es

150

$$T(Z,t) = T + \frac{AM}{2}\exp\left(-\frac{Z}{DD}\right)\cos\left[\frac{2\pi}{365}(t-200)-\frac{Z}{DD}\right]$$

donde

T(Z, t) = Temperatura diaria promedio del suelo en el centro de cada capa de suelo, en °C
Z = Profundidad desde la superficie del suelo, en mm
t = Tiempo en dias
= Temperatura media anual del aire, en °C
AM = Amplitud anual en la temperatura diaria promedio, en °C
DD = Frente de humedecimiento del suelo, en mm

La ecuacion 150 ayuda a estimar la temperatura del aire (Z=0) asi como la temperatura del suelo Debido a que la temperatura del aire se calcula con el componente climatico del modelo SWRRB, se usan las temperaturas generadas como guia De no ser asi, la ecuacion 150 predicirıa las mismas temperaturas para un cierto dia de cada año Para permitir que la temperatura del aire simulada sea usada como una guia de la temperatura del suelo, se desarrollaron las siguientes ecuaciones para estimar la temperatura de la superficie del suelo

151

$TGB_{IDA} = (z_j)\,(T_{mx}) + (1-z_j)\,(T_{mn}),$ R=0

152

$TGB_{IDA} = T_{mn}\,,$ R>0

donde

TGB_{IDA} = Temperatura de la superficie del suelo desnudo, en determinado dia **IDA** del año, en °C
T_{mx} = Temperatura maxima diaria del aire, en °C
T_{mn} = Temperatura minima diaria del aire, en °C
z_j = Factor adimensional para la conversion de la temperatura del aire a temperatura de la superficie del suelo para dias secos, en el mes j

Obviamente, la ecuacion 152 utiliza la temperatura minima del aire para estimar la temperatura de la superficie en dias lluviosos Las temperaturas mas altas se estiman en los dias secos con la ecuacion 151 El valor de **z**, se determina al considerar la **T_{mx}** y **T_{mn}**, promedio, y el numero de dias lluviosos en el mes

$$z_j = \frac{\dfrac{\left(\dfrac{T_{mxj}+Tsubmnj}{2}\right)(ND_j)-(T_{mnj})(NRD_j)}{NDD_j} - T_{mnj}}{T_{mxj}-T_{mnj}}$$

donde

z_j = Factor adimensional para la conversion de la temperatura del aire a temperatura de la superficie del suelo para dias secos, en el mes j

T_{mxj} = Temperatura maxima diaria del aire en el mes j, en °C

T_{mnj} = Temperatura minima diaria del aire en el mes j, en °C

ND_j = Numero de dias del mes j

NRD_j = Numero de dias lluviosos en el mes j

NDD_j = Numero de dias secos en el mes j

La ecuacion 153 asegura que la temperatura promedio de la superficie del suelo a largo plazo y la temperatura del aire sean aproximadamente iguales

La temperatura de la superficie del suelo es tambien afectada por los residuos y por la capa de nieve Este efecto, puede ser simulado al retrazar la prediccion de la temperatura de la superficie del suelo desnudo, con la ecuacion

154

$$TG_{IDA} = (bcv)\,(TGB_{IDA\,1}) + (1 - bcv)\,(TGB_{IDA})$$

donde

TG_{IDA} = Temperatura de la superficie del suelo, en determinado dia del año **IDA**, en °C

bcv = Factor adimensional de retrazo para simular el efecto de los residuos y la capa de nieve sobre la temperatura de la superficie del suelo

$TGB_{IDA\,1}$ = Temperatura de la superficie del suelo desnudo, en el dia anterior **IDA-1** del año, en °C

TGB_{IDA} = Temperatura de la superficie del suelo desnudo, en determinado dia **IDA** del año en °C

El valor de **bcv** es de 0 para un suelo desnudo y se aproxima a 1 0 conforme se incrementa la cubierta como se expresa en la ecuacion

$$bcv = \max\left\{\begin{array}{c} \dfrac{CV}{CV + \exp(7\ 563 - 1\ 297 \bullet x\ 10^{-4}\ CV)} \\ \dfrac{SNO}{SNO + \exp(6\ 055 - 0\ 3022\ SNO)} \end{array}\right\} \qquad 155$$

donde

bcv = Factor adimensional de retrazo para simular el efecto de los residuos y la capa de nieve sobre la temperatura de la superficie del suelo

CV = Suma de la biomasa de la parte aerea y los residuos del cultivo, en kg×ha^{-1}

SNO = Contenido de agua de la capa de nieve, en mm

La temperatura del suelo a cualquier profundidad, se estima con la ecuacion 150 al sustituir **TG**, por **T(0,t)** **TG** es mejor estimador de la temperatura de la superficie que **T(0,t)** debido a que considera el clima actual y las condiciones de la cubierta En la superficie del suelo (Z=0), la sustitucion propia puede ser realizada adicionando **TG** y sustrayendo **T(0,t)** de la ecuacion 150 Las diferencias entre **TG** y **T(0,t)** son amortiguadas conforme z, se incrementa Asi la ecuacion final para estimar la temperatura del suelo a cualquier profundidad es

$$T(Z,t) = T + \left[\left(\frac{AM}{2} + TG - T(0,t)\right)\right]\cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - 200) - \frac{Z}{DD}\right]\exp\left(\frac{-Z}{DD}\right) \qquad 156$$

donde

T(Z,t) = Temperatura diaria promedio del suelo en el centro de cada capa de suelo, en °C
Z = Profundidad desde la superficie del suelo, en mm
t = Tiempo, en dias
T = Temperatura media diaria del aire, en °C
AM = Amplitud anual en la temperatura diaria promedio, en °C
TG = Temperatura diaria de la superficie del suelo, en °C
T(0,t) = Temperatura diaria de la superficie del suelo, en °C
DD = Frente de humedecimiento del suelo, en mm

La profundidad humedecida, **DD**, es una funcion de la densidad del volumen de suelo y del contenido de agua, como se expresa en las ecuaciones

$$DP = 100 + \left[\frac{2500\ BD}{BD + 686\ \exp(-5\ 63\ BD)}\right] \qquad 157$$

$$S_p = \frac{SW}{(0\ 356 - 0\ 144\ BD)\ ZM} \qquad 158$$

159

$$DD = DP\exp\left[\ln\left(\frac{\mathbf{500}}{DP}\right)\left(\frac{\mathbf{1} - S_p}{\mathbf{1} + S_p}\right)^2\right]$$

donde

DP = Profundidad de humedecimiento maxima del suelo, en mm
BD = Densidad del suelo, en t×m^3
S_p = Parametro adimensional de escalonamiento
SW = Contenido de agua en el suelo, en mm

ZM = Distancia desde el fondo de la capa de suelo mas baja, hasta la superficie, en mm
DD = Frente de humedecimiento del suelo, en mm

VII - Crecimiento del cultivo

El modelo de cultivo del modelo SWRRB es una simplificacion del modelo de cultivo del EPIC (Williams et al , 1984) El modelo SWRRB utiliza los conceptos del EPIC sobre el desarrollo fenologico del cultivo con base en la acumulacion diaria de unidades calor, el indice de cosecha para la distribucion del rendimiento de grano, la propuesta de Monteith (Monteith, 1977) para la biomasa potencial, y los ajustes de estres por agua y temperatura Sin embargo, los modelos detallados para el crecimiento de la raiz y del ciclo de nutrientes del modelo EPIC no estan incluidos

El modelo SWRRB utiliza un modelo simple para la simulacion en todos los cultivos considerados y es capaz de simular el crecimiento de cultivos anuales y perennes Los cultivos anuales crecen desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha o hasta que la acumulacion de unidades calor igualen a las unidades calor potenciales para el cultivo, los cultivos perennes mantienen su sitema radical durante el año, aunque la planta puede entrar en dormancia despues de una helada

El desarrollo fenologico del cultivo esta basado en la acumulacion de unidades calor diarias Este se calcula con la ecuacion

$$HU_i = \frac{T_{mx\,i} + T_{mn\,i}}{2} - T_{bj}, \qquad HU_i \geq 0 \qquad 160$$

donde
HU_i = Unidades calor del dia **i**, en °C
$T_{mx,i}$ = Temperatura maxima del dia **i**, en °C
$T_{mn\,i}$ = Temperatura minima del dia **i**, en °C
T_{bj} = Temperatura base, en °C (no ocurre crecimiento debajo de **tb**) del cultivo **j**

El indice de unidad calor **HUI**, que fluctua de 0 en la siembra, a 1 en la madurez fisiologica se calcula con la ecuacion

$$HUI_i = \frac{\sum_{k=1}^{i} HU_k}{PHU_j} \qquad 161$$

donde
HUI_i = Indice adimensional de unidades calor del dia **i**
PUI_i = Unidades calor potenciales requeridas para la madurez del cultivo **j** en °C

El valor de **PHU**, es calculado por el modelo con las fechas normales de siembra y de cosecha

1 - Crecimiento potencial

La intercepcion de la radiacion solar se estima con la ecuacion de la Ley de Beer (Monsi y Saeki, 1953)

$$PAR_i = 0\ 02092\ RA_i\ [1 - \exp(-0\ 65\ LAI_i)] \qquad 162$$

donde

PAR_i = Radiacion activa fotosintetica en el dia **i** del año, en $MJ \times m^{2}$ [9]

RA_i = Radiacion solar en el dia **i** del año, en Ly [10]

LAI_i = Indice de area foliar en el dia **i** del año (adimensional)

Con la propuesta de Monteith (Monteith, 1977), el incremento potencial de la biomasa para un dia se puede estimar con la ecuacion

$$DB_{pi} = (BE_j)\ (PAR_i) \qquad 163$$

donde

DB_{pi} = Incremento potencial diario en la biomasa total, en $kg \times ha^{1}$

BE = Factor que convierte la energia solar a biomasa del cultivo **j**, en $kg \times m^{2} \times ha^{1} \times MJ$ (ver Tabla 20 en el Apendice XII)

PAR_i = Radiacion activa fotosintetica en el dia **i** del año, en $MJ \times m^{2}$

El **LAI**, se simula como una funcion de las unidades calor y de la biomasa **LAI**, se estima con las ecuaciones

$$LAI_i = \frac{(LAI_{mx})(B_{AG})}{B_{AG} + \exp(9\ 5 - 0\ 0006\ B_{AG})} \quad , \qquad HUI_i > DLAI \qquad 164$$

$$LAI_i = (16)\ (LAI_{mx})\ (1 - HIU_i)^2 , \qquad HUI_i > DLAI \qquad 165$$

donde

LAI_i = Indice de area foliar en el dia **i** del año (adimensional)

LAI_{mx} = Indice adimensional del area foliar maximo potencial del cultivo (ver Tabla 20 en el Apendice XII)

B_{AG} = Biomasa de la parte aerea, en $kg \times ha^{1}$

DLAI = Fraccion de la etapa de crecimiento cuando el indice de area foliar **LAI**, empieza a declinar (» 0 75)

La fraccion de la biomasa total que corresponde al sistema radical normalmente disminuye

de 0 3 a 0 5 en la etapa de plantula hasta 0 05 a 0 20 en madurez (Jones, 1985) El modelo estima que la fraccion de biomasa para la raiz varia linealmente desde 0 4 en la emergencia hasta 0 2 en madurez Asi, la fraccion de raiz diaria se calcula con la ecuacion

166

$$RWT_i = (0\ 4 - 0\ 2\ HUI_i)$$

donde

RWT_i = Fraccion de biomasa total correspondiente al sistema radical, en el dia **i**

HUI_i = Indice adimensional de unidades calor del dia **i**

Asi, **B_{AG}**, se calcula a partir de la ecuacion

167

$$B_{AG} = (1 - RWT_i)\ (B_{TOTi})$$

donde

B_{AG} = Biomasa de la parte aerea, en kg×ha^{1}

RWT_i = Fraccion de biomasa total correspondiente al sistema radical, en el dia **i**

B_{TOTi} = Biomasa total en el dia **i**, en kg×ha^{1}

2 - Rendimiento del cultivo

El rendimiento economico de la mayoria de los granos, leguminosas, y cultivos de tuberculo es un organo reproductivo Los cultivos poseen una variedad de mecanismos los cuales aseguran que su produccion no sea tan grande, que puede ser soportada por los componentes vegetativos, ni tan pequeña que no se asegure la sobrevivencia de la especie Como resultado, el indice de cosecha (rendimiento economico/biomasa de la parte aerea) es a menudo un valor relativamente estable en un rango de condiciones ambientales El rendimiento del cultivo se estima al usar el concepto de indice de cosecha

168

$$YLD_j = (HI_j)\ (B_{AGj})$$

donde

YLD_j = Cantidad cosechada del cultivo **j**, en kg×ha^{1}

HI_j = Indice de cosecha a la cosecha del cultivo **j**

B_{AGj} = Biomasa de la parte aerea del cultivo **j**, en kg×ha^{1}

El indice de cosecha se incrementa en forma no lineal, a partir de 0 en la siembra segun la siguiente ecuacion

169

$$HIA_i = HIO_j\ (HUFH_i - HUFH_{i\ 1})$$

donde

HIA_i = Indice de cosecha ajustado para el dia **i**

HIO_j = Indice de cosecha del cultivo **j** en condiciones de crecimiento favorables

$HUFH_i$ = Factor de la unidad de calor que afecta el indice de cosecha en el dia **i**

$HUFH_{i-1}$ = Factor de la unidad de calor que afecta el indice de cosecha en el dia previo **i-1**

La unidad calor que afecta el indice de cosecha se calcula con la ecuacion

$$HUFH_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp(6\ 50 - 10\ 0\ HUI_i)} \qquad 170$$

donde

$HUFH_i$ = Factor de la unidad de calor que afecta el indice de cosecha en el dia **i**

HUI_i = Indice adimensional de unidades calor del dia **i**

Las constantes de la ecuacion 170 se utilizaron para permitir que **$HUFH_i$**, se incremente desde 0 1 cuando HUI_i = 0 5 hasta 0 92 cuando HUI_i = 0 9 Esto es consistente con el desarrollo del rendimiento economico de los cereales, los cuales producen el mayor rendimiento economico en la segunda mitad de su crecimiento

La mayoria de los cereales son particularmente sensibles al estres hidrico, desde poco antes hasta poco despues de la antesis, que es cuando se determinan los principales componentes del rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979) Las condiciones optimas para el crecimiento, pueden reducir el indice de cosecha ligeramente, si la acumulacion de materia seca es alta y el rendimiento economico esta limitado por la perdida de tamaño El indice de cosecha es afectado por el estres hidrico, segun la ecuacion

$$HIA_i = \frac{HIA_i}{1 + (WSYF)(FHU_i)(0\ 9 - WS_i)} \qquad 171$$

donde

HIA_i = Indice de cosecha ajustado para el dia **i**

$WSYF_j$ = Factor adimensional de sensibilidad a la sequia del cultivo **j** (ver Tabla 20 en el Apendice XII)

FHU_i = Funcion adimensional de la etapa del cultivo para el dia **i**

WS_i = Factor adimensional de estres hidrico para el dia **i**

Se puede apreciar que el indice de cosecha puede incrementarse ligeramente en dias con valores de **WS**, mayores de 0 9 El factor etapa del cultivo, **FHU**, se estima con la ecuacion

$$FHU_i = \sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{HUISUBi - 0\ 3}{0\ 3}\right)\right] \qquad 0\ 3 \quad HUI_i \quad 0\ 9$$

$$FHU_i = 0 \qquad HUI < 0\ 3 \text{ o } HUI > 0\ 9 \qquad 172$$

donde

FHU_i = Funcion adimensional de la etapa del cultivo para el dia **i**

HUI_i = Indice adimensional de unidades calor del dia i

Asi, el estres hidrico solamente afecta el indice de cosecha entre 0 3 y 0 9 de madurez el efecto mayor ocurre con un valor de 0 6

3 - Limitantes del crecimiento

La biomasa potencial predicha con la ecuacion 163 se ajusta diariamente, cuando uno de los factores de estres de la planta es menjor de 1 0, con la siguiente ecuacion

$$DB = (DB_P)\,(REG) \qquad 173$$

donde

DB = Incremento diario ajustado de biomasa, en kg×ha^{1}

DB_P = Incremento potencial diario de la biomasa total, en kg×ha^{1}

REG = Factor adimensional de estres minimo del cultivo

a - Estres hidrico

El factor de estres hidrico se calcula al considerar el suministro y demanda, con la ecuacion

$$WS = \frac{\sum_{i=1}^{N_l} U_i}{E_p} \qquad 174$$

donde

WS = Factor adimensional de estres hidrico (0-1)

U_i = Uso de agua pro la planta en la capa i, en mm

E_p = Evapotranspiracion diaria de la planta, en mm×d^{1}

El valor de **E_p** se predice con el modelo de evapotranspiracion

Para simular la absorcion de agua de la planta se utiliza el modelo de Williams y Hann (1978), el cual estima la distribucion de **E_p** La profundidad del sistema radicular se calcula con la ecuacion

$$RD_n = \frac{2\,5 \sum_{i=1}^{n} Esub\,pi}{\sum_{i=1}^{N_g} E_{pi}} \qquad 175$$

donde

RD_n = Fraccion de la zona radical que contiene a las raices en el dia **n**

E_{pi} = Evapotranspiracion de la planta en el dia i, en mm×d^{1}

N_g = Numero de dias de la etapa de crecimiento

El uso potencial de agua en cada capa de suelo se estima con la ecuacion

$$u_{pi} = \frac{E_p}{1 - \exp(-\lambda)} \left(1 - \exp\left[-\lambda \left(\frac{RD_i}{RZ} \right) \right] \right) \sum_{j=1}^{i\,1} u_i$$

donde

$\mathbf{u_{pi}}$ = Demanda de uso potencial del agua en la capa **i**, en mm×d^{1}
$\mathbf{E_p}$ = Evapotranspiracion diaria de la planta, en mm×d^{1}
$\mathbf{RD_i}$ = Profundidad de la raiz en el dia **i**, en mm
RZ = Profundidad maxima de la zona radical, en mm
L = Factor adimensional de la tasa de uso que toma en cuenta la profundidad
$\mathbf{u_i}$ = Uso de agua de la planta en la capa de suelo **i**, en mm

Los detalles de la evaluacion de **L**, son proporcionados por Williams y Hann (1978) Un valor de L=3 065 se utiliza en el modelo SWRRB, que supone que el 30 % del total del agua utilizada proviene del 10 % de la parte superior de la zona radical La ecuacion 177 permite a las raices compensar los deficits hidricos en ciertas capas, por la extraccion de mas agua en las capas con un suministro adecuado El uso potencial del agua debe ser ajustado a los deficits hidricos para obtener el uso actual de cada capa

$$u_i = u_{pi} \qquad SW_i > 0\ 25\ FC_i \tag{177}$$

$$u_i = u_{pi}\left(\frac{SW_i}{0\ 25\ FC_i}\right) \qquad SW_i \quad 0\ 25\ FC_i \tag{178}$$

donde

$\mathbf{u_i}$ = Uso de agua de la planta en la capa de suelo **i**, en mm
$\mathbf{u_{pi}}$ = Demanda de uso potencial del agua en la capa **i**, en mm×d^{1}
$\mathbf{SW_i}$ = Contenido de agua en el suelo al final del dia, en la capa **i**, en mm
$\mathbf{FC_i}$ = Contenido de agua disponible a capacidad de campo para la capa **i**, en mm

Notese que el uso actual para las capas de arriba de la capa **i** en la ecuacion 177 debe ser conocido Esto no presenta problemas, debido a que $\mathbf{u_i}$=0 cuando **i**=1

b - Estres por temperatura

El factor estres por temperatura se calcula con la ecuacion

$$TS = \exp \delta \left(\frac{T_o - T}{T}\right)^2 \tag{179}$$

donde

TS = Factor adimensional de estres por temperatura (0-1)
δ = Factor adimensional de estres por temperatura del cultivo
$\mathbf{T_o}$ = Temperatura optima del cultivo (25 °C para cultivos de verano y 13 °C para cultivos de invierno), en °C
T = Temperatura del aire diaria promedio, en °C

El factor de estres se evalua mediante una sustitucion apropiada y reacomodando la ecuacion 180 da

$$\delta = \frac{\ln(0\ 9)}{\left[\dfrac{T_o - \dfrac{T_o + T_b}{2}}{\dfrac{T_o + T_b}{2}}\right]} \qquad 180$$

donde

δ = Factor adimensional de estres por temperatura del cultivo

$\mathbf{T_o}$ = Temperatura optima del cultivo (25 °C para cultivos de verano y 13 °C para cultivos de invierno), en °C

$\mathbf{T_b}$ = Temperatura base del cultivo, en °C

La temperatura base del cultivo $\mathbf{T_b}$ es de 8 °C para los cultivos de verano y 0 °C para los cultivos de invierno En la ecuacion 181 fija a TS=0 9 cuando la temperatura del aire esta a la mitad de $\mathbf{T_b}$ y $\mathbf{T_c}$

VIII - Labranza y residuos

El componente de labranza del modelo SWRRB fue diseñado para desglozar la biomasa de la parte aerea en la etapa de cosecha Una parte de la biomasa se incorpora en el suelo, mientras que el resto se deja en la superficie del suelo como residuo Una vez que el residuo se incorpora, este no tiene impacto en el modelo Tampoco hay cambios en la densidad debido a la labranza

El residuo se incorpora al momento de la cosecha de acuerdo a las siguientes practicas de labranza elegidas

Labranza de otoño

$$RSD = 0\ 5\ WLV \qquad 181$$

Labranza de primavera

$$RSD = 0\ 25\ WLV \qquad 182$$

Labranza de conservacion

$$RSD = 0\ 5\ WLV \qquad 183$$

Labranza cero

184

$$RSD = 0\ 95\ WLV$$

donde

RSD = Residuo que se deja despues de la cosecha, en kg×ha^{1}

WLV = Biomasa de la parte aerea menos el rendimiento del cultivo a la cosecha, en kg×ha^{1}

Los residuos se descomponen conforme pasa el tiempo (entre cosechas) en funcion del contenido del agua y de la temperatura del suelo

$$DECR = 0\ 05\ \min\ [CDG, SUT] \qquad 185$$

donde

DECR = Factor de disminucion diaria del residuo

CDG = Factor de descomposicion de residuos de acuerdo con el contenido de agua del suelo

SUT = Factor de descomposicion de residuos de acuerdo con la temperatura del suelo

$$RSD = RSD\ (1 - DECR) \qquad 186$$

donde

RSD = Residuos sobre la superficie del suelo, en kg×ha^{1}

DECR = Factor de descomposicion o disminucion diaria del residuo

$$CDG = \frac{0\ 9\ ST_2}{ST_2 + \exp(9\ 93 - 0\ 312\ ST_2)} \qquad 187$$

donde

CDG = Factor de descomposicion de residuos de acuerdo con el contenido de agua del suelo

ST_2 = Temperatura en la segunda capa de suelo, en °C

$$SUT = \frac{SW_2}{FC_2} \qquad 188$$

donde

SUT = Factor de descomposicion de residuos de acuerdo con la temperatura del suelo

SW_2 = Contenido de agua de la segunda capa de suelo, en mm

FC_2 = Contenido de agua disponible a capacidad de campo en la segunda capa de suelo, en mm

IX - Riego

El usuario del SWRRB tiene la opcion de simular para areas agricolas de riego o de temporal Si existe riego, se debe tambien especificar la fraccion del riego que se convierte en escurrimiento (volumen del agua que se convierte en escurrimiento/volumen aplicado) y el nivel de estres hidrico de la planta al inicio del riego El factor de estres hidrico de la planta varia de 0 a 1 0 (1 significa que no hay estres y 0 significa que no hay crecimiento)

Estos factores de estres se describen en la seccion de crecimiento del cultivo Cuando el usuario especifica los niveles de estres que existen, el agua se aplica de acuerdo a la ecuacion

$$AIR = \frac{FC - SW}{1 - EFI} \qquad 189$$

donde

AIR = Lamina de agua de riego aplicada, en mm
FC = Contenido de agua disponible a capacidad de campo en la zona radical, en mm
SW = Contenido de agua en la zona radical antes de regar, en mm
EFI = Proporcion del riego que se convierte en escurrimiento

X - Transito de avenidas

Debido a que el modelo SWRRB es fundamentalmente un simulador de la produccion de agua y sedimentos a largo plazo, un alto grado de precision en la prediccion de los hidrografos no es tan necesario como para otras aplicaciones como la planeacion del control y diagnostico de la corriente Tambien, el modelo SWRRB debe operar tan eficientemente como sea posible para que sea util en la planeacion de recursos hidricos que requiere simulaciones a largo plazo de numerosas estrategias de manejo Por lo tanto, el transito de avenidas no se efectua en el modelo y el gasto de salida diario de la cuenca se estima sumando el gasto de salida de cada una de las subcuenca Todo el escurrimiento superficial llega a las salidas de la cuenca en el dia del evento y el flujo subsuperficial se retraza como una funcion del tiempo de retrazo la cuenca La prediccion precisa de los gastos maximos por la subcuenca, es tambien importante debido a que ellos son usados en la estimacion de la produccion de sedimentos de las subcuencas

XI - Depositos y almacenamientos

1 - Depositos

Este componente del SWRRB fue diseñado para estimar los efectos de los depositos sobre la produccion de agua La ecuacion de balance hidrico es

$$VM = VM_o + QI - QO - EV - SEP \qquad 190$$

donde

VM = Volumen de agua almacenada en todos los depositos de la subcuenca del final del dia, en m^3
VM_o = Volumen de agua almacenada en todos los depositos dentro de la subcuenca al inicio del dia, en m^3
QI = Volumen de entrada durante el dia, en m^3
QO = Volumen de salida, en m^3
EV = Volumen de evaporacion, en m^3
SEP = Volumen de infiltracion del deposito, en m^3

El volumen de entrada, **QI**, se compone del escurrimiento superficial del area total de drenaje de los depositos y de la lluvia que cae sobre estos El gasto de salida ocurre cuando el volumen excede la capacidad de almacenamiento del deposito y se describe con la ecuacion

$QO = VM - VM_{mx}$, $VM > VM_{mx}$

191

$QO = 0$, $VM \quad VM_{mx}$

donde

QO = Volumen de salida, en m^3

VM = Volumen de agua al final del dia, en m^3

VM_{mx} = Volumen de almacenamiento maximo de todos los depositos de la subcuenca, en m^3

El volumen de evaporacion se calcula con la ecuacion

192

$$EV = 10\ (\eta)\ (E_o)\ (SA)$$

donde

EV = Volumen de evaporacion, en m^3

η = Coeficiente adimensional de evaporacion (0 6)

E_o = Cantidad e evaporacion potencial, en $mm \times d^{1}$

SA = Area de la superficie de todos los depositos de la subcuenca, en ha

La infiltracion de los depositos se calcula con la ecuacion

193

$$SEP = 240\ (SC)\ (SA)$$

donde

SEP = Volumen de infiltracion de los depositos, en m^3

SC = Conductividad hidraulica saturada del fondo de los depositos, en $mm \times h^{1}$

SA = Area de la superficie de todos los depositos de la subcuenca, en ha

Debido a que el area de la superficie del deposito, se requiere para calcular la evaporacion y la infiltracion, es necesaria una realcion entre el area de la superficie y el volumen Los datos de un gran numero de depositos y pequeños almacenamientos de Texas y Oklahoma (USDA, 1957) indican que el area de la superficie se puede calcular con la ecuacion

$$SA = \omega_1 (VM)^{\omega_2}$$ 194

donde

SA = Area de la superficie de todos los depositos de la subcuenca, en ha

ω_1 = $1\ 3 \times 10^{-4}$

VM = Volumen de agua al final del dia, en m^3

ω_2 = 0 9

El SWRRB supone que w_2=0 9 y determina a w_1, para cada subcuenca al utilizar **SA_{mx}** y **VM_{mx}**

2 - Almacenamientos

Aunque este componente fue diseñado principalmente para simular el flujo a traves de pequeños almacenamientos como aquellos construidos en los proyectos del SCS, este puede ser tambien usado en almacenamientos mas grandes El componente balance hidrico del almacenamiento es similar al componente de los depositos excepto que este permite que haya flujo en los vertedores principal y de emergencia La ecuacion para el volumen de salida del almacenamiento se expresa en la ecuacion

$$QOR = VR - VR_F \qquad VR > VR_F$$

$$QOR = (RR)\,(Dt) \qquad VR_s < VR \quad VR_F \qquad 195$$

$$QOR = 0 \qquad VR < VR_S$$

donde

QOR = Volumen de salida diario del almacenamiento, en m^3
VR = Volumen de agua almacenada, en m^3
VR_F = Volumen del almacenamiento hasta la cresta del vertedor de emergencia, en m^3
RR = Gasto del vertedor principal, en $m^3 \times s^{1}$
Dt = Intervalo de tiempo (24 h)
VR_S = Volumen del almacenamiento hasta la cresta del vertedor principal, en m^3

Las relaciones (Ecuaciones 193, 194, y 195) utilizadas para estimar la evaporacion y la infiltracion de los depositos son tambien aplicables a los almacenamientos Sin embargo, el metodo para la estimacion de $\mathbf{w_1}$ y $\mathbf{w_2}$, es ligeramente diferente Debido a que las areas de la superficie y los volumenes al nivel de las crestas de los vertedores principal y de emergencia estan generalmente disponibles, esos valores pueden ser usados para una solucion simultanea de la ecuacion 195 Las ecuaciones resultantes son

$$\omega_1 = \frac{\log SA_F - \log SA_s}{\log VR_F - \log VR_S} \qquad 196$$

$$\omega_2 = \frac{SA_F}{VR^{\omega_1}} \qquad 197$$

donde

ω_1, ω_2 = Parametros de la relacion superficie y volumen de almacenamiento
SA_F = Area de la superficie del almacenamiento al vertedor de emergencia, en ha
SA_S = Area de la superficie del almacenamiento al vertedor principal, en ha
VR_F = Volumen del almacenamiento hasta la cresta del vertedor de emergencia, en m^3
VR_S = Volumen del almacenamiento hasta la cresta del vertedor principal, en m^3
VR = Volumen de agua almacenda, en m^3

XII - Sedimentos en suspension

1 - Cauce

El modelo de sedimentos en suspension consiste de dos componentes que operan simultaneamente (deposicion y degradacion) La deposicion en la corriente del cauce esta basada en la velocidad de caida de las particulas de sedimento (Arnold et al , 1990) Con una temperatura de 22 °C y una densidad de sedimentos de 1 2 t×m^3, la ley de Stokes para velocidad de caida llega a ser

198

$$V_f = 411(d_f^2)$$

donde

V_f = Velocidad de caida de las particulas de sedimento de tamaño **f**, en m×h^{1}

d_f = Diametro del sedimento para el tamaño de particula **f**, en mm

La profundidad **y** a la que el sedimento de tamaño de particula **d** caerá durante el tiempo, **TT**, es

199

$$y_f = (V_f)\,(TT)$$

donde

y_f = Altura que caera el sedimento de tamaño de particula **d_f** durante **TT**, en m

V_f = Velocidad de caida de las particulas de sedimento de tamaño **f**, en m×h^{1}

TT = Tiempo de recorrido desde la salida de la subcuenca hasta la salida de la cuenca, en h

La tasa de entrega de sedimentos **DR** durante el trayecto se estima con las ecuaciones

200

$$DR = \frac{1 - 0\,5(y_f)}{d_q}, \qquad y_f < d_q$$

201

$$DR = \frac{0\,5(d_q)}{y_f}, \qquad y_f > d_q$$

donde

DR = Tasa de entrega de sedimentos (sedimento producido en la subcuenca entre el grosor de la lamina erosionada)

y_f = Distancia que el sedimento de tamaño de particula **d_f** caera durante **TT**, en mm

d_q = Profundidad de la corriente, en m

Finalmente, la deposicion se calcula con la ecuacion

202

$$DEP = SED_{IN}\,(1 - DR)$$

donde

DEP = Sedimento depositado, en t
SED_{IN} = Sedimentos que entran al cauce, en t
DR = Tasa de entrega de sedimentos (sedimento producido en la subcuenca entre el grosor de la lamina erosionada)

La fuerza de la corriente se usa para predecir la degradacion del recorrido en el cauce Williams (1980) uso la definicion de fuerza de la corriente de Bagnold (1977) para desarrollar un metodo que determina la degradacion en los cauces Bagnold definio a la fuerza de la corriente **SP**, con la ecuacion

$$SP = \gamma_w \, q \, S_W \qquad 203$$

donde
SP = Fuerza de la corriente, en $t \times s^{1}$
γ_w = Densidad del agua, en $t \times m^{3}$
q = Gasto en $m^3 \times s^{1}$
S_W = Pendiente de la superficie del agua, en $m \times m^{1}$

Con la aplicacion de la fuerza de la corriente para predecir la carga en el fondo (Bagnold, 1977) y estimando los parametros del modelo (Williams, 1980) La ecuacion para los sedimentos reincorporados, **DEG_R**, es

$$DEG_R = \alpha_{sp} \gamma_w^{1/2} (DU)(w)(d_q S_w V_c)^{1/2} \qquad 204$$

donde
DEG_R = Sedimentos reincorporados a la corriente, en t
α_{sp} = Parametro dependiente de la fuerza maxima de la corriente para el trayecto
DU = Duracion del flujo de la corriente, en h
w = Anchura promedio del flujo en el cauce, en m
γ_w = Densidad del agua, en $t \times m^{3}$
d_q = Profundidad de la corriente, en m
S_W = Pendiente de la superficie del agua, en $m \times m^{1}$
V_c = Velocidad en el cauce, en $m \times s^{1}$

El parametro **a_{sp}** se puede estimar con la ecuacion

$$\alpha_{sp} = (\gamma_W \, q_{mx} \, S_c)^{0.5} \qquad 205$$

donde
α_{sp} = Parametro dependiente de la fuerza maxima de la corriente para el trayecto
γ_w = Densidad del agua, en $t \times m^{3}$
q_{mx} = Gasto maximo esperado en el cauce para eventos extremos, en $m^3 \times s^{1}$
S_c = Pendiente del cauce, en $m \times m^{1}$

El valor de $\mathbf{q_{mx}}$ se supone que es igual a alguna intensidad de lluvia maxima (250 mm×h^{-1}) y $\mathbf{a_{sp}}$ es

206

$$\alpha_{sp} = (69\ 44\ \gamma_W\ DA\ S_c)^{0\ 5}$$

donde

α_{sp} = Parametro dependiente de la fuerza maxima de la corriente para el trayecto
γ_w = Densidad del agua, en t×m^{3}
DA = Area de drenaje para el tramo, en Km^2
$\mathbf{S_c}$ = Pendiente del cauce, en m×m^{-1}

Toda la fuerza de la corriente es utilizada para la reincorporacion del material perdido y depositado hasta que todo el material se ha removido Cuando esto ocurre, la degradacion del material del cauce, $\mathbf{DEG_B}$, comienza y se calcula con la siguiente ecuacion

207

$$DEG_B = K\ C\ DEG_R$$

donde

$\mathbf{DEG_B}$ = Degradacion del material del cauce, en t
K = Factor de erosionabilidad del suelo de la EUPS para el cauce de la corriente, en t×h×ton^{-1}
C = Factor adimensional de cobertura vegetal de la ecuacion universal de la perdida de suelo para el cauce de la corriente
$\mathbf{DEG_R}$ = Sedimentos reincorporados a la corriente, en t

La degradacion total **DEG**, es la suma de los componentes de reincorporacion y degradacion del cauce A esta cantidad tambien se le permite que se deposite antes de que llegue a la salida de la cuenca

208

$$DEG = (DEG_R + DEG_B)\ (1 - DR)$$

donde

DEG = Degradacion total, en t
$\mathbf{DEG_B}$ = Degradacion del material del cauce, en t
$\mathbf{DEG_R}$ = Sedimentos reincorporados a la corriente, en t
DR = Tasa de entrega de sedimentos (sedimento producido en la subcuenca entre el grosor de la lamina erosionada)

Finalmente la cantidad de sedimento que llega a la salida de la cuenca, $\mathbf{SED_{out}}$, es

209

$$SED_{out} = SED_{in} - DEP + DEG$$

donde
SED_{out} = Cantidad de sedimentos que llegan a la salida de la cuenca, en t
SED_{in} = Sedimentos que entran al cauce, en t
DEP = Sedimento depositado, en t
DEG = Degradacion total, en t

2 Movimiento de sedimentos en los almacenamientos

La ecuacion de balance de sedimentos para los almacenamientos es

$$SR_i = SR_{i\,1} + SR_{in} - SR_{out} - SR_{DEP} \qquad 210$$

donde
SR_i = Sedimentos totales en el almacenamiento, en t
$SR_{i\,1}$ = Sedimentos totales en el almacenamiento un dia antes, en t
SR_{in} = Sedimento de entrada, en t
SR_{out} = Sedimento transportado en el flujo de salida, en t
SR_{DEP} = Cantidad de sedimento depositado en el almacenamiento, en t

El sedimento que sale de los almacenamientos se calcula con la siguiente ecuacion

$$SR_{out} = c_o\, QO, \qquad QO > 0 \qquad 211$$

$$SR_{out} = 0 \qquad QO = 0 \qquad 212$$

donde
SR_{out} = Sedimento transportado en el flujo de salida, en t
c_o = Concentracion de sedimentos en el flujo de salida, en t m^3
QO = Volumen de salida, en m^3

La concentracion del flujo de salida esta en funcion de la concentracion del almacenamiento al inicio y al final del dia

$$c_o = \frac{cs_1 + cs_2}{2} \qquad 213$$

donde
c_o = Concentracion de sedimentos en el flujo de salida, en t m^3
cs_1 = Concentracion de sedimentos en el almacenamiento al inicio del dia, en t m^3
cs_2 = Concentracion de sedimentos en el almacenamiento al final del dia, en t m^3

La concentracion inicial de sedimentos en el almacenamiento es un dato que se introduce al modelo La concentracion del flujo de entrada se puede calcular ya que **q_i** y **SR_{in}** son simulados, pero la concentracion final del almacenamiento se desconoce y esta se calcula con la ecuacion de continuidad

214

$$V_2\, cs_2 = V_1\, cs_1 + QI\, c_i - QO\, c_o$$

Al sustituir la ecuacion 214 en la ecuacion 215 y reacomodando se obtiene la expresion de la concentracion final, que es

$$cs_2 = \frac{V_1\, cs_1 + QI\, csubi - \left(\frac{QO}{2}\right) cs_1}{V_2 + \left(\frac{QO}{2}\right)} \qquad 215$$

donde

cs_2 = Concentracion de sedimentos en el almacenamiento al final del dia, en t×m^3
V_1 = Volumen almacenado al inicio del dia, en m^3
cs_1 = Concentracion de sedimentos en el almacenamiento al inicio del dia, en t×m^3
QI = Volumen de entrada durante el dia, en m^3
c_i = Concentracion de sedimentos en el flujo de entrada, en t×m^3
QO = Volumen de salida, en m^3
V_2 = Volumen almacenado al final del dia, en m^3

Entre tormentas la concentracion final del almacenamiento disminuye hasta una concentracion de equilibrio de acuerdo a la ecuacion

216

$$cs = (cs_2 - cs_e)\exp(-k_s\, t\, d_{50}) + cs_e$$

donde

cs = concentracion de sedimentos en el almacenamiento **t** dias despues de que el valor de **cs_2** es obtenido, en t×m^3
cs_2 = Concentracion de sedimentos en el almacenamiento al final del dia, en t×m^3
cs_e = Concentracion de sedimentos en equilibrio (introducida al modelo), en t×m^3
k_s = Constante de disminucion
d_{50} = Tamaño medio de particulas de las particulas que componen el sedimento del flujo de entrada, en mm

Se considera k_s=0 184 al suponer que el 99 % de las particulas de 1 mm se asientan en 25 dias

XIII - Movimiento de nutrientes y plaguicidas

1 - Movimiento de nitratos

Una vez que el NO_3-N se incorpora a una corriente, este se considera como un material constante para la duracion de un evento de escurrimiento individual (Williams, 1980) Asi, el transito de NO_3-N es simplemente el resultado de la suma de las producciones de todas las subcuencas para determinar la produccion de la cuenca

2 - Movimiento de nitrogeno organico

La funcion factorial propuesta se utiliza para transitar el nitrogeno organico desde las salidas de la subcuenca hasta la salida de la cuenca

$$YON_{Bj} = 0\ 01\ (Y_B)_j\ (CONSB)_j\ (ER_R)_j \qquad 217$$

donde

YON_B = Perdida de nitrogeno organico en el escurrimiento en la salida de la cuenca en kg×ha^{1}

Y_B = Produccion de sedimentos que llegan a la salida de la cuenca desde la subcuenca **j** en t×ha^{1}

CONSB= Concentracion de nitrogeno organico en los sedimentos que llegan a la salida de la subcuenca **j**, en g×t^{1}

ER_R = Tasa de enriquecimiento para el cauce desde la subcuenca **j** hasta la salida del cauce

La estimacion de **ER_R** se hace con las ecuaciones 121, 122, y 123 y con la tasa de entrega del cauce calculada con

$$DR = \frac{(Y_{SB})_j}{(Y_B)_j} \qquad 218$$

donde

DR = Tasa de entrega de sedimentos

Y_{SB} = Produccion de sedimentos en la salida de la subcuenca **j**, en t×ha^{1}

Y_B = Produccion de sedimentos desde la subcuenca **j** despues de que estos han transitado hasta la salida de la cuenca, en t×ha^{1}

Arnold et al , (1991) describe el procedimiento de los sedimentos en suspension a detalle

Al igual que con el NO_3-N en suspension, una vez que el P soluble se incorpora a una corriente es considerado como un material constante y se calcula al sumar las producciones de todas las subcuencas para determinar la produccion de la cuenca

3 - Movimiento de fosforo

Otra vez, la funcion factorial propuesta, es utilizada en el movimiento de fosforo desde las salidas de la subcuenca hasta la salida de la cuenca

$$YP_{Bj} = 0\ 01\ (Y_B)_j\ (C_{PSB})_j\ (ER_R)_j \qquad 219$$

donde

YP_B = Produccion de P en la salida de la cuenca, en kg×ha^{1}

Y_B = Produccion de sedimentos desde la subcuenca **j** despues de que estos han transitado hasta la salida de la cuenca, en t×ha^{1}

C_{PSB} = Concentracion de P en los sedimentos que llegan a la salida de la subcuenca **j**, en g×t^{1}

ER_R = Tasa de enriquecimiento para el cauce desde la subcuenca **j** hasta la salida del cauce

4 - Movimiento de plaguicidas

La concentracion de plaguicidas se supone constante a lo largo de los cauces y no se considera la degradacion o volatilizacion de estos A los plaguicidas adsorbidos se considera su depositacion si esta ocurre a los sedimentos La propuesta de tasa de entrega/tasa de enriquecimiento utilizada para el movimiento de los nutrientes tambien se utiliza para los plaguicidas adsorbidos en las corrientes de los cauces

XIV - Calidad del agua en almacenamientos y cuerpos de agua

Pocos modelos predicen el efecto del manejo del suelo sobre los cuerpos de agua que estan fuera del sitio de estudio Frecuentemente los ingenieros ambientales asumen que los modelos para calidad de agua suponen una fuente sin un punto de origen especifico y no pueden directamente predecir los efectos del manejo en el suelo Asi mismo, los agronomos y cientificos modelan las fuentes sin considerar su punto de origen y los efectos al exterior

El presente modelo, se desarrollo al unificar el SWRRB con el modelo de toxicos para almacenamientos y cuerpos de agua de Chapra (1989) El modelo integrado opera con intervalos de tiempo diarios y es muy eficiente para su ejecucion con periodos de varios años El modelo sigue el recorrido de los plaguicidas desde su aplicacion en el suelo, hasta su destino final en los cuerpos de agua Esto permite a los que toman las decisiones predecir en forma directa la influencia del manejo de las tierras agricolas altas, sobre la calidad del agua en los cuerpos de agua

1 - Balance de toxicos

El balance de toxicos en los almacenamientos y cuerpos de agua es tomado de Chapra (1989) y supone condiciones homogeneas El modelo es dividido entre capas de agua de superficies homogeneas, debajo de las cuales se localizan capas homogeneas de sedimentos Los toxicos se dividen en disueltos y en suspension, en ambos con capas de agua y sedimentos

Los procesos principales simulados por el modelo son la carga, flujo de salida, reacciones, volatilizacion, depositacion, difusion, resuspension, y enterrado La carga hasta el cuerpo de agua se estima con los componentes del modelo "sin punto de origen", y la salida de toxicos, es simplemente la cantidad de agua que sale del almacenamiento o cuerpo de agua multiplicado por su concentracion La volatilizacion es el intercambio de toxicos a traves de la interface aire-agua y ocurre solamente en la fraccion disuelta mientras que la depositacion ocurre solamente en la fraccion disuelta mientras que la depositacion ocurre solamente en la fraccion en forma de particulas asociadas El movimiento de los toxicos debido al movimiento aleatorio del agua se considera como una difusion, y es el mecanismo mediante el cual el agua en los poros del sedimento contaminado puede infiltrarse otra vez en el almacenamiento o cuerpo de agua La resuspension ocurre cuando el escurrimiento suspende las particulas que han sido previamente depositadas En el proceso de enterrado, los toxicos son cubiertos a una profundidad a la cual estos ya no pueden reaccionar con el almacenamiento o cuerpo de agua y son considerados fuera del sistema El balance de masas

puede ser descrito matematicamente como

220

$$V_1 \frac{\Delta C_1}{\Delta t} = QSUB1\, C_1 - Q_o C_1 - K_1 V_1 C_1 - V_s A F_{d1} C_1 - V_s F_{p1} C_1 + V_r A C_2 + V_c A (F_{d2} C_2 - F_{d1} C_1)$$

221

$$V_2 \frac{\Delta C_2}{\Delta t} = KSUB2\, V_2 C_2 + V_g A F_{d1} C_1 - V_r A C_2 - V A C_2 + V_d A (F_{d1} C_1 - F_{d2} C_2)$$

Los subindices 1 y 2 indican la capa de agua y la capa de sedimentos, respectivamente

donde

V = Volumen del almacenamiento o cuerpo de agua, en m^3
C = Concentracion total de toxicos (disueltos y sedimento), en $g \times m^3$
D = Intervalo o incremento de tiempo (un dia)
Q_1 = Volumen de entrada, en m^3
Q_2 = Volumen de salida, en m^3
K = Coeficiente de reaccion de primer orden, en $dias^1$
V_v = Coeficiente de transferencia de la masa de volatilizacion, en $m \times d$
A = Area en m^2
V_s = Velocidad de depositacion, en $m \times d^1$
V_r = Velocidad de resuspension, en $m \times d^1$
V_d = Velocidad de difusion de la mezcla, en $m \times d^1$
V_b = Velocidad de enterrado, en $m \times d^1$
F_d = Fraccion de contaminantes totales en forma disuelta (adimensional)
F_p = Fraccion de contaminantes totales en forma particulada (adimensional)

2 - Division suelo-liquido

La concentracion de toxicos total se separa en dos componentes

222

$$C = C_d + C_p$$

donde

C = Concentracion total de toxicos (disueltos y sedimentos), en $mg \times m^3$
C_d = Componente en forma disuelta (adimensional)
C_p = Componente en forma particulada (adimensional)

Estos componentes representan la fraccion de la concentracion total como sigue

223

$$C_d = F_d C$$

224

$$C_p = F_p C$$

Las fracciones F_d y F_p son una funcion del coeficiente de division de los contaminantes y la concentracion de solidos suspendidos en el almacenamiento o cuerpo de agua

$$F_d = \frac{1}{1 + K_d S} \qquad 225$$

$$F_p = \frac{K_d S}{1 + KSUBd\ S} \qquad 226$$

donde

F_d = Fraccion de contaminantes totales en forma disuelta (adimensional)
F_p = Fraccion de contaminantes totales en forma particulada (adimensional)
K_d = Coeficiente de division, en $m^3 \times g^{1}$
S = Concentracion de solidos suspendidos en el almacenamiento o cuerpo de agua, en $g \times m^3$

El coeficiente de division cuantifica la tendencia de los toxicos a asociarse con la materia solida

3 - Balance de masa para fosforo

Un modelo simple para el balance de masa para fosforo se tomo de Thormann y Mueller (1987) El modelo supone 1) el almacenamiento o cuerpo de agua completamente mezclado, 2) fosforo limitado, y 3) el fosforo total puede ser utilizado como una medida de la condicion trofica La primera suposicion ignora la estratificacion del almacenamiento o cuerpo de agua y la intensificacion del almacenamiento o cuerpo de agua y la intensificacion del fitoplacton en el eplimnion La segunda suposicion es generalmente valida cuando las cargas sin punto de origen son dominantes y la tercera suposicion implica que existe una relacion entre el fosforo total y la biomasa

A pesar de la severidad de las suposiciones, el modelo siguiente ha mostrado producir resultados muy utiles (Thormann y Mueller, 1987) La ecuacion de balance de masa para el fosforo total es

$$V \frac{\Delta p}{\Delta t} = W - K_s\, p\, V - Q\, p \qquad 227$$

donde

V = Volumen del almacenamiento o cuerpo de agua, en m^3
p = Concentracion total de fosforo en el almacenamiento o cuerpo de agua, en $mg \times l^{1}$
Q = Volumen de salida, en l
K_s = Tasa de perdida total de fosforo, en dia^{1}
W = Entrada de fosfor total, en mg
Δt = Incremento de tiempo (un dia)

Vollenwelder (1975) y Chapra y Tarapchak (1976) estimaron los metodos para K_s con parametros disponibles

4 - Relacion entre el fosforo total y las condicion trofica

Diversas relaciones empiricas con datos medidos han sido postuladas por varios investigadores como Bartsch y Gakstatter (1978), Rast y Lee (1978), Dillon y Rigler (1975), y Smith y Shapiro (1981) Sus relaciones son similares y la de Rast y Lee se selecciono para usarla en el modelo

228

$$\log_{10} (\text{chl a}) = 0\ 76 \log_{10} (p) - 0\ 259$$

donde

chl a = Concentracion de clorofila a, en mg ^{1}

p = Concentracion total de fosforo en el almacenamiento o cuerpo de agua, en mg×l ^{1}

Otra medida de la condicion trofica del almacenamiento o cuerpo de agua es la profundidad visible Debido a que la claridad del agua es facilmente percibida por cualquiera, la profundidad visible es una medida importante de la calidad del agua La Tabla 1 muestra la relacion entre la profundidad visible y la percepcion publica de la calidad del agua La relacion entre la profundidad visible y la concentracion de clorofila es (Rast y Lee, 1978)

229

$$\log_{10} (S_d) = 0\ 473 \log_{10} (\text{chl a}) + 0\ 803$$

donde

S_d = Profundidad visible, en m

chl a= Concentracion de clorofila a, en mg ^{1}