



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE**

AUTOR: ING. MSc. ADRIANA M. MÁRQUEZ R.

VALENCIA, MARZO DE 2011



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE**

AUTOR: ING. MSc. ADRIANA M. MÁRQUEZ R.

TUTOR: Dr. EDILBERTO GUEVARA P.

VALENCIA, MARZO DE 2011



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE**

AUTOR: ING. MSc. ADRIANA M. MÁRQUEZ R.

**Trabajo presentado ante el Área de Estudios de
Postgrado de la Universidad de Carabobo para
optar al título de Doctor en Ingeniería. Área: Ambiente**

VALENCIA, MARZO DE 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
SECCIÓN DE GRADO



ACTA DE DISCUSIÓN DE TESIS DOCTORAL

En atención a lo dispuesto en los Artículos 147, 148 y 149 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 146 del citado Reglamento, para estudiar la Tesis Doctoral titulada:

“MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO - CACHINCHE”

Presentada para optar al grado de DOCTOR EN INGENIERÍA por la aspirante:

ADRIANA MÁRQUEZ
V.- 12.604.007

Habiendo leído el contenido y escuchada la exposición, decidimos que la Tesis cumple con la rigurosidad académica y científica, por lo que se da por APROBADA.

En Valencia, a los diecisiete (17) días del mes de Junio del año dos mil once.

Prof. Cristóbal Vega
C.I.: 5264970

Prof. Esmeya Díaz
C.I.: 4246181



Prof. Adriana Florentino
C.I.: 7255734



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL.



VEREDICTO

Nosotros, Miembros del Jurado designado para la evaluación del Trabajo de Grado titulado: **MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE**, presentado por la **ING. MSc. ADRIANA MERCEDES MÁRQUEZ ROMANCE**, C.I.: 12.604.007 para optar al grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**. AREA: AMBIENTE, estimamos que el mismo reúne los requisitos para ser considerado como: Aprobado Meritum

Dr. Cristóbal Vega
C.I.: 5.264.970

Presidente del Jurado

Dra. Esmeya Díaz
C.I.: 4.246.181
Miembro del Jurado



Dra. Adriana Florentino
C.I.: 7.255.931
Miembro del Jurado

VALENCIA, JUNIO DE 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA,
DIRECCIÓN DE POSGRADO
SECCIÓN DE GRADO



ACTA DE OTORGAMIENTO DE MENCIÓN HONORÍFICA A LA TESIS DOCTORAL

En atención al Reglamento de Menciones Honoríficas para los egresados del Postgrado de la Universidad de Carabobo, Artículo 2, Ordinal (e), donde se especifican los requisitos para la Mención Honorífica de las Tesis Doctorales, se acuerda: Otorgar la Mención Honorífica a la Tesis Doctoral:

**“MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA
DEL EMBALSE PAO – CACHINCHE”**

Presentada por la Ciudadana Adriana Márquez, Cédula de Identidad: 12.604.007, fundamentada en las siguientes consideraciones:

1. El trabajo pertenece a una de las líneas de investigación del CIHAM – UC: Modelación de variables ambientales.
2. En la tesis se lleva a cabo un tratamiento novedoso del tema, en el sentido de relacionar las variables que intervienen en los modelos con las mediciones de campo.
3. El trabajo agrega valor al conocimiento, ya que suministra información de campo en una zona estratégica de abastecimiento de agua a la región central de Venezuela.
4. Las conclusiones y recomendaciones conducen a la implementación de nuevas líneas de investigación.
5. Los resultados permitirán mejorar las prácticas agrícolas en la zona, luego de implementar un programa educativo ambiental, que promueva el desarrollo sustentable y la mejora de calidad de vida.

En Valencia a los 17 días del mes de junio del año dos mil once

Prof. Cristóbal Vega
C. I.: 5.264.970

Prof. Esmeya Díaz
C. I.: 4.246.181

Prof. Adriana Florentino
C. I.: 7.255.931

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades de la Universidad de Carabobo, quienes han facilitado los permisos y recursos para que esta investigación se haya llevado a cabo

A las autoridades de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo, quienes han brindado el apoyo para el uso de los laboratorios donde los tesistas han realizado ensayos

Al Profesor Edilberto Guevara, por su orientación como tutor

Al FONACIT, organismo que ha contribuido al financiamiento de la investigación

A los dueños de parcelas agrícolas y a la comunidad en general que habita la cuenca del río Chirgua –Estado Carabobo, quienes han permitido el acceso a su propiedad y han colaborado en el desarrollo de la investigación, participando activamente en la misma, y con quienes se ha logrado una relación basada en la amistad y el respeto

A los co-investigadores que llevaron a cabo el trabajo de campo

Al Sr. Jesús Valero, quien ha colaborado en el traslado a campo de los co-investigadores y ha sido un amigo para todos

A mi amiga, Maryelvi Jiménez por darme su apoyo incondicional

A todos los amigos y familiares que han coadyuvado a que esta investigación se haya llevado a cabo

DEDICATORIA

A Dios por darme fuerzas y ser guía en los momentos más difíciles en esta meta alcanzada

A mis Padres, Miriam Josefina Romance y Benny José Márquez, que con amor, cariño y paciencia me brindaron todo su apoyo incondicional y depositaron toda su confianza para el logro de esta meta.

A mis Abuelos, Hortensia de Márquez y Hermes Márquez, Emilia Romance y Humberto Escobar, agradezco la comprensión por el tiempo que no pude compartir con ustedes para poder lograr esta meta.

A mis hermana, Leydi Diana y Mairim, por su comprensión, cariño y solidaridad a lo largo de este camino.

A mi gran amigo, profesor y tutor Edilberto Guevara por sus sabios consejos, orientación y apoyo. Es alguien inolvidable para mi, un ejemplo a seguir, y la prueba de que cuando se es perseverante es posible lograr las metas por méritos.

INDICE GENERAL

INDICE	PP.
VEREDICTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	
I EL PROBLEMA.....	5
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo General.....	8
1.2.2 Objetivos Especificos.....	9
1.3 Justificación.....	9
1.4 Alcances y limitaciones.....	10
CAPITULO II	
II MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Antecedentes.....	11
2.2 Bases Teóricas.....	15
2.2.1 Erosión.....	15
2.2.2 Sedimentación.....	16
2.2.3 Impacto de la Erosión y Sedimentación.....	16
2.2.3.1 Impactos Ambientales.....	17
2.2.3.2 Impactos Económicos.....	17
2.2.4 Factores que afectan la Erosión.....	17
2.2.4.1 Clima.....	18
2.2.4.2 Suelo.....	18
2.2.4.3 Topografía.....	18
2.2.4.4 Vegetación.....	18
2.2.4.5 Hombre.....	18
2.5 Tipos de Erosión.....	18
2.5.1 Erosión por Salpicadura.....	19
2.5.2 Erosión Laminar.....	20
2.5.3 Erosión por Surcos.....	21
2.5.4 Erosión por Cárcavas.....	21
2.5.5 Erosión en Cauces y Costera.....	21
2.6 Modelación de la Erosión	22
2.6.1 Mecanismo de la Erosión Hídrica.....	22
2.7 Tipos de Modelos de Erosión.....	23
2.7.1 Modelos Empíricos.....	24
2.7.2 Modelos Conceptuales.....	24
2.7.3 Modelos basados en Procesos Físicos.....	24
2.7.4 Modelo CREAMS.....	27
2.7.5 Modelo ANSWERS.....	27

2.7.6 Modelo WEPP.....	27
2.7.7 Modelo DWEPP.....	28
2.7.8 Modelo EUROSEM.....	29
2.8 Descripción de los Modelos basados en Procesos Físicos.....	29
2.8.1 Modelos de Infiltración.....	31
2.8.1.1 Modelo de Philip.....	34
2.8.1.2 Modelo de Green Ampt.....	34
2.8.1.3 Modelo Lineal de Smith – Parlange.....	37
2.8.1.4 Modelo No Lineal de Smith – Parlange.....	37
2.8.1.5 Modelo de Horton.....	38
2.8.1.6 Modelo de Mishra Singh.....	38
2.8.1.7 Modelo de Holtan.....	39
2.8.1.8 Modelo de Kostiaikov.....	39
2.8.1.9 Modelo de Kostiaikov Modificado.....	40
2.9 Modelos de Lluvia – Escorrentía.....	41
2.9.1 Regresión Lineal.....	
2.9.2 Regresión No Lineal.....	42
2.10 Modelo de Erosión y Transporte de Sedimentos.....	42
2.10.1 WEPP.....	44
2.10.2 DWEPP.....	45
2.10.3 EUROSEM.....	46
2.10.4 CIHAM-UC.....	47
2.10.4.1 Modelos de Capacidad de Desprendimiento de Partículas.....	47
2.10.4.2 Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos.....	51
2.11 Modelo de Erosión Ajustado mediante Técnicas de Regresión.....	51
2.11.1 Modelo de Erosión basado en Regresión Múltiple Lineal.....	51
2.11.2 Modelo de Erosión basado en Regresión Múltiple No Lineal.....	51
2.12 Ajuste basado en Técnicas de Inteligencia Artificial.....	52
2.12.1 Redes Neuronales Artificiales.....	52
2.12.1.1 Modelo de Neurona.....	53
2.12.1.2 Red de Alimentación Progresiva.....	54
2.12.2 Lógica Difusa.....	55
2.12.2.1 Sistema de Inferencia Difuso.....	56
2.13 Análisis Estadístico.....	57
2.13.1 Residuo.....	57
2.13.2 Error Cuadrático Medio.....	57
2.13.3 Coeficiente de Determinación.....	57
2.13.4 Coeficiente de Determinación Ajustado.....	57
2.13.5 Coeficiente de Mallows.....	58
2.13.6 Error Estándar de Estimación.....	58
2.13.7 Error Medio Absoluto.....	58
2.13.8 Estadístico de Durbin-Watson.....	58
2.13.9 Autocorrelación Residual de Retardo 1.....	58
2.14 Indicadores Locales de Asociación Espacial.....	59
2.14.1 Índice Local de Moran.....	61
2.14.2 Estadístico Getis y Ord.....	64
III MARCO METODOLÓGICO.....	66
3.1 Tipo de Investigación.....	66
3.2 Diseño de la Investigación.....	66
3.3 Población y Muestra.....	67
3.4 Técnicas de Recolección de Datos y Análisis de la Información.....	68
3.5 Fases de la Investigación.....	69
3.5.1 Selección del Área Experimental.....	70
3.5.2 Recolección de Datos Existentes y Evaluación de Estudios Previos de la Cuenca	

Experimental.....	72
3.5.3 Implementación del Área Experimental y de la Red de Monitoreo.....	72
3.5.3.1 Precipitación.....	73
3.5.3.2 Propiedades Físicas del Flujo.....	73
3.5.3.3 Propiedades Físicas de Canales.....	73
3.5.3.4 Propiedades Físicas del Suelo.....	73
3.5.3.5 Infiltración.....	73
3.5.4 Desarrollo de un Programa de Observación y Monitoreo en Sitio.....	74
3.5.5 Evaluación de los Modelos Existentes para la Estimación de la Erosión y el Transporte de Sedimentos.....	74
3.5.6 Desarrollo de un Modelo de Erosión y Transporte de Sedimentos para la Cuenca	75
Experimental.....	
3.5.7 Implementación del Modelo	76
3.5.8 Lineamientos sobre el Plan de Manejo de la Cuenca, utilizando el Modelo de Erosión de la Cuenca.....	76
3.6 Planteamiento de Hipótesis.....	78
3.6.1 Caracterización de las Variables de los Modelos de Erosión Hídrica y el Transporte de Sedimentos.....	79
3.6.1.1. Factor Climático.....	79
3.6.1.2 Factores Edáficos.....	79
3.6.1.3 Factor Topográfico.....	80
3.6.1.4 Factor de Manejo.....	80
3.6.1.5. Características Físicas del Flujo en el Surco.....	81
3.6.2 Calibración de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	81
3.6.3 Validación de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	81
3.6.4 Generalización de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	82
3.7 Definición Operacional de las Variables.....	82
IV RESULTADOS.....	86
4.1 Caracterización de las Variables de los Modelos de Erosión Hídrica y el Transporte de Sedimentos.....	86
4.1.1 Factor Climático.....	86
4.1.2 Factores Edáficos.....	86
4.1.3 Factor Topográfico.....	95
4.1.4 Factor de Manejo.....	95
4.1.5 Características Físicas del Flujo en el Surco.....	95
4.2 Calibración de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	98
4.2.1 Ajustes de Modelos de Erosión basado en Procesos Físicos.....	98
4.2.1.1 Ajustes de Modelos de Infiltración.....	98
4.2.1.2 Ajustes de Modelos de Lluvia – Escorrentía.....	118
4.2.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos.....	124
4.2.2 Ajustes de Modelos de Erosión basados en Regresiones.....	145
4.2.3 Ajustes basados en Técnicas de Inteligencia Artificial.....	149
4.3 Validación de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	154
4.3.1 Ajustes de Modelos de Erosión basado en Procesos Físicos.....	154
4.3.1.1 Ajustes de Modelos de Infiltración.....	154
4.3.1.2 Ajustes de Modelos de Lluvia – Escorrentía.....	155
4.3.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos.....	157
4.3.2 Ajustes de Modelos de Erosión basados en Regresiones.....	158
4.3.3 Ajustes de basados en Técnicas de Inteligencia Artificial.....	159
4.4 Generalización de Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos.....	161
4.4.1 Ajustes de Modelos de Erosión basado en Procesos Físicos.....	161
4.4.1.1 Ajustes de Modelos de Infiltración.....	161

4.4.1.2 Ajustes de Modelos Lluvia – Escorrentía.....	163
4.4.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos.....	165
4.4.2 Ajustes de Modelos de Erosión basados en Regresiones.....	169
4.4.3 Ajustes basados en Técnicas de Inteligencia Artificial.....	171
4.5 Discusión de Resultados.....	173
4.6 Lineamientos sobre el Plan de Manejo de la Cuenca, utilizando el Modelo de Erosión de la Cuenca	185
CAPITULO V	
5.1 Conclusiones y Recomendaciones.....	223
REFERENCIAS.....	225
ANEXOS.....	226

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	pp.
1 Diagrama de flujo de un modelo de erosión hídrica basado en procesos físicos.....	30
2 Esquema Entrada/Salida de la red neuronal artificial.....	52
3 Arquitectura de red de capa única de neuronas.....	53
4 Función de transferencia Log-Sigmoidal.....	54
5 Función de transferencia lineal.....	54
6 Arquitectura de la red de alimentación progresiva.....	55
7 Diagrama de un sistema de inferencia difuso.....	56
8 Índice Local de Moran (ILM) y Valor z Período Seco 2008. Tasa de infiltración para t=2 min.: (a) ILM.(b) Valor z. Tasa de infiltración para t=47 min.: (c) ILM. (d) Valor z.....	91
9 Índice Local de Moran (ILM) y Valor z Período Seco 2009. Tasa de infiltración para t=2 min.: (a) ILM. (b) Valor z. Tasa de infiltración para t=47 min.: (c) ILM. (d) Valor z.....	92
10 (a) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en t=2 min-2008. (b) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en t=47 min-2008. (c) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en t=2 min-2009 (d) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en t=47 min-2009.....	93
11 Hidrogramas medidos para surcos de diferentes pendientes durante eventos de riego.....	95
12 Carga de sedimentos medida durante eventos de lluvia y riego.....	96
13 Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para el caso de la Serie Total. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostikov, (k) Kostikov Modificado.....	99
14 Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para el caso de Contenido de Humedad Inicial Bajo. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable,	100

	(g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado.....	
15	Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para el caso de Contenido de Humedad Inicial Alto. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado.....	101
16	Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelo del tipo arena limosa. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado..	103
17	Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelos del tipo limo orgánico. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado..	104
18	Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelos del tipo arcilla limosa. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado..	105
19	Comparación de los procesos de erosión en surcos simulados con los datos observados.....	128
20	Relación entre la capacidad de desprendimiento y el esfuerzo cortante del flujo	130
21	Comparación de la capacidad de desprendimiento observada mediante métodos experimentales en surcos con pendientes diferentes y la estimada con las Ecuaciones (40) y (53) a (72).....	131
22	Comparación de la capacidad de transporte observada mediante métodos experimentales en surcos con pendientes diferentes y la estimada con las Ecuaciones (42), (50) y (73).....	133
23	Comparación de los procesos de erosión estimados con las observaciones de la carga de sedimentos en la salida de un surco durante un evento de riego en parcelas de diversas pendientes	142
24	Erosión y deposición estimadas durante eventos de riego en la salida de un surco empleando datos promediados por etapa en parcelas de diversas pendientes (cada etapa representa 1/3 del tiempo del ciclo de siembra).....	143

25	Comparación de la erosión en surcos simulada mediante modelos de regresión con los datos observados.....	147
26	Comparación de la erosión simulada mediante Redes Neuronales Artificiales con las observaciones de eventos de lluvia de 1 h y 2 h	150
27	Comparación de la erosión simulada mediante Sistema de Inferencia Difuso con observaciones de eventos de lluvias de 2 h.....	152
28	Efecto de la calidad del agua sobre la pérdida de suelo en surcos bajo riego (Lentz et al., 1993,1996).....	192
29	Efecto de 10 ppm sobre el agua de riego sobre el suelo en la salida de los surcos, luego de 12 horas de riego (Sokja, 1996).....	193
30	Efecto de la concentración de los sedimentos y la tasa de flujo sobre la eficiencia de remoción de los sedimentos (Brown et al., 1981).....	195
31	Esquema demostrativo de plantas, surcos, y situación de los neumáticos para cuatro propuestas de espaciamiento utilizados. Los patrones son: A, filas doble de 1.12 m; B, fila sencilla de 0,56 m; C, fila doble de 0.76 m; D, fila sencilla de 0,76 m. (Sokja et al., 1992).....	210
32	Extracción del agua mediante captación directa desde el río Chirgua.....	211
33	Preparación de tierras y siembra simultánea.....	213
34	Labranza de bordos o surcos.....	214
35	Actividades en la etapa de la cosecha.....	215

LISTA DE TABLAS

TABLAS	pp.
1 Ecuaciones propuestas para la estimación de la capacidad de desprendimiento.....	50
2 Ubicación y Usos de la Tierra de los Sectores en la Cuenca del Río Chirgua.....	71
3 Operacionalización de Variables.....	82
4 Media (μ), Desviación Estándar (σ) y Coeficiente de Variación (CV) para las Propiedades Físicas de suelo	88
5 Resultados de la Calibración de Modelos de Infiltración. Series: Total, Contenido de Humedad Alta y Contenido de Humedad Baja.....	109
6 Resultados de la Calibración de Modelos de Infiltración. Serie: Tipo de Suelo.....	114
7 Coeficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía (D=1H).	119
8 Coeficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía (D=2H).....	108
9 Resultados en la Calibración de los Modelos lluvia-Escorrentía.....	122
10 Parámetros de Modelo para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c).....	124
11 Resultados en la Calibración del Modelo para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c).....	124
12 Coeficientes de Regresión de los Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos.....	125
13 Resultados en la Calibración del Modelo para la Estimación de la Capacidad de Transporte de Sedimentos.....	125
14 Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 0.8%.....	134

15	Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 0.8%.....	134
16	Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1%.....	135
17	Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1%.....	135
18	Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1.5%.....	136
19	Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1.5%.....	136
20	Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 2.5%.....	137
21	Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 2.5%.....	137
22	Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 13%.....	138
23	Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 13%.....	138
24	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 0.8%.....	139
25	Estadísticos de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 0.8%.....	139
26	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1%.....	139
27	Estadísticos de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1%.....	139
28	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1.5%.....	140
29	Estadísticos de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1.5%.....	140
30	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en	140

	Surcos de Pendiente 2.5%.....	
31	Estadísticos de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 2.5%.....	140
32	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 13%.....	140
33	Estadísticos de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 13%.....	140
34	Coefficientes de Regresión de los Modelos de Erosión basados en RLM y RNLM.....	145
35	Estadísticos de ajuste de los modelos de erosión basados en RML y RNLM.....	145
36	Estadísticos de Ajuste de los Modelos de Erosión mediante las Redes Neuronales Artificiales (RNA).....	148
37	Coefficientes de las Funciones de Pertenencia para diversos SID	151
38	Estadísticos de Ajuste de los Modelos de Erosión basados en SID.....	151
39	Resultados en la Validación de los Modelos de Infiltración.....	154
40	Resultados en la Validación de los Modelos Lluvia – Escorrentía.....	155
41	Resultados en la Validación de los Modelos de Erosión basados en Procesos Físicos.....	157
42	Resultados en la Validación de los Modelos de Regresión para Estimación de Erosión.....	158
43	Resultados en la Validación de los Modelos de Redes Neuronales Artificiales para Estimación de la Erosión.....	159
44	Resultados en la Validación de los Modelos de Sistema de Inferencia Difusa para la Estimación de Erosión.....	159
45	Resultados en la Prueba de los Modelos de Infiltración.....	161
46	Parámetros del Modelo para la Estimación de la Tasa de Infiltración de Horton.....	162

47	Resultados en la Prueba de los Modelos Lluvia – Escorrentía.....	163
48	Coefficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía.....	164
49	Resultados en la Validación de los Modelos de Erosión basados en Procesos Físicos.....	165
50	Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Diversas Pendientes.....	166
51	Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de diversas Pendientes.....	167
52	Resultados en la Prueba de los Modelos de Regresión para la Estimación de Erosión.....	168
53	Coefficientes de Regresión de los modelos de erosión basados en RLM y RNLM.....	169
54	Resultados en la Prueba de los Modelos de Redes Neuronales Artificiales para Estimación de Erosión.....	170
55	Resultados en la Prueba de los Modelos de Sistema de Inferencia Difusa para Estimación de Erosión.....	171
56	Características de las pruebas de campo a partir de las cuales se obtienen los parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo debido al flujo en surcos.....	174
57	Características de los experimentos de laboratorio a partir de los cuales se obtienen los parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas de suelo debido al flujo en surcos.....	175
58	Parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo en surcos y características de las pruebas de campo para su obtención.....	176

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS	pp.	
I	<i>Figura 1.</i> Cuenca del embalse Pao-Cachinche. Estado Carabobo.....	225
II	<i>Figura 2.</i> Serie de tiempo para la superficie sembrada con maiz (<i>Zea Mays</i>) (ha): (a) Municipio Valencia, (b) Municipio Libertador, (c) Municipio Bejuma. Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados de MPPAT, (2010). Fuente: Datos tomados del Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.....	226
II	<i>Figura 3.</i> Serie de tiempo para la superficie sembrada con papa (<i>Solanum tuberosum</i>) (ha). Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados del Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.....	226
II	<i>Figura 4.</i> Serie de tiempo para la superficie sembrada con papa (<i>Solanum tuberosum</i>) (ha). Parroquia Simón Bolívar-Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados del INDER-Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.....	226
III	Carta de productores.....	227
IV	<i>Figura 5.</i> Mapa de usos de la tierra en la cuenca del río Chirgua. Fuente: Elaboración propia.....	228
V	<i>Figura 6.</i> Mapa de pendientes de parcelas en la cuenca del río Chirgua. Fuente: Elaboración propia.....	229
VI	<i>Tabla 1.</i> Muestreo para Determinar la Erosión.....	229
VII	Método artesanal de medición de pendientes.....	230
VIII	Formatos de medición en campo.....	231
IX	<i>Tabla 2.</i> Muestreo para Propiedades Físicas del Suelo.....	235
X	<i>Tabla 3.</i> Muestreo para Medir la Infiltración.....	236
XI	<i>Tabla 4.</i> Datos para los Modelos	237
XII	<i>Figura 7.</i> Estructura SID. Entrada 1: Lluvia. Entrada 2:	238

	infiltración. Salida: tasa de erosión. Fuente: Elaboración propia.....	
XIII	<i>Tabla 5.</i> Errores de las Entradas Difusas para Tormentas de 2 Horas.....	250
XIV	<i>Figura 8.</i> Datos de entrenamiento vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.....	251
XIV	<i>Figura 9.</i> Datos de validación vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.....	251
XIV	<i>Figura 10.</i> Datos de prueba vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.....	251
XV	<i>Figura 11.</i> Lámina de Precipitación. Fuente: Elaboración propia.....	252
XVI	<i>Figura 12.</i> Tamaño medio de partículas del suelo de la Cuenca del río Chirgua-Estado Carabobo. Media e intervalos de confianza al 95%. Fuente: Elaboración propia.....	253
XVII	<i>Figura 13.</i> Distribución de tamaños de partículas. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	254
XVIII	<i>Figura 14.</i> Contenido de arcilla. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	255
XIX	<i>Figura 15.</i> Contenido de arena. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	256
XX	<i>Figura 16.</i> Contenido de limo. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	257
XXI	<i>Figura 17.</i> Límite líquido. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	258
XXII	<i>Figura 18.</i> Límite plástico. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	259
XXIII	<i>Figura 19.</i> Contenido de humedad inicial del suelo. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	260
XXIV	<i>Figura 20.</i> Tasa de Infiltración Observada en las Pruebas de	261

	Campo. Fuente: Elaboración propia.....	
XXV	<i>Figura 21.</i> Ajuste cualitativo del histograma de frecuencias de la infiltración acumulada en el suelo de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo a las funciones de distribución estadísticas. Fuente: Elaboración propia.....	262
XXVI	<i>Tabla 6.</i> Comparación de Distribuciones Alternas para la Infiltración Acumulada.....	263
XXVII	Índices Globales de Asociación Espacial.....	264
XXVIII	Indicadores Locales de Asociación Espacial.....	265
XXIX	Distribución del Índice de Moran.....	266
XXX	<i>Figura 23.</i> Pendientes de canales de drenaje en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	267
XXXI	<i>Figura 24.</i> Sólidos Totales en caudales de drenaje durante eventos de riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	268
XXXII	<i>Figura 25.</i> Sólidos Totales en caudales de drenaje durante ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	271
XXXIII	<i>Figura 26.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	272
XXXIV	<i>Figura 27.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	273
XXXV	<i>Figura 28.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	274
XXXVI	<i>Figura 29.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	275
XXXVI I	<i>Figura 30.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	276

XXXVI II	<i>Figura 31.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	277
XXXIX	<i>Figura 32.</i> Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.....	278
XL	<i>Figura 33.</i> Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Philip. Fuente: Elaboración propia.....	279
XL	<i>Figura 34.</i> Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Misrha Singh. Fuente: Elaboración propia.....	279
XL	<i>Figura 35.</i> Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Horton. Fuente: Elaboración propia.....	279
XL	<i>Figura 36.</i> Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Kostiaikov. Fuente: Elaboración propia.....	280
XL	<i>Figura 37.</i> Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Kostiaikov Modificado. Fuente: Elaboración propia.....	280
XLI	<i>Figura 38.</i> Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Philip. Fuente: Elaboración propia.....	281
XLI	<i>Figura 39.</i> Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Misrha Singh. Fuente: Elaboración propia.....	281
XLI	<i>Figura 40.</i> Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Horton. Fuente: Elaboración propia.....	281
XLI	<i>Figura 41.</i> Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Kostiaikov. Fuente: Elaboración propia.....	282



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL



**MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE**

Autor: Ing. MSc. Adriana M. Márquez R.

Tutor: Dr. Edilberto Guevara

Fecha: Marzo, 2011

RESUMEN

La investigación trata sobre la modelación de la erosión y el transporte de sedimentos en una cuenca del embalse Pao-Cachinche. Se emplean modelos basados en procesos físicos, en regresiones y en técnicas de inteligencia artificial. Los modelos físicos los procesos como: infiltración, lluvia-escorrentía, capacidad de desprendimiento de partículas sólidas, transporte de sedimentos y erosión-deposición. Entre los modelos de erosión se usan: WEPP, DWEPP, EUROSEM y CIHAM-UC. Los modelos de erosión basados en regresiones incluyen: regresión lineal múltiple y regresión no lineal múltiple. Los modelos de erosión basados en ajustes de técnicas de inteligencia artificial incluyen: las redes neuronales artificiales y los sistemas de inferencia difusa. De manera general, para todos los modelos se siguen las etapas de calibración, validación y prueba. Los datos de campo utilizados para la calibración de los modelos fueron recolectados en tierras agrícolas, durante las estaciones seca y lluviosa en la Cuenca del Río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela durante dos años (2008-2009). La información de campo está caracterizada por: factores climáticos, edáficos, topográficos y de manejo. Se realizaron 526 pruebas de infiltración, se midieron 97 tormentas de lluvia y 300 eventos de riego. El suelo de la cuenca varía, tanto verticalmente en un estrato de 0 a 60 cm como espacialmente entre un limo orgánico de baja plasticidad (OL) y una arena limosa (SM). Se encontró que los modelos utilizados estiman la tasa de erosión y el transporte de sedimentos en forma satisfactoria, R^2 mayor a 0.6. El modelo seleccionado para ser utilizado en la cuenca del río Chirgua es el desarrollado por en el CIHAM-UC.

Palabras clave: sedimentos, modelos hidrológicos, modelo de erosión del suelo, hidrología, escorrentía, redes neuronales artificiales, sistema de inferencia difuso.

INTRODUCCIÓN

La explotación irracional y sin control es una de las causas principales de la degradación y el agotamiento de las tierras. El problema de la erosión de los suelos es particularmente agudo en los países en desarrollo, en tanto que los problemas de salinización, anegamiento, contaminación del suelo y pérdida de fertilidad del suelo aumentan en todos los países. El uso que se da al suelo en la actualidad a menudo hace caso omiso de las posibilidades reales, de la capacidad de sustento y de las limitaciones de los recursos naturales, así como de su diversidad en el espacio. Los más de 6 mil millones de personas que viven actualmente en el mundo disponen, como promedio, de un 15 por ciento más de alimentos *per cápita* que los 5 mil millones que integraban la población mundial hace 20 años. Si no se realizan esfuerzos extraordinarios, para el año 2011 una parte inaceptablemente grande de la población mundial, particularmente de países en desarrollo, podría seguir padeciendo desnutrición crónica, a lo que se añadiría el sufrimiento causado por las situaciones periódicas de escasez aguda de alimentos (FAO, 2010). La necesidad de aumentar la producción de alimentos para atender a las necesidades crecientes de la población acrecentará enormemente la presión ejercida sobre todos los recursos naturales, entre ellos los de tierras bajo riego.

El riego es importante para la producción de alimentos mundial, se utiliza en aproximadamente el 15% de las tierras cultivadas del mundo (FAO, 2008), cuya producción representa más del 30% de los alimentos, que es 2 1/2 veces más por unidad de superficie en comparación con la producción de secano (MacKenzie, 2008). La erosión del suelo puede ser un problema grave en las tierras de regadío. Los surcos irrigados por aspersion en los campos agrícolas pueden ser considerados como riachuelos sometidos a la acción de la lluvia (Laflen et al., 1991). El riachuelo es la principal fuente de sedimentos y el mecanismo para el transporte de los mismos en los procesos de erosión en ladera (Lei et al., 1998; Yan et al., 2008). La erosión en riachuelos es el desprendimiento debido a la

fricción y transporte de los sedimentos por un flujo concentrado de agua en un canal erosionable angosto (Bagnold, 1966; Laflen et al., 1991).

En las últimas tres décadas, el creciente interés sobre la erosión en riachuelos se refleja en los numerosos intentos por incorporarla dentro de los modelos de erosión basados en procesos físicos. Si un modelo se construye usando la ecuación de conservación de la masa de los sedimentos, se denomina modelo de erosión y transporte de sedimentos basado en procesos físicos (Jetten et al., 2003; Aksoy y Kavvas, 2005; Bulygina et al., 2006). Algunos de los modelos que representan la erosión son: CREAMS (Knisel, 1980), WEPP (Nearing et al., 1989), EUROSEM (Morgan et al., 1998), SHESED (Wicks et al., 1996), DWEPP (Bulygina et al., 2006) MOVFO2D (Rivera et al., 2004). Los dos primeros modelos representan la erosión mediante una solución de la ecuación para el estado estable y el resto en el estado inestable. Generalmente se asume que los procesos de erosión en surcos irrigados son similares a los que ocurren en riachuelos bajo la lluvia sin embargo, según (Trout y Neibling, 1993; Bjorneberg et al., 1999; Trout, 1999), entre las principales diferencias se encuentran que, los primeros ocurren en tasas de bajas a moderadas durante varios eventos de riego mediante la aplicación de agua en forma controlada, mientras que los segundos ocurren durante unos pocos eventos altamente erosivos, respectivamente. La mayoría de los surcos irrigados tienen pendientes menores que 3%, mientras que la investigación de la erosión en riachuelos se ha llevado a cabo sobre pendientes que superan el 3%. Sin embargo, a pesar de la entrada controlada del flujo y las pendientes relativamente bajas, en los campos agrícolas con suelos altamente erosionables, existe un daño por erosión significativo causado por la irrigación de los surcos (Koluvec et al., 1993).

En América Latina se han realizado evaluaciones de los resultados de los modelos de erosión basados en procesos físicos. EUROSEM ha sido probado en México, Nicaragua, Costa Rica y Bolivia, obteniendo un desempeño moderadamente satisfactorio en la simulación de los eventos de lluvia, en

términos de los hidrogramas y sedimentogramas (Quinton y Rodríguez, 1999; Veihe et al., 2001). Una gran cantidad de estudios se han realizado para validar los procesos de la erosión y escorrentía mediante el modelo WEPP a nivel mundial: Austria (Klik et al., 1995; Savabi et al, 1996); Brasil (Ranieri et al., 1999); Italia (Santoro et al., 2002); USA (Savabi et al 1996; Laflen y et al., 2004; Zhang et al., 1996); Ucrania (Nearing et al., 1998); Etiopia (Zeleeke, 1999).

En Venezuela sólo recientemente se han acometido estudios detallados sobre procesos de erosión y sedimentación en cuencas. La investigación de la erosión hídrica en campos agrícolas de la región central mediante la aplicación de índices, ha mostrado que existe un riesgo moderado a alto de erosión asociado a un alto índice de productividad (Lobo et al., 2005). Estudios sobre los factores que causan la erosión y los procesos que intervienen son muy escasos, restringiendo la adaptación o modificación de técnicas usadas en otras partes para estimar las tasas de erosión. Aunque investigadores de diversos países han estudiado la erosión en canales aproximados a los surcos agrícolas, experimentalmente en el campo y en el laboratorio, para una gran variedad de tipos de suelo y condiciones superficiales, existe una carencia de estudios de campo sobre la calibración y la validación de los procesos de erosión en surcos irrigados a escala real. Esta investigación se ha centrado en la modelación de la erosión y el transporte de sedimentos en surcos irrigados en parcelas ubicadas en un campo agrícola sobre la cuenca del río Chirgua, una de las principales que aporta sus aguas al embalse Pao-Cachinhe en Venezuela. En el presente documento se presentan los resultados de dichas investigaciones estructurado en cinco capítulos.

En el Capítulo I se describe el problema, se establecen los objetivos y justifica la investigación.

El Capítulo II está constituido por los antecedentes y bases teóricas de los modelos matemáticos que estiman la erosión de suelos y el transporte de sedimentos durante eventos de tormentas. En cuanto a los modelos de erosión, se incluyen tres tipos que se basan en: procesos físicos, regresiones estadísticas y técnicas de inteligencia artificial. Con respecto a los modelos de transporte de

sedimentos se emplean los basados en propiedades mecánicas de los suelos. En ambos casos, se incluye una nueva propuesta.

En el Capítulo III se presenta la metodología correspondiente al desarrollo de una investigación no experimental. La escala de la estimación corresponde a los niveles meso y micro. Se describen las siguientes fases: selección del área experimental, recolección de datos existentes y evaluación de estudios previos de la cuenca experimental, implementación del área piloto, instalación de la red de monitoreo, desarrollo de un programa de observación y monitoreo en sitio para la medición de las lluvias, caudal, erosión, sedimentación, propiedades del suelo y fisiográficas de la región, evaluación de la aplicabilidad de los modelos existentes de erosión y transporte de sedimentos al área experimental, procesamiento e interpretación de los datos colectados en la primera etapa y desarrollo de un modelo para una cuenca del embalse Pao-Cachinche.

El Capítulo IV contiene los resultados de los objetivos que conducen a la modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos, los cuales involucran: caracterización de las variables de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos, calibración de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos, validación de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos y la generalización del uso de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca experimental.

El capítulo V incluye las conclusiones y recomendaciones de los resultados de la investigación.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

La degradación de los suelos constituye uno de los mayores problemas que confronta la agricultura alrededor del mundo. Aspectos como deforestación, cultivos intensivos en suelos vulnerables, sobre pastoreo y pobre o mal manejo del suelo y del agua, reducen la capacidad productiva del suelo creando serias restricciones para la producción de alimentos. Científicos y planificadores concuerdan en que una agricultura sana sólo puede sustentarse sobre la base de recursos naturales estables, por lo que resaltan la importancia de mantener y mejorar la productividad del recurso suelo y hacen un llamado para invertir más esfuerzos en la reducción de la erosión y degradación del suelo.

En la mayoría de las áreas agrícolas del mundo ocurre erosión severa de los suelos. Las tasas de pérdidas de suelo en Europa varían entre 10 y 20 t/ha-año; en USA la erosión promedio en las tierras agrícolas es de 16 t/ha-año; en Asia, África y América del Sur las pérdidas de suelo varían entre 20 y 40 t/ha-año (Pimentel, 1993; Guevara, 2004).

Aunque muchos expertos opinan que la expansión de la producción agrícola se efectuará sobre suelos cultivados actualmente, es obvio que las tierras marginales, ya sean planas o en laderas están adquiriendo gran importancia en muchos países en desarrollo, donde la población crece rápidamente y las tierras arables escasean cada vez más. Como resultado de la baja calidad de los suelos y condiciones climáticas desfavorables, un mal uso de esas tierras puede resultar en una degradación seria. Al respecto, en el Capítulo 14 “Fomento de la agricultura y el desarrollo rural sostenibles” del Programa 21, aprobado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Rio de Janeiro, 3 al 14 de junio de 1992), se señala que *“para el año 2025, el 83% de la población mundial, que según se prevé será de unos 8.500 millones de personas, vivirá en países en desarrollo. La capacidad de recursos y tecnologías disponibles para satisfacer las demandas de alimentos y otros productos básicos agrícolas de esta población en constante crecimiento sigue siendo incierta. Ahora bien, la agricultura tendrá que hacer frente a este reto, sobre todo mediante el aumento de la producción en las tierras que ya se están utilizando, y evitando asimismo el aprovechamiento aun más intenso de tierras que solo son marginalmente aptas para el cultivo”*.

Históricamente la mayoría de los recursos naturales de una región han sido considerados como de propiedad comunitaria y proporcionaban los requerimientos para el sustento de las personas que vivían en la región. Ese concepto ha cambiado debido a que los recursos ya no son abundantes, la población ha crecido y los ecosistemas ya no disponen de suficiente tiempo para recuperarse en forma natural. Ahora la continua dependencia de un gran número de individuos de un recurso natural finito resulta en la degradación del recurso y en la pérdida de su capacidad productiva. Adicionalmente son de considerar políticas de desarrollo mal orientadas y otras que discriminan a los agricultores desprovistos de capacidad productiva y de incentivos que les permita adoptar prácticas de conservación adecuadas.

En los países en desarrollo el elevado precio de los productos induce a los agricultores a utilizar las mejores tierras para cultivos cuyo producto pueda ser vendido, frecuentemente, cultivos industriales, relegando los cultivos alimenticios a las tierras marginales, incrementando así la degradación. Por otro lado, precios bajos de los productos agrícolas a nivel de productor, creados artificialmente por cadenas monopólicas de los intermediarios desmotivan la inversión en la conservación del suelo y agua y el uso de componentes que promuevan cosechas altas y sostenibles. En muchos países se encuentra que el aseguramiento de los derechos de tenencia incentiva las inversiones en el mantenimiento y conservación de la propiedad.

La degradación de los suelos es un proceso en el que, factores físicos, químicos y biológicos contribuyen al deterioro de la capacidad productiva. Los tipos y formas de degradación varían con las regiones. En Venezuela, por ejemplo, la principal forma de degradación la constituye la erosión hídrica, especialmente en áreas deforestadas para cultivos y asentamientos, potreros para ganados y otros usos (Guevara, 2000). La degradación de los suelos y la pérdida de la fertilidad son ocasionadas por la erosión; por otra parte, la sedimentación ocasiona la contaminación de los cuerpos de agua y conduce al relleno de los cauces y canales y a la sedimentación de los embalses. En términos de volumen, los sedimentos constituyen la primera fuente de contaminación por lo que para establecer las medidas de control se requiere un conocimiento profundo del fenómeno. En Venezuela, la sedimentación ha ocasionado una reducción de más del 50% de la vida útil en una gran parte de los embalses; algunos de ellos han quedado inutilizados. (Guevara, 2004)

La cuenca del embalse Pao Cachinche, es la principal fuente de abastecimiento para más de cuatro millones de habitantes de la Región Central de Venezuela. Los aportes del embalse al acueducto regional del centro son alrededor de 6 y 9 m³/s (Guevara, 1994); sin embargo, la cuenca que alimenta a estos embalses sufre de los mismos problemas de erosión y sedimentación que las otras del país.

En Venezuela sólo recientemente se han acometido estudios detallados sobre conservación de cuencas. Tradicionalmente las estimaciones de la producción de sedimentos se efectúan sobre la base de mediciones de concentración de sedimentos medidas en las estaciones hidrométricas; y a través de análisis de regresión se extrapolan a cuencas carentes de información. Estudios sobre los factores que causan el fenómeno son muy escasos, restringiendo la adaptación o modificación de técnicas usadas en otras partes para estimar las tasas de erosión.

Por lo expuesto, es evidente la necesidad de acometer investigaciones sobre los procesos de erosión y sedimentación a nivel de parcelas, ese el objetivo de la presente investigación, cuyos resultados se ha enfocado en el empleo de diversas técnicas de modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos dentro de eventos de riego y lluvia en un campo agrícola ubicado en una cuenca del embalse Pao-Cachinche.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Modelar la erosión hídrica y el transporte de sedimentos en una cuenca del embalse Pao-Cachinche.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la concepción general de los modelos de erosión y transporte de sedimentos

2. Caracterizar las variables de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos
3. Calibrar los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos
4. Validar los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos
5. Generalizar el uso de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca experimental
6. Establecer lineamientos sobre el Plan de Manejo de la Cuenca, utilizando el Modelo de Erosión de la Cuenca

1.3 Justificación

A pesar de la importancia de la agricultura de regadío para los alimentos y suministros mundiales de fibra, y su rol en la conservación de otros ecosistemas amenazados naturales, la erosión inducida por riego, ha recibido muy poca atención en la comunidad de la investigación de la erosión (Larson et al., 1990). El progreso hacia la formación de los conservacionistas y los científicos, así como la conciencia colectiva sobre el tema ha sido lento (Carter, 1990; Carter, 1993; Carter et al, 1993;.Koluvek et al, 1993., Trout y Neibling, 1993).

La prevención de la erosión en tierras de regadío es, sin duda, más importante que en las tierras de secano. Los rendimientos de las tierras de regadío son más del doble de los de secano, con casi el triple del valor de la cosecha por hectárea (Carter, 1985).

Actualmente se dispone de técnicas para incrementar la producción y conservar los recursos hídricos y de tierras agrícolas, pero ellas no se suelen aplicar en forma amplia ni sistemática. Se requiere un enfoque sistemático que permita determinar cuáles usos de la tierra y cuáles sistemas de producción resultan sostenibles en cada suelo y en cada zona climática, y que incluya los mecanismos económicos, sociales e institucionales necesarios para su aplicación. Uno de los enfoques sistemáticos para

alcanzar metas de desarrollo sustentable se vincula con la gestión integrada de cuencas, la cual sólo es posible si se conoce detalladamente los procesos que se llevan a cabo en las cuencas y que afectan la gestión. Parte de esos procesos son los de erosión y sedimentación, por lo que se justifican plenamente los esfuerzos investigativos se vayan a llevar a cabo sobre tales aspectos.

1.4 Alcances y Limitaciones

La investigación se ha llevado a cabo en un sentido general sometido a las siguientes limitaciones:

1. Debido al elevado costo de los trabajos de campo, sólo se han recolectado datos durante dos años. Sin embargo, se considera que ese período de monitoreo de datos es suficiente para lograr los objetivos de la investigación.
2. Falta de presupuesto para cumplir con el equipamiento del laboratorio, donde se han llevado a cabo los análisis de suelos y aguas.
3. Escasas fuentes de financiamiento para la adquisición e instalación de una red de estaciones meteorológicas, por lo que sólo se logró reactivar la estación antigua que operó hasta 1980, mediante la instalación de un equipo de tecnología reciente para almacenamiento de datos en una unidad electrónica.
4. Dificultades para la logística en los traslados de los co-investigadores a la zona de estudio con fines de realizar las pruebas de campo.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene los antecedentes de la investigación y las bases teóricas de los modelos que estiman los procesos de erosión y transporte de sedimentos en tierras agrícolas. En los antecedentes se describen los estudios previos en la zona experimental para recabar la información básica requerida a fin de cumplir con los propósitos de esta investigación. Estos estudios fueron realizados con el apoyo logístico y coordinación general del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) y han conducido a trabajos de grado realizados por co-investigadores adscritos a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo; seguidamente se presentan resúmenes de los trabajos publicados en revistas internacionales en una extensión tal que permita comprender el alcance de los estudios en modelación de procesos de erosión. Luego se describen las bases teóricas; las cuales incluyen: aspectos conceptuales de erosión y sedimentación, modelos de estimación clasificados bajo diferentes modalidades: tipos de erosión, empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos. Finalmente, se detallan los procedimientos estadísticos para determinar la calidad de ajuste de los modelos.

2.1 Antecedentes

Como apoyo a la investigación se llevaron a cabo estudios preliminares de campo, contando con la colaboración de graduandos de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo. A continuación se presenta extractos que incluyen los

aspectos más importantes encontrados con respecto a las pruebas de campo realizadas y el ajuste de los modelos de procesos físicos a los valores observados en campo.

Zamora y Toro (2008), Archila y Hernández (2009), Córdova y Jiménez (2009), Chacón et al. (2009), Da Graca y Saturno (2009), Manrique et al. (2009), Morillo y Morey (2009), Morillo (2009), Quintero y Altamiranda (2009); Silva y Sifontes (2009), Muñoz (2009), López y De Ornelas, 2009; Sánchez y Sortino (2009); Trejo et al. (2009), Velásquez (2010), Bárcenas y Angola (2010), Vivas et al. (2010), calibraron nueve modelos de infiltración: cuatro con base física, dos semi-empíricos y tres empíricos. Los modelos físicos incluyen los propuestos por: Green-Ampt (1911), Philip (1957, 1969), Smith-Parlange Lineal (1978) y Smith-Parlange No Lineal (1978). Los semi-empíricos corresponden a los propuestos por Horton (1938) y Holtan (1961). Los empíricos incluyen los propuestos por Kostiakov (1932), Kostiakov modificado (Smith, 1972) y Mishra-Singh (2002). La tasa de infiltración varió desde 2400 mm/h hasta 20 mm/h, cuyos valores fueron medidos durante las estaciones seca y lluviosa en la cuenca del río Chirgua en el período desde 2008 hasta 2010. Los modelos que incluyen la variable tiempo, propuestos por Philip, Mishra-Singh, Kostiakov y Horton, arrojaron un ajuste satisfactorio en términos del coeficiente de determinación ya que R^2 fue mayor a 0.6.

Araujo et al. (2008), Álvarez et al. (2008), Diluigi et al. (2009), Betancourt y Rendón (2008), Delgado et al. (2009), Silva et al. (2008), Castro et al. (2008), Basna et al. (2008), calibraron tres modelos de erosión: uno con base física y dos empíricos. El modelo físico abarca los componentes de desprendimiento de partículas sólidas, transporte de sedimentos y deposición que conforman el modelo WEPP (Flanagan et al, 2001). Los modelos empíricos fueron los propuestos por Kilinc (1972) y modificaciones de la USLE (Williams, 1978; Williams y Brendt, 1972). Las mediciones se realizaron durante la estación seca y lluviosa en la cuenca del río Chirgua en el lapso desde 2008 hasta 2009. Los surcos midieron entre 100 y 200 m de longitud, con pendientes entre 0.8 y 13%, el ancho varió entre 0.3 y 0.35 m. El caudal de riego varió entre 0.3 y 0.4 L/s, la concentración de los sedimentos en la esorrentía varió entre 6200 mg/L y 100

mg/L. Se encontró ajuste satisfactorio de los modelos a los datos observados en términos del coeficiente de determinación ya que R^2 fue mayor a 0.6.

Linares et al. (2008), López et al. (2008), Lugo et al. (2008), Santana et al. (2009), Hernández y Griffin (2009), Niño y Páez (2010), Santana (2009), calibraron los modelos basados en la teoría del esfuerzo cortante excedente propuestos por Duboys (1879) y modificaciones, Meyer-Peter-Muller (1948), y Einstein-Brown (1950) empleados para estimar el transporte de sedimentos en ríos, evaluando su adaptación al flujo en canales de tierras agrícolas. Las mediciones se realizaron durante las estaciones seca y lluviosa en la cuenca del río Chirgua durante dos años (2008-2009). El caudal de aplicación del riego varió entre 0.3 y 0.4 L/s, la pendiente varió entre 0.8 y 13%, el esfuerzo cortante del flujo varió entre 0 y 16 Pa. Se encontró que un ajuste de los modelos a los datos observados moderadamente satisfactorio, con base en un coeficiente de determinación R^2 que varió entre 0.3 y 0.70. Las modificaciones de la ecuación de Duboys dieron como resultado un incremento en el R^2 entre 0.7 y 0.98.

Benavides et al. (2009), Cayama et al. (2009), Mata y Araujo (2009), Gaeta y Guevara (2009), Figueredo y Rosillo (2009), Ferrari y Martin (2009), Leañez (2010), realizaron una caracterización físicas del suelo en la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela durante dos años (2008-2009), captaron muestras en estratos desde 0 hasta 30 cm y desde 30 hasta 60 cm. Se encontró que el suelo es de grano fino, con predominio de limos orgánicos de baja plasticidad (OL), y en menor proporción arenas o arcillas limosas de baja plasticidad (CL). La permeabilidad resultó mediana a baja. El contenido de humedad inicial varió entre 10 y 25% fue menor al límite líquido (30%) y plástico del suelo (28%). La cohesión fue baja y el ángulo de fricción (ϕ) alrededor de 24° y 39°.

Pérez et al. (2000), compararon mediciones de pérdida de suelo con estimaciones derivadas de aplicaciones de la USLE (Universal Soil Loss Equation), evaluando la eficiencia de la protección ejercida por la cobertura de dos cultivos de la región andina: papa (*Solanum tuberosum* L., var. granola) y pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*

Hochst ex Chiov). En términos generales, los experimentos con parcelas de erosión mostraron que la protección ejercida por la cobertura vegetal depende del tipo de cultivo, incrementando la eficiencia de la protección a medida que se desarrolla el ciclo.

Lobo, et al. (2005) evaluaron el riesgo por erosión hídrica y el impacto sobre la productividad de un suelo de los llanos centrales de Venezuela. El estudio se llevó a cabo sobre un suelo Haplustalfs cultivado con sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench). Seleccionaron cuatro ubicaciones diferentes con el mismo tipo de suelo, con pendientes que variaron desde 3% hasta 6%. Encontraron que en los suelos ligeramente erosionados es posible realizar una agricultura intensiva, en los suelos moderadamente erosionados recomiendan aplicar una agricultura semi-intensiva y en los severamente erosionados se recomienda agroforestería o cultivos especiales.

Guillen y Silva, (2005) determinaron las prioridades de atención conservacionista según los riesgos de erosión potencial y actual en la cuenca media del río Pao, estimaron la erosión empleando el modelo USLE, encontraron que la prioridad conservacionista varió desde alta hasta más alta en las cuencas de los ríos Mucaria y Pacaragua, moderadamente alta en las cuencas de los ríos Caimancito, Caimán grande, Pao, así como desde ligera hasta moderada en las cuencas de los ríos Araguaita, Prepo, El Palmar y Gamelotal.

Bulygina et al. (2006) desarrollaron un modelo dinámico basado en procesos físicos para la estimación de la erosión hídrica denominado Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica Dinámico (DWEPP, por sus siglas en inglés) durante eventos de tormentas de lluvia aplicable en laderas y pequeñas a medianas cuencas, el cual describe los procesos de desprendimiento, transporte y deposición de las partículas del suelo debido a fuerzas mecánicas e hidrológicas que actúan sobre el suelo, cuyo fundamento se basa en los procesos de infiltración, escorrentía superficial, crecimiento vegetal, descomposición de residuos, hidráulica, labranza, manejo y mecánica de la erosión y consolidación del suelo. Los modelos propuestos para la estimación de los procesos físicos han sido calibrados, validados y probados en este trabajo.

Mishra et al. (2003), calibraron catorce modelos de infiltración, cuatro con base física, dos semi-empíricos y ocho empíricos. Se realizaron un total de 243 pruebas de infiltración entre la India y los E.E.U.U., en suelos que variaban desde una arena gruesa hasta una arcilla fina. Basado en la clasificación indicada, los modelos se presentan en el orden decreciente de su desempeño como: modelo de Singh-Yu, modelo Holtan, modelo Huggins-Monke, modelo de Smith-Parlange (no lineal), modelo de Horton, modelo modificado de Kostiaikov, el modelo de Smith-Parlange (lineal), modelo Kostiaikov, modelo de Mishra-Singh, modelo de Collis-George, modelo de Overton, el modelo de Green-Ampt, modelo de Smith, y el modelo de Philip. El modelo semi-empírico de Singh-Yu supera al resto de los modelos en el desempeño, ya que fue calificado con 6.52, mientras que los demás modelos obtuvieron una puntuación menor a 5.57 (como por ejemplo, los modelos de Holtan, Huggins-Monke y Philip). La mayor parte de los modelos propuestos para la estimación del proceso de infiltración han sido calibrados, validados y probados en este trabajo.

2.2 Bases Teóricas

En esta sección se discuten los aspectos conceptuales sobre la erosión y sedimentación incluyendo: definiciones, impactos, factores que la originan, y clasificación; posteriormente se describen los modelos mediante los cuales se estiman estos procesos hidrológicos.

2.2.1 Erosión

Etimológicamente la palabra erosión proviene del latín *erodere* que significa roer, *desprender o degradar*. En términos generales, erosión significa la remoción física del suelo por la acción de varios agentes, tales como impacto de la caída de las gotas de lluvia, energía del flujo superficial y subterráneo, velocidad del viento y fuerza de la gravedad. De acuerdo con la Sociedad Americana de Conservación de Suelos (SCSA, 1982) la erosión se define como la denudación de la superficie debido a la acción del agua, viento, hielo, nieve y otros agentes geológicos, incluyendo los procesos de

deslizamiento masivo. La denudación del suelo por agua incluye la remoción del material soluble e insoluble. El proceso físico de erosión incluye el desprendimiento y transporte de partículas insolubles, tales como arena, limo arcilla y materia orgánica. El transporte puede ser lateral, sobre la superficie o vertical en el perfil del suelo a través de los espacios porosos y grietas.

2.2.2 Sedimentación

La masa de suelo removida de un lugar es frecuentemente depositada en otro cuando la energía del agente de transporte disminuye o desaparece. El término *sedimento* se refiere al material sólido desprendido de la masa del suelo por los agentes erosivos y transportado de su sitio de origen, en suspensión por el agua, el aire, o arrastrado por gravedad. El término *sedimentación* se refiere a la deposición del sedimento cuando la energía del agente erosivo no es suficiente para seguir transportándolo.

El concepto de erosión y sedimentación por el agua comprende los procesos de desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos causados por los agentes erosivos y de transporte, tales como impacto de lluvia y de la escorrentía superficial sobre la superficie del terreno.

2.2.3 Impacto de la Erosión y Sedimentación

Tanto la erosión como la sedimentación ocasionan efectos ambientales y económicos en el sitio donde ocurre la pérdida de suelo. La erosión reduce la productividad del suelo al reducir la profundidad del perfil arable y consumir las reservas de agua y nutrientes. La sedimentación disminuye indirectamente la productividad a través de los efectos aguas abajo al disminuir la capacidad de almacenamiento de los embalses y colmatar los canales de riego. Los impactos de tipo ambiental son difíciles de detectar ya que se manifiestan a largo plazo; los impactos económicos son difíciles de cuantificar. A continuación se presenta una relación de ambos tipos de impactos:

2.2.3.1 Impactos Ambientales. Entre los principales se encuentran los siguientes:

- 1) Transporte de elementos contenidos en el sedimento, como N, P y otros nutrientes propiciando el desarrollo de algas y otras especies acuáticas que reducen el grado de claridad del agua y consumen el oxígeno, creando malos olores y eliminando la fauna acuática.
- 2) La erosión de bancos y planicies de inundación destruye la vegetación afectando la fauna silvestre de esas áreas.
- 3) La deposición excesiva en los cauces afecta a la fauna acuática.
- 4) La turbidez originada por la concentración de sedimentos reduce la actividad fotosintética dentro del cauce reduciendo el suministro de alimento para la vida acuática.
- 5) Los sedimentos suspendidos cubren a los organismos acuáticos limitando su normal desarrollo.
- 6) La erosión remueve los constituyentes más finos y menos densos del suelo arable (arcilla y limo) y con ellos los nutrientes, dejando detrás un suelo más duro, rocoso, infértil y seco.

2.2.3.2 Impactos Económicos. Entre los principales se encuentran los siguientes:

- 1) Reducción de la capacidad de almacenamiento de los embalses, con la consiguiente inversión en la remoción del material o construcción de nuevas obras que cumplan la función de las sedimentadas.
- 2) La erosión disminuye severamente la habilidad del suelo para soportar a las plantas, cuya restauración requiere de inversiones elevadas en fertilizantes y otras medidas.
- 3) Hay otros impactos de la erosión y sedimentación, tal como la pérdida de la vegetación, inundaciones y pérdida de la calidad del agua.

2.2.4 Factores que Afectan a la Erosión

Los factores más importantes que afectan a la erosión son el clima, el suelo, la vegetación, la topografía y el hombre. A continuación se discute cada uno de ellos:

2.2.4.1 Clima. El efecto del clima es la erosividad, es decir su grado de agresividad sobre el suelo. Los factores que determinan la erosividad son la precipitación, la velocidad del viento, el balance hídrico, la escorrentía y la temperatura.

2.2.4.2 Suelo. El efecto del suelo es su grado de erosionabilidad, es decir la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. La erosionabilidad es una propiedad inherente al suelo y es influida por sus características, tal como textura, estructura, permeabilidad, contenido de materia orgánica, contenido de minerales de arcilla y de óxidos de Fe y Al.

2.2.4.3 Topografía. Existen varias características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión; entre ellas se encuentran, el grado de inclinación, longitud y forma de la pendiente.

2.2.4.4 Vegetación. La vegetación normalmente ejerce los siguientes efectos positivos en la reducción de la erosión:

- 1) A través de la intercepción reduce el impacto de caída de las gotas de lluvia, el sellado de la superficie y la escorrentía.
- 2) Disminuye la velocidad del flujo superficial y por lo tanto la erosión.
- 3) A través del sistema radicular favorece la resistencia del perfil del suelo en contra de movimientos masivos.
- 4) Favorece las características de agregación del suelo y mejora la porosidad por efecto de los canalículos que forman las raíces y los residuos vegetales.
- 5) Incrementa la actividad biológica del suelo favoreciendo la infiltración y disminuyendo el potencial de escorrentía.
- 6) Incrementa la evapotranspiración disminuyendo la escorrentía.

2.2.4.5 Hombre. Las actividades antropogénicas juegan el papel más importante entre las causas que ocasionan la erosión del suelo, las cuales se manifiestan a través del uso y abuso (mal uso) de los recursos naturales. Las actividades humanas relacionadas con la erosión, incluyen a la agricultura, pastoreo, minería, silvicultura, recreación, navegación, urbanismo, vialidad, etc.

2.2.5 Tipos de Erosión

La erosión puede clasificarse de acuerdo con los agentes que la ocasionan. Los principales agentes erosivos son los flujos (agua y aire) y la fuerza de gravedad. En las tierras arables de las zonas tropicales la erosión es causada por el viento, la lluvia y la escorrentía. En áreas elevadas y de gran latitud, el hielo y la nieve constituyen agentes importantes de erosión; existen también procesos glaciares que causan erosión. La fuerza gravitacional juega un papel importante en las zonas de pendientes pronunciadas. (Guevara, 2000; Lal, 1990)

Sin la intervención del hombre, la erosión es un proceso natural inevitable, denominado *erosión geológica*, que no necesariamente posee efectos adversos sobre el medio ambiente, sino más bien es necesaria para la formación del suelo a lo largo del tiempo hidrológico. Este proceso lento de denudación de montañas y formación de planicies y valles se denomina *intemperismo* (SCSA, 1982). La erosión geológica se convierte en un grave problema cuando es acelerado por la intervención del hombre, ocasionando tasas de erosión mayores que el nivel máximo permitido para mantener el balance entre la formación del suelo y la pérdida del mismo, y se conoce como *erosión acelerada*.

De acuerdo con lo expuesto, la erosión se clasifica por el agente erosivo en: eólica ocasionada por el viento, por salpicadura causada por la lluvia, laminar causada por la escorrentía, por surcos, cárcavas y de bancos ocasionada por el flujo en canales, por túnel o conducto causada por el flujo subsuperficial, de costas causada por los océanos, glacial ocasionada por los glaciares, por nieve ocasionada por la nieve, por deslizamientos, caídas de material y flujo de agregados secos ocasionada por un movimiento en masa. (Guevara, 1997; 2000)

2.2.5.1 Erosión por Salpicadura. La erosión por salpicadura o intersurcos es causada por el impacto de las gotas de lluvia que caen directamente sobre las partículas de suelo y consiste en el desgarramiento y transporte de dichas partículas. La energía de la caída de lluvia se da en función de la intensidad como sigue:

$$E = 0.119 + 0.873 \log I \quad (1)$$

Donde E es la energía cinética de la lluvia en MJ/ha-mm; I es la intensidad de la precipitación en mm/h.

2.2.5.2 Erosión Laminar. La erosión laminar es la remoción de una capa delgada y uniforme de partículas de suelo. Los estudios realizados sobre el mecanismo de la erosión con técnicas fotográficas indican que ese proceso idealizado sólo ocurre raramente. De acuerdo con Watson y Laflen (1986), la tasa de pérdida de suelo por erosión laminar se puede estimar como sigue:

$$D_i = k_i I^2 S_f \quad (2)$$

Donde D_i es la tasa de erosión laminar en Kg/m²-s, k_i es el grado de erosionabilidad del suelo en las áreas entre los surcos en Kg-s/m⁴, I es la intensidad de la precipitación en m/s, S_f es el factor de pendiente.

2.2.5.3 Erosión por Surcos. La erosión por surcos se inicia cuando la escorrentía se concentra en las pequeñas depresiones superficiales. A medida que el flujo cambia de laminar a más profundo y turbulento, se incrementa la velocidad creando una energía que es capaz de desprender y transportar el suelo. Así pues, la erosión por surcos, viene a ser el desprendimiento y transporte del suelo debido al efecto del flujo concentrado. La tasa de desprendimiento de suelo en el surco D_r es la tasa de erosión que ocurre en el área hidráulica mojada del surco y se estima como sigue:

$$D_r = k_r (\tau - \tau_c) (1 - Q_s/T_c) \quad (3)$$

Donde la tasa de desprendimiento se da en Kg/m²-s; la erosionabilidad del suelo en s/m, los esfuerzos en Pa, siendo Q_s la tasa de sedimentos que entrega el surco en Kg/m-s y T_c la capacidad de transporte de sedimentos del surco en Kg-/m-s. Esta ecuación se

discute más adelante, ya que constituye uno de los componentes de los modelos basados en procesos físicos.

2.2.5.4 Erosión por Cárcavas. Los surcos se transforman en cárcavas cuando no pueden ser eliminados por la labranza normal. La tubificación o erosión en túnel es ocasionada por un flujo de agua subsuperficial rápido. Beer y Johnson (1963) desarrollaron la siguiente ecuación para determinar la tasa de crecimiento de una cárcava en suelos calcáreos de Iowa occidental:

$$G = 81.41 R^{0.0982} A^{-0.044} L^{0.7954} D^{-0.2473} e^{-0.014P} \quad (4)$$

Donde G es el crecimiento superficial de la cárcava en m²; R es el índice de escorrentía superficial en mm; A es el área terraceada de la cuenca en m²; L es la longitud inicial de la cárcava en m; D es la distancia desde la cabecera de la cárcava hasta la divisoria de aguas de la cuenca en m; e es la base de los logaritmos neperianos y P es la desviación de la magnitud de la precipitación con respecto al valor normal, es decir, al promedio de 30 años.

2.2.5.5 Erosión en Cauces y Costera. La erosión en cauces y la erosión costera son ocasionadas, respectivamente, por el flujo de la corriente y el oleaje oceánico. El movimiento del suelo en masa es causado por la gravedad (Lal, 2001).

2.2.6 Modelación de la Erosión del Suelo

Es el proceso que describe matemáticamente el desprendimiento de partículas de suelo, transporte y deposición sobre la superficie del terreno. Existen al menos tres razones para modelar erosión:

- 1) Los modelos de erosión pueden emplearse como herramientas de estimación para evaluar la pérdida de suelo y planificar proyecto de conservación, inventarios de erosión y para regulación.

2) Mediante los modelos matemáticos basados en procesos físicos se puede predecir dónde y cuándo está ocurriendo la erosión, de ese modo representan una contribución a los propósitos de los planificadores de conservación en sus esfuerzos por reducir la erosión.

3) Los modelos se pueden usar como herramientas para entendimiento de los procesos de erosión y sus interacciones y para asignar prioridades en la investigación.

Mecanismo de la Erosión Hídrica

La erosión incluye el desprendimiento, transporte, y deposición de partículas de suelo debido a la fuerza erosivas de las gotas de lluvia y el flujo superficial del agua. Es común en los modelos de erosión separar, conceptualmente, los procesos de erosión de laderas en los relacionados a los mecanismos de flujo en surcos y mecanismos del flujo intersurcos. Dentro de este marco del flujo en surco, podría actuar el desprendimiento de las partículas de suelo siempre que el esfuerzo cortante hidráulico en el surco sea suficiente para sobrepasar las fuerzas de enlace entre partículas individuales en la masa de suelo. El flujo en el surco también actúa como agente de transporte para trasladar el suelo desprendido (sedimentos), desde el surco y áreas entre surcos. El desprendimiento en las áreas intersurcos es inducido principalmente por el impacto de las gotas de lluvia, ya que las profundidades de flujo de las áreas intersurcos son despreciables para la potencia erosiva. El transporte sobre las áreas intersurcos es principalmente por flujo superficial laminar. La energía requerida para el movimiento es mucho menor que la que se requiere para desprender partículas de suelo in-situ. El transporte neto por salpicadura de la gota de lluvia es muy pequeño, con sólo un movimiento descendente neto pequeño debido al efecto de pendiente (Lal, 1994).

La mayoría de los modelos de erosión dependen del concepto de *capacidad de transporte*, el cual se define como la máxima cantidad de sedimento que un flujo puede transportar sin que ocurra deposición neta. Diversas ecuaciones de capacidad de transporte han sido desarrolladas para el transporte de sedimentos en canales grandes y *adaptadas* para el uso en modelos de erosión superficial. La elección de la “mejor” ecuación de transporte de sedimentos es subjetiva con respecto a la ecuación más

apropiada a utilizar. En lugar de cuál ecuación utilizar, un aspecto más importante en la modelación fundamental del proceso de erosión es lo que la capacidad de transporte significa y cómo se utiliza en el modelo. La capacidad de transporte es básicamente un equilibrio entre la tasa de entrada y deposición de los sedimentos en el flujo. La descripción de los procesos de entrada no incluye un factor para las fuerzas cohesivas del suelo, sino que considera sólo las fuerzas de gravedad de los sedimentos las cuales deben ser sobrepasadas para las partículas que se levantan dentro del flujo. La suposición implícita, para la erosión de suelos cohesivos es que las fuerzas cohesivas son despreciables una vez que el suelo ha sido inicialmente desprendido desde la masa de suelo in-situ.

Otra suposición implícita cuando se utilizan ecuaciones de transporte de sedimentos para describir erosión es que la deposición es un proceso continuo. Cuando se refiere a “*desprendimiento*” al describir la pérdida de suelo significa el proceso de remoción de las partículas de suelo in situ de la masa de suelo a granel. El término “*desprendimiento neto*” se refiere al balance entre el desprendimiento, entrada de partículas previamente desprendidas, y deposición desde la superficie del suelo dentro del flujo. Algunos modelos recientes de erosión han evitado el uso explícito de ecuaciones de transporte de sedimentos por completo.

2.2.7 Tipos de Modelos de Erosión

Existen básicamente tres tipos de modelos de erosión: empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos. Los modelos empíricos se basan principalmente en observaciones y son generalmente estadísticos en su naturaleza. Los modelos empíricos incluyen la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE; por sus siglas en inglés) (Wishmeier y Smith, 1958), y sus posteriores desarrollos Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos Revisada (RUSLE) y la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos Modificada (MUSLE) (Renard et al., 1997a, 1997b). En cuanto a los modelos basados en procesos físicos, algunos ejemplos de este tipo están representados por WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Flanagan et al., 2001), DWEPP (Dynamic Water Erosion

Prediction Project) (Bulygina et al., 2006) y EUROSEM (European Soil Erosion Model) (Morgan et al., 1998).

Una gran cantidad de estudios se han realizado para calibrar y validar los componentes de los modelos basados en procesos físicos para estimar escorrentía y erosión hídrica. (Flanagan et al., 1995; Klik et al., 1995; Savabi et al., 1996; Laflen y et al., 2004; et al., 1996; Nearing et al., 1998; Zeleke, 1999; Ranieri et al., 1999; Santoro et al., 2002; Bulygin et al., 2002). La mayoría de este tipo de modelos para la estimación de la erosión hídrica requieren una gran cantidad de datos en las etapas de calibración y validación, así como también un alto desempeño, lo que significa: algoritmos complejos, tiempos de ejecución que pueden ser un problema y un lenguaje de programación que minimice el tiempo de cálculo. Recientemente, las redes neuronales artificiales (RNA) y los Sistemas de Inferencia Difuso (SID) se han propuesto como herramientas eficientes para la calibración en la modelación y el pronóstico en la hidrología. (Bishop, 1994; Jain et al., 2002; Panigrahi y Mujundar, 2000).

2.2.7.1 Modelos Empíricos. Se basan en una lógica inductiva y generalmente son aplicables sólo en aquellas condiciones para las cuales los parámetros han sido calibrados. El ejemplo clásico de los modelos paramétricos lo constituye la *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo*, USLE (Universal Soil Loss Equation). Fue desarrollado por Wischmeier y Smith (1978) y actualmente se utiliza prácticamente en todo el mundo. Su expresión general es como sigue:

$$A = R K L S C P \quad (5)$$

Donde A es la tasa media anual de pérdida de suelo por erosión, R es el factor de erosividad de la lluvia, K es el factor de inclinación de la pendiente, L es el factor de longitud de la pendiente, C es el factor de cobertura y manejo y P es el factor de prácticas de conservación. La crítica mayor de la USLE ha sido su ineffectividad en aplicaciones fuera del rango de condiciones para las cuales fue desarrollada. La adaptación de la USLE a nuevas condiciones ambientales requiere una mayor inversión de recursos

y tiempo para desarrollar la base de datos requerida para manejar el modelo. El enfoque principal de los modelos empíricos ha sido estimar pérdidas de suelo promedio, aunque se han desarrollado algunas extensiones para la producción de sedimentos. (Lal, 1994,2001).

Las variaciones del modelo USLE lo constituyen el modelo USLE o ULE revisado y el modelo MUSLE (ULE modificado). En este último, el término R se reemplaza por un factor de escorrentía que incluye el volumen total de escorrentía de la tormenta y el caudal pico correspondiente (Williams, 1975):

$$Y = \left[11.8 (VQ_p)^{0.56} \right] [K SL CP] \quad (6)$$

Donde Y es la producción de sedimentos debido a la tormenta en toneladas, V es el volumen de escorrentía originado por la tormenta, Q_p es el caudal pico correspondiente a la tormenta, los otros términos son como en el modelo USLE. Los parámetros V y Q_p se estiman utilizando algún modelo hidrológico, por ejemplo el de Williams y La Seur (1976).

2.2.7.2 Modelos Conceptuales. Los modelos conceptuales se encuentran entre los modelos basados en procesos físicos y los modelos empíricos, y se basan en formas concentradas espacialmente del agua y en las ecuaciones de continuidad para los sedimentos. El enfoque de los modelos conceptuales ha sido estimar la producción de sedimentos, principalmente usando el concepto de hidrogramas unitarios.

2.2.7.3 Modelos Basados en Procesos Físicos. Los modelos basados en procesos físicos son intentos por representar los mecanismos esenciales que controlan la erosión. La fortaleza de los modelos basados en procesos físicos es que representan una síntesis de los componentes individuales los cuales afectan la erosión, incluyendo interacciones complejas entre diversos factores y sus variabilidades espaciales y temporales. El resultado es sinérgico, el todo representa más que la suma de sus partes. La investigación científica puede utilizar los modelos de erosión basados en procesos

físicos para ayudar a identificar cuál de las partes del sistema es la más importante en todo el proceso de erosión, y por lo tanto debería prestarse atención en investigación y desarrollo de predicción de erosión y tecnología de control. El planificador en conservación puede utilizar los modelos basados en procesos físicos como una herramienta de diseño de conservación interactiva, determinación de las estaciones críticas o meses en los cuales ocurren los mayores eventos de erosión así como también las posiciones críticas sobre las laderas donde ocurre la mayor pérdida de suelo. El planificador puede rápidamente sugerir y evaluar nuevas estrategias de conservación para campos particulares.

La mayoría de los modelos de erosión basados en procesos físicos se fundamentan en balances: hídrico y de masa que produce escorrentía y sedimentos. Una vez que se inicia la lluvia, una parte de la precipitación es interceptada por la cobertura vegetal. Cuando la capacidad de almacenamiento por intercepción es excedida, se inicia la infiltración hacia el interior del suelo. La tasa de infiltración depende de las propiedades del suelo, tales como textura, relaciones de fases (contenido de humedad inicial, porosidad, gravedad específica, conductividad hidráulica saturada), entre otros. La tasa de infiltración disminuye con una tendencia exponencial a medida que el almacenamiento del agua en el suelo se incrementa, hasta que se alcanza un punto en el cual la tasa de lluvia excede a la tasa de infiltración. La tasa de lluvia excedente normalmente se conoce como lluvia efectiva. Cuando esto ocurre, el agua comienza a detenerse sobre la superficie en las micro-depresiones. Una vez que el almacenamiento en las micro-depresiones (volumen de detención superficial) se ha completado, se inicia la escorrentía. Si la duración y la intensidad del evento de lluvia son lo suficientemente largos, la tasa de infiltración alcanza el estado estable, la cual, algunos investigadores consideran que es aproximadamente igual a la conductividad hidráulica saturada. La acción del flujo sobre el terreno ocasiona desprendimiento de partículas, una vez que el esfuerzo cortante ejercido por el flujo supera al esfuerzo cortante crítico del suelo. La resistencia al esfuerzo cortante o esfuerzo cortante crítico es la propiedad mecánica del suelo más importante que interviene en el proceso lluvia-erosión. El suelo desprendido es transportado en suspensión por la corriente. La potencia de la corriente para efectuar el transporte depende de las características topográficas de los canales y de la velocidad

del flujo, las cuales influencia la carga de sedimentos que se depone o sale fuera del canal(o surco).

Cada componente del modelo de erosión hídrica se expresa como una tasa, de ese modo la tasa de infiltración se puede abstraer de la tasa de lluvia para obtener la tasa de lámina excedente o lluvia efectiva, la cual se utiliza para determinar la tasa a la que sale el agua del surco o canal mediante un modelo de lluvia-escorrentía. La escorrentía es uno de los principales factores en los modelos de estimación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos.

2.2.7.3.1 Modelo CREAMS (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems). Desarrollado para evaluar las fuentes no puntuales de la contaminación de las parcelas agrícolas (Knisel, 1980). Es un modelo de eventos constituido de tres componentes: Hidrología, Erosión/Sedimentación y Químico. El volumen de la escorrentía superficial se estima mediante una ecuación empírica. Los estimados de erosión/sedimentación se basan en la erosividad de la tormenta, en el volumen y caudal de escorrentía y usan las relaciones fundamentales de la erosión para calcular el desprendimiento y transporte en el terreno y cauce. Las salidas incluyen estimados de erosión, producción de sedimentos y distribución de tamaños de partículas.

2.2.7.3.2 Modelo ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment) es de parámetros distribuidos y se desarrolló para planificar y evaluar estrategias para controlar las fuentes de contaminación no puntual de cuencas agrícolas (Beasley y Huggins, 1982). Representa a la cuenca mediante una malla cuadrada. El volumen y el caudal pico de la escorrentía se estiman mediante el modelo de infiltración de Holtan et al., (1985). El componente de erosión y transporte de sedimentos utiliza los conceptos propuestos por Meyer y Wischmeier (1969) y una modificación de la relación de transporte de Yalin (1963). La información de salida incluye el flujo y la tasa de sedimentos y deposición a lo largo del cauce.

2.2.7.3.3. Modelo WEPP por sus siglas en ingles (*Water Erosion Prediction Project*). El modelo WEPP fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA; por sus siglas en ingles) adscrito al Servicio de Investigaciones Agrícolas como un esfuerzo para mejorar la tecnología de estimación de la erosión del suelo basada en procesos físicos, empleada por las agencias involucradas en la evaluación y planificación para la conservación del agua y del medio ambiente (Foster y Lane, 1987). Los fundamentos de infiltración, escorrentía, hidráulica de flujo, crecimiento de plantas, descomposición de residuos, perturbación del suelo y consolidación, así como mecanismos de erosión son componentes de este modelo (Flanagan *et al.*, 1995). En el proceso de desarrollo de WEPP se contemplaron tres versiones: una para laderas, la segunda para cuencas y la tercera para celdas. Las tres versiones predicen la erosión laminar y por surcos, ninguna incluye algoritmos por cárcavas y cauces. La erosión está representada por una ecuación de estado estable. Los modelos de los procesos físicos involucrados se describen posteriormente.

2.2.7.3.4 Modelo DWEPP por sus siglas en ingles (*Dynamic Water Erosion Prediction Project*). Bulygin *et al.*, (2006) desarrollaron una versión dinámica del modelo WEPP, que cuantifica la dinámica de los sedimentos dentro de una tormenta tienen en común que son aplicables para la estimación de la erosión en laderas, cuencas y celdas. En vez de re-codificar la ecuación de la onda cinemática, han empleado el módulo de flujo superficial de escorrentía en KINEROS2 (Woolhiser *et al.*, 1990). Entre las principales ventajas se incluyen, por un lado, el ahorro de tiempo y esfuerzo en la re-codificación de lo que ya se ha logrado, y por otro, que el módulo de la escorrentía de KINEROS2 ha sido suficientemente probado y validado en una amplia variedad de condiciones. Los modelos de los procesos físicos involucrados se describen posteriormente.

2.2.7.3.5 Modelo EUROSEM por sus siglas en ingles (*European Soil Erosion Model*). Fue desarrollado por Morgan *et al.*, (1998), tiene una estructura modular mediante la cual se logra una simulación distribuida y dinámica del proceso de erosión enfocada en el flujo en surcos y las áreas entre surcos. El agua y los sedimentos son

transitados empleando el programa KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990), mediante el cual se resuelve la ecuación de la onda cinemática, uno de los modelos comúnmente aplicados en la hidrología (Morris y Woolhiser, 1980; Woolhiser y Liggett, 1967; Lighthill y Whitham, 1955; Woolhiser, 1973; Singh, 1996; Singh y Woolhiser, 1976). Las pérdidas de suelo se estiman a través de las descargas de sedimentos, definidas como el producto de la tasa de escorrentía y la concentración de sedimentos en el flujo, para suministrar el volumen (o masa) que pasa por un punto específico en un tiempo determinado. El cálculo de la carga de sedimentos se basa en la solución numérica de la ecuación de balance de masa dinámico (Bennett, 1974; Kirkby, 1980; Woolhiser *et al.*, 1990). El caudal y el área se obtienen mediante la solución numérica de la ecuación de balance de masa dinámico para el agua, que se basa en la diferencia entre la precipitación en forma de lluvia y las pérdidas tales como, la intercepción y la infiltración. Los modelos de los procesos físicos involucrados se describen posteriormente.

2.2.7.3.6 Modelo de Erosión del CIHAM-UC. En el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) se ha desarrollado un modelo de erosión basado en la modificación de las ecuaciones para estimar el transporte de sedimentos y la ecuación de estimación de la tasa de erosión para el caso en el cual la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los sedimentos. La ecuación propuesta para estimar la capacidad de transporte de los sedimentos es el modelo de Simons, Li y Fullerton, (1981); el cual ha sido desarrollado para estimar el transporte de sedimentos en ríos. La ecuación empleada para la estimación de la tasa de erosión en la condición señalada es una modificación del modelo de Smith *et al.*, (1995) usado en el modelo EUROSEM.

En esta investigación se usan modelos basados en procesos físicos, regresión estadística, redes neuronales artificiales y sistemas de inferencia difusos para estimar la tasa de erosión hídrica y el transporte de sedimentos.

2.2.8 Descripción de los Modelos basados en Procesos Físicos

La mayoría de los modelos de erosión se basan en un balance hídrico y de sedimentos que produce escorrentía y sedimentos, como se muestra en la Figura 1, donde se observan las principales propiedades y procesos que influyen sobre la erosión-deposición; cuya interacción se puede explicar como sigue: una vez que se inicia la lluvia natural o artificial (riego), una parte de la precipitación es interceptada por la cobertura vegetal; luego que la capacidad de almacenamiento por intercepción es excedida, se inicia la infiltración hacia el interior del suelo. La tasa de infiltración depende de las propiedades del suelo, tales como textura, relaciones de fases (contenido de humedad inicial, porosidad, gravedad específica y conductividad hidráulica saturada), entre otros. La tasa de infiltración disminuye con una tendencia exponencial a medida que el almacenamiento del agua dentro del suelo se incrementa, hasta que se alcanza un punto en el cual la tasa de lluvia excede a la tasa de infiltración; escurriendo superficialmente. Cuando esto ocurre, el agua comienza a detenerse sobre la superficie en las micro-depresiones. Al completarse el almacenamiento en las micro-depresiones (volumen de retención superficial) se inicia la escorrentía. Si la duración y la intensidad del evento de lluvia son lo suficientemente largos, la tasa de infiltración alcanza el estado estable. La acción del flujo sobre el terreno ocasiona desprendimiento de partículas, cuando el esfuerzo cortante ejercido por el flujo supera al esfuerzo cortante crítico del suelo. El suelo desprendido es transportado en suspensión por la corriente. La potencia de la corriente para efectuar el transporte depende de las características topográficas de los canales y de la velocidad del flujo, las cuales influyen la carga de sedimentos que se deposita o sale fuera del surco.

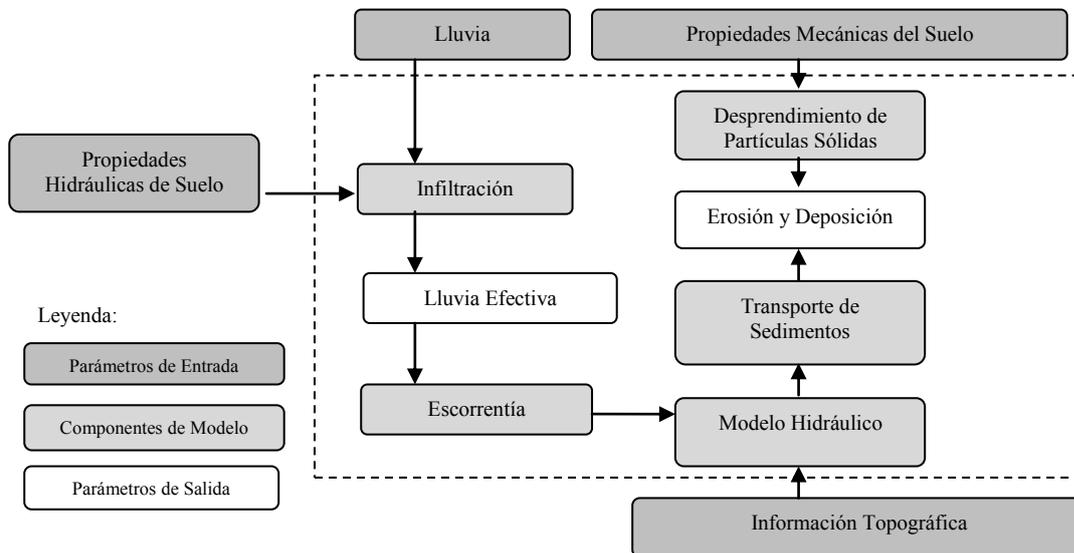


Figura 1. Diagrama de flujo de un modelo de erosión hídrica basado en procesos físicos. Fuente: Elaboración propia

Cada componente del modelo de erosión hídrica se expresa como una tasa, de ese modo la tasa de infiltración se puede sustraer de la tasa de lluvia para obtener la lluvia efectiva en el área del surco, la cual se puede expresar como caudal de escorrentía. La escorrentía es uno de los principales factores en los modelos de estimación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos.

Las relaciones entre los componentes de los procesos hidrológicos y de erosión son, en general, modelos empíricos desarrollados desde hace años por diversos investigadores mediante experiencias en cuencas. A continuación se presenta una descripción de los modelos matemáticos que se emplean para estimar los componentes del modelo de erosión basado en procesos físicos.

2.2.8.1 Modelos de Infiltración

Para estimar la infiltración se han desarrollado numerosos modelos matemáticos, los cuales pueden clasificarse en tres grupos, Mishra (2003): (1) con base física (teóricos), (2) semi-empíricos y (3) empíricos. Los modelos con base física son de complejidad

variable y se basan en la Ley de Conservación de la Masa y la Ley de Darcy, dependiendo de la dimensionalidad, dinámica del flujo, conductividad hidráulica-carga capilar, relación de retención, condiciones límites e iniciales. Comprenden los de Green-Ampt (1911), Philip (1957; 1969), Mein y Larson (1971), Smith (1972), Smith-Parlange (1978). Los modelos semi-empíricos se basan en la ecuación de continuidad y la hipótesis de la relación flujo-concentración y abarcan los propuestos por Horton (1940), Holtan (1961), Overton (1964), Singh-Yu (1990), Grigorjev-Iritz (1991). Los modelos empíricos se basan en mediciones de campo o pruebas experimentales de laboratorio, incluyen los propuestos por SCS-CN (1956), Kostiakov (1932), Kostiakov modificado (Smith, 1972), Collis-George (1977). A continuación se presenta una descripción resumida de los modelos de infiltración:

Antes de detallar los modelos paramétricos de infiltración se presenta una breve descripción de las leyes que constituyen la base de los modelos teóricos. Estas son; la ley de conservación de la masa y la ley de Darcy:

La ley de conservación de la masa se expresa mediante la ecuación de continuidad como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

La Ecuación (7) es aplicable a flujos poco profundos donde no ocurren cambios en la densidad ni en la porosidad debido a cambios en la presión. (Chow y otros., 1993).

La ley de Darcy se expresa como:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (8)$$

Donde θ es el contenido de humedad del suelo, K es la conductividad hidráulica como una función del contenido de agua en el suelo, q es el flujo de Darcy, h es la carga hidráulica constituida por la carga capilar y la carga de elevación expresada como:

$$h = \varphi + z, \quad (9)$$

Donde φ es la carga capilar, z es la carga de elevación o vertical. La carga capilar en el suelo en cada instante depende de la humedad del suelo en ese instante. Esto significa que la conductividad hidráulica también puede ser expresada como una función del contenido de humedad del suelo, lo que introduce un nuevo término D llamado difusividad del agua en el suelo (L^2/T),

$$D = K \left(\frac{d\varphi}{d\theta} \right) \quad (10)$$

Combinando las Ecuaciones (7) a (9), se obtiene:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (11)$$

La Ecuación (11) se conoce como la ecuación de Fokker-Planck y se basa en los siguientes supuestos (Smith, 1972): (a) Sólo se considera el flujo vertical, (b) la superficie freática se encuentra a una gran profundidad y los cambios en la presión de vacío durante la infiltración no son significativos, (c) la saturación se incrementa de la misma manera cualquiera que sea la dirección a partir de un punto con el tiempo. Para resolver la Ecuación (11), se pueden definir las siguientes condiciones límites:

$$t = 0, z > 0, \theta = \theta_i; \quad 0 < t \leq t_p, z = 0, K - D(\partial\theta/\partial z) = r(t) \quad (12)$$

Donde θ_i es el contenido de humedad inicial, t_p es el tiempo hasta la detención (T), y $r(t)$ es el patrón de intensidad de la lluvia variable en el tiempo. Asumiendo que $D(\theta)$ varía rápidamente con θ , Philip (1969) transformó la Ecuación (11) en:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{\partial K}{\partial \theta} \quad (13)$$

La Ecuación (13) constituye el fundamento de los modelos de infiltración con base física.

Suponiendo una columna de suelo de área unitaria para la infiltración vertical, la Ecuación (7) se puede integrar sobre el espacio y se expresa de forma concentrada como:

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = f(t) - f_s(t) \quad (14)$$

Donde $S(t)$ es el espacio disponible para el almacenamiento potencial del agua en cualquier momento, f_s es la tasa a la cual el agua sale del elemento de suelo y f es la tasa de infiltración o la tasa a la cual el agua entra al elemento de suelo. Se puede expresar $S(t)$ como:

$$S(t) = S(f, f_s, t) \quad (15)$$

La Ecuación (15) es una expresión general que relaciona S con f y f_s y es análoga a la relación flujo- concentración. Las Ecuaciones (14) y (15) constituyen la base de diversos modelos de infiltración semi-empíricos comunes (Singh y Yu, 1990).

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos de infiltración con base física y empíricos.

Modelo de Philip. Philip (1957, 1969) derivó el siguiente modelo para estimar la infiltración en función del tiempo:

$$f(t) = st^{-1/2} + C \quad (16)$$

Donde f es la velocidad de infiltración en mm/h, s y C son parámetros dependientes de las características de difusividad y retención de humedad del suelo. El parámetro s se conoce como sorptividad. Luego de un largo período de tiempo, f tiende a ser aproximadamente constante, y podría igualar a la conductividad hidráulica saturada, K_s . Sin embargo, Philip encontró que esta igualdad no existe. El parámetro C varía entre medio y tres cuarto de K_s , El parámetro de sorptividad se puede estimar en términos de K_s , conductividad capilar efectiva, o la diferencia entre contenido de humedad saturado e inicial (White and Sully, 1987; Nachabe *et al.*, 1997). En la práctica, sin embargo, los parámetros son estimados empleando técnicas de ajuste de curvas.

Modelo de Green-Ampt. Green y Ampt (1911) propusieron un modelo basado en el supuesto de que el suelo se puede considerar como un paquete de diminutos tubos capilares de área, dirección y forma irregular. Asumiendo homogeneidad, lo que implica que las propiedades del suelo no cambian de un punto a otro, contenido de humedad inicial uniforme en la profundidad y superficie inundada, las ecuaciones de Green-Ampt toman la forma siguiente:

$$f = A \left[1 + \frac{B(H_c + H)}{F} \right] \quad (17)$$

Donde A y B son parámetros que dependen de las características físicas del suelo. A es la conductividad hidráulica, en cm/hora y B es la porosidad disponible, la cual se calcula como la porosidad efectiva, θ_e (porosidad total, ϕ , menos saturación residual, θ_r), menos el contenido de humedad inicial, H es la carga de agua sobre la superficie (L), y F es la infiltración acumulada. Smith y Parlange (1978) han demostrado que para condiciones iniciales inundadas con una tasa de lluvia aproximadamente infinita y K con una pequeña variación próxima a la saturación, la Ecuación (17) se puede derivar de la Ecuación (11). El modelo de Green-Ampt ha resurgido, debido a que sus parámetros se pueden obtener a partir de cantidades medibles físicamente (Brakensiek, 1981; Rawls

et al., 1983; Odgen y Sagafian, 1977) empleando la ecuación de Brooks y Corey, la cual se expresa como (Brooks *et al*, (1964)):

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad (18)$$

Donde S_e es la saturación efectiva

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (19)$$

Donde θ es el contenido de humedad del suelo, en cm^3/cm^3 ; θ_r es la saturación residual en cm^3/cm^3 ; ϕ es la porosidad total, en cm^3/cm^3 ; ψ es la presión capilar, en cm; y λ es el índice de saturación del tamaño del poro.

Los parámetros de Green-Ampt se pueden estimar a partir de las constantes de Brooks y Corey, expresadas como:

$$H = \frac{2\lambda+3}{2\lambda+2} \left(\frac{L_b}{2}\right) \quad (20)$$

La porosidad efectiva, θ_e , se calcula como:

$$\theta_e = \phi - \theta_r \quad (21)$$

En la cual ϕ es la porosidad total, en cm^3/cm^3 , y se calcula a partir de la densidad aparente y la densidad de partículas, y θ_r es el contenido de humedad residual en el suelo, en cm^3/cm^3 . La conductividad hidráulica, K , según Bouwer es la mitad de la conductividad hidráulica saturada. (Brooks *et al*, (1964)):

$$A = K = \frac{K_s}{2} \quad (22)$$

Donde la conductividad hidráulica saturada, K_s , se calcula mediante la ecuación propuesta por Brutsaert, (1967) derivada mediante la sustitución de la ecuación de Brooks y Corey en Childs, dada por:

$$K_s = a \frac{\phi_e^2}{\psi_b^2} \left[\frac{\lambda^2}{(\lambda+1)(\lambda+2)} \right] \quad (23)$$

Donde a es igual a una constante que representa los efectos de diversas constantes del fluido y la gravedad. La constante a es igual a $270 \text{ cm}^3/\text{s}$ según Brutsaert, (1967). Los valores encontrados para el parámetro A en el horizonte A variaron según el tipo de suelo como sigue: arena 11.78 cm/h ; limo 0.34 cm/h y arcilla 0.03 cm/h . En cuanto al parámetro B en el horizonte A variaron según el tipo de suelo como sigue: arena 0.354 a $0.48 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; limo 0.376 a $0.576 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y arcilla 0.309 a $0.515 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Actualmente, existe una amplia literatura sobre el modelo de Green-Ampt; para datos de infiltración obtenidos mediante pruebas de campo los parámetros se estiman empleando técnicas de ajuste de curvas. Resultando que la Ecuación (17) se puede reescribir como:

$$f = A + C/F \quad (24)$$

Dónde $C = AB(H_c + H)$. Los parámetros A y C pueden ser estimados empleando técnicas de ajuste de curvas utilizando datos de mediciones de la infiltración.

Modelo Lineal de Smith-Parlange. Smith y Parlange (1978) desarrollaron una expresión lineal, omitiendo el primer término diferencial del lado izquierdo de la Ecuación (13) y luego integrando, que se expresa como:

$$f = K_s \left[\frac{C}{K_s F} + 1 \right] \quad (25)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada en mm/h, y C es un parámetro que está relacionado con la sorptividad del suelo y la variación lineal de la humedad inicial, también es dependiente de la cantidad y el patrón de intensidad de lluvia. La omisión del primer término diferencial se basa en la condición de que $D(\theta)$ en la Ecuación (13) varía rápidamente con θ (Parlange, 1971). Los parámetros C y K_s se pueden determinar gráficamente o usando una aproximación por regresión mediante el uso de datos de infiltración. Para aplicaciones en campo, esta es la forma más factible para estimar parámetros.

Modelo No Lineal de Smith-Parlange. Smith y Parlange (1978), también desarrollaron un modelo no lineal de infiltración, el cual se expresa como sigue:

$$f = K_s \frac{e^{\left(\frac{FK_s}{C}\right)}}{e^{\left(\frac{FK_s}{C}\right)^{-1}}} \quad (26)$$

Donde C tiene la misma connotación que en la Ecuación (4). Ambos parámetros K_s y C pueden derivarse de las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo, para aplicaciones prácticas, los parámetros se estiman empleando técnicas de ajuste de curvas.

Modelo de Horton. Horton (1938) desarrolla la siguiente ecuación para estimar la velocidad de infiltración:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (27)$$

Donde f_c es el valor de f para el estado estable, f_o es el valor de f en $t=0$, y k es el factor de decaimiento de la infiltración. La Ecuación (21) se deriva de la suposición de que la reducción en la capacidad de infiltración durante la lluvia es directamente proporcional a la tasa de infiltración y se aplica sólo cuando la intensidad de lluvia efectiva es mayor que f_c (Linsley y otros, 1975). Maidment (1993) condicionó los

estimados generalizados de f_o para una variación entre 210 a 900 mm h⁻¹, f_c entre 2 y 290 mm h⁻¹, y k entre 0.8 y 2.0 min⁻¹ para suelos que varían desde una arcilla arenosa fina hasta suelos agrícolas. Para aplicaciones en campo, los parámetros se estiman empleando técnicas de ajuste de curvas.

Modelo de Mishra-Singh. Mishra (1998) y Mishra y Singh (2002) desarrollaron para la infiltración el modelo dado en la Ecuación (7), expresando el procedimiento convencional del SCS-CN bajo la forma del método de Horton, suponiendo una variación lineal de la precipitación acumulada con el tiempo (o intensidad de lluvia constante):

$$f_t = f_c + \frac{Sk}{[1 + kt]^2} \quad (28)$$

Donde S es el potencial máximo de retención de agua en el suelo, idéntico al parámetro S_o del modelo de Singh-Yu (1990), y k es coeficiente de decaimiento, igual al parámetro del modelo de Horton. Collis-George (1977); Mishra (1998) y Mishra y Singh (1999) expresan S como se indica a continuación:

$$S = \frac{f_o - f_c}{k} = \frac{\pi s^2}{4 K} \quad (29)$$

Donde S es la retención máxima potencial, f_o es la tasa de infiltración inicial en mm/h, k es el factor de disminución de la infiltración, análogo al parámetro de tiempo del modelo de Horton, y K es la conductividad hidráulica en mm/h. La Ecuación (28) implica que S (o S_o del modelo general) se deriva de propiedades físicas de suelo. Sin embargo, k , S y f_c son mejor estimadas aplicando técnicas de ajuste de curvas usando datos de infiltración observados.

Modelo de Holtan. Usando un concepto de agotamiento del almacenamiento, Holtan (1961) desarrolló para la infiltración, la siguiente expresión:

$$f = f_c + a(S_o - F)^n \quad (30)$$

Donde a y n son constantes que dependen del tipo de suelo, superficie y el tipo de cultivo, y S_o es el almacenamiento potencial por encima de la capa impermeable (porosidad total, \emptyset , menos la humedad inicial del suelo θ_0), la expresión $(S_o - F)$ representa el potencial de infiltración. Para cuatro suelos diferentes, el valor de n se encontró que es igual a 1.387 y a varía entre 0.25 y 0.80 con un valor promedio de 0.62. Considerando el efecto de la vegetación, un factor K se introdujo para suelos cubiertos con vegetación y el parámetro a se reemplazó por $0.62 k$. Al igual que otros modelos, los parámetros del modelo se determinan mejor aplicando técnicas de ajuste de curvas.

Modelo de Kostiakov. Kostiakov (1932) desarrolla una ecuación empírica para la infiltración de la siguiente estructura:

$$F = at^b \quad (31)$$

Donde a y b son constantes ($0 < b < 1$). Para tres suelos diferentes (franco limoso, franco arenoso y arcilla), Kincaid et al., (1969) encontraron que el valor de a varía desde 0.225 hasta 1.1 y el valor de b desde 0.458 hasta 0.669. Los parámetros son estimados aplicando técnicas de ajuste de curvas. Diferenciando la Ecuación (31) se encuentra la siguiente expresión para la velocidad de infiltración (Rode, 1965):

$$f = \alpha(t)^{-\beta} \quad (32)$$

Donde $\alpha = ab$ y $\beta = 1-b$

Modelo de Kostiakov Modificado. Smith (1972) modificó la Ecuación original de Kostiakov introduciendo el nuevo término f_c como sigue:

$$f = f_c + \alpha t^{-\beta} \quad (33)$$

Donde α y β son los mismos parámetros que en el caso anterior. Cahoon (1998) derivó los parámetros de la Ecuación (33) a partir del modelo de la onda cinemática descrito por Walker y Humpherys (1983), cuya formulación resulta de la solución de una ecuación no lineal, con el área de la sección transversal del flujo desconocida en los nodos internos de una malla espacio-tiempo. La técnica de Newton-Raphson se empleó para resolver la ecuación no lineal. Las soluciones algebraicas proporcionan el área de la sección transversal del flujo en la entrada y la distancia recorrida por el avance frontal para cada incremento de tiempo. La tasa de escorrentía se calcula basada en el área de la sección transversal del flujo en la salida después que el avance se ha completado. El modelo fue codificado de manera que el avance, la recesión y el hidrograma de escorrentía fueron generados repitiendo el procedimiento para diversas suposiciones de los valores de α y β . El rango y el incremento de α y β se ingresan de manera que cada combinación de éstos resulta en una única corrida. Las trayectorias de avance y de los hidrogramas de escorrentía observados y estimados se compararon en cada corrida. Empleando 101 datos generados por Ganapathy- Iyer (1993) a partir de ensayos sobre canales de riego sobre un suelo limoso, encontraron que el error estándar cuadrático medio fue menor a 10% en el ajuste de la curva de avance y el hidrograma de escorrentía directa simultáneamente para $\alpha = 0.00140 \text{ m}^3/\text{m-min.}$ y $\beta = 0.67$.

2.2.8.2 Lluvia-Escorrentía

La lluvia-escorrentía es un proceso complejo, dinámico y no lineal, que se ve afectado por muchos factores fisiográficos y climáticos. La influencia de estos factores hace que el proceso de lluvia-escorrentía no sólo sea complejo de entender, sino también difícil de modelar (Guevara y Cartaya, 2004). Históricamente, los investigadores han utilizado modelos determinísticos, basados en la física del proceso subyacente, o en la teoría de los sistemas/modelos de caja negra. La mayoría de los modelos lluvia-escorrentía determinísticos requieren gran cantidad de datos para la calibración y validación, y son exigentes computacionalmente, por lo que son vistos con escepticismo por los investigadores y no han sido muy populares (Grayson et al., 1992).

En esta investigación se emplea el modelo clásico basado en hidrogramas unitarios y modelos de regresión del tipo lineal y no lineal múltiple, cuya variable independiente es la lluvia dentro de un evento de tormenta.

Modelo de Hidrogramas Unitarios. Mediante el uso de un modelo determinista de hidrograma unitario (HU), se puede desarrollar inicialmente un HU empleando datos de lluvia - escorrentía que procedan de un evento de lluvia aislada. Posteriormente, se puede utilizar el HU desarrollado para calcular el hidrograma de escorrentía para una tormenta dada. El HU de cierta duración se puede convertir a otro HU de una duración diferente utilizando superposición o el método de la curva S, en caso de ser necesario, para su validación.

Modelo de Regresión. Dos tipos de estructuras de modelos de regresión son aplicables: una estructura de modelo de regresión lineal múltiple (RLM) y una estructura de modelo de regresión no lineal múltiple (RNLM).

Para el caso del desarrollo del modelo de RLM, la relación entre la escorrentía resultante en el tiempo t (Q_t) y la lluvia que da origen a dicha escorrentía en cada tormenta, se representa mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \beta_1 P_t + \beta_2 P_{t-1} + \beta_3 P_{t-2} + \beta_4 P_{t-3} + \dots + \beta_{12} P_{t-11} \quad (34)$$

Donde β_s es el coeficiente de regresión a ser determinado, Q_t es la escorrentía en L/s; P_s representa la lluvia en mm y el índice t es el tiempo.

Para el caso del desarrollo del modelo de RNLM, la relación que se investiga es una regresión polinómica de orden n , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q_t = \beta_1 P_t^n + \beta_2 P_{t-1}^n + \beta_3 P_{t-2}^n + \beta_4 P_{t-3}^n + \dots + \beta_{12} P_{t-11}^n \quad (35)$$

2.2.8.3 Erosión y Transporte de Sedimentos

Las tecnologías actuales para la evaluación de la erosión sobre la base de los sistemas de valoración de la erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, pendiente y uso del suelo, proporcionan información sobre la distribución espacial del riesgo de erosión, sin embargo presentan limitaciones en lo referente a la estimación de las tasas de erosión. (Auerswald y Schmidt, 1986; Rubio, 1988; Briggs y Giordano, 1992; Jäger, 1994). Los intentos de utilizar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978) en algunos países para, por un lado, estimar las tasas de erosión y por el otro, evaluar diferentes prácticas de conservación de los suelos muestran que es necesario extremar el cuidado en la selección de los valores de entrada, tanto para el factor del poder erosivo de la lluvia (R) (Chisci y Zanchi, 1981; Richter, 1983), como el de la erosionabilidad del suelo (K) (Richter, 1980; De Ploey, 1986; Shwertmann, 1986). Hay que hacer notar que la USLE, no estima la deposición.

En el contexto global, el diseño de estrategias para controlar la contaminación asociada con el escurrimiento y la erosión en tierras agrícolas requiere el conocimiento de lo que ocurre en tormentas aisladas a menudo sobre una base minuto a minuto, con el propósito de estimar la magnitud y el tiempo de ocurrencia del caudal máximo de agua y sedimentos desde las laderas hacia los ríos. La USLE, no puede proporcionar estos resultados porque estima sólo la media de la pérdida anual de suelo.

A fin de proporcionar una mejor representación de los procesos de erosión, algunos científicos se han concentrado en el desarrollo de modelos de erosión basados en procesos físicos, como los utilizados en CREAMS (Knisel, 1980; Foster et al., 1981), ANSWER (Beasley et al., 1980), KINEROS (Woolhiser et al., 1990) y WEPP (Nearing et al., 1989). Modelos similares se están desarrollando también en Australia (Rose et al., 1983; Misra y Rose, 1992).

Aunque CREAMS y WEPP se pueden ejecutar para las tormentas individuales, únicamente simulan la pérdida total del suelo durante una tormenta, asumiendo un perfil de la superficie de flujo constante. En ambos programas no se modela el caudal máximo ni se describe el patrón de los eventos dentro de una tormenta, o se obtiene un gráfico

que muestre el patrón de los caudales de sedimentos en el tiempo, información que es útil para representar las cargas de la contaminación potencial de los flujos de sedimentos en los cursos de agua.

Para cuencas, donde una o dos tormentas representan la mayor parte de la pérdida anual de suelo, que es la situación típica en muchos países, pocas veces se logra un flujo constante, por tanto las metodologías CREAMS y WEPP pueden resultar inapropiadas (Sfalanga y Franchi, 1978; Boschi y Chisci, 1978; Richter, 1979; Raglione et al., 1980; Boschi et al., 1984; Tropeano, 1984; Chisci et al., 1985; Govers, 1987). A fin de obtener una buena aproximación de lo que ocurre sobre la superficie de la tierra en tales eventos, se requiere un enfoque totalmente dinámico para modelar la erosión.

La necesidad de un enfoque alternativo fue reconocida a nivel mundial y hasta el presente algunos de los dos principales modelos dinámicos basados en procesos físicos han sido EUROSEM (European Soil Erosion Model) propuesto por Morgan et al., (1998) y más recientemente DWEPP (Dynamic Water Erosion Prediction Project) por Bulygina et al., (2006). En esta investigación se emplean los modelos WEPP, DWEPP y EUROSEM, como algunos de los principales para estimar la erosión hídrica durante eventos de tormentas de lluvia. Estos modelos incluyen los componentes de infiltración, en las diferentes propuestas descritas con anterioridad, desprendimiento de partículas sólidas, transporte de sedimentos y deposición, indicados en la Figura 1. Seguidamente se presentan los componentes de los modelos que describen la interacción entre los procesos de desprendimiento, transporte de sedimentos y deposición.

WEPP. Se basa en una ecuación de estado estable que asume una pendiente uniforme del flujo superficial, en el cual las variables están en función del ancho o área total (Foster y Meyer, 1975; Foster, 1982; Foster y Lane, 1987; Foster, 1990). En WEPP se diferencian los procesos que involucran la erosión en los surcos y en las áreas entre surcos. La relación básica está dada por:

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = S \quad (36)$$

Donde C es la concentración de los sedimentos en el flujo (kg/m^3), A el área de la sección transversal del flujo (m^2), Q el caudal (m^3/s), t el tiempo (s), x la distancia (m), el término $\partial(CQ)/\partial x$ la tasa de cambio de los sedimentos con la distancia, $\partial(CA)/\partial t$ la tasa de almacenamiento de los sedimentos dentro de profundidad del flujo, S el término de fuente/sumidero para los sedimentos (kg/s/m^2), dado por:

$$S = D_I + D_R \quad (37)$$

Asumiendo un movimiento de sedimentos cuasi-estable, la Ecuación (36) se reduce a:

$$\frac{\partial(CQ)}{\partial x} = D_I + D_R \quad (38)$$

$$D_R = \begin{cases} D_c \left(1 - \frac{CQ}{wT_c}\right), & CQ \leq wT_c \\ \frac{0.5V_s}{Q} (wT_c - CQ), & CQ \geq wT_c \end{cases} \quad (39)$$

Donde D_I es el aporte de los sedimentos hacia el surco (kg/s/m^2), D_R la tasa de erosión por flujo, T_c la capacidad de transporte del flujo en el surco (kg/s/m), w el ancho del surco, V_s la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), Q la descarga del flujo (m^3/s), y D_c la capacidad de desprendimiento de suelo por flujo (kg/s/m^2) se calcula mediante la ecuación propuesta pro Duboys (1879):

$$D_c = \begin{cases} K_c(\tau_s - \tau_c), & \tau_s \geq \tau_c \\ 0, & \tau_s \leq \tau_c \end{cases} \quad (40)$$

$$\tau = \rho_w gSR \quad (41)$$

Donde K_c es la erodabilidad del surco (s/m), τ el esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo (Pa), τ_c el esfuerzo cortante crítico (Pa), ρ_w la densidad del agua (Kg/m^3), g la aceleración debida a la gravedad (m/s^2), S la pendiente (m/m), R el radio hidráulico (m).

Los surcos se asumen que son rectangulares con anchos que dependen de la tasa del flujo.

La forma simplificada de la ecuación de Yalin (1963) para estimar la capacidad de transporte de los sedimentos ha sido adaptada por Foster y Meyer (1975) como:

$$T_c = K_t \tau^b \quad (42)$$

Donde T_c es la capacidad de transporte de los sedimentos (kg/s/m), K_t el coeficiente de transporte ($\text{kg}^{1-b} \text{ m}^{-(1-b)} \text{ s}^{-(1-2b)}$), los parámetros K_t y b se obtienen mediante ajuste empírico.

DWEPP. Este modelo se basa en las Ecuaciones (36) a (41). Muchas ecuaciones de transporte de sedimentos han sido desarrolladas para el flujo en corrientes, y posteriormente aplicadas al flujo superficial y en canales. Según Alonso et al., (1981) y Foster y Meyer (1972); la ecuación de Yalin es más aplicable al flujo en canales asociado a la erosión laminar. En DWEPP, la ecuación de capacidad de transporte del flujo de Yalin está dada por:

$$T_c = 0.635 G_s d \sqrt{\rho_w \tau_s} \delta \left[1 - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta) \right] \quad (43)$$

$$\delta = \begin{cases} \frac{Y}{Y_{cr}} - 1, & Y < Y_{cr} \\ 0, & Y \geq Y_{cr} \end{cases} \quad (44)$$

$$\beta = 2.45 G_s^{-0.4} Y_{cr}^{0.5} \delta \quad (45)$$

$$Y = \frac{\tau_s}{\rho_w (G_s - 1) g d} \quad (46)$$

Dónde G_s es la gravedad específica de las partículas sólidas, d el diámetro de la partícula (m), δ y β se calculan mediante las Ecuaciones 44 y 45, respectivamente. Y es el esfuerzo cortante adimensional del diagrama de Shields, Y_{cr} el esfuerzo cortante crítico adimensional del diagrama de Shields.

EUROSEM. Se basa en las Ecuaciones (36) y (37), las cuales simulan el transporte de sedimentos, erosión y deposición sobre la superficie del terreno mediante los procesos físicos en los surcos y áreas afluentes para tormentas aisladas en parcelas individuales y cuencas pequeñas.

La salida de los modelos para una tormenta particular incluye la escorrentía total, pérdida de suelos total, hidrogramas y sedimentogramas. El desprendimiento de suelo por escorrentía se modela en términos de la teoría de erosión-deposición propuesta por Smith et al., (1995), donde D_R es la tasa de erosión (mg/s/m^2), (positivo para la erosión y negativo para la deposición); la capacidad de transporte del flujo T_c , representa la concentración de los sedimentos en la cual la tasa de erosión y deposición correspondientes están en equilibrio. Una ecuación general para la tasa de erosión por flujo se expresa en términos de la velocidad de sedimentación y la concentración de la capacidad de transporte del flujo, como sigue:

$$D_R = V_s(T_c - C) \quad (47)$$

La capacidad de la escorrentía para transportar partículas sólidas se expresa en términos de la concentración, T_c (mg/m^3), la cual se modela como una función de la potencia de la corriente unitaria mediante el uso de las relaciones de Govers, (1990):

$$T_c = a(\omega - \omega_c)^b \quad (48)$$

$$\omega = VS \quad (49)$$

Donde ω_c es el valor crítico de la potencia de la corriente unitaria, ω la potencia de la corriente unitaria (cm/s), V_s la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), a y b son coeficientes derivados experimentalmente que dependen del tamaño de las partículas, S la pendiente (%) y V la velocidad media del flujo.

Modelo de Erosión del CIHAM-UC

En el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) se ha desarrollado un modelo de erosión basado en las Ecuaciones (36) a (39), modificando las ecuaciones para el caso en el cual la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los sedimentos, así como proponiendo la Ecuación (50) para estimar la capacidad de transporte de los sedimentos de Simons, Li y Fullerton, (1981). La Ecuación (50) constituye una solución derivada de la ecuación de transporte de material de lecho de ríos propuesta por Meyer-Peter y Müller, (1948) y el método de Einstein para la descarga de sedimentos suspendidos desde el lecho de corrientes y canales naturales. Guevara y Márquez, (2009) proponen ese modelo para estimar la capacidad de transporte de sedimentos en surcos, la cual se expresa como:

$$T_c = K_t h^a V^b \quad (50)$$

Donde T_c es la capacidad de transporte de sedimentos del flujo (mg/s/m), a , b y c son parámetros estimados mediante ajuste empírico, V la velocidad del flujo (m/s) y h la profundidad del flujo (m).

La tasa de erosión del flujo D_R (mg/s/m²) para el caso en el cual la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los sedimentos se describe en términos de una modificación de la teoría de erosión-deposición propuesta por Smith, (1995). Esta relación se expresa como:

$$D_R = T_c / w - f_s C V_s \quad (51)$$

Donde V_s es la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), w es el ancho del surco (m), $f_s = A_{ce} / A_{surco}$, A_{ce} el área del cilindro experimental de la prueba del hidrómetro (D422) (American Society for Testing Material, 2007).

Sobre la base de los aspectos expuestos hasta aquí, se puede observar cómo se interrelacionan los modelos de capacidad de desprendimiento de partículas sólidas con los modelos de transporte de sedimentos, así como las ecuaciones que han sido incluidas como componentes en los diferentes modelos de erosión, disponibles hasta el presente. A continuación se describen otros modelos que han surgido como modificaciones de los indicados; incluyendo también algunas propuestas que se investigan como parte de este trabajo con el propósito de comprobar la selección de los modelos para describir los procesos de desprendimiento y transporte de sedimentos, y cuyo fundamento teórico se incluye en este marco referencial con el fin de disponer de mayores herramientas mediante las cuales se puedan obtener mejores aproximaciones a los valores observados en campo.

Modelos de Capacidad de Desprendimiento de Partículas. La relación comúnmente empleada para estimar la capacidad de desprendimiento de partículas de surcos se basa en el excedente del esfuerzo cortante aplicado por el flujo concentrado sobre un valor crítico del esfuerzo que depende del suelo. El concepto del umbral se ha expresado mediante una modificación de la ecuación propuesta por Duboys (1879), según la cual se explica el movimiento de una delgada capa de sedimentos a lo largo del lecho para un canal grande o río. Para que se inicie el movimiento de los sedimentos, el esfuerzo cortante aplicado al lecho τ (Pa) debe exceder al esfuerzo cortante crítico del suelo τ_c (Pa), como se indica mediante la siguiente expresión:

$$q_{vb} = K' \tau (\tau - \tau_c) \quad (52)$$

Donde q_{bw} es la tasa de transporte del volumen de la carga de lecho por unidad de ancho ($m^2 s^{-1}$), K' es el parámetro de los sedimentos ($m^2/s/Pa^2$). Esta ecuación fue modificada a una función de potencias por O'Brien y Rindlaub (1934) como:

$$D_c = K_c (\tau - \tau_c)^b \quad (53)$$

Donde D_c es la capacidad de desprendimiento de las partículas del surco (kg/s/m^2), K_c la erodabilidad del surco ($\text{kg}^{1-b} \text{s}^{-1} \text{m}^{-(2-b)} \text{Pa}^{-(1-2b)}$). K_c , τ_c y b son parámetros que se obtienen mediante ajuste empírico. El esfuerzo cortante del flujo τ (Pa) se obtiene mediante la ecuación $\tau = \rho g R S_f$; donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), g la aceleración gravitacional (m/s^2), R_h el radio hidráulico (m) calculado como A/W_p , A el área (m^2), W_p el perímetro húmedo (m), calculado como $w+2h$, h la profundidad del flujo (m) y S_f la pendiente de fricción (m/m). Generalmente, b se asume igual a la unidad en los modelos WEPP y DWEPP (Foster y Meyer, 1972; Nearing, 1989; Bulygina, 2006), mediante la Ecuación (40). En diversos estudios, mediante el uso de una función de potencias se ha obtenido una mejor descripción de D_c (Hollick, 1976; Franti et al., 1999; Zhu et al., 2001), indicada como se indica en la Ecuación (53).

Lu et al., (1989) asignaron un valor cero para τ_c , reduciendo la Ecuación (53) a la siguiente expresión:

$$D_c = K_c (\tau)^b \quad (54)$$

Foster y Meyer (1972) formulan una versión simplificada de la Ecuación (53) expresada como:

$$D_c = K_c \tau^{3/2} \quad (55)$$

Wicks y Bathurst (1996) modificaron la ecuación (53) para el modelo SHE como sigue:

$$D_c = K_c ((\tau/\tau_c) - 1) \quad (56)$$

En esta investigación se han evaluado modelos adicionales para estimar la capacidad de desprendimiento que se basan en modificaciones de las ecuaciones (53) y (56) y un modelo lineal multivariable; incorporando las variables que representan las características físicas de suelo y del flujo, basado en los estudios de la influencia de

estas características por otros investigadores, incluyendo: gravedad específica de partículas sólidas G (Hanson et al., 1999; Sheridan et al., 2000a,b), profundidad y ancho del flujo, pendiente de fricción y temperatura del fluido T (Ariathurai y Arulanandan, 1978; Van Klaveren y McCool, 1998), como se indica en el cuadro 1, con sus respectivos parámetros.

Tabla 1

Ecuaciones propuestas para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento

N°	Ecuación	Parámetros
57	$D_c = K_c \tau (\tau - \tau_c)$	K_c ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-2}$)
58	$D_c = K_c h \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)$	K_c ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$), h (m)
59	$D_c = K_c h S_f \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)$	K_c ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$), S_0 (m m^{-1})
60	$D_c = K_c h w \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)$	K_c ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-4}$)
61	$D_c = K_c \left(\frac{h}{S_f} \right) \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)$	K_c ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$)
62	$D_c = K_c \left(\frac{hG}{S_f} \right) \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)$	K_c ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$)
63	$D_c = K_c h (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
64	$D_c = K_c h S_f (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
65	$D_c = K_c \left(\frac{h}{S_f} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
66	$D_c = K_c \left(\frac{h w T}{S_f} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2}), T ($^{\circ}$)
67	$D_c = K_c \left(\frac{h}{S_f} G \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
68	$D_c = K_c \left(\frac{hG}{S_f} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
69	$D_c = K_c \left(\frac{h w}{S_f} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
70	$D_c = K_c \left(\frac{hG}{S_f^b} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
71	$D_c = K_c \left(\frac{h w}{S_f^b} \right) (\tau - \tau_c)$	K_c (s m^{-2})
72	$D_c = \alpha_1(\tau) + \alpha_2(h) + \alpha_3(w) + \alpha_4(S_f) + \alpha_5(G)$	α_i

Nota. Elaboración propia

Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos. Diversas ecuaciones de la capacidad de transporte se han desarrollado para el transporte de sedimento en ríos y han sido adaptadas para su uso en modelos de erosión en surcos. La elección de la mejor

ecuación es subjetiva, y las opiniones varían sobre cuál es la mejor ecuación (Knapen et al, 2007).

Foster y Meyer (1975) adaptaron la forma simplificada de la ecuación de Yalin (1963) para estimar la capacidad de transporte de los sedimentos y su uso en el modelo WEPP mediante la Ecuación (42). Govers, (1990) emplea el concepto de la potencia de la corriente unitaria, basado en los estudios de Yang, (1979) y propone la Ecuación (48) para estimar T_c . Simons, Li, Fullerton (1981) desarrollaron la Ecuación (50).

Bagnold (1966) propuso que la potencia del flujo suministra la energía para el transporte de los sedimentos. Donde A y B son parámetros que se estiman empíricamente.

$$T_c = \frac{\tau V}{G - 1} \left(A - B \left(\frac{V}{V_f} \right) \right) \quad (73)$$

2.2.9 Modelos de Erosión Ajustados mediante Técnicas de Regresión

2.2.9.1 Ajuste basado en Regresión Lineal Múltiple. El modelo de Regresión Múltiple Lineal (RLM) que se utiliza se basa en la estructura dada por:

$$D_R = \beta_1 P_t + \beta_2 P_{t-1} + \beta_3 P_{t-2} + \dots + \beta_{12} P_{t-6} \quad (74)$$

Donde D_R es la tasa de erosión por flujo (mg/s/m^2) en el tiempo t , β_s representa los coeficientes de regresión a ser determinados; P_s representa la lluvia correspondiente a intervalos de tiempo definidos dentro de una tormenta particular; y t es el índice que representa el tiempo.

2.2.9.2 Ajuste basado en Regresión No Lineal Múltiple. El modelo de Regresión Múltiple No Lineal (RNLM) que se utiliza se basa en la estructura dada por:

$$D_R = \beta_1 P_t^n + \beta_2 P_{t-1}^n + \beta_3 P_{t-2}^n + \dots + \beta_{12} P_{t-11}^n \quad (75)$$

Donde n es el orden de la regresión polinomial. El resto de las variables fueron identificadas con anterioridad.

2.2.10 Ajuste basado en Técnicas de Inteligencia Artificial

Dado que las técnicas de Inteligencia Artificial son relativamente nuevas en el ajuste de los modelos de erosión, se ha creído conveniente llevar a cabo una descripción mas detallada de dichas técnicas.

Según Bishop (1994) y Jain et al., (2002); (2003), las técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales artificiales (RNA) y los sistemas de inferencia difusos (SID) constituyen herramientas eficientes para el modelado y la predicción que están siendo introducidas en la hidrología como modelos de caja negra. En esta investigación se emplean estas herramientas para ajustar algunos de los principales procesos hidrológicos como son lluvia-escorrentía y lluvia-erosión.

2.2.10.1 Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales se componen de elementos simples que operan en paralelo inspirados en el sistema nervioso biológico. Al igual que en la naturaleza, las conexiones entre los elementos determinan en gran medida la función de la red. Una red neuronal puede ser entrenada para realizar una función particular mediante el ajuste de los valores de las conexiones (pesos) entre los elementos. Típicamente, las redes neuronales son ajustadas, o entrenadas, de manera que una entrada particular da lugar a una salida objetivo específica. En la Figura 2 se ilustra tal situación. La red es ajustada, con base en la comparación de la salida y el objetivo, hasta que la salida de la red coincida con el objetivo. (Demuth et al., 2009).

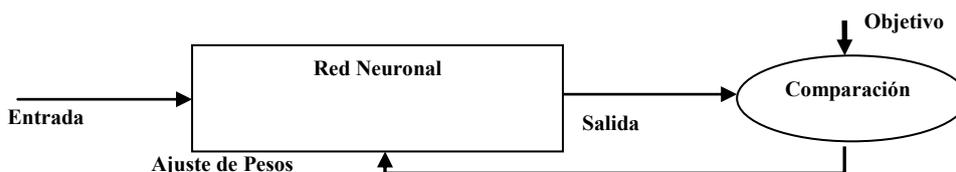


Figura 2. Esquema Entrada/Salida de la red neuronal artificial. Fuente: Demuth (2009)

Modelo de Neurona. Una o más neuronas pueden ser combinadas en una capa, y una red particular puede contener una o más de tales capas. En la Figura 3 se muestra una red de capa única con R elementos de entrada y S neuronas.

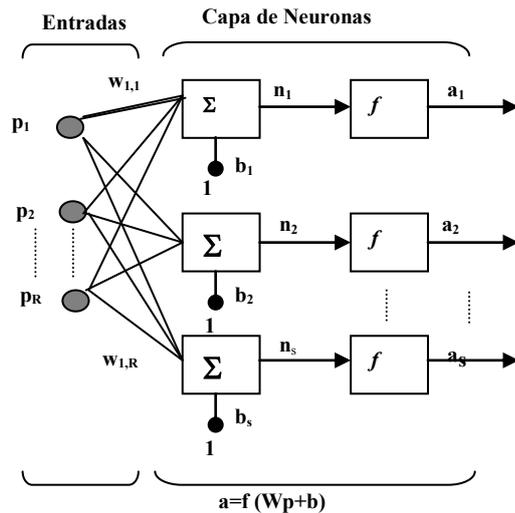


Figura 3. Arquitectura de red de capa única de neuronas. Fuente: Demuth (2009)

En esta red, cada elemento del vector de entrada \mathbf{p} se conecta a cada entrada de la neurona mediante la matriz de pesos \mathbf{W} . Considerando una neurona con un único vector de entrada de R elementos, \mathbf{p} , cada elemento p_1, p_2, \dots, p_R , es multiplicado por los pesos $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$ y los valores ponderados son alimentados a la unión sumatoria, como se muestra en la Figura 3. Esta suma es \mathbf{Wp} , el producto punto de la matriz \mathbf{W} y el vector \mathbf{p} . La neurona tiene un sesgo \mathbf{b} , el cual es sumado con las entradas ponderadas para formar la entrada a la red n . Esta suma, n , es el argumento de la función de transferencia \mathbf{f} que se define como sigue:

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b \quad (76)$$

La Ecuación (76) se puede escribir como:

$$n(i) = \mathbf{Wp} + b \quad (77)$$

Dónde, la *i*ésima neurona tiene un operador de sumatoria que une sus entradas ponderadas y los sesgos para su propio escalar de salida $n(i)$. Los diversos $n(i)$ forman en conjunto un vector de entrada n a la red de S elementos.

La función de transferencia sigmoideal es la que comúnmente se emplea en la redes de propagación hacia atrás, en parte debido a que es diferenciable. En la Figura 4, se muestra que esta función admite cualquier valor de entrada entre más y menos infinito, y la salida varía en un rango entre 0 y 1.

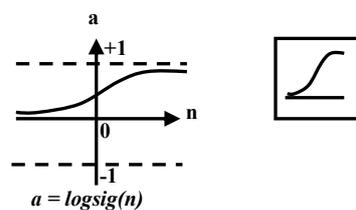


Figura 4. Función de transferencia Log-Sigmoideal. Fuente: Demuth (2009)

Ocasionalmente, la función de transferencia purelin se utiliza en las redes de propagación hacia atrás. En la Figura 5 se muestra la función de transferencia lineal.

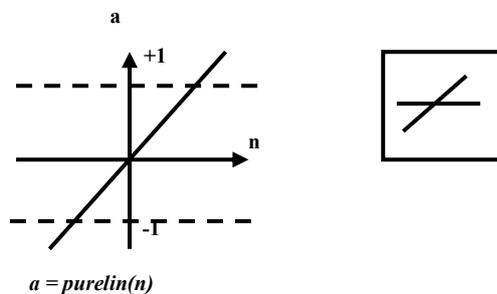


Figura 5. Función de transferencia lineal. Fuente: Demuth (2009)

El símbolo en el recuadro a la derecha de cada gráfica de la función de transferencia representa a la función de transferencia asociada. Estos iconos reemplazan la f general en los recuadros de los diagramas de red para simbolizar la función de transferencia que está siendo utilizada.

Red de Alimentación Progresiva. Las redes de alimentación progresiva con frecuencia tienen una o más capas ocultas de neuronas sigmoideales seguidas por una

capa de salida de neuronas lineales. Múltiples capas de neuronas con funciones de transferencia no lineal permiten que la red aprenda relaciones lineales y no lineales entre los vectores de la entrada y la salida. La capa de salida lineal permite que la red produzca valores fuera del rango de -1 a 1. Para la descripción de redes de capas múltiples, la notación debe ampliarse. Específicamente, se requiere hacer una distinción entre las matrices de los pesos que son conectadas a las entradas y las matrices de los pesos que se conectan entre capas.

En una red puede haber varias capas que emplean matrices de peso de las capas (LW) así como matrices de pesos de las entradas (IW). La red mostrada en la Figura 6 tiene R entradas, S^1 neuronas en la primera capa, y S^2 neuronas en la segunda capa. Una constante de entrada 1 es alimentada como el sesgo de cada neurona. Se debe observar que las salidas de cada capa intermedia son las entradas a la siguiente capa. De ese modo, la capa 2 se puede analizar como una red de capa única con S^1 entradas, S^2 neuronas, y una matriz de pesos $S^2 \times S^1$ representada por W^2 . La entrada a la capa 2 es a^1 ; la salida es a^2 . Una vez que todos los vectores y matrices de la capa 2 han sido identificados, estos pueden tratarse como una red de capa única. Esta aproximación puede ser adoptada con cualquier capa de la red.

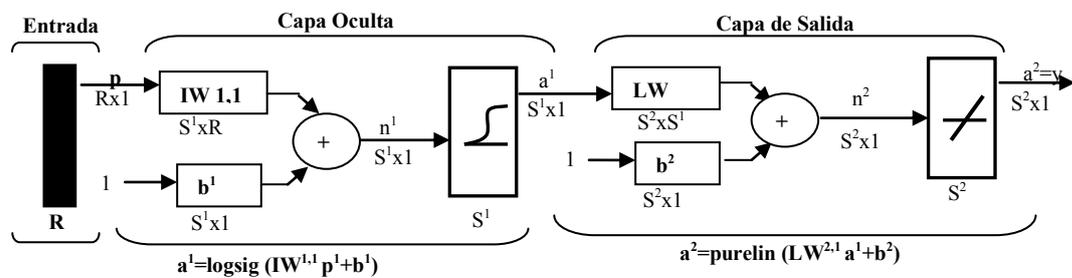


Figura 6. Arquitectura de la red de alimentación progresiva. Fuente: Demuth, (2009)

2.2.10.2 Lógica Difusa

La lógica difusa tiene dos significado, en un sentido restringido, la lógica difusa es un sistema difuso, el cual es una extensión de la lógica multivalor. Sin embargo, en un sentido amplio la lógica difusa es casi sinónimo con la teoría de conjuntos difusos, una teoría que relaciona a las clases de objetos con los límites indefinidos en los cuales la

pertenencia se mide a través de un grado. El enfoque de la lógica difusa es mapear el espacio de la entrada hacia un espacio de salida, y el mecanismo primario para hacer esto es una lista de reglas denominadas sentencias Si-Entonces. Todas las reglas se evalúan en forma paralela, y el orden de las reglas no tiene importancia. La descripción general de un sistema difuso se muestra en la Figura 7 (MATLAB, 2010).

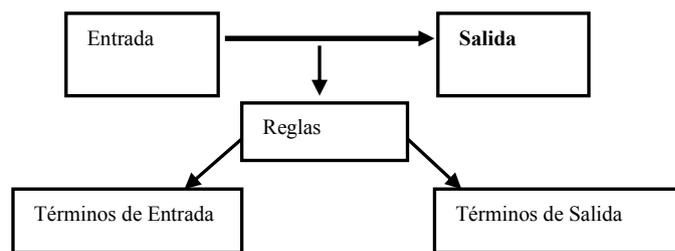


Figura 7. Diagrama de un Sistema de Inferencia Difuso. Fuente: MATLAB, (2010)

Sistema de Inferencia Difuso. La inferencia difusa es el proceso de formulación del mapeo de una entrada determinada hacia una salida empleando lógica difusa. El proceso de inferencia difusa involucra tres componentes: (1) funciones de pertenencia, (2) operaciones lógicas y (3) reglas Si-Entonces. (1) Una función de pertenencia (FP) es una curva que define cómo cada punto en el espacio de entrada es mapeado hacia un valor de pertenencia (o grado de pertenencia) que varía entre 0 y 1. Las funciones de pertenencia comúnmente utilizadas son: funciones lineales, la función de distribución Gaussiana, la curva sigmoideal, las curvas polinómicas cuadráticas y cúbicas, (2) las operaciones lógicas, una correspondencia particular entre operaciones lógicas multivalor y dos valores se puede definir mediante la intersección difusa o conjunción (AND), la unión difusa o disyunción (OR), y el complemento difuso (NOT). (3) Las reglas Si-Entonces se usan para formular las sentencias condicionales.

Dos tipos de sistemas de inferencia difusa se pueden implementar: el tipo Mamdani y el tipo Sugeno. Estos dos tipos de sistemas de inferencia difusa varían de acuerdo con la forma en que las salidas son determinadas. En esta investigación se usa el sistema tipo Sugeno, el cual puede usarse para modelar cualquier sistema de inferencia en el cual las funciones de pertenencia en la salida sean lineales o constantes.

2.2.11 Análisis Estadístico

Un análisis estadístico se lleva a cabo mediante diversos métodos para examinar el desempeño de cada modelo. Los estadísticos empleados son: cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajust}), coeficiente de Mallows (C_p), error estándar de estimación, error medio absoluto (EMA), coeficiente de Durbin Watson (d), error porcentual medio absoluto (EPMA), error medio (EM), error porcentual medio (EPM). Los estadísticos de la calibración serán comparados con los estadísticos de la validación del modelo para determinar qué tan bien el modelo predice las observaciones excluyendo los datos usados para la calibración. Una descripción de estas relaciones en textos de estadística.

2.2.11.1 Residuo. Diferencia entre y_i el valor observado de la variable dependiente Y, y el valor estimado con el modelo ajustado \hat{y}_i . Se expresa como:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (78)$$

2.2.11.2 Error Cuadrático Medio (ECM). Es una estimación de la varianza de las desviaciones con respecto al modelo ajustado, dada por:

$$CME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1} \quad (79)$$

Donde p es el número de variables independientes incluidas en el modelo.

2.2.11.3 Coeficiente de Determinación (R^2). Se interpreta como la proporción de la variabilidad en los datos (Y) que es explicada por el modelo.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (80)$$

2.2.11.3 Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2_{ajust}). Se emplea para comparar modelos con diferente número de variables independientes, ya que no disminuye aunque se agreguen al modelo variables no relacionadas. Se expresa como:

$$R^2_{ajust} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (81)$$

2.2.11.4 Coeficiente de Mallows (C_p). El estadístico C_p de Mallows se obtiene como:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{CME} - (n-2p) \quad (82)$$

Donde CME es el cuadrado medio del error del modelo cuando todas las variables independientes están incluidas en el ajuste. Si el modelo ajustado tiene poco sesgo, el valor de C_p debería aproximarse a p . Es deseable obtener un valor pequeño de C_p , siempre que no sea mucho mayor que p .

2.2.11.5 Error Estándar de Estimación. Es una estimación de la desviación estándar del error, expresado como:

$$s_{y.X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-2}} \quad (83)$$

2.2.11.6 Error Medio Absoluto. Valor absoluto promedio de los residuos, obtenido como:

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (84)$$

2.2.11.7 Estadístico de Durbin-Watson. El estadístico de Durbin Watson se obtiene como:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (e_i)^2} \quad (85)$$

Donde e_i , $i=1,2,\dots,n$, son los residuos ordenados en el tiempo. La prueba de Durbin-Watson detecta sólo la estructura de correlación de residuos consecutivos.

2.2.11.8 Autocorrelación Residual de Retardo 1. Es una correlación estimada entre residuos consecutivos, en una escala entre -1 y 1. Valores alejados del 0 indican que en el modelo queda una estructura significativa sin explicar.

2.2.11.9 Indicadores Locales de Asociación Espacial

A continuación se describen los estadísticos como Índice de Moran y el Índice de Gettis-Ord, los cuales miden si existen agrupaciones significativas de valores similares o diferentes, así como si existen agrupaciones significativas de valores máximos o mínimos, respectivamente. El conocimiento obtenido a través de estos índices permite: (1) apreciar el grado de homogeneidad de la muestra de datos que será utilizada en las etapas de calibración, validación y prueba de los modelos, (2) vincular el grado de ajuste de los datos a los modelos con una ubicación geográfica y una posible explicación física y (3) efectuar algunas recomendaciones de carácter operativo con base en el patrón de asociación espacial que muestren los datos. La aplicación de estas herramientas estadísticas se realiza en esta investigación sobre los datos de la infiltración de los suelos, la cual es una de las principales variables intervinientes en los procesos de erosión hídrica de suelos.

Un indicador local de asociación espacial es un estadístico que satisface los dos requerimientos siguientes: (1) para cada observación proporciona un índice de la magnitud de la agrupación espacial significativa de valores similares alrededor de una observación y (2) la suma de los indicadores de asociación espacial para todas las observaciones es proporcional a un indicador global de asociación espacial (Anselin, 1995). En términos generales, un indicador de asociación espacial para una variable y_i , observada en una ubicación i , se puede expresar como un estadístico L_i , tal que:

$$L_i = f(y_i, y_{J_i}) \quad (86)$$

Donde f es una función y los y_{J_i} son los valores observados en la vecindad J_i de i .

Los valores de y usados en el cálculo del estadístico pueden ser las observaciones originales o una estandarización de éstas a fin de evitar la dependencia de la escala de los indicadores locales. La vecindad J_i para cada observación, se define por las medias de los pesos espaciales o la matriz de contigüidad, W . Las columnas con elementos no nulos en una fila determinada de esta matriz indican la relevancia de los vecinos para las observaciones que corresponden a la fila. Los criterios que se emplean para definir los vecinos son la contigüidad de primer orden y el umbral de distancia crítica. La matriz de pesos espaciales podría estandarizarse por filas (tal que sus filas sumen uno) para facilitar la interpretación de los estadísticos, pero esto no es un requisito. Sin embargo, cuando la estandarización por filas se lleva a cabo, la función $f(y_i, y_{J_i})$ corresponde a una forma de promedios ponderados de los valores de todas las observaciones $j \in J_i$.

El L_i debería ser tal que sea posible inferir la significancia estadística del patrón de asociación espacial en la ubicación i . Esto requiere establecer lo siguiente:

$$Prob[L_i > \delta_i] \leq \alpha_i \quad (87)$$

Donde δ_i es un valor crítico, y α_i es una significancia elegida, como el resultado de la prueba de aleatorización.

El segundo requerimiento de un indicador local de asociación espacial es su relación a un estadístico global, que puede establecerse como:

$$\sum_i L_i = \gamma \Lambda \quad (88)$$

Donde Λ es un indicador global de asociación espacial y γ es un factor de escala. La suma de los indicadores locales es proporcional al indicador global. Esto requiere establecer lo siguiente:

$$Prob[\Lambda > \delta] \leq \alpha \quad (89)$$

Indica una asociación espacial significativa sobre todo el conjunto de datos.

2.2.11.9.1 Índice Local de Moran

El Índice Moran Local es un caso especial del índice Gamma Local, Γ , definido en Mantel (1967). El Gamma consiste en la suma del producto cruzado de los elementos coincidentes a_{ij} y b_{ij} en dos matrices de similitud, denominadas A y B , está dado por:

$$\Gamma = \sum_i \sum_j a_{ij} b_{ij} \quad (90)$$

El estadístico local de Moran para una observación i se define como:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (91)$$

Donde las observaciones z_i, z_j son desviaciones de la media, y la sumatoria sobre j es tal que sólo se incluyen los valores vecinos $j \in J_i$. Para facilitar la interpretación, los pesos w_{ij} pueden ser la forma estandarizada de las filas, aunque esto no es requisito, y por convención, $w_{ii}=0$. El estadístico global correspondiente es:

$$\sum_i I_i = \sum_i z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (92)$$

El índice de Moran es:

$$I = (n/S_0) \sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j / \sum_i z_i^2 \quad (93)$$

O

$$I = \sum_i I_i / [S_0 (\sum_i z_i^2 / n)] \quad (94)$$

Donde $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$, y tomando $m_2 = \sum_i z_i^2 / n$ como el segundo momento, el factor de proporcionalidad entre la suma de Moran Global y local es, en la notación de la Ecuación (93):

$$\gamma = S_0 m_2 \quad (95)$$

Para la matriz de pesos espaciales estandarizados por fila, $S_0 = n$, de manera que $\gamma = \sum_i z_i^2$, y para las variables estandarizadas, $m_2 = 1$, de forma que, $\gamma = S_0$. El mismo tipo de resultado se obtiene si en la Ecuación (90) cada indicador local se divide por m_2 , el cual es una constante para todas las localizaciones. El índice local de Moran se calcularía como:

$$I_i = (z_i / m_2) \sum_j w_{ij} z_j \quad (96)$$

Los momentos para I_i pueden ser derivados empleando los principios definidos en Cliff y Ord, (1981). Empleando la Ecuación (88), el valor esperado de I_i bajo la hipótesis de aleatorización es:

$$E[I_i] = (\sum_j w_{ij} / m_2) E[z_i z_j] \quad (97)$$

El valor de la esperanza es:

$$E[z_i z_j] = -m_2 / (n - 1) \quad (98)$$

Basado en Cliff y Ord, (1981). Consecuentemente, el valor esperado de I_i se convierte en:

$$E[I_i] = -w_i / (n - 1) \quad (99)$$

Con w_i como la suma de los elementos de la fila, $\sum_j w_{ij}$. En caso de usar una matriz de pesos estandarizada por fila, la suma será uno.

Para la obtención del segundo momento, la siguiente expresión deberá ser evaluada:

$$E[I^2] = (1/m_2^2) E \left[z_i^2 (\sum_j w_{ij} z_j)^2 \right] \quad (100)$$

o

$$E[I^2] = (1/m_2^2) E \left[z_i^2 (\sum_{j \neq i} w_{ij}^2 z_j^2 + \sum_{k \neq i} \sum_{h \neq i} w_{ik} w_{ih} z_k z_h) \right] \quad (101)$$

Para el cual los siguientes resultados son importantes, basados en Cliff y Ord (1981):

$$E[z_i^2 z_j^2] = (nm_2^2 - m_4) / (n - 1) \quad (102)$$

$$E[z_i^2 z_k z_h] = (2m_4 - nm_2^2) / (n - 1)(n - 2) \quad (103)$$

Con $m_4 = \sum_i z_i^4 / n$ como el cuarto momento. Los primeros términos de pesos en la esperanza de todos los cuadrados de los pesos, o, $w_{i(2)} = \sum_{j \neq i} w_{ij}^2$, y el segundo es el doble de la suma de los productos cruzados, o, $2w_{i(kh)} = \sum_{k \neq i} \sum_{h \neq i} w_{ik} w_{ih}$. Luego de la combinación de términos, el segundo momento se encuentra como:

$$E[I_i^2] = (1/m_2^2) \left[w_{i(2)} (nm_2^2 - m_4)/(n-1) + 2w_{i(kh)} (2m_4 - nm_2^2)/(n-1)(n-2) \right] \quad (104)$$

La cual se simplifica luego de usar $b_2 = m_4/m_2^2$, para:

$$E[I_i^2] = w_{i(2)} (n - b_2)/(n - 1) + 2w_{i(hk)} (2b_2 - n)/(n - 1)(n - 2) \quad (105)$$

Consecuentemente, la varianza de I_i es:

$$Var[I_i] = w_{i(2)} (n - b_2)/(n - 1) + 2w_{i(hk)} (2b_2 - n)/(n - 1)(n - 2) - w_i^2/(n - 1)^2 \quad (106)$$

Un valor positivo para el Índice Local de Moran (I_i) indica un agrupamiento espacial de valores *similares* (altos o bajos), y un valor negativo indica un agrupamiento espacial de valores diferentes (una ubicación con valores altos rodeada por vecinos con valores bajos)

2.2.11.9.2 Estadístico Getis y Ord (G_i)

El estadístico G_i para una observación i se define como:

$$G_i = \sum_j w_{ij}(d) z_j / \sum_j z_j \quad (107)$$

Donde $w_{ij}(d)$ son los elementos en la matriz de pesos basada en la distancia, (para detalles, ver Getis y Ord, (1992)). El único aspecto de la Ecuación (107) que cambia con cada permuta es el numerador, ya que el denominador no depende de la asignación espacial de las observaciones. Visiblemente, este es el mismo término como la parte variante del numerador en la Ecuación (96). En otras palabras, los niveles de significancia generados con un enfoque de permutación aplicados al estadístico I_i serán idénticos para G_i . Para el estadístico G_i^* (como un valor z estandarizado), un valor positivo indica un agrupamiento espacial de valores altos, y un valor negativo un agrupamiento espacial de valores bajos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Investigación

Esta investigación se considera correlacional explicativa, es correlacional debido a que tiene como propósito evaluar la relación que existe entre los factores climáticos, topográficos y edáficos en la erosión y el transporte de sedimentos, así como explicativa porque responde a las causas de los fenómenos físicos mencionados, de acuerdo con Hernández *et al.*, (2003), UPEL (2005). También se puede definir como una investigación de campo y laboratorio por las diferentes actividades llevadas a cabo en cada instancia.

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es del tipo no experimental; ya que las observaciones relacionadas a los factores climáticos, edáficos, topográficos y de manejo fueron realizadas como se dan en las zonas de uso agrícola localizadas dentro de la cuenca de estudio, lo que quiere decir que no se manipulan deliberadamente las variables, como se indica en Hernández *et al.*, (2003). Según UPEL (2005), la investigación es de campo-experimental.

3.3 Población y Muestra

En esta investigación se realizó un muestreo probabilístico por racimos o conglomerados, (Hernández et al., 2003; Puertas et al., 1998), utilizando las parcelas agrícolas como racimos, es decir, como unidades muestrales, a partir de las cuales se seleccionaron los sitios de muestreo o unidades de análisis donde se recolectaron datos sobre infiltración, escorrentía, erosión, y características físicas de suelo.

El tamaño de la muestra se estableció tomando en cuenta los cálculos para un muestreo probabilístico simple, en dos pasos:

1. Cálculo del tamaño provisional de la muestra

$$n' = \frac{S^2}{V^2} = \frac{\text{Varianza de la muestra}}{\text{Varianza de la población}} \quad (108)$$

2. Cálculo del tamaño de la muestra

$$n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}} \quad (109)$$

Donde n' es el tamaño de la muestra sin ajustar, V^2 es la varianza de la población definida, S^2 es la varianza de la muestra expresada como la probabilidad de ocurrencia de la media, n es el tamaño de la muestra y N es el tamaño de la población.

3.4 Técnicas de Recolección de datos y Análisis de Información

Los datos se recolectan considerando los procedimientos y criterios siguientes:

1. Selección de la muestra en el enfoque cuantitativo
2. Selección de los sitios de muestreo de suelos
3. Selección de la escala del levantamiento de suelos
4. Selección de la profundidad del muestreo
5. Calidad de la muestras

La selección de los sitios para realizar las pruebas de infiltración, medición de la escorrentía y captación de las muestras para los ensayos de las propiedades físicas del suelo y el agua se llevó a cabo aplicando un muestreo probabilístico por conglomerados en dos etapas, asumiendo un error estándar igual a 0.015 y una probabilidad de ocurrencia de 99%. En la primera etapa se seleccionaron los racimos y en la segunda, los sujetos de medición dentro de cada racimo. La selección se hizo al azar (Hernández, 2003). Los racimos vienen a ser las parcelas agrícolas y los sujetos de medición, los sitios en los cuales se llevaron a cabo las pruebas mencionadas, definidos por las intersecciones en una malla constituida por cuadrículas. La malla permitió un registro preciso de la posición de un lugar (Hodgson, 1987). Las dimensiones de las cuadrículas se fijaron utilizando el criterio del Soil Survey Division Staff (1993), según el cual, para estudios experimentales la mínima área delimitada debe ser de una hectárea. La malla se superpuso a un ortofotomapa digital usando la versión 9.3 de ArcGIS. Se hizo corresponder los ortofotomapas con las hojas oficiales de Cartografía Nacional 6546-I-SO y 6546-I-NO, con escala variable entre 1:1000 y 1:50000. Se empleó un equipo de posicionamiento global para obtener las coordenadas geográficas de los puntos de medición.

En cuanto a la caracterización física de los suelos se realizó un muestreo a profundidades que variaron desde 0 hasta 30 cm y desde 30 hasta 60 cm siguiendo las

indicaciones de Pla (1977). Se tomaron muestras perturbadas para la determinación del contenido de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica, análisis de tamizado o distribución del tamaño del grano y características de compactación. Las muestras no perturbadas se usaron para realizar pruebas de esfuerzo y conductividad hidráulica saturada, de acuerdo con US Army Corps of Engineers (2001).

3.5 Fases de la Investigación

La investigación se llevó a cabo en las siguientes fases:

1. Selección del área experimental
2. Recolección de los datos existentes y evaluación de los estudios previos en la cuenca experimental
3. Implementación del área piloto. Instalación de la red de monitoreo
4. Desarrollo de un programa de observación y monitoreo en sitio para la medición de las lluvias, caudal, erosión y sedimentación, propiedades del suelo y vegetación y propiedades fisiográficas de la región.
5. Evaluación de la aplicabilidad de los modelos existentes de erosión/sedimentación al área experimental.
6. Procesamiento e interpretación de los datos colectados
7. Desarrollo de un modelo para una subcuenca del embalse Pao-Cachinche que permita evaluar la sensibilidad de las diferentes medidas de Conservación/Protección para el control de la erosión/sedimentación.
8. Lineamientos sobre el plan de manejo de la cuenca, utilizando el modelo de erosión de la cuenca.

A continuación se describe brevemente cada una de las fases indicadas.

3.5.1 Selección del Área Experimental

La selección del área experimental se basó en la información suministrada por HIDROCENTRO y el Ministerio de Agricultura y Tierras, la cual se describe a continuación:

A través de HIDROCENTRO se obtuvo la representación de la red hídrica que conforma la cuenca del embalse Pao-Cachinche. La cuenca de embalse está integrada por los siguientes ríos de acuerdo con su ubicación: el río Paito circula a través de los Municipios Valencia y Libertador. Los siguientes tres ríos: Paya, Pira Pira y San Pedro se encuentran ubicados dentro de la región del Municipio Libertador. La quinta vertiente al embalse es el río Chirgua, cuya red hídrica se encuentra ubicada en su totalidad dentro del Municipio Bejuma, más detalles se presentan en la Figura 1 del Anexo I.

El Ministerio de Agricultura y Tierras proporcionó reportes anuales, donde se han especificado los planes de siembra en el Estado Carabobo durante el período desde 2000 hasta 2009 (MAT, 2000-2009). A partir de estos datos, se seleccionaron los rubros del sector agrícola vegetal que requieren un suministro de agua con una alta intensidad y frecuencia, aportada bien sea por la lluvia natural o artificial (riego) como es el caso del maíz (*Zea Mays*) y la papa (*Solanum Tuberosum*). La variabilidad temporal en términos de la superficie sembrada con maíz en hectáreas anualmente indica que el Municipio Bejuma se distingue del resto por presentar una notable permanencia de la actividad de la siembra de durante el período comprendido entre 2000 y 2008, la cual varía entre 200 y 1000 ha. En cuanto a los Municipios Valencia y Libertador parece existir un patrón en la siembra, el cual se manifiesta mediante una estacionalidad de dos años, más detalles se presentan en las Figuras 2 y 3 del Anexo II.

La serie de tiempo para la superficie sembrada con papa (*Solanum Turosum*) expresada en hectáreas en el Municipio Bejuma, Estado Carabobo, indica que existe notable regularidad en la siembra en el período que abarca desde el año 2000 hasta el 2008, más detalles se presentan en la Figura 3 del Anexo II. Según el MAT, (2006) la superficie sembrada con papas en la parroquia no urbana Simón Bolívar del Municipio Bejuma varió entre 500 y 1100 ha durante el período desde 1995 hasta 2006, más detalles se presentan en la Figura 4 del Anexo II.

Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que la parroquia no urbana Simón Bolívar ubicada Municipio Bejuma del Estado Carabobo debe seleccionarse para desarrollar la investigación sobre los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos, debido a que en ésta se aplica una técnica de cultivo en forma rotativa permanente en el tiempo. Desde el enfoque de los límites de la cuenca, la zona de estudio está delimitada por la cuenca del río Chirgua, más detalles se presentan en la Figura 1 del Anexo I. En consecuencia, el área experimental corresponde a las parcelas agrícolas ubicadas en la cuenca del río Chirgua, ubicado dentro de la parroquia Simón Bolívar, Municipio Bejuma, Estado Carabobo.

El área experimental en la parroquia Simón Bolívar está integrada por seis sectores: Cariaprima, El León, Potrerito, La Colonia, La Paredaña y Casupito, cuya ubicación geográfica, área y usos de la tierra se muestran en la Tabla 2. Se obtuvo la autorización de los productores agrícolas para realizar las pruebas en su propiedad, más detalles se presentan en los Anexos III y IV. .

Tabla 2***Ubicación y Usos de la Tierra de los Sectores en la Cuenca del Río Chirgua***

Sector N°	Ubicación				Área (ha)	Usos de la tierra			
	Coordenada Norte		Coordenada Oeste			% Agrícola	% Avícola	% Residencial	Otros
Cariaprima	10° 13' 55"	10° 15' 00"	68° 12' 10"	68° 11' 05"	244,38	95,3	2,7	2	0
Potrerito	10° 13' 00"	10° 14' 00"	68° 11' 10"	68° 12' 00"	209,21	87,99	4,46	6,13	1,42
El León	10° 10' 10"	10° 11' 50"	68° 11' 10"	68° 10' 20"	320,64	93,04	0,74	6,22	0
La Paredaña	10° 12' 25"	10° 13' 10"	68° 11' 10"	68° 11' 50"	131,74	83,33	5,56	16,67	0
La Colonia	10° 12' 18"	10° 15' 45"	68° 11' 67"	68° 15' 07"	250,64	94,04	0,84	7	0
Casupito	10° 11' 50"	10° 12' 20"	68° 11' 30"	68° 10' 30"	162,58	77,78	5,56	16,66	0
Total					1319,19				
Promedio						88,58	3,31	9,11	1,42

3.5.2 Recolección de Datos Existentes y Evaluación de Estudios Previos de la Cuenca Experimental

La recolección de la información básica y de los estudios previos sobre la cuenca se llevó a cabo mediante visitas a HIDROCENTRO, Ministerio de Agricultura y Tierras, Ministerio del Ambiente; obteniendo información cartográfica, registros históricos de producción agrícolas y datos meteorológicos

3.5.3 Implementación del Área Experimental y de la Red de Monitoreo

La red de monitoreo consistió en la instalación de un pluviógrafo en la zona y la elección de una muestra representativa de parcelas agrícolas en cada uno de los seis sectores indicados en la Tabla 2, en los cuales se realizaron las mediciones de lluvia, infiltración, escorrentía, propiedades físicas de suelo y erosión. A continuación se presenta una breve descripción de los métodos que se emplearon para la medición de las variables de interés en la investigación.

3.5.3.1 Precipitación. La precipitación en forma de lluvia se midió mediante un pluviómetro conectado a un sistema electrónico de almacenamiento en la estación La Paredaña, ubicada en la posición geográfica W-68°10'50" y N-10°11'45".

3.5.3.2 Propiedades Físicas del Flujo. Se eligieron cinco parcelas con las siguientes pendientes (en dirección de la labranza): 0,008±0,0055 m/m; 0,01±0,00197 m/m; 0,015±0,0006 m/m; 0,025±0,0033 m/m y 0,13±0,0156 m/m. La variación espacial de las pendientes medidas en las parcelas agrícolas de la cuenca indica que existe predominancia en el orden en el cual fueron mencionadas arriba, más detalles se presentan en la Figura 6 del Anexo V. Se realizaron mediciones entre dos y tres surcos/parcela. El conjunto total de los eventos medidos fue 24 eventos de riego/parcela, con un total de 120 eventos de riego (5 parcelas x 24 eventos/parcela=120 eventos de riego). La escorrentía fue medida usando el método volumétrico; registrando el tiempo que tarda un recipiente de volumen conocido en llenarse. El transporte de los sedimentos fue medido usando un muestreador de punto en un lugar fijo de la corriente constantemente durante el tiempo que tardó la botella en llenarse. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio para determinar los sólidos totales (2540 B) (American Public Health Association, 1995), más detalles sobre el muestreo se presentan en la Tabla 1 del Anexo VI.

3.5.3.3 Propiedades Físicas de Canales. Se emplearon materiales como cintas métricas y niveles para medir longitudes y pendientes. La pendiente se determinó como la relación entre la diferencia de nivel entre dos puntos y la distancia horizontal entre esos dos puntos, el nivel fue medido con reglas graduadas de 6 m de altura (miras) y la distancia entre los puntos a lo largo del surco con cinta métrica, aplicando un método artesanal, más detalles se dan en el Anexo VII.

3.5.3.4 Propiedades Físicas del Suelo. Las características de suelo requeridos para la modelación se obtuvieron mediante los siguientes métodos estándar: (1) Contenido

de Humedad (ASTM D2216), (2) Límites de Atterberg (ASTM D4318), (3) Análisis por tamizado (ASTM D422), (4) Análisis por Hidrómetro (ASTM D422), (5) Clasificación (ASTM D2487), (6) Gravedad Específica (ASTM D854), (7) Conductividad Hidráulica – Permeabilidad con carga variable (ASTM D5084), (8) Esfuerzo cortante directo-consolidado-drenado (ASTM D3080) y (9) Permeabilidad con carga constante (ASTM D2434), más detalles se presentan en el Anexo VIII y en la Tabla 2 del Anexo IX.

3.5.3.5 Infiltración. Se usó el método del infiltrómetro con dos cilindros concéntricos y un dispositivo para medir agua (colocado en el cilindro interno), más detalles se presentan en el Anexo VIII y en la Tabla 3 del Anexo X.

3.5.4 *Desarrollo de un Programa de Observación y Monitoreo en Sitio*

El programa de observación y monitoreo en sitio consistió en; realizar salidas de campo para medición de características físicas de canales y recolección de muestras para determinación de características físicas de suelo y del flujo en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua, durante el lapso comprendido entre 2008 y 2009.

3.5.5 *Evaluación de los Modelos Existentes para la Estimación de la Erosión y el Transporte de Sedimentos*

Se evaluaron los siguientes modelos de erosión y transporte de sedimentos evaluados fueron los siguientes: modelos basados en procesos físicos, tales como WEPP (Flanagan et al., 2001), y EUROSEM (Morgan et al., 1998); modelos basados en regresiones y técnicas de inteligencia artificial, tales como Redes Neuronales Artificiales y Sistemas de Inferencia Difuso.

3.5.6 Desarrollo de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos para la Cuenca Experimental

Sobre la base de los resultados de la actividad 5 se desarrollan diversas opciones dentro de los modelos basados en procesos físicos, en regresiones y las técnicas de inteligencia artificial. Las opciones incluyen ajustes de los modelos para: (1) eventos de lluvia de una y dos horas de duración, (2) eventos de riego de dos horas de duración para el conjunto total de datos y (3) eventos de riego de dos horas de acuerdo con la pendiente de los surcos. Esta distinción se hizo con base en la alta variabilidad encontrada entre los datos correspondientes a los eventos de lluvia en relación con los provenientes de eventos de riego, así como con el propósito de encontrar mejores ajustes a las observaciones de campo.

Siguiendo la clasificación de los datos indicada, se realizó el siguiente procesamiento preliminar para obtener los datos correspondientes a los eventos lluvia-erosión requeridos para los ajustes de los modelos.

Determinación de los hidrogramas unitarios de 1 hora y 2 horas basados en treinta y seis hidrogramas de escorrentía directa para tormentas de lluvia artificial de 2 horas.

1. ***Determinación de los erodogramas unitarios de 1 hora y 2 horas*** calculados a partir de las ordenadas de los hidrogramas unitarios de 1 hora y 2 horas y la concentración de los sólidos totales cada veinte minutos.
2. ***Cálculo de la lluvia efectiva de 1 hora y 2 horas.*** Se usaron setenta y tres tormentas de lluvia de 2 horas y 24 tormentas de lluvias de 1 hora, tomando seis valores de lluvia total (en mm) correspondientes a intervalos de 10 y 20 minutos cada uno, para cada tormenta de lluvia de 1 hora y 2 horas, respectivamente. El modelo de infiltración de Philip calibrado con 496 datos puntuales por Márquez y Guevara, (2010) fue empleado para calcular la

infiltración en cada intervalo de tiempo y el resultado fue sustraído de la lluvia total para obtener la “lluvia efectiva” en cada intervalo de tiempo. La suma de seis valores de “lluvia efectiva” da la “lluvia efectiva total” durante eventos de 1 hora y 2 horas.

3. **Obtención de los erodogramas** calculados como el producto de las ordenadas de los erodogramas unitarios de 1 hora y 2 horas y la lluvia efectiva de 1 hora y 2 horas. Se generaron 144 erodogramas para eventos de una hora y 438 erodogramas para eventos de dos horas.
4. **Validación.** Se usaron 162 puntos de datos experimentales y 300 datos puntuales de riego para validar los resultados correspondientes a los erodogramas de 1 hora y 2 horas.

Datos usados para el Ajuste de los Modelos.

Los datos empleados para el ajuste fueron: 144 para lluvias de una hora, y 438 para lluvias de dos horas y 300 para eventos de riego. El resto de las mediciones sobre características físicas del flujo y del suelo, se detallan en la Tabla 4 del Anexo XI. Cada conjunto de datos fue dividido como sigue: 60% para la calibración, 20% para la validación y 20% para la prueba.

Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos Basados en Procesos Físicos.

Los valores óptimos de los parámetros se estiman usando el algoritmo de Marquardt mediante el procedimiento de mínimos cuadrados.

Modelos de Erosión Ajustados mediante Técnicas de Regresión. Los valores óptimos de los parámetros se estiman usando el algoritmo de Marquardt mediante el procedimiento de mínimos cuadrados.

Ajustes mediante Técnicas de Inteligencia Artificial

Ajustes mediante Redes Neuronales Artificiales. Se realizaron tres pruebas para lograr el mejor ajuste: (1) reiniciar los pesos de la red y sesgos y entrenar nuevamente, (2) incrementar el número de neuronas ocultas y (3) incrementar el número de vectores de entrenamiento. El modelo de RNA final consiste de tres capas: una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Una estructura de 6-N-6 es empleada con 20 neuronas ocultas (6-20-6), donde se incluyen seis valores de la lámina de lluvia y seis valores de la erosión ocurridos dentro de cada evento de lluvia natural.

Ajustes mediante Sistema de Inferencia Difusa. El proceso de inferencia involucró cuatro pasos:

1. *Fusificación* de las entradas mediante la determinación del grado en el cual cada elemento pertenece a cada uno de los conjuntos difusos de las funciones de pertenencia: lineales, distribución Gaussiana, sigmoideal, polinómicas cuadráticas y cúbicas.
2. *Generación del sistema de inferencia difuso (SID)* mediante la determinación de las funciones de pertenencia, lineal para la salida del SID y el operador AND, se probaron dos alternativas: una con dos funciones de pertenencia y la otra, con 3 funciones de pertenencia, más detalles se presentan en la Figura 7 del Anexo XII y en la Tabla 5 del Anexo XIII
3. *Entrenamiento del SID.* El método de optimización de parámetros elegido para entrenar al SID fue propagación hacia atrás. El error de entrenamiento más bajo se obtuvo mediante la combinación de dos funciones de pertenencia para cada variable de entrada. Los errores de entrenamiento varían en un rango entre 2.3172 y 2.7162 (que no difiere significativamente). El criterio para seleccionar la función de pertenencia se basó en la elección de aquella función que suministra errores pequeños en las fases de validación y prueba. El SID generado

consistió de dos funciones de pertenencia trapezoidal seleccionadas para cada vector de entrada, más detalles se presentan en la Tabla 5 del Anexo XIII. En el Anexo XIV se muestran los datos del entrenamiento como círculos superpuestos con el SID de salida.

4. *Validación y prueba del SID entrenado.* Los datos de la validación y el modelo SID entrenado, indican que existe una ligera discrepancia entre los datos de la validación y la salida del SID entrenado; mientras que la representación de los datos de prueba y el modelo SID entrenado es satisfactoria, más detalles se presentan en las Figuras 8, 9 y 10 del Anexo XIV.

3.5.7 Implementación del Modelo

El modelo se implementó en el centro de cómputo de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo con la participación de co-investigadores de la Escuela de Ingeniería Civil. Posteriormente se implementaran en el CIHAM-UC.

3.5.8 Lineamientos sobre el Plan de Manejo de la Cuenca, utilizando el Modelo de Erosión de la Cuenca

Se establecieron lineamientos para aplicar un plan de manejo de la cuenca, mediante la utilización del modelo de erosión de la cuenca; seleccionando métodos de control de la erosión enfocadas principalmente hacia la disminución del esfuerzo cortante y la velocidad del flujo.

3.6 Planteamiento de Hipótesis

En esta investigación se aplicaron tres tipos de hipótesis: de estimación, de correlación y de diferencias de medias u otros valores. Hernández et al., (2003). En la

Tabla 3 se indican las hipótesis que se plantearon en el marco de los objetivos de la investigación, que se describen a continuación.

3.6.1 Caracterización de las Variables de los Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos

Factor climático: Precipitación (P).

Se empleó una hipótesis estadística de diferencia entre grupos, ya que se comparó la lluvia total caída durante cada tormenta en el periodo 2007-2009.

Hipótesis Nula (Ho). Los valores de la precipitación total (P) son iguales durante cada tormenta ocurrida durante 2007-2009 si se encuentran dentro de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{H_0: P_1=P_2=\dots P_n}$$

Para n = 117 tormentas

Hipótesis Alternativa (Ha). Los valores de la precipitación acumulada son diferentes durante cada tormenta ocurrida durante 2007-2009 si se encuentran fuera del intervalo de 95% de confianza.

$$\mathbf{H_a: P_1 \neq P_2 \neq \dots P_n}$$

Para n = 117

Factor Edáfico: Tamaño Medio de Partícula (d_m)

Se empleó una hipótesis estadística de diferencia entre grupos, debido a que se realizó la comparación entre grupos de tamaños medios de partículas (diámetro) encontrados en dos estratos del suelo de las parcelas experimentales.

Hipótesis Nula (H_0). Los diámetros medios de las partículas de las muestras de suelo analizadas para los estratos de 0-20, 20-40 son iguales si se encuentran dentro de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{H_0: } d_{m10} = d_{m20} = \dots d_{m40}$$

Hipótesis Alternativa (H_a). Los diámetros resultantes de las muestras de suelo analizado para los estratos de 0-20, 20-40 difieren si se encuentran fuera de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{.H_a: } d_{m10} \neq d_{m20} \neq \dots d_{m40}$$

Factor Topográfico: Pendiente (S)

Se empleó una hipótesis de diferencia entre grupos, debido a que se realizó la comparación entre grupos de tamaños de pendientes de canales o surcos encontrados en las parcelas experimentales.

Hipótesis Nula (H_0). Todos los valores de las pendientes de los surcos medidas en campo son iguales si se encuentran dentro de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{H_0: } S_1 = S_2 = \dots S_{32}$$

Hipótesis Alternativa (H_a). Todos los valores de las pendientes medidas en campo difieren si se encuentran fuera de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{H_0: } S_1 \neq S_2 \neq \dots S_{32}$$

Factor de Manejo: Caudal de Aplicación de Agua al Surco (Q)

Se empleó una hipótesis estadística de diferencia entre grupos ya que se compararon los caudales medidos dentro de cada evento de lluvia natural o artificial.

Hipótesis Nula (Ho). El comportamiento de los valores de los caudales medidos para tiempos de 0, 15, 30, 45 y 60 min por cada surco es igual si se encuentran dentro de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{Ho: Q_0 = Q_{15} = \dots = Q_{60}}$$

Hipótesis Alternativa (Ha). El comportamiento de los valores de los caudales medidos a un tiempo de 0, 15, 30, 45 y 60 minutos por cada surco difieren si se encuentran fuera de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{Ha: Q_0 \neq Q_{15} \neq \dots \neq Q_{60}}$$

Características Físicas del Flujo en el Surco: Concentración de Sedimentos (ST)

Se empleó una hipótesis estadística de diferencia entre grupos, ya que realizó una comparación semanal de los valores de la concentración de los sedimentos

Hipótesis Nula (Ho). Los valores de concentración de sedimento (ST) son iguales si se encuentran dentro de un intervalo del 95% de confianza.

$$\mathbf{Ho: ST_1 = ST_2 = \dots = ST_n}$$

Hipótesis Alternativa (Ha). Los valores de concentración de sedimento difieren si se encuentran fuera de un intervalo del 95% de confianza.

3.6.2 Calibración de los Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos

Se empleó una hipótesis estadística de estimación, ya que se realizó la comparación semanal de los valores de la concentración de los sedimentos.

Hipótesis Nula (Ho). El coeficiente de determinación (R^2) es mayor o igual a 0,60.

$$\mathbf{Ho: R^2 \geq 0,6}$$

Hipótesis Alternativa (Ha). El coeficiente de determinación (R^2) es menor a 0,60.

$$\mathbf{Ha: R^2 \leq 0,6}$$

Validación de los Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos

Hipótesis Nula (Ho). El coeficiente de determinación (R^2) es mayor o igual a 0,60.

$$\mathbf{Ho: R^2 \geq 0.6}$$

Hipótesis Alternativa (Ha). El coeficiente de determinación (R^2) es menor a 0,60.

$$\mathbf{Ha: R^2 \leq 0,6}$$

3.6.3 Generalización de los Modelos de Erosión Hídrica y Transporte de Sedimentos

Hipótesis Nula (Ho). El coeficiente de determinación (R^2) es mayor o igual a 0,60.

$$\mathbf{Ho: R^2 \geq 0,6}$$

Hipótesis Alternativa (Ha). El coeficiente de determinación (R^2) es menor a 0,60.

$$\mathbf{Ha: R^2 \leq 0,6}$$

3.7 Definición Operacional de las Variables

En la Tabla 3 se indica la manera como se midieron las variables en el marco de cada objetivo planteado, incluyendo las hipótesis planteadas en cada caso desde el punto de vista cuantitativo. Hernández *et al.* (2003)

Tabla 3

Operacionalización de Variables

Objetivo 1				
Caracterizar las variables de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimento				
Variable nominal	Variable real	Indicadores	Formulación De hipótesis	Tipo de hipótesis
Factor Climático	Precipitación (P)	Cantidad de lluvia caída durante cada evento de tormentas	Ho: $P_1 = P_2 = \dots P_n$ Ha: $P_1 \neq P_2 \neq \dots P_n$	a) Hipótesis Estadística de diferencias entre grupos
Factores Edáficos	Tamaño de partícula (d)	Cantidad de grupos de partículas	Ho: $d_{m10} = d_{m20} = \dots d_{m40}$	b) Hipótesis Estadística de diferencias entre grupos
		Porcentaje en peso retenido entre tamices	Ha: $d_{m10} \neq d_{m20} \neq \dots d_{m40}$	
Factores topográficos	Pendiente (S)	Diferencia de niveles (altitudes) en una longitud de tramo del surco expresada en porcentaje	Ho: $S_1 = S_2 = \dots S_{32}$ Ha: $S_i \neq S_j$ para algún $i \neq j$ ($i, j = 1, \dots, 32$)	c) Hipótesis Estadística de diferencias entre grupos
Factores de manejo	Caudal de aplicación de agua al surco (Q)	Caudal de estabilización	Ho: $Q_0 = Q_{15} = \dots Q_{60}$ Ha: $Q_0 \neq Q_{15} \neq \dots Q_{60}$	d) Hipótesis Estadística de diferencias entre grupos
		Cantidad de partículas sólidas en agua	Ho: $ST_1 = ST_2 = \dots ST_n$ Ho: $ST_1 = ST_2 = \dots ST_n$	g) Hipótesis Estadística de diferencias entre grupos

Tabla 3 (cont.)

Objetivo 2				
Calibrar los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos				
Variable nominal	Variable real	Indicadores	Formulación De hipótesis	Tipo de hipótesis
Erosión	Modelo basado en Procesos Físicos (MPF)	Infiltración Lluvia-Esorrentía Desprendimiento Capacidad de Transporte de Sedimentos Deposición	Ho: $R^2 \geq 0,6$ Ha: $R^2 \leq 0,6$	Hipótesis Estadística de estimación
	Modelos Empíricos Técnicas basadas en inteligencia Artificial			
Objetivo 3				
Validar los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos				
Variable nominal	Variable real	Indicadores	Formulación De hipótesis	Tipo de hipótesis
Erosión	Modelo basado en Procesos Físicos (MPF)	Infiltración Lluvia-Esorrentía Desprendimiento Capacidad de Transporte de Sedimentos Deposición	Ho: $R^2 \geq 0,6$ Ha: $R^2 \leq 0,6$	Hipótesis Estadística de estimación
	Modelos Empíricos Técnicas basadas en inteligencia Artificial			

Tabla 3 (cont.)

Objetivo 4				
Generalizar el uso de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos en la cuenca experimental				
Variable nominal	Variable real	Indicadores	Formulación De hipótesis	Tipo de hipótesis
Erosión	Modelo basado en Procesos Físicos (MPF)	Infiltración		
Erosión		Lluvia-Escurrentía		
		Desprendimiento		
		Capacidad de Transporte de Sedimentos	Ho: $R^2 \geq 0,6$	Hipótesis Estadística de estimación
		Deposición	Ha: $R^2 \leq 0,6$	
	Modelos Empíricos			
	Técnicas basadas en inteligencia Artificial			
	Modelo basado en Procesos Físicos (MPF)	Desprendimiento		
		Capacidad de Transporte de Sedimentos	Ho: $R^2 \geq 0,6$	Hipótesis Estadística de estimación
		Deposición	Ha: $R^2 \leq 0,6$	

CAPITULO IV

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la investigación, agrupados como sigue: (1) caracterización de las variables de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos, (2) ajuste de los modelos en las etapas de calibración, validación y prueba y (3) lineamientos sobre el plan de manejo de la cuenca, utilizando el modelo de erosión de la cuenca.

4.1 Caracterización de las Variables de los Modelos de Erosión hídrica y Transporte de Sedimentos

4.1.1 Factor Climático

La precipitación total para eventos de una hora y dos horas varió entre 20 y 30 mm y entre 35 y 40 mm, respectivamente, más detalles se presentan en la Figura 11 del Anexo XV.

4.1.2 Factores Edáficos

Los resultados de la caracterización física del suelo incluyen: la textura representada por el tamaño medio de partícula (d_{50}), los contenidos de limo, arena y arcilla expresados como porcentaje en peso; relaciones de fases: contenido de humedad, límites de Attemberg y la gravedad específica, propiedades hidráulicas,

indicadas por la permeabilidad y la infiltración; propiedades estructurales representadas por el ángulo de fricción y la cohesión, los cuales son mostrados en la Tabla 4.

4.1.2.1 Textura. El tamaño medio de partículas en los estratos desde 0 hasta 30 cm y desde 30 hasta 60 cm varió entre 0.055 y 0.064 mm y entre 0.07 y 0.08 mm, respectivamente, más detalles se presentan en la Figura 12 del Anexo XVI. Estos valores son significativamente diferentes entre sí; encontrándose un material más fino en la superficie y más granular en el segundo estrato. De acuerdo con el sistema de clasificación de suelos propuesto por el Massachusetts Institute Technology (Juárez y Rico, 1978), el intervalo que corresponde a la variación de los tamaños medios en el estrato superficial se encuentra entre 0.02 y 0.06 mm, cuyos límites se asocian a un limo grueso, mientras que el segundo intervalo se encuentra contenido entre 0.06 y 0.2 mm, que representa una arena fina.

En la Tabla 4 se presentan los resultados para la determinación de la textura del suelo; a partir de los cuales se puede afirmar que: menos del 3% en peso de la muestra se retuvo en el tamiz # 10 (contenido de material grueso); el 97 % restante pasa el tamiz # 10 (fracción fina del suelo). Entre 40 y 50% del material fino pasa el tamiz # 200 (fracción más fina; es decir, limo y arcilla); el resto es arena. En promedio el suelo se compone como sigue: 45% es arena, 45 % limo y 10% arcilla. Según el Sistema de Clasificación Unificado basado en la combinación de la composición granulométrica y los límites de consistencia, el suelo varía entre un limo orgánico (OL) de baja plasticidad y una arena limosa (SM) (Lambe y Whitman, 1994; Juárez y Rico, 1978). El coeficiente de variación de la porción de la muestra pasante disminuye en los tamices cercanos al # 200, indicando uniformidad en el diámetro del material retenido en los tamices de malla fina. En las parcelas agrícolas predomina el grano fino, con un diámetro medio de partícula (d_{50}) cercano a 0.074 mm, límite entre la arena fina y el limo grueso. En las zonas 2 y 5 predomina el contenido de arena, más detalles se presentan en la Figuras 13 a 16 de los Anexos XVII hasta XX.

4.1.2.2 Relaciones de Fases. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las

relaciones de fases; a partir de los cuales se puede afirmar que: el límite líquido varió desde 25 hasta 32%, el límite plástico desde 23 hasta 28%, el índice de plasticidad se aproxima a 5%; más detalles se presentan en la Figuras 17 y 18 de los Anexos XXI y XXII. La diferencia entre los límites plástico y líquido es pequeña, indicando que la saturación del suelo es rápida.

La humedad inicial del suelo in situ varió entre 15 y 20%, menor que los límites; líquido y plástico, más detalles se presentan en la Figura 19 del Anexo XXIII. El suelo se encuentra en un estado semisólido a sólido, precediendo al estado seco (Lambe, (1994)).

4.1.2.3 Propiedades Hidráulicas. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las propiedades hidráulicas, a partir de los cuales se puede afirmar que: la conductividad hidráulica saturada se aproximó a 1 mm/h en la mayoría de las zonas, clasificándose como baja a muy baja, según Terzaghi y Peck, (1967).

4.1.2.4 Propiedades Estructurales. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las propiedades estructurales, a partir de los cuales se puede afirmar que: el ángulo de fricción varió entre 30 y 32° y la cohesión fue menor a 0.5 Kgf/cm². De acuerdo con Lambe y Whitman, (1994) el ángulo de fricción obtenido corresponde a un limo y una arena limosa con compacidad media.

Dado que el suelo de las parcelas agrícolas ubicadas en la cuenca del río Chirgua se caracterizó por un contenido de humedad próximo al estado seco, resulta ser de grano fino, uniforme, alta porosidad, baja compacidad, baja plasticidad, media a baja compresibilidad. En consecuencia, el paso del tractor con una frecuencia de 2 veces mensual con fines de control de plagas y malezas ejerce una baja influencia sobre la capacidad de infiltración de los suelos.

4.1.2.5 Tasa de Infiltración (f). La tasa de infiltración se estabilizó a partir de un tiempo aproximado de 60 minutos. Los valores dados en la figura indican que: la máxima tasa de infiltración alcanzada varía entre 1000 y 2000 mm/h, mientras que la estabilización se inicia próxima a 60 minutos desde el inicio de la prueba, más detalles se presentan en la Figura 20 del Anexo XXIV.

Tabla 4
Media (μ), Desviación Estándar (σ) y Coeficiente de Variación (CV) para las Propiedades Físicas de suelo

Propiedad Física	Zona 1			Zona 2			Zona 3			Zona 4			Zona 5			Zona 6		
	μ	σ	CV (%)	μ	σ	CV	μ	σ	CV (%)									
Textura:																		
Porcentaje Retenido en Tamices:																		
>9,51mm (Tamiz 3/8")	3.9	4.4	112.9	0.0	0.0	-	1.2	1.1	93.2	0.0	0.0	-	0.3	0.5	146.9	1.2	1.5	126.5
9,51 – 4,76 mm (Tamiz 4)	2.6	1.9	70.1	4.0	4.5	110.6	1.3	0.8	63.3	0.9	0.3	38.2	2.2	2.1	96.8	1.4	1.3	94.1
4,76 – 2,00 mm (Tamiz 10)	4.0	2.5	61.8	5.5	5.3	95.3	2.7	1.1	39.0	3.7	2.8	75.9	0.7	1.3	188.2	2.7	1.5	55.9
2,00 – 0,84 mm (Tamiz 20)	6.7	3.6	54.0	10.9	7.8	71.7	5.7	2.1	36.5	8.3	4.1	49.2	7.2	3.5	48.2	5.6	2.0	34.9
0,84 – 0,42 mm (Tamiz 40)	10.9	5,2	47,3	14,5	6,4	44,2	8,7	2,8	32,1	13,8	3,9	28,7	10,4	3,7	36,1	8,3	1,8	22,1
0,42 – 0,149 mm (Tamiz 100)	22.6	5.2	23.0	31.2	9.8	31.6	15.7	2.9	18.4	19.0	3.3	17.5	32.5	8.0	24.7	18.8	3.1	16.4
0,149 – 0,074 mm (Tamiz 200)	14.4	6.3	43.8	28.3	12.6	44.6	13.0	3.4	26.1	15.7	5.1	32.2	28.5	11.5	40.2	15.1	2.5	16.6
< 0,074 mm Plato	34.9	9.3	26.6	5.9	3.5	60.3	51.7	9.5	18.4	38.7	7.8	20.2	18.3	12.0	65.8	48.2	8.6	17.9
Porcentaje total:																		
% Arena	46.4	4.2	9.1	30.7	5.6	18.4	46.1	1.6	3.5	46.1	1.6	3.5	46.1	1.6	3.5	46.2	2.1	4.6
% Limo	49.5	2.7	5.5	36.7	11.7	31.9	46.9	2.3	4.9	49.5	2.7	5.5	46.9	2.3	4.9	46.9	2.3	4.9
%Arcilla	4.1	2.0	48.4	19.9	8.2	41.3	7.0	2.4	33.9	6.6	1.8	27.6	7.0	2.4	33.9	6.9	2.5	36.2
Hidráulica:																		
Permeabilidad (mm/h)	0.4	0.1	33.3	24.0	22.7	94.3	0.9	0.6	60.6	0.9	0.6	60.6	0.9	0.6	60.6	1.4	0.6	41.8
Estructural:																		
Angulo de fricción (°)	29.9	3.9	12.9	29.8	1.1	3.8	29.8	1.1	3.8	31.8	1.9	5.9	32.7	1.1	3.4	32.7	1.1	3.4
Cohesión (kgf/cm ²)	0.3	0.0	15.4	0.1	0.0	60.0	0.1	0.0	60.0	0.43	0.03	7.0	0.3	0.0	6.7	0.3	0.0	6.7
Relaciones de Fase:																		
Humedad Inicial (%)	21.8	11.5	52.6	7.1	3.5	49.2	18.9	11.8	62.5	20.7	10.6	51.3	18.9	11.8	62.5	15.0	7.1	47.2
Humedad Final (%)	26.1	11.5	44.0	51.0	11.7	22,9	40,5	7,7	19,0	40,5	7,7	19,0	40,5	7,7	19,0	54,0	12,6	23,4
Porosidad	0.4	0.1	13.5	0.4	0.1	11.6	0.4	0.1	14.6	0.5	0.1	16.7	0.4	0.1	14.6	0.4	0.1	18.9
Limite Liquido (%)	26.2	2.5	9.4	30.7	4.1	13.3	32.4	4.4	13.4	33.2	4.2	12.8	32.4	4.4	13.4	29.6	2.0	6.8
Limite Plástico (%)	23.1	5.0	21.6	26.2	3.7	14.0	27.1	2.9	10.6	28.3	3.9	13.9	27.1	2.9	10.6	25.2	3.4	13.6
Índice de Plasticidad (%)	5.1	2.2	43.8	4.5	2.5	54.3	5.2	4.0	76.0	4.9	1.2	25.0	5.2	4.0	76.0	4.3	2.6	60.0
Gravedad Específica	2.6	0.1	3.9	2.5	0.1	4.8	2.5	0.1	4.3	2.7	0.1	3.7	2.5	0.1	4.3	2.6	0.2	7.7

4.1.2.5.1 Análisis de Frecuencias de la Infiltración Acumulada (F). El análisis de la frecuencia de la ocurrencia de los valores de infiltración acumulada que conforman la serie temporal registrada en las pruebas realizadas durante 2 horas indica que: (1) la lámina de infiltración acumulada más frecuente varió entre 4 y 7 mm, la lámina acumulada con menos frecuencia varió entre 24 y 29 mm; (2) la función de distribución de Weibull fue la que mejor se ajustó a las frecuencias observadas. Más detalles se presentan en la Figura 21 del Anexo XXV y en la Tabla 6 del Anexo XXVI.

4.1.2.5.2 Análisis del Patrón Espacial y Temporal de la Infiltración

Indicadores Globales de Asociación Espacial. Los valores del Índice Global de Moran (I) en la etapa inicial y de estabilización de la infiltración medidos entre 2008 y 2009 resultaron en su totalidad positivos y los valores del estadístico z mayores al valor crítico, indicando agrupamiento espacial significativo de valores similares dentro de cada periodo. En cuanto al Índice Global de Getis (G) se encontraron resultados similares al Índice Local de Moran; se encontraron zonas con agrupamientos significativos de valores altos, principalmente entre los sectores medio y bajo de la cuenca. Así mismo, la comparación de las mediciones entre los periodos de 2008 y 2009 resultó en una variabilidad significativa aun cuando los valores se mantuvieron positivos, lo que confirma la alta variabilidad de los valores empleados para la modelación. Más detalles se presentan en la Tabla 7 del Anexo XXVII.

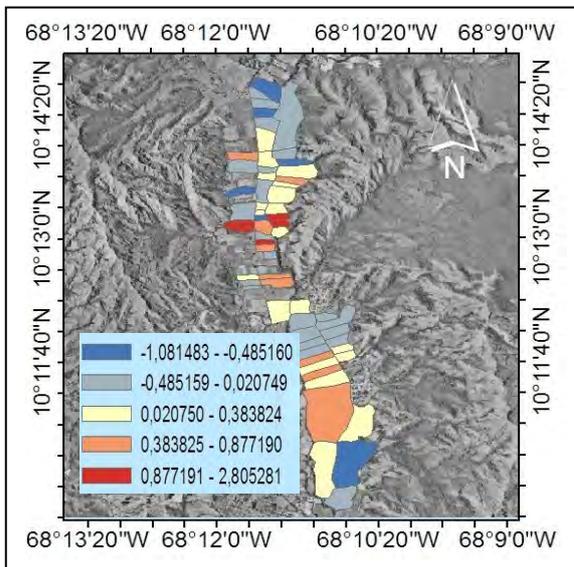
Indicadores Locales de Asociación Espacial. En las Figura 8 y 9 se presentan los resultados del patrón local de agrupación de las tasas de infiltración para los años 2008 y 2009. Mediante el análisis de los patrones locales de agrupación espacial de la tasa de infiltración los años 2008 y 2009 se encuentra un patrón aleatorio en la mayoría de las parcelas (Figuras 8(b), 9(b), 8(c) y 9(c)). Esta

interpretación basada en un nivel de confianza del 95% resulta contraria al patrón local de agrupación de la tasa de infiltración observado (Figuras 8(a), 9(a), 8(c) y 9(c)). De manera general, en cuanto a las tasas de infiltración en la etapa inicial se observa un agrupamiento significativo de valores atípicos en el sector alto y de valores similares en los sectores medio y gran parte del bajo; mientras que en la etapa de la estabilización de la tasa de infiltración se observan valores similares en toda la cuenca. Más detalles se presentan en el Anexo XXVIII. Posteriormente, se discutirá la suposición de normalidad para la distribución de los índices locales.

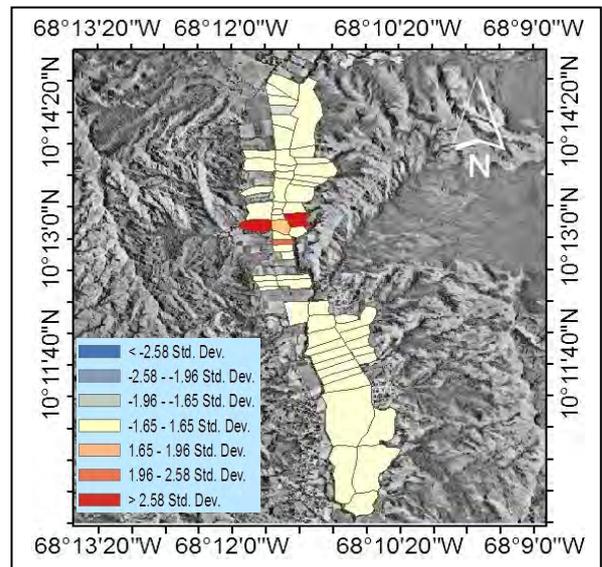
En cuanto a la relación entre el índice global y las indicaciones del patrón local de agrupación de la tasa de infiltración observada para los años 2008 y 2009, se encuentra que en la etapa inicial del proceso de infiltración se cumple que el primero no es representativo del segundo; mientras que en el estado estable se encontró correspondencia. Comparando el patrón local de agrupación espacial de la tasa de infiltración observada entre 2008 y 2009 se observa que disminuye la ocurrencia de valores atípicos en el sector alto y se mantienen las agrupaciones similares en los sectores medio y bajo. En estas condiciones, la medida de manejo del agua se orienta hacia disminuir los tiempos de riego en el sector bajo y enfatizar en el manejo de la labranza en el sector alto a fin de incrementar la retención del agua en el suelo.

Distribución de Índices Locales de Asociación Espacial

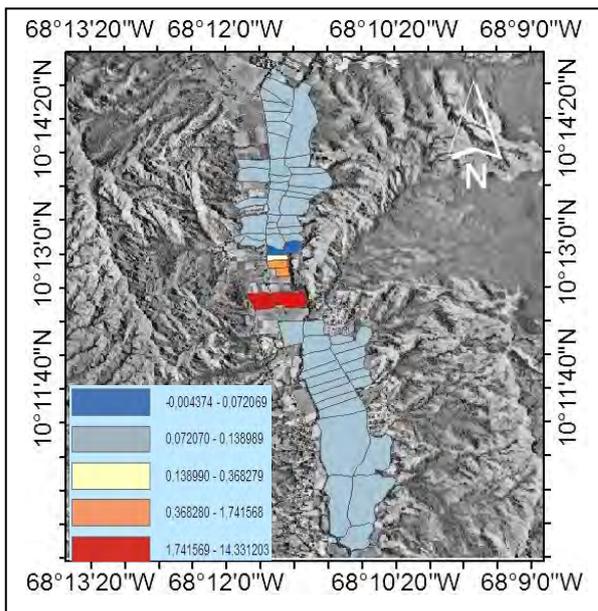
En el análisis del patrón espacial se asume el ajuste de los datos a una función de distribución normal para el índice local de Moran y el estadístico Getis-Ord. La falta de ajuste de los índices locales a una función de distribución normal trae como consecuencia que se juzgue un patrón de agrupación local como aleatorio cuando en realidad existe agrupación significativa de valores atípicos en unos sectores y similares en otros sectores de la zona de estudio, por lo que la aleatoriedad es condicional en este caso. Más detalles se presentan en el Anexo XXIX.



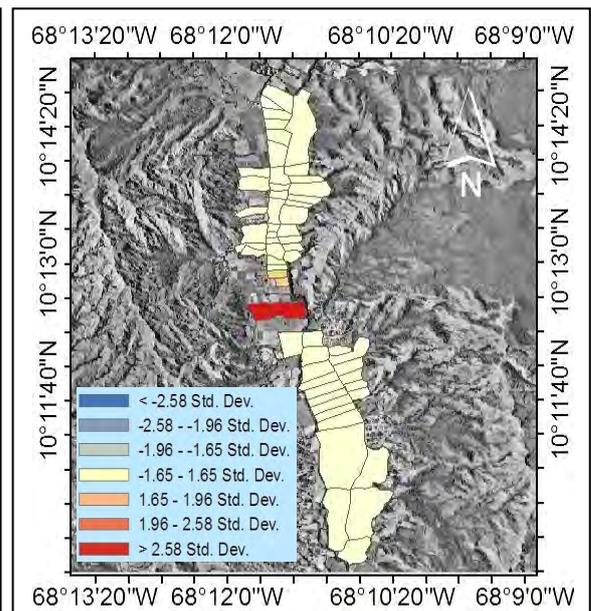
(a)



(b)

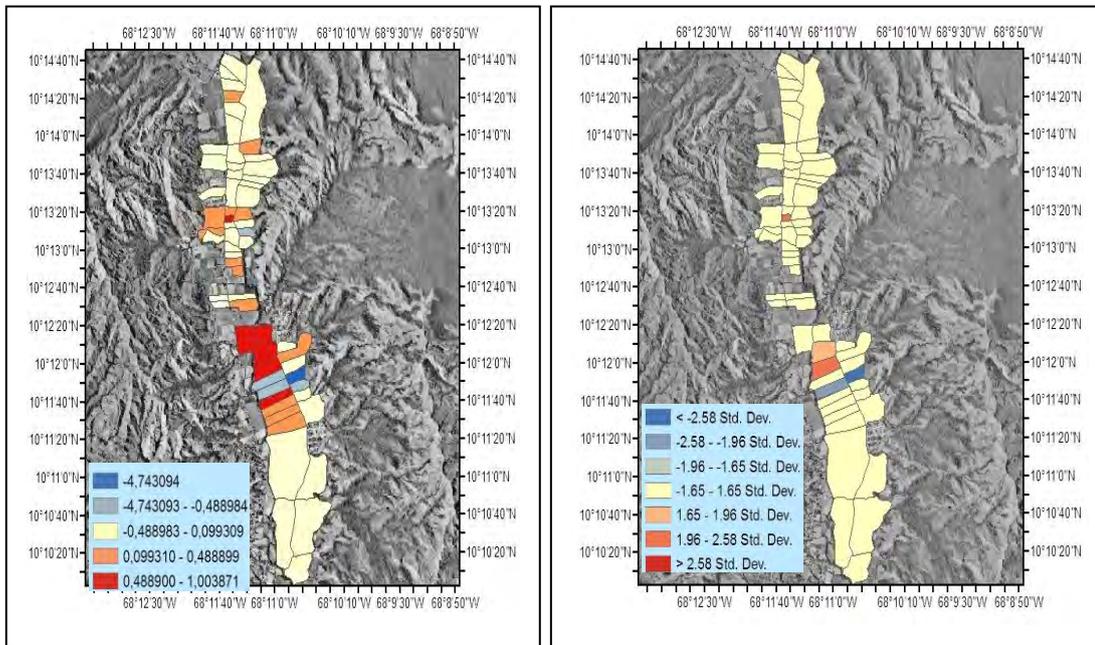


(c)



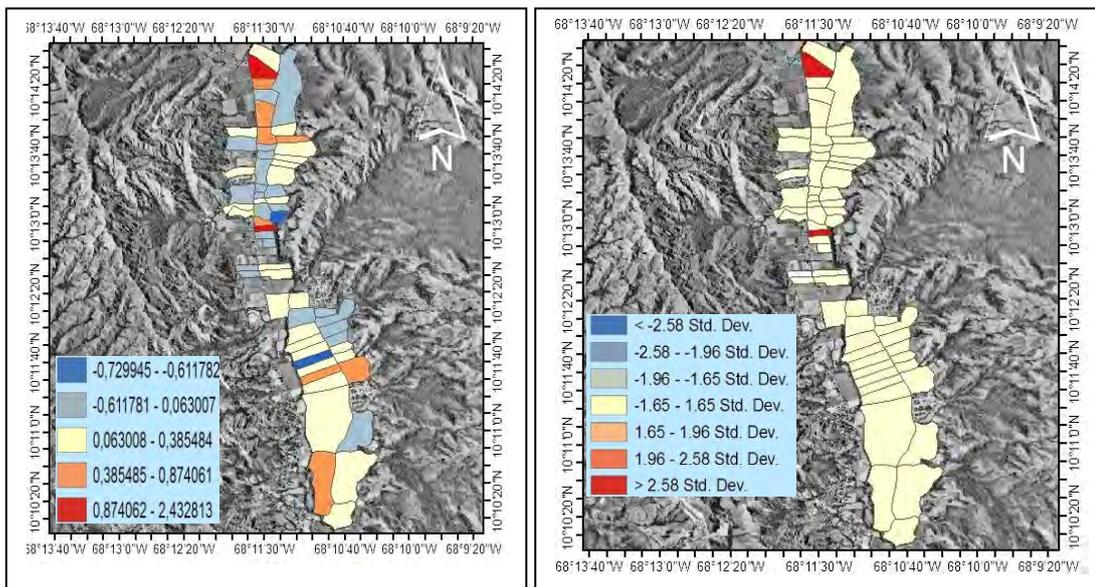
(d)

Figura 8. Índice Local de Moran (ILM) y Valor z Período Seco 2008. Tasa de infiltración para $t=2$ min.: (a) ILM. (b) Valor z. Tasa de infiltración para $t=47$ min.: (c) ILM. (d) Valor z. Fuente: Elaboración propia.



(a)

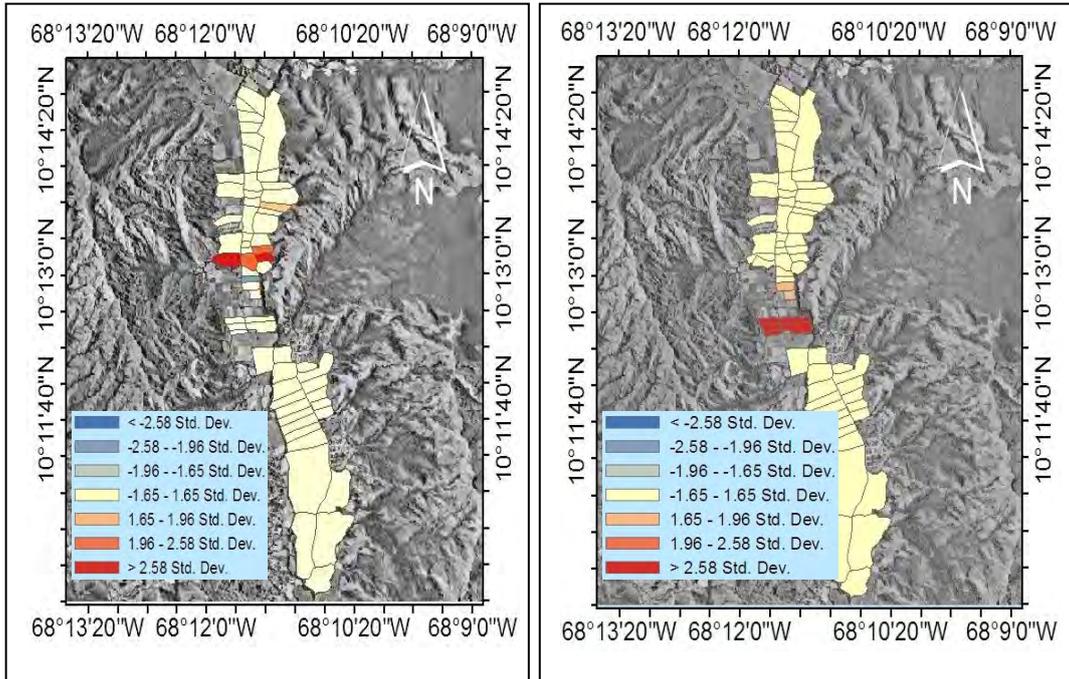
(b)



(c)

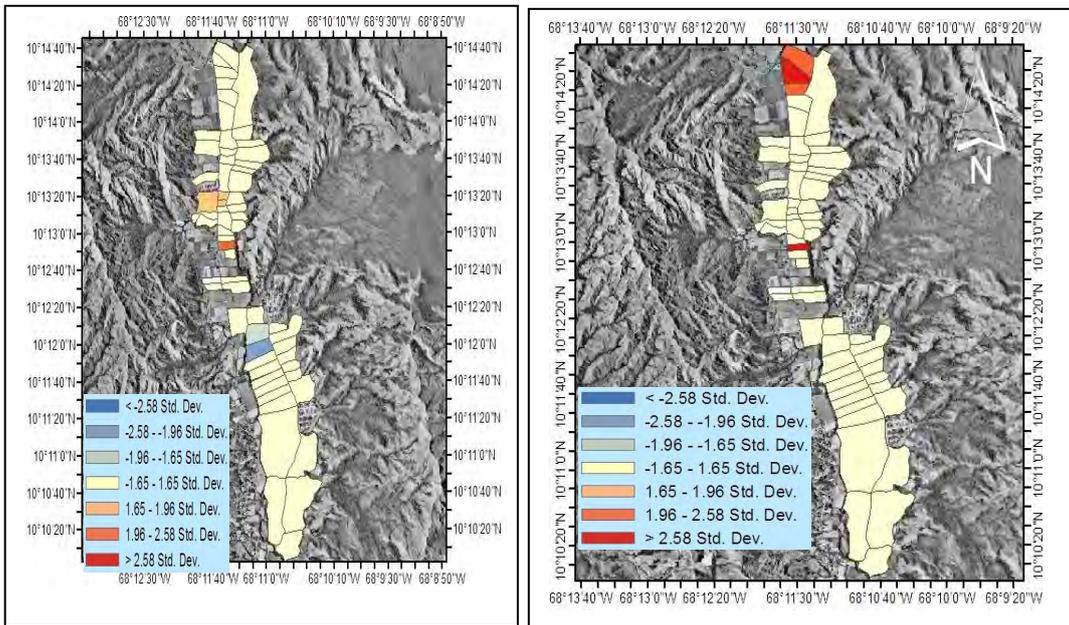
(d)

Figura 9. Índice Local de Moran (ILM) y Valor z Período Seco 2009. Tasa de infiltración para $t=2$ min.: (a) ILM. (b) Valor z. Tasa de infiltración para $t=47$ min.: (c) ILM. (d) Valor z. Fuente: Elaboración propia.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 10. (a) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en $t=2$ min-2008. (b) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en $t=47$ min-2008. (c) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en $t=2$ min-2009 (d) Valor z para G_i^* . Tasa de infiltración en $t=47$ min-2009. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Factor Topográfico: Pendiente (S)

Las pendientes medias en las parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua variaron entre 0.07% y 2.8%. Más detalles se presentan en el Anexo XXX.

4.1.4 Factor de Manejo: Caudal de Aplicación de Agua al Surco (Q)

Los caudales de aplicación de agua a los surcos mediante el riego variaron entre 0.24 y 0.30 L/s.

Durante la estación seca, la escorrentía se estabilizó después de la primera media hora de la aplicación del riego. El lapso para la estabilización del flujo fue aproximadamente de una hora; ocurriendo más rápido en los surcos donde la pendiente resultó igual a 0.8% (Figura 11). La tasa de flujo en el estado estable varió entre 0.30 y 0.50 L/s; disminuyendo entre 0.05 y 0.1 L/s después del séptimo riego. El efecto de la variación del caudal entre los diferentes surcos por el movimiento rotativo del aspersor es bajo dentro de un evento de riego.

Una comparación de la carga de los sedimentos durante los eventos de riego y lluvia de una y dos horas de duración se muestra en la Figura 12. La carga de los sedimentos máxima observada durante los eventos de una hora varía aproximadamente como sigue: entre 100 y 400 mg/s para el riego, 600 y 100 mg/s para la lluvia (Figura 12a). La carga de los sedimentos máxima observada para los eventos de dos horas varía como sigue: entre 500 y 2000 mg/s para el riego, 2500 y 7000 mg/s para la lluvia (Figura 12b). Por tanto, se puede afirmar que existe una variación significativa de la carga de sedimentos entre los eventos de riego y los de lluvia, siendo 5 a 10 veces más erosivos los últimos.

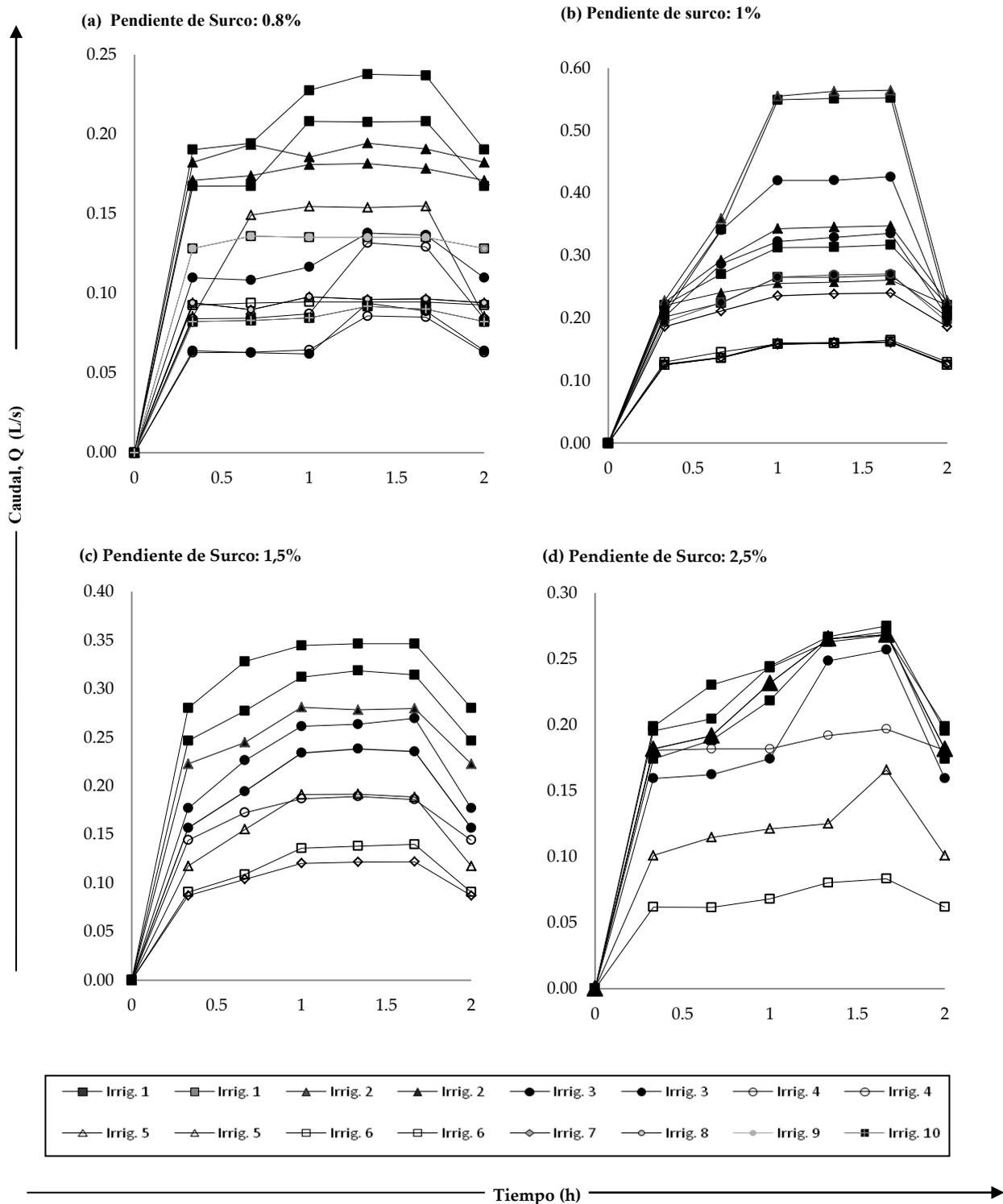


Figura 11. Hidrogramas medidos para surcos de diferentes pendientes durante eventos de riego

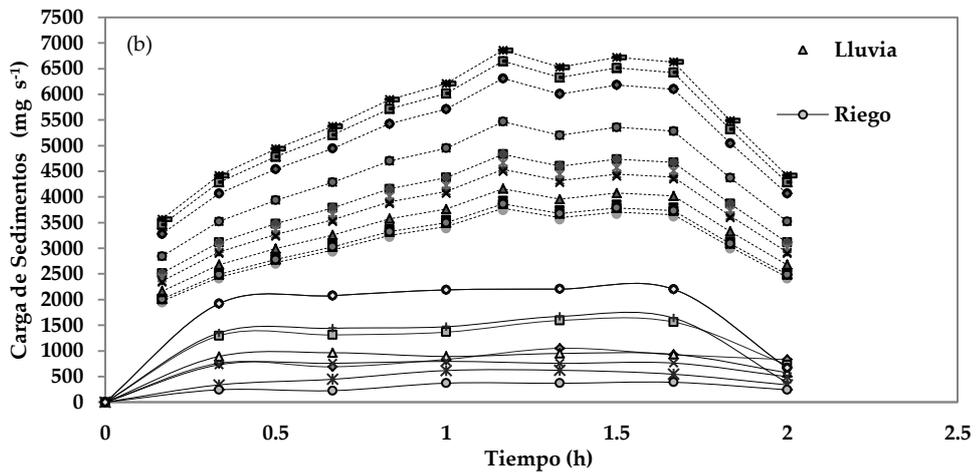
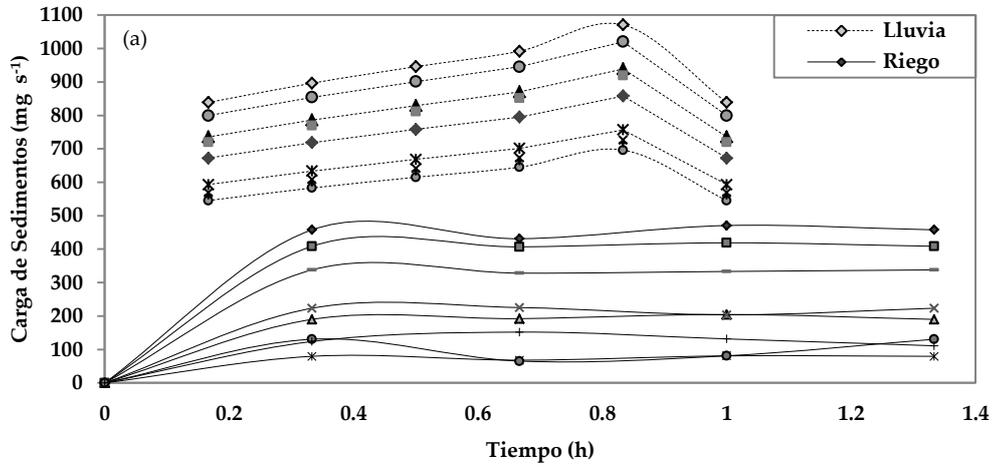


Figura 12. Carga de sedimentos medida durante eventos de lluvia y riego

4.1.5 Características Físicas del Flujo en el Surco: Concentración de Sedimentos (ST)

Los sólidos totales expresados en mg/L contenidos en el caudal de drenaje de los surcos de las parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua, desde la etapa inicial hasta la final dentro de los eventos de riego variaron entre 3330 y 4300 mg/L . No existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%, más detalles se presentan la Figura 24 del Anexo XXXI.

En cuanto a los sólidos totales expresados en mg/L contenidos en el caudal de drenaje de los surcos de las parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua, desde la etapa inicial hasta la final dentro de los ciclos de desarrollo del cultivo sometido a la aplicación del riego variaron entre 6000 y 1000 mg/L. Se encuentran diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%, lo que indica que la concentración de partículas sólidas en la escorrentía es inestable tendiendo a disminuir en el tiempo dentro del ciclo del desarrollo de cultivos bajo riego, más detalles se presentan en la Figura 25 del Anexo XXXII y las Figuras 26 a 32 de los Anexos XXXIII a XXXIX.

4.2 Calibración de los modelos de erosión hídrica y transporte de sedimentos

4.2.1 Ajustes de los Modelos de Erosión Basados en Procesos Físicos

Los modelos de erosión hídrica incluyen los siguientes procesos físicos: infiltración, lluvia-escorrentía, capacidad de desprendimiento de partículas sólidas y transporte de sedimentos.

4.2.1.2 Ajustes de Modelos de Infiltración

La calibración de los modelos de infiltración dados en las Ecuaciones (16) a (33), se llevó a cabo mediante la aplicación del método de estimación Marquardt, considerando las tres series de datos siguientes: (1) total, (2) sólo el contenido de humedad inicial del suelo y (3) sólo el tipo de suelo. La evaluación de la calibración se realiza mediante dos tipos de análisis: (1) cualitativo, basado en la observación de las curvas de ajuste de los modelos a los datos observados y (2) cuantitativo, basado en los parámetros y el coeficiente de determinación R^2 . A continuación se discuten los resultados para los dos tipos de análisis y tres grupos de series.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la aplicación de los modelos de infiltración para las series total y de acuerdo con el contenido de humedad inicial del suelo. En las Figura 13, 14 y 15 se dan los resultados gráficos del ajuste de dichos modelos a la series de los datos observados. En general, a partir de las observaciones de las figuras indicadas se encuentra que, cualitativamente los modelos se comportan como se describe a continuación: (a) el modelo de Philip se ajustó satisfactoriamente en las etapas de transición y estabilización; (b) los modelos Green-Ampt Lineal, Smith-Parlange Lineal, Smith-Parlange No Lineal, Green-Ampt múltiple, Smith-Parlange no lineal múltiple, se ajustaron satisfactoriamente a las observaciones únicamente en la etapa de estabilización; (c) en los modelos de Mishra-Singh y Horton, los valores de la tasa de infiltración dados en la se relacionan con el tiempo mediante un modelo potencial y exponencial, se observa un ajuste satisfactorio de los modelos a la serie total de datos; (d) en el modelo de Holtan, se observa que el modelo se ajusta sólo a los datos observados en el estado estable, (g) en el modelo de y la versión modificada de Kostiaikov, se observa un ajuste satisfactorio de los modelos en las etapas de transición y estabilización.

Con base en el análisis cualitativo de las Figuras 13, 14 y 15 se puede concluir que únicamente los modelos dependientes del tiempo muestran un ajuste satisfactorio a los datos. Los modelos propuestos por Horton y Mishra-Singh representan la totalidad de las observaciones; mientras que los modelos de Philip, Kostiaikov y Kostiaikov Modificado presentan un ajuste moderadamente satisfactorio a los datos medidos en las etapas de transición y estabilización. En cuanto a los modelos dependientes de la permeabilidad y la infiltración acumulada se encuentra que éstos solo representan la etapa final del proceso o de estabilización presentando severas restricciones que constituyen limitantes para su uso.

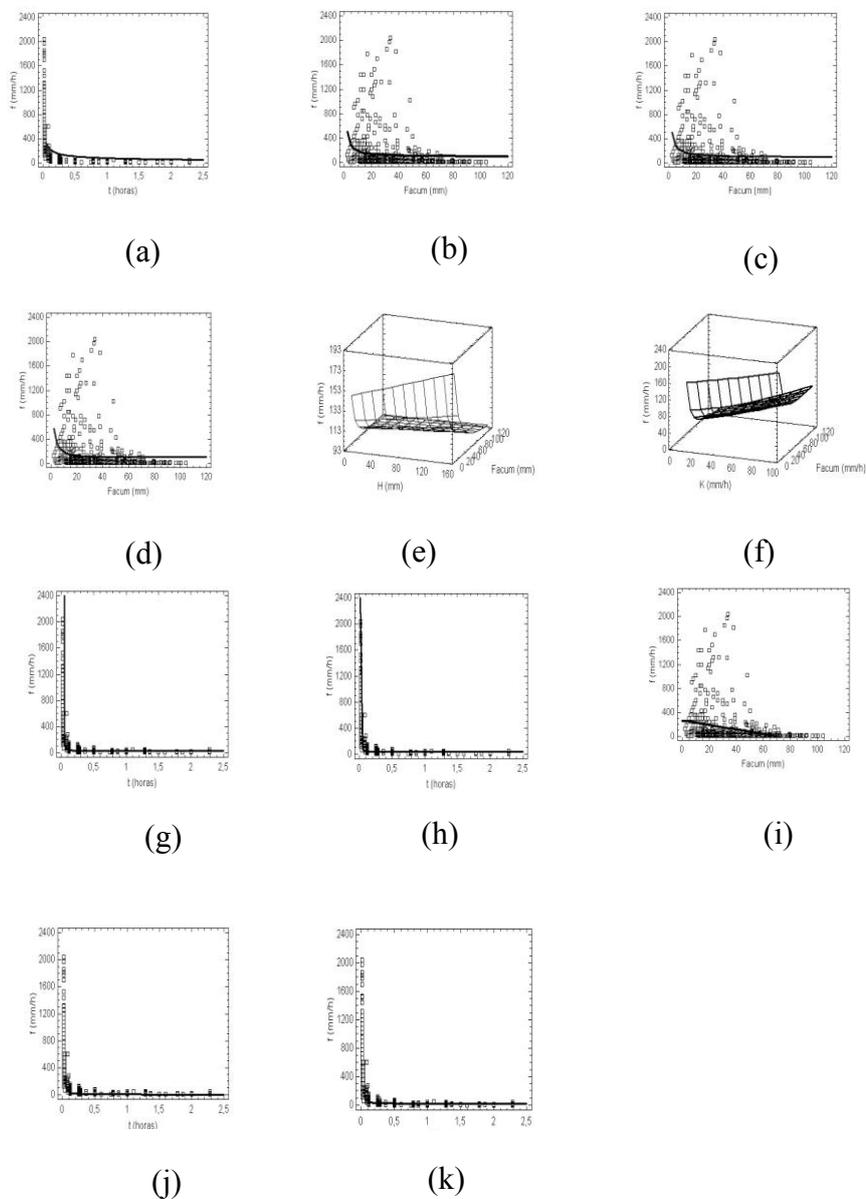


Figura 13. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para la serie total. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia.

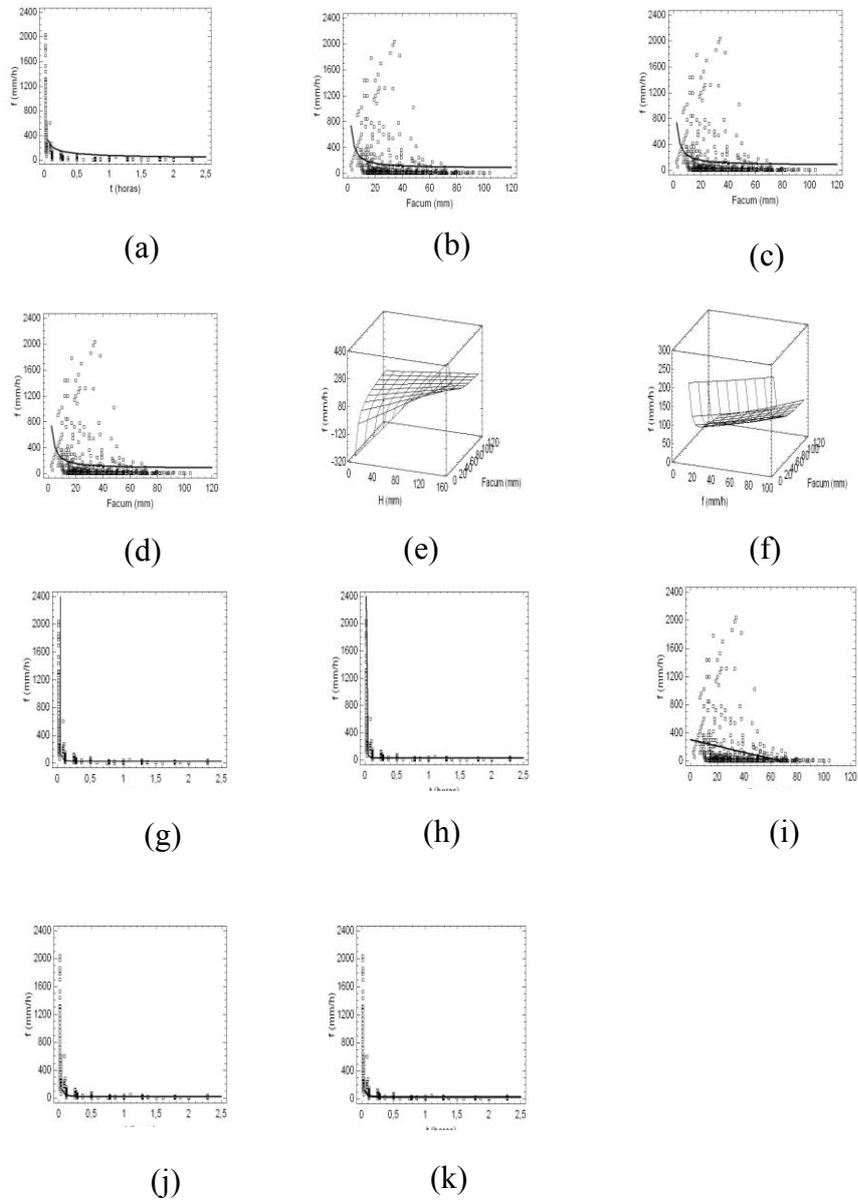


Figura 14. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para el caso de Contenido de Humedad Inicial Bajo. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt Múltiple, (f) Smith-Parlange No Lineal Múltiple, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia.

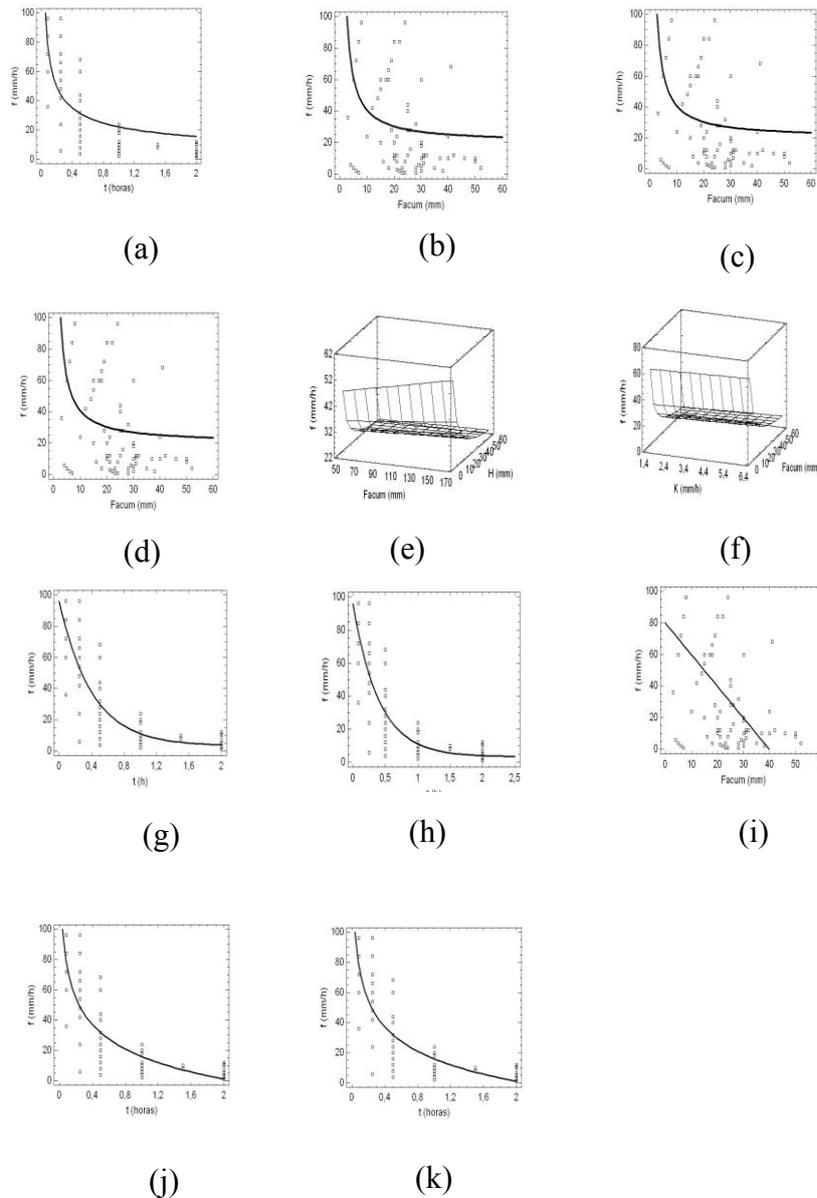


Figura 15. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para el caso de Contenido de Humedad Inicial Alto. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt Múltiple, (f) Smith-Parlange No Lineal Múltiple, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia

Según el Tipo de Suelo. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la aplicación de los modelos de infiltración para la serie según el tipo de suelo. En las Figuras 16, 17 y 18 se presentan los resultados del ajuste de los valores observados de la tasa de infiltración a los modelos para la serie de arena limosa, limo orgánico y arcilla limosa, respectivamente. La serie total de datos se ha

dividido en tres grupos de acuerdo con el tipo de suelo: arena limosa, limo orgánico y arcilla limosa. En general, a partir de las observaciones de las figuras indicadas se encuentra que, cualitativamente los modelos se comportan como se describe a continuación: (a) el modelo de Philip se ajustó satisfactoriamente en las etapas de transición y estabilización; (b) los modelos Green-Ampt Lineal, Smith-Parlange Lineal, Smith-Parlange No Lineal, Green-Ampt múltiple, Smith-Parlange no lineal múltiple, se ajustaron satisfactoriamente a las observaciones únicamente en la etapa de estabilización; (c) en los modelos de Mishra-Singh y Horton, los valores de la tasa de infiltración se relacionan con el tiempo mediante un modelo potencial y exponencial, se observa un ajuste satisfactorio de los modelos a la serie total de datos, para tasas de infiltración que varían entre 100 mm/h y cerca de 0 mm/h; (d) en el modelo de Holtan, se observa que el modelo se ajusta sólo a los datos observados en el estado estable, (g) en el modelo de y la versión modificada de Kostiakov, se observa un ajuste satisfactorio de los modelos en las etapas de transición y estabilización, para tasas de infiltración que menores a 100 mm/h.

A partir del análisis cualitativo de las Figuras 13 a 18 se pueden concluir los siguientes principales aspectos: (a) los modelos dependientes del tiempo muestran un mejor ajuste a los datos de infiltración observados en relación a los modelos que dependen de la permeabilidad, carga de agua sobre el suelo, la infiltración acumulada o la combinación de cualquier par de estas variables para el caso de los modelos múltiples; (b) los modelos siguientes: inverso propuesto por Mishra-Singh (Figuras 13(g), 14(g), 15(g), 16(g), 17(g) y 18(g)), exponencial propuesto por Horton (Figuras 13(h), 14(h), 15(h), 16(h), 17(h) y 18(h)), se perfilan como los de mejor ajuste al conjunto total de los datos para las series observadas, (c) los modelos dependientes del tiempo basados en relaciones de potencia propuestos por Philip, Kostiakov y Smith (Kostiakov Modificado) han mostrado sensibilidad a los cambios de la tasa de infiltración observada con el tiempo, mostrando resultados poco satisfactorios en la etapa inicial de la prueba, por lo general para tasas de infiltración que variaron entre 2400 mm/h y cerca de 300 mm/h.

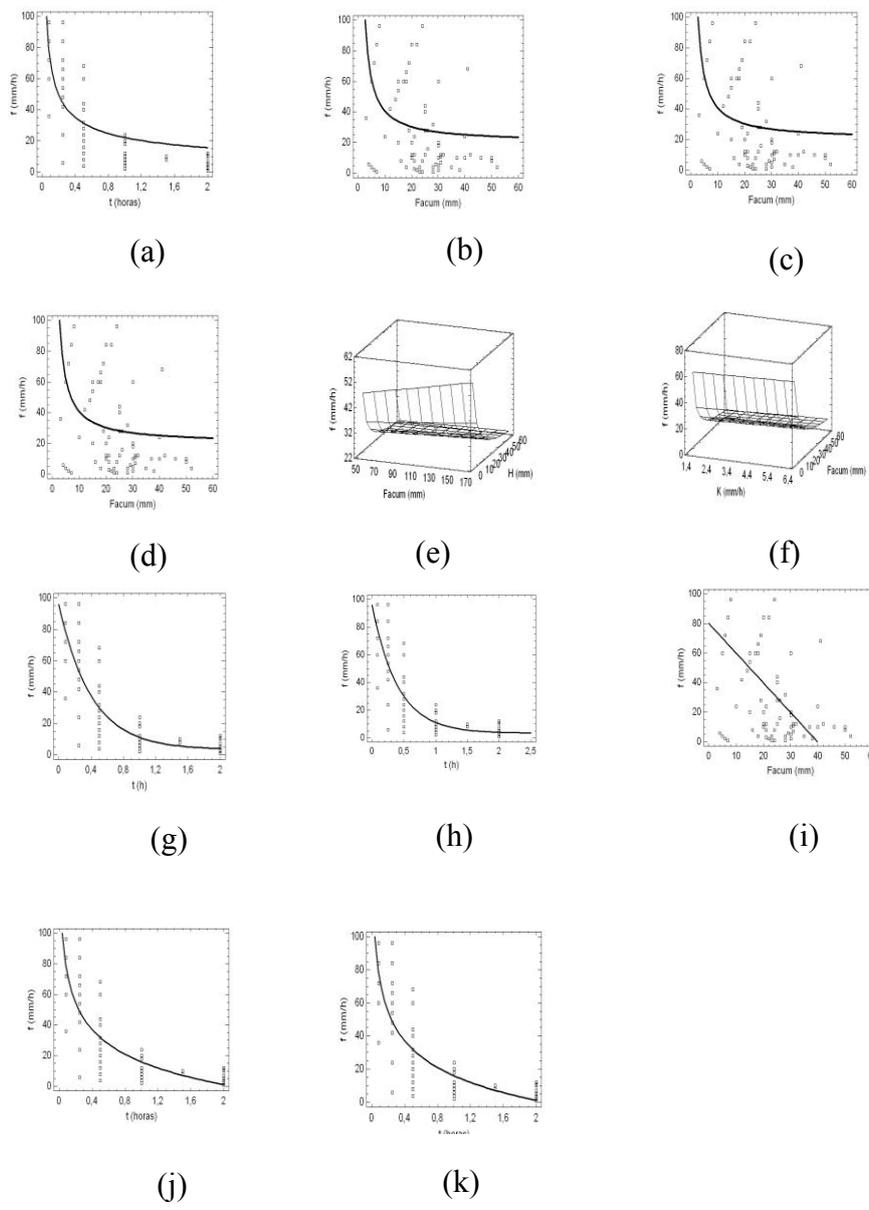


Figura 16. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelo del tipo arena limosa. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt Múltiple, (f) Smith-Parlange No Lineal Múltiple, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia

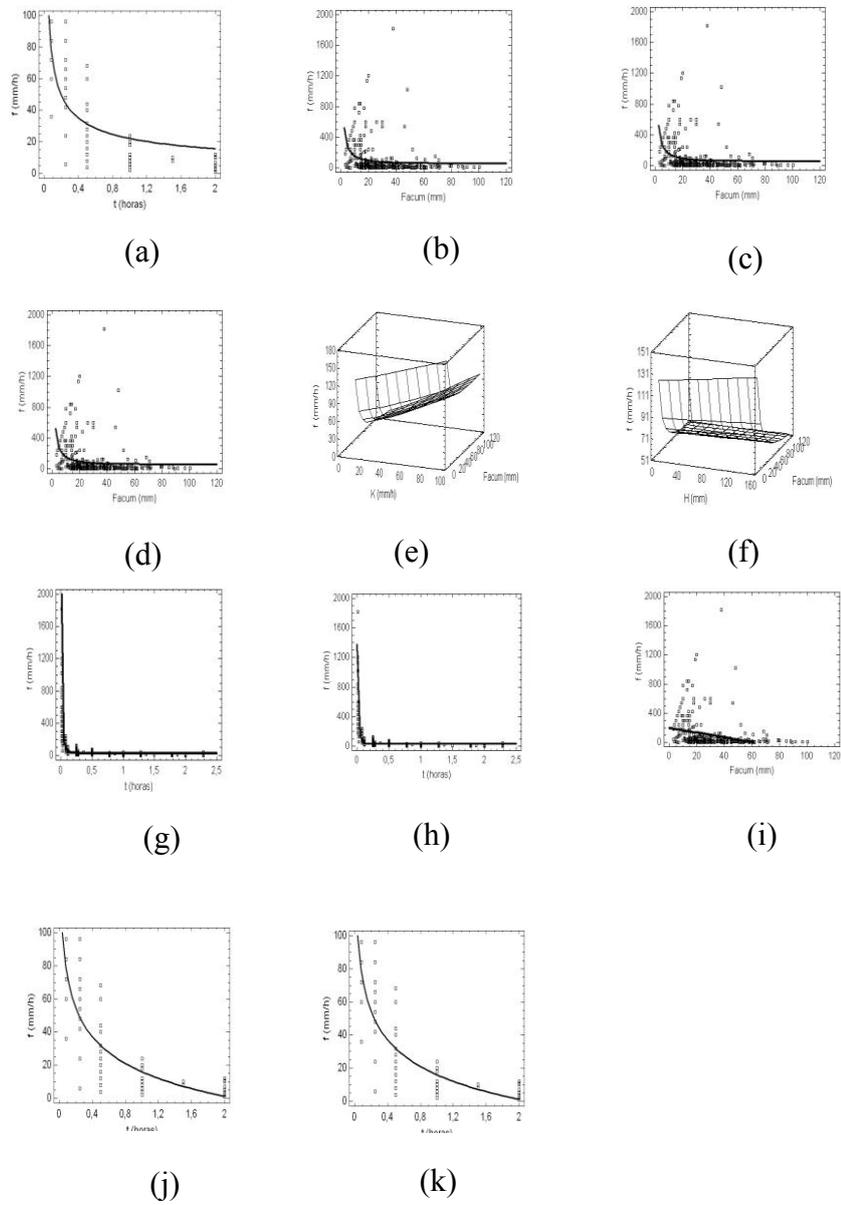


Figura 17. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelos del tipo limo orgánico. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt Múltiple, (f) Smith-Parlange No Lineal Múltiple, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia

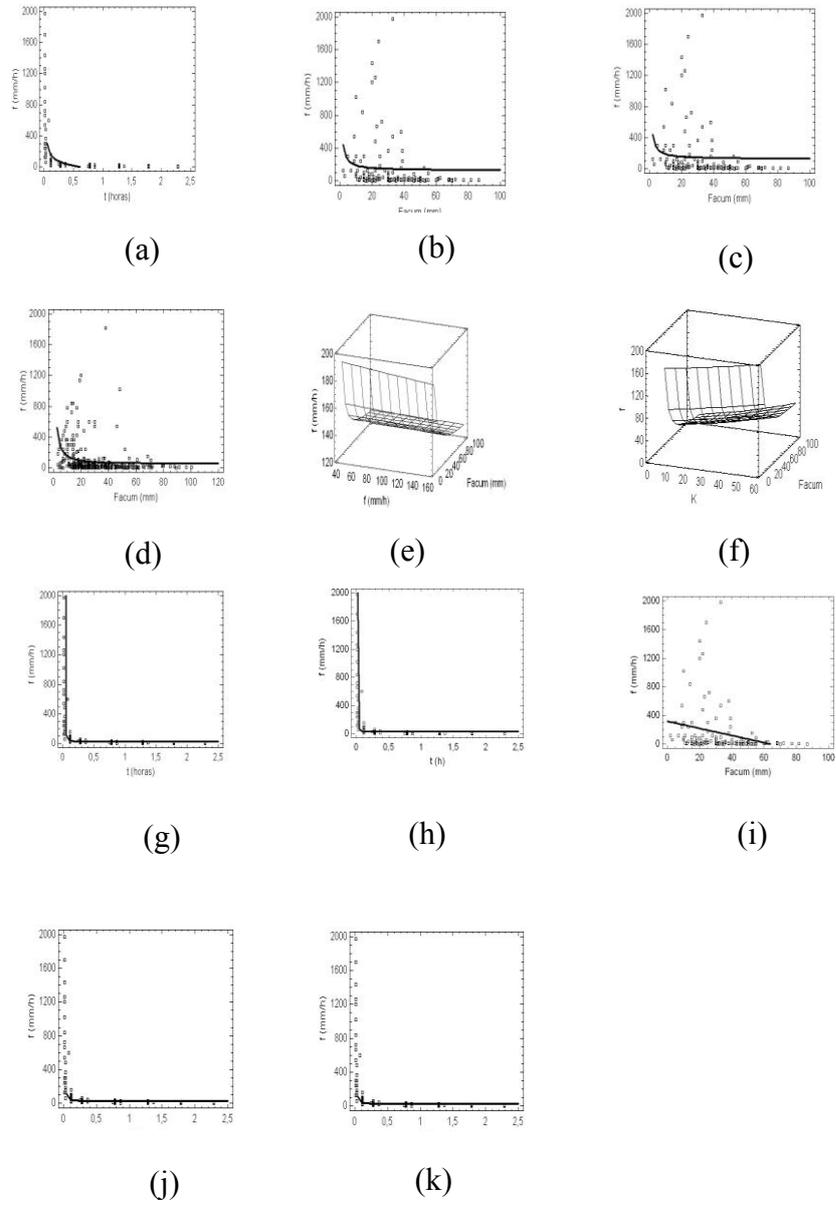


Figura 18. Representación gráfica de las estimaciones de la infiltración para suelos del tipo arcilla limosa. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt Múltiple, (f) Smith-Parlange No Lineal Múltiple, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia

La falta de ajuste de los datos observados a los modelos en la etapa inicial es notable cuando se emplean las siguientes series: total, para suelos con contenidos de humedad bajos, para suelos del tipo arcilla limosa; mientras que se ha encontrado un mejor ajuste para las mediciones realizadas en suelos cuyo contenido de humedad inicial es alto, del tipo arena limosa y limo orgánico. La sensibilidad de estos modelos al conjunto de datos parece estar condicionada por su estructura matemática. Un aspecto a destacar es la falta de ajuste del modelo propuesto por Holtan a los datos observados de la tasa de infiltración.

Desde el punto de vista cuantitativo, los valores dados en la Tabla 5 indican lo siguiente:

Modelo de Philip. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro s varió entre 93.163 y 105.732, C varió entre -143.996 y -100.778, R^2 resultó igual a 0.571. Para la serie de humedad alta: s varía entre 23.4568 y 30.7351, C varió entre -18.2443 y -3.8742, R^2 resultó igual a 0.713. Para la serie de humedad baja: s varía entre 94.8122 y 108.528, C varió entre -150.476 y -101.151, R^2 resultó igual a 0.575.

Modelo de Green-Ampt. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro a varió entre 55.1416 y 119.813, b varió entre -0.1363 y 0.1949, H_c varió entre -1907.15 y 2437.66, R^2 resultó igual a 0.0243. Para la serie de humedad alta: a varió entre 9.317 y 31.3991, b varió entre -0.2403 y 0.2846, H_c varió entre -3385.65 y 3970.12, R^2 resultó igual a 0.1639. Para la serie de humedad baja: a varió entre 64.2051 y 31.3991, b varió entre 0.2972 y 0.8637, H_c varió entre -100.52 y -69.74, R^2 resultó igual a 0.0739.

Modelo de Smith-Parlange No Lineal Múltiple. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro C varió entre 1481.28 y 2108.5, R^2 resultó igual a 0.0066. Para la serie de humedad alta: C varió entre 289.627 y 424.436, R^2 resultó igual a

0.0304. Para la serie de humedad baja: C varió entre 1988.89 y 2790.42, R^2 resultó igual a 0.029.

Modelo de Smith-Parlange No Lineal Simple. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro C varió entre 860.832 y 1657.04, K_s varió entre 68.8878 y 129.785, R^2 resultó igual a 0.0159. Para la serie de humedad alta: C varió entre 169.58 y 336.319, K_s varió entre 14.5973 y 33.8462, R^2 resultó igual a 0.1403. Para la serie de humedad baja: C varía entre 1370.56 y 2388.06, K_s varía entre 53.1787 y 132.874, R^2 resultó igual a 0.0371.

Modelo de Smith-Parlange Lineal. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro C varió entre 540.862 y 1453.74, K_s varió entre 54.8713 y 116.841, R^2 resultó igual a 0.0248. Para la serie de humedad alta: C varió entre 109.832 y 307.462, K_s varió entre 10.3904 y 29.4428, R^2 resultó igual a 0.1667. Para la serie de humedad baja: C varió entre 1005.42 y 2162.22, K_s varió entre 42.8083 y 113.904, R^2 resultó igual a 0.0441.

Modelo de Mishra-Singh. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro f_c varió entre 8.1183 y 37.0561, f_o varió entre -234723 y 458872, a varió entre -553.309 y 1849.25, R^2 resultó igual a 0.6801. Para la serie de humedad alta: f_c varió entre -14.7825 y 5.6532, f_o varió entre 84.4996 y 114.489, a varió entre 1.7092 y 3.2438, R^2 resultó igual a 0.7651. Para la serie de humedad baja: f_c varió entre 4.9114 y 38.421, f_o varió entre -398518 y 684507, a varió entre -915.232 y 2385.81, R^2 resultó igual a 0.6814.

Modelo de Horton. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: para la serie total de los datos; el parámetro f_c varió entre 16.1341 y 44.2106, f_o varió entre 2618.26 y 4145.38, a varió entre 72.7281 y 98.3681, R^2 resultó igual a 0.6742. Para la serie de humedad alta: f_c varió entre -3.5338 y 10.4419, f_o varió entre 84.3015 y 107.462, a varió entre 1.7093 y 3.2438, R^2 resultó igual a 0.7729. Para la serie de

humedad baja: f_c varió entre 12.9876 y 45.5974, f_0 varió entre -2636.08 y 4329.15, a varió entre 72.7851 y 100.505, R^2 resultó igual a 0.6762.

Modelo de Kostiakov. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro a varió entre 0.1651 y 1.3957, b varió entre 1.5114 y 1.8946, R^2 resultó igual a 0.6770. Para la serie de humedad alta: a varió entre 14.6903 y 23.0817, b varió entre 0.4847 y 0.6875, R^2 resultó igual a 0.6955. Para la serie de humedad baja: a varió entre 0.0632 y 1.1977, b varió entre 1.5414 y 1.9745, R^2 resultó igual a 0.6788.

Modelo de Smith (Kostiakov Modificado). A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro a varió entre -0.0286 y 0.6831, b varió entre 1.6566 y 2.1628, f_c varió entre 7.8726 y 37.6696, R^2 resultó igual a 0.6807. Para la serie de humedad alta: a varió entre -222.963 y 663.657, b varió entre -0.1125 y 0.3135, f_c varió entre -646.892 y 238.314, R^2 resultó igual a 0.7447. Para la serie de humedad baja: a varió entre -0.05538 y 0.6141, b varió entre 1.6707 y 2.2316, f_c varió entre 5.48604 y 39.7785, R^2 resultó igual a 0.682.

Modelo de Holtan. A partir de los valores dados en Tabla 5 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie total de los datos: el parámetro a varió entre 0.0119 y 0.02139, S resultó igual a 23721.6, f_c varió entre -76484 y -42513, n varió entre -79.4329 y 82.4294, R^2 resultó igual a 0.06. Para la serie de humedad alta: a varió entre -8.7621 y 8.8541, S varió entre -2.6958E6 y 2.7071E6, f_c varió entre -3.9077E6 y 3.8916E6, n varió entre 0.8578 y 1.9389, R^2 resultó igual a 0.2333. Para la serie de humedad baja: a varió entre -64.2895 y 71.8187, S varió entre -675722 y 677460, f_c varió entre -2.9885E6 y 2.981E6, n varió entre -255.527 y 257.574, R^2 resultó igual a 0.0808.

Tabla 5

Resultados de la Calibración de Modelos de Infiltración. Series: Total, Contenido de Humedad Alta y Contenido de Humedad Baja

N°	Modelo	Serie	Estadísticos	Parámetro			R ²
				s	C		
1	Philip	Total	Mín.	93.163	-143.996		0.5719
			Máx.	105.732	-100.778		
			Prom	99.4473	-122.387		
		Humedad Alta	Mín.	23.4568	-18.2443		0.7133
			Máx.	30.7351	-3.8742		
			Prom	27.0959	-11.0593		
Humedad Baja	Mín.	94.8122	-150.476		0.5754		
	Máx.	108.528	-101.151				
	Prom	101.67	-125.814				
2	Green-Ampt	Total		a	b	Hc	
			Mín.	55.1416	-0.1363	-1907,15	0.0243
			Máx.	119.813	0.1949	2437,66	
		Prom	87.4774	0.0292	265,253		
		Humedad Alta	Mín.	9.31703	-0,2403	-3385,65	0.1639
			Máx.	31.3991	0,2846	3970,12	
Prom	20.3581		0,0221	292,239			
Humedad Baja	Mín.	64.2051	0.2972	-100.5200	0.0739		
	Máx.	136.897	0.8636	-69.7400			
	Prom	100.551	0.5804	-85.1299			
3	Smith-Parlange No Lineal	Total		C			
			Mín.	1481.28			0.0066
			Máx.	2108.5			
		Prom	1794.89				
		Humedad Alta	Mín.	289.627			0.0304
			Máx.	424.436			
Prom	357.032						
Humedad Baja	Mín.	1988.89			0.0290		
	Máx.	2790.42					
	Prom	2389.66					
4	Smith-Parlange No Lineal	Total		C	Ks (mm/h)		
			Mín.	860.832	68.8878		0.0159
			Máx.	1657.04	129.785		
		Prom	1258.93	99.3364			
		Humedad Alta	Mín.	169.58	14.5973		0.1403
			Máx.	336.319	33.8462		
Prom	252.949		24.2218				
Humedad Baja	Mín.	1370.56	53.1787		0.0371		
	Máx.	2388.06	132.874				
	Prom	1879.31	93.0266				
5	Smith-Parlange Lineal	Total		C	Ks (mm/h)		
			Mín.	540.862	54.8713		0.0248
			Máx.	1453.74	116.841		
		Prom	997.301	85.856			
		Humedad Alta	Mín.	109.832	10.3904		0.0166
			Máx.	307.462	29.4428		
Prom	208.647		19.9166				
Humedad Baja	Mín.	1005.42	42.8083		0.0441		
	Máx.	2162.22	113.904				
	Prom	1583.82	78.356				

Tabla 5 (cont.)

N°	Modelo	Serie	Estadísticos	Parámetros				R ²
				fc (mm/h)	fo (mm/h)	a		
6	Mishra-Singh	Total	Mín.	8.1183	-234723	-553.309		0.6801
			Máx.	37.0561	458872	1849.25		
			Prom	22.5872	112075	647.969		
		Humedad Alta	Mín.	-14,7825	84,4996	1.7092		0.7651
			Máx.	5,6532	114,489	3.2438		
			Prom	-4,56462	99,4942	2.4765		
		Humedad Baja	Mín.	4.9139	-398518	-915.232		0.6814
			Máx.	38.421	684507	2385.81		
			Prom	21.6675	142994	735.289		
7	Horton	Total	Mín.	16.1341	2618.26	72.7281		0.6742
			Máx.	44.2106	4145.38	98.3681		
			Prom	30.1723	3381.82	85.5481		
		Humedad Alta	Mín.	-3.53384	84,3015	0,759207		0.7729
			Máx.	10.4419	107,462	2,0821		
			Prom	3.45401	95,8819	1,42065		
		Humedad Baja	Mín.	12.9876	2636.08	72.7851		0.6762
			Máx.	45.5974	4329.15	100.505		
			Prom	29.2925	3482.62	86.6449		
8	Kostiakov	Total	Mín.	0.1651	1.5114			0.6770
			Máx.	1.3957	1.8946			
			Prom	0.7804	1.7030			
		Humedad Alta	Mín.	14.6903	0.4847			0.6955
			Máx.	23.0817	0.6874			
			Prom	18.886	0.5860			
		Humedad Baja	Mín.	0.0632	1.5414			0.6788
			Máx.	1.1977	1.9745			
			Prom	0.6304	1.758			
9	Kostiakov Modificado	Total	Mín.	-0.0286	1.6566	7.8726		0.6807
			Máx.	0.6830	2.1628	37.669		
			Prom	0.3272	1.9097	22.7711		
		Humedad Alta	Mín.	-222.963	-0.1125	-646.892		0.7447
			Máx.	663.657	0.3135	238.314		
			Prom	220.347	0.1005	-204.289		
		Humedad Baja	Mín.	-0,0553	1.6706	5.48604		0.6820
			Máx.	0,6141	2.2316	39.7785		
			Prom	0,2793	1.9511	22.6323		
10	Holtan	Total	Mín.	-76484.0	0.0119	23721.6	-79.4329	0.06
			Máx.	-42513.0	0.0213	23721.6	82.4294	
			Prom	-59498.5	0.0166	23721.6	1.4982	
		Humedad Alta	Mín.	-3,907E6	-8,76212	-2.695E6	0.8578	0.2333
			Máx.	3,891E6	8,85408	2.707E6	1.9389	
			Prom	-8057.01	0,0459821	5659.8	1.3983	
		Humedad Baja	Mín.	-2,988E6	-64.2895	-675722	-255.527	0.0808
			Máx.	2,981E6	71.8187	677460	257.574	
			Prom	-3526.84	3.76456	869.25	1.0233	

En la Tabla 5 se presentaron los resultados del ajuste de los modelos a los datos observados, agrupados en las series: total y correspondientes al contenido de humedad. Seguidamente en la Tabla 6 se dan los resultados de la aplicación de modelos de infiltración para las series de datos clasificadas de acuerdo al tipo de suelo como: arena limosa, limo orgánico y arcilla limosa, cuyos ajustes a los modelos han sido representados en las Figuras 16, 17 y 18.

Modelo de Philip. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro s varió entre 133.818 y 164.434, C varió entre -258.52 y -144.813, R^2 resultó igual a 0.6837. Para la serie de limo orgánico: s varió entre 71.7199 y 82.379, C varió entre -101.432 y -67.0154, R^2 resultó igual a 0.6446. Para la serie de arcilla limosa: s varió entre 80.4353 y 111.341, C varió entre -180.621 y -63.7521, R^2 resultó igual a 0.5217.

Modelo de Green-Ampt. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro a varió entre -73.559 y 165.634, b varió entre -7.1086 y 14.6974, H_c varió entre -99.5793 y -34.9744, R^2 resultó igual a 0.2325. Para la serie de limo orgánico: a varió entre 14.9132 y 72.5299, b varió entre -0.2267 y 0.2738, H_c varió entre -8268.92 y 9922.26, R^2 es igual a 0.0572. Para la serie de arcilla limosa: a varió entre 47.2852 y 200.715, b varió entre -0.4553 y 0.4459, H_c varió entre -98552.8 y 96184.7, R^2 resultó igual a 0.0109.

Modelo de Smith-Parlange No Lineal Múltiple. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro C varió entre 5411.01 y 8513.58, R^2 resultó igual a 0.1779. Para la serie de limo orgánico: C varió entre 1188.88 y 1699.09, R^2 resultó igual a 0.0501. Para la serie de arcilla limosa: C varió entre 823.27 y 2368.41, R^2 resultó igual a 0.

Modelo de Smith-Parlange No Lineal Simple. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro C varió entre 5367,58 y 11828.1, K_s varió entre -402.177 y 181.783, R^2 resultó igual a 0.1734. Para la serie de limo orgánico: C varió entre 840.363 y 1507.09, K_s varió entre 25.3382 y 90.6231, R^2 resultó igual a 0.0539. Para la serie de arcilla limosa: C varió entre -4796.0 y 4930.26, K_s varió entre 98.925 y 208.995, R^2 resultó igual a 0.

Modelo de Smith-Parlange Lineal. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro C varió entre 5878.55 y 11625.7, K_s varió entre -166.878 y 49.38, R^2 resultó igual a 0.1744. Para la serie de limo orgánico: C varió entre 645.124 y 1408.78, K_s varió entre 19.1414 y 74.6569, R^2 resultó igual a 0.059. Para la serie de arcilla limosa: C varió entre -359.601 y 1612.31, K_s varió entre 52.3104 y 196.002, R^2 resultó igual a 0.0113.

Modelo de Mishra-Singh. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro f_c varió entre -23.2418 y 34.4435, f_0 varió entre -3.0988E7 y -3.5467E7, a varió entre -18326.0 y 23345.7, R^2 es igual a 0.8712. Para la serie de limo orgánico: f_c varió entre 7.6625 y 32.6503, f_0 varió entre 1353.37 y 3866.8, a varió entre 36.3589 y 94.3467, R^2 resultó igual a 0.7011. Para la serie de arcilla limosa: f_c varió entre -20.5154 y 61.5657, f_0 varió entre -3.1306E6 y -3.6417E6, a varió entre -6957.98 y 9041.82, R^2 resultó igual a 0.621.

Modelo de Horton. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro f_c varió entre -4.2709 y 50.6575, f_0 varió entre 4831.77 y 10024.9, a varió entre 86.7913 y 128.108, R^2 es igual a 0.876. Para la serie de limo orgánico: f_c varió entre 16.7709 y 40.7979, f_0 varió entre 119.18 y 1629.55, a varió entre 41.0422 y 59.9513, R^2 resultó igual a 0.6899. Para la serie de arcilla limosa: f_c varió entre -10.6795 y

69.0287, f_0 varió entre 1311.27 y 5832.82, a varió entre 55.6868 y 128.953, R^2 resultó igual a 0.6175.

Modelo de Kostiakov. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro a varió entre -0.0406 y 0.1808, b varió entre 2.01936 y 2.76493, R^2 resultó igual a 0.8751. Para la serie de limo orgánico: a varió entre 3.3132 y 9.5958, b varió entre 0.9918 y 1.2305, R^2 resultó igual a 0.7037. Para la serie de arcilla limosa: a varió entre -0.5466 y -1.3545, b varió entre 1.2878 y 2.4125, R^2 resultó igual a 0.6184.

Modelo de Smith (Kostiakov Modificado). A partir de los valores dados en Tabla 13 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro a varió entre -0.4128 y 0.8088, b varió entre 1.3009 y 2.7344, f_c varió entre -19.3561 y 64.2267, R^2 resultó igual a 0.6216. Para la serie de limo orgánico: a varió entre 1.2103 y 7.6782, b varió entre 1.027 y 1.3718, f_c varía entre -3.865 y 25.8735, R^2 resultó igual a 0.705. Para la serie de arcilla limosa: a varió entre -0.0404 y 0.1337, b varió entre 2.0525 y 2.9229, f_c varió entre -8.5102 y 47.6389, R^2 resultó igual a 0.8766.

Modelo de Holtan. A partir de los valores dados en Tabla 6 se pueden realizar las siguientes afirmaciones para la serie de arena limosa; el parámetro a varió entre -48156.6 y 48190.5, S varía entre -1.3087E6 y 1.3095E6, f_c varió entre -1.401E7 y 1.4008E7, n varió entre -339.485 y 341.293, R^2 es igual a 0.17. Para la serie de limo orgánico: a varió entre -26440.4 y 26462.2, S varía entre -597648 y 598421, f_c varía entre -2.854E6 y 2.8515E6, n varió entre -288.0 y 289.651, R^2 resultó igual a 0.0797. Para la serie de arcilla limosa: a varió entre -8240.7 y 8259.77 y 71.8187, S varió entre -150089 y 150453, f_c varió entre -955111 y 953759, n varió entre -115.81 y 117.596, R^2 resultó igual a 0.0763.

Tabla 6

Resultados de la Calibración de Modelos de Infiltración. Serie: Tipo de Suelo

N°	Modelo	Tipo de suelo	Estadístico	Parámetros			R ²	
				s	C			
1	Philip							
		Arena Limosa	Mín. Máx. Prom	133.818 164.434 149.126	-258.52 -144.813 -201.667		0.6837	
		Limo Orgánico	Mín. Máx. Prom	71.7199 82.379 77.0494	-101.432 -67.0154 -84.2239		0.6446	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín. Máx. Prom	80.4353 111.341 95.8882	-180.621 -63.7521 -122.186		0.5217	
					a	b	Hc	
		Arena Limosa	Mín. Máx. Prom	-73.559 165.634 46.037	-7.1086 14.6974 3.7943	-99.5793 -34.9744 -67.2769	0.2325	
		Limo Orgánico	Mín. Máx. Prom	14.9132 72.5299 43.7215	-0.2267 0.2738 0.0256	-8268.92 9922.26 826.673	0.0572	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín. Máx. Prom	47.2852 200.715 124.0	-0.4553 0.4459 -0.0046	-98552.8 96184.7 -1184.02	0.0109	
					C			
3	Smith-Parlange No Lineal Permeabilidad Variable	Arena Limosa	Mín. Máx. Prom	5411.01 8513.58 6962.29			0.1779	
		Limo Orgánico	Mín. Máx. Prom	1188.88 1699.09 1443.98			0.0501	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín. Máx. Prom	823.27 2368.41 1595.84			0.0	
					C	Ks (mm/h)		
		Arena Limosa	Mín. Máx. Prom	5367,58 11828,1 8597.85	-402.177 181.783 -110.197		0.1734	
		Limo Orgánico	Mín. Máx. Prom	840,363 1507,09 1173,73	25.3382 90.6231 57.9807		0.0539	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín. Máx. Prom	-4796,0 4930,26 67,1275	98.925 208.995 153.96		0.0	
					C	Ks (mm/h)		
		Arena Limosa	Mín. Máx. Prom	5878.55 11625.7 8752.1	-166.878 49.38 -58.749		0.1744	
5	Smith-Parlange Lineal Permeabilidad como constante	Limo Orgánico	Mín. Máx. Prom	645.124 1408.78 1026.95	19.1414 74.6569 46.8992		0.0590	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín. Máx. Prom	-359.601 1612.31 626.353	52.3104 196.002 124.156		0.0113	

Tabla 6 (cont.)

N°	Modelo	Serie	Estadístico				R ²	
				fc (mm/h)	fo (mm/h)	a		
6	Mishra-Singh			fc (mm/h)	fo (mm/h)	a		
		Arena Limosa	Mín.	-23.2418	-3.0988E7	-18326.0	0.8712	
			Máx.	34.4435	3.5467E7	23345.7		
			Prom	5.6008	2.2394E6	2509.87		
		Limo Orgánico	Mín.	7.6625	1353.37	36.3589	0.7011	
			Máx.	32.6503	3866.8	94.3467		
			Prom	20.1565	2610.08	65.3528		
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-20.5154	-3.1306E6	-6957.98	0.621	
			Máx.	61.5657	3.6417E6	9041.82		
Prom	20.5251		255581	1041.92				
7	Horton			fc (mm/h)	fo (mm/h)	a		
		Arena Limosa	Mín.	-4.2709	4831.77	86.7913	0.876	
			Máx.	50.6575	10024.9	128.108		
			Prom	23.1933	7428.36	107.45		
		Limo Orgánico	Mín.	16.7709	1119.18	41.0422	0.6899	
			Máx.	40.7979	1629.55	59.9513		
			Prom	28.7844	1374.36	50.4968		
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-10.6795	1311.27	55.6868	0.6175	
			Máx.	69.0287	5832.82	128.953		
Prom	29.1746		3572.05	92.3198				
8	Kostiakov			a	b			
		Arena Limosa	Mín.	-0.0406107	2.01936	0.8751		
			Máx.	0.180867	2.76493			
			Prom	0.0701282	2.39214			
		Limo Orgánico	Mín.	3.3132	0.9918	0.7037		
			Máx.	9.5958	1.2305			
			Prom	6.4545	1.11118			
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-0.5466	1.2878	0.6184		
			Máx.	1.3545	2.4125			
Prom	0.4039		1.8501					
9	Kostiakov Modificado			a	b	fc (mm/h)		
		Arena Limosa	Mín.	-0.4128	1.3009	-19.3561	0.6216	
			Máx.	0.8088	2.7344	64.2267		
			Prom	0.1979	2.0176	22.4353		
		Limo Orgánico	Mín.	1.2103	1.0273	-3.8650	0.705	
			Máx.	7.6782	1.3718	25.8735		
			Prom	4.4442	1.1996	11.0042		
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-0.0404	2.0525	-8.5102	0.8766	
			Máx.	0.1337	2.9229	47.6389		
Prom	0.0466		2.4877	19.5643				
10	Holtan	Parámetro		fc (mm/h)	a	So	n	
		Arena Limosa	Mín.	-1.4014E7	-48156.6	-1.3087E6	-339.485	0.17
			Máx.	1.4008E7	48190.5	1.3095E6	341.293	
			Prom	-3238.46	16.9839	401.397	0.9038	
		Limo Orgánico	Mín.	-2,85409E6	-26440.4	-597648	-288.0	0.0797
			Máx.	2,8515E6	26462.2	598421	289.651	
			Prom	-1293,77	10.8949	386,568	0.8256	
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-955111	-8240.7	-150089	-115.81	0.0763
			Máx.	953759	8259.77	150453	117.596	
Prom	-676.351		9.53396	182.091	0.893			

Sobre la base del análisis de los valores dados en las Tablas 5 y 6 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Los modelos dependientes del tiempo: Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Kostiakov Modificado, dieron como resultado valores de R^2 que variaron entre 0.5217 y 0.8751 para las diversas series de los datos observados de infiltración.

En cuanto a los parámetros del modelo de Philip, se encontró un ajuste satisfactorio a los datos de infiltración observados, R^2 varió entre 0.5217 y 0.7133. Según Philip (1957) el parámetro s corresponde a la sorptividad del suelo. White y Sully (1987) y Nachabe et al., (1997) indican que s puede ser expresado en términos de la conductividad hidráulica saturada, K_s , o bien la diferencia entre el contenido de humedad saturado e inicial. En esta investigación se encuentra que el intervalo en cual varía el parámetro s no se aproxima a los valores de las propiedades físicas mencionadas. En cuanto al parámetro C , los valores máximos y mínimos encontrados para los intervalos resultaron negativos para todas las series de datos. Philip (1957) planteó que este parámetro representa las tres cuartas partes de K_s , como un intento de aproximar al parámetro C a un proceso físico.

En referencia al modelo de Mishra-Singh, se encontró un ajuste satisfactorio a los datos observados de infiltración, R^2 varió entre 0.6801 y 0.8712. Sin embargo, cabe destacar que, los valores máximos y mínimos encontrados mediante ajuste por optimización para los intervalos de la mayoría de las series asociados con el parámetro f_0 son extremadamente altos y no son consistentes con el evento físico.

El modelo propuesto por Horton representó satisfactoriamente a los datos observados de infiltración, R^2 varió entre 0.6175 y 0.876 para la totalidad de las series extraídas de los datos. Así mismo, los valores máximos y mínimos encontrados para los parámetros f_c y f_0 resultaron aproximados a los medidos en campo.

En relación al modelo propuesto por Kostiakov se encontró ajuste satisfactorio a los datos observados de infiltración, R^2 varió entre 0.6184 y 0.8751. Este modelo no posee parámetros a los que se intente asignar un significado físico.

En cuanto al modelo propuesto por Smith (1972) como una modificación del modelo de Kostiakov se encontró ajuste satisfactorio a los datos observados de

infiltración, R^2 varió entre 0.6216 y 0.8716. El parámetro f_c se aproximó a los valores medidos en campo.

Los modelos que dependen de las variables: conductividad hidráulica saturada, infiltración acumulada y carga de agua sobre la superficie no se ajustaron a los datos observados de infiltración. R^2 varió entre 0 y 0.23.

Comparación del Análisis Cualitativo con el Cuantitativo para la Calibración de los Modelos de Infiltración.

De la comparación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

A pesar de haber encontrado que todos los modelos dependientes del tiempo estiman satisfactoriamente el proceso de infiltración basado en los valores obtenidos de R^2 , sólo el modelo propuesto por Horton cumple con el ajuste cualitativo y cuantitativo simultáneamente en la totalidad de las series analizadas. Los otros modelos tales como Mishra-Singh, Kostiakov y Kostiakov modificado, presentan limitantes, bien sea en el ajuste al conjunto total de datos observados de infiltración de cada serie representando, por lo general, sólo las etapas de transición y estabilización o presentando incertidumbre en relación a los valores de los parámetros.

En cuanto a los modelos dependientes de la conductividad hidráulica saturada, infiltración acumulada y carga total, propuestos Green-Ampt, Smith- Parlange en sus diferentes versiones y Holtan, de manera general, se puede afirmar que, tanto cualitativa como cuantitativamente su ajuste a los datos observados de infiltración es deficiente o nulo.

4.2.1.3 Ajustes de Modelos de Lluvia-Escorrentía

Ajustes de Modelos de Lluvia-Escorrentía para Eventos de Una Hora de Duración

En la Tabla 7 se presentan los resultados de seis parámetros, β_1 hasta β_6 , correspondientes a cinco variables que representan la precipitación ocurrida

dentro de tormentas de duración 1 hora separada mediante intervalos iguales de tiempo, P_t hasta P_{t-5} para ajustar cinco modelos de regresión a datos observados de escorrentía: (1) regresión Múltiple Lineal (RLM) (2) Regresión No Lineal de orden 2 (RNL-1), (3) Regresión No Lineal de orden 3 (RNL-2), (4) Regresión No Lineal de orden 4 (RNL-3), (5) Regresión No Lineal de orden 5 (RNL-4). Los valores dados en la Tabla 7 para los parámetros de los modelos de regresión indican lo siguiente:

RLM: β_1 varió entre -0.065 y -0.044 L/s/mm, β_2 varió entre 0.016 y 0.0404 L/s/mm, β_3 varió entre 0.018 y 0.043 L/s/mm, β_4 varió entre -0.002 y 0.028 L/s/mm, β_5 varió entre 0.017 y 0.038 L/s/mm, β_6 varió entre 0.017 y -0.029 L/s/mm.

RNL-1: β_1 varió entre 0.00406 y 0.00475 L/s/mm, β_2 varió entre 0.0033 y 0.00041 L/s/mm, β_3 varió entre 0.0014 y 0.0021 L/s/mm, β_4 varió entre 0.0026 y 0.0036 L/s/mm, β_5 varió entre 0.0024 y 0.0030 L/s/mm, β_6 varió entre 0.0021 y -0.023 L/s/mm.

RNL-2: β_1 varía entre 0.0025 y 0.0029 L/s/mm, β_2 varió entre 0.00039 y 0.00084 L/s/mm, β_3 varió entre -6.051E-5 y 0.00025 L/s/mm, β_4 varió entre 0.00044 y 0.00099 L/s/mm, β_5 varió entre 0.00014 y 0.00049 L/s/mm, β_6 varió entre 0.00021 y 0.00033 L/s/mm.

RNL-3: β_1 varió entre 0.0025 y 0.0029 L/s/mm, β_2 varió entre 0.00039 y 0.00084 L/s/mm, β_3 varió entre -6.051E-5 y 0.00025, β_4 varió entre 0.00044 y 0.00099 L/s/mm, β_5 varió entre 0.00014 y 0.00049 L/s/mm, β_6 varió entre 0.00021 y 0.00033 L/s/mm.

RNL-4: β_1 varió entre 0.00024 y 0.0029 L/s/mm, β_2 varió entre -3.33E-6 y 4.35E-5 L/s/mm, β_3 varió entre -1.26E-5 y 9.68E-6 L/s/mm, β_4 varió entre 1.02E-5 y 6.16E-5 L/s/mm, β_5 varió entre -1.29E-5 y 1.67E-5 L/s/mm, β_6 varió entre 2.2E-6 y 9.02E-6 L/s/mm.

Los resultados de la Tabla 7 indican lo siguiente: los coeficientes de las variables de los modelos RLM, RNL-1, RNL-2, y RNL-3 son significativos entre el tercer y quinto modelo, se observa que la mayoría de los intervalos de los parámetros son poco significativos debido a los valores variaron entre 10^{-4} y 10^{-6} ,

indicando una influencia baja sobre la escorrentía. Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que, la escorrentía puede ser estimada mediante los modelos dos primeros modelos.

Tabla 7

Coefficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía (D=1H)

Parámetro	Variable	Estadístico	RLM	RNL-1	RNL-2	RNL-3	RNL-4
β_1	P_t	Promedio	-0.0550026	0.0044062	0.00272575	0.002726	0.000264
		Mínimo	-0.06563	0.0040606	0.00250252	0.002503	0.000238
		Máximo	-0.0443704	0.0047518	0.00294898	0.002949	0.00029
β_2	P_{t-1}	Promedio	0.028196	0.0037558	0.00061954	0,00062	2.01E-05
		Mínimo	0.015959	0.003382	0.00039238	0.000392	-3.33E-06
		Máximo	0.0404331	0.0041296	0.0008467	0.000847	4.35E-05
β_3	P_{t-2}	Promedio	0.0307009	0.001791	9.8895E-05	9.89E-05	-1.44E-06
		Mínimo	0.0187552	0.0014777	-6.051E-05	-6.1E-05	-1.26E-05
		Máximo	0.0426467	0.0021044	0.0002583	0.000258	9.68E-06
β_4	P_{t-3}	Promedio	0.0130657	0.0031408	0.00071735	0.000717	3.59E-05
		Mínimo	-0.0024481	0.0026748	0.00044309	0.000443	1.02E-05
		Máximo	0.0285795	0.0036067	0.00099161	0.000992	6.16E-05
β_5	P_{t-4}	Promedio	0.0280107	0.0027689	0.00031924	0.000319	1.9E-06
		Mínimo	0.0173823	0.0024637	0.00014717	0.000147	-1.29E-05
		Máximo	0.038639	0.0030741	0.00049131	0.000491	1.67E-05
β_6	P_{t-5}	Promedio	0.0234715	0.0022161	0.00027613	0.000276	5.61E-06
		Mínimo	0.0176518	0.0020806	0,00021451	0.000215	2.2E-06
		Máximo	0.0292912	0.0023515	0.00033776	0.000338	9.02E-06

Ajustes de Modelos de Lluvia-Escorrentía para Eventos de Dos Horas de Duración

En la Tabla 8 se presentan los resultados de doce parámetros, β_1 hasta β_{12} , correspondientes a doce variables que representan la precipitación ocurrida dentro de tormentas de duración 2 horas medidos a intervalos iguales de tiempo, P_t hasta P_{t-11} para ajustar cinco modelos de regresión a datos observados de escorrentía: (1) regresión Múltiple Lineal (RLM) (2) Regresión No Lineal de orden 2 (RNL-1), (3) Regresión No Lineal de orden 3 (RNL-2), (4) Regresión No Lineal de orden 4

(RNL-3), (5) Regresión No Lineal de orden 5 (RNL-4). Los valores dados en la Tabla 8 para los parámetros de los modelos de regresión indican lo siguiente:

RLM: β_1 varió entre -0.102 y -0.036 L/s/mm, β_2 varió entre 0.017 y 0.0858 L/s/mm, β_3 varió entre -0.061 y 0.01057 L/s/mm, β_4 varió entre 0.01041 y 0.18012 L/s/mm, β_5 varió entre -0.1883 y -0.1002, β_6 varió entre 0.0605 y 0.1115, β_7 varió entre 0.0829 y 0.1466, β_8 varió entre 0.2305 y 0.28857 L/s/mm, β_9 varió entre 0.2305 y 0.28857 L/s/mm, β_{10} varió entre 0.0258 y 0.033 L/s/mm, β_{11} varió entre -0.004 y 0.0038 L/s/mm, β_{12} varió entre 0.00147 y 0.00987 L/s/mm.

RNL-1: β_1 varió entre -0.016 y 0.09, β_2 varió entre -0.0755 y 0.04617 L/s/mm, β_3 varió entre -0.04383 y 0.089 L/s/mm, β_4 varió entre -0.0474 y 0.0848 L/s/mm, β_5 varía entre -0.024 y 0.046 L/s/mm, β_6 varió entre -0.02767 y 0.0608 L/s/mm, β_7 varió entre -0.0524 y 0.0019, β_8 varía entre 0.0017 y 0.0101, β_9 varió entre 0.002692 y 0.0076 L/s/mm, β_{10} varió entre 0.00181 y 0.00691 L/s/mm.

RNL-2: β_1 varió entre -0.0023 y 0.034 L/s/mm, β_2 varió entre -0.0375 y -0.00267 L/s/mm, β_3 varió entre 0.01164 y 0.04899 L/s/mm, β_4 varió entre -0.004 y 0.043 L/s/mm, β_5 varió entre -0.004 y 0.014 L/s/mm, β_6 varió entre -0.0137 y 0.0097 L/s/mm, β_7 varía entre -0.033 y -0.0207 L/s/mm, β_8 varió entre 0.000383 y 0.00204 L/s/mm, β_9 varió entre 0.00091 y 0.0015 L/s/mm, β_{10} varió entre 0.0053 y 0.00116 L/s/mm.

RNL-3: β_1 varió entre 0.000834 y 0.012 L/s/mm, β_2 varió entre -0.01745 y -0.00567 L/s/mm, β_3 varió entre 0.01194 y 0.02425 L/s/mm, β_4 varió entre 0.0473 y 0.0186 L/s/mm, β_5 varió entre 0.00756 y 0.006457 L/s/mm, β_6 varió entre -0.00727 y -0.00027 L/s/mm, β_7 varió entre -0.01415 y -0.01052 L/s/mm, β_8 varió entre $8.56E-5$ y 0.00045 L/s/mm, β_9 varió entre 0.000203 y 0.000302 L/s/mm, β_{10} varió entre 0.000104 y 0.0002 L/s/mm.

RNL-4: β_1 varió entre -0.000111 y 0.004251 L/s/mm, β_2 varió entre -0.0078 y -0.003414 L/s/mm, β_3 varió entre 0.0067 y 0.01122 L/s/mm, β_4 varió entre 0.002185 y 0.07519 L/s/mm, β_5 varió entre 0.00103 y 0.002987 L/s/mm, β_6 varió entre -0.003556 y -0.001324 L/s/mm, β_7 varió entre -0.00526 y -0.004143 L/s/mm, β_8 varió entre $1.92E-5$ y 0.00015 L/s/mm, β_9 varió entre $3.92E-5$ y $5.6E-5$ L/s/mm, β_{10} varió entre $1.8E-5$ y $3.42E-5$ L/s/mm.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 8 se pueden realizar las siguientes afirmaciones: los coeficientes de las variables de los modelos RLM, RNL-1, RNL-2, y RNL-3 son significativos. En el cuarto y quinto modelo, se observa que la mayoría de los intervalos de los parámetros son poco significativos a partir de la séptima variable de precipitación debido a los valores variaron entre 10^{-4} y 10^{-5} , indicando una influencia baja sobre la escorrentía. Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que, la tasa de erosión puede ser estimada mediante los modelos tres primeros modelos.

Tabla 8

Coefficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía (D=2H)

Parámetro	Variable		(1) RLM	(2) RNL-1	(3) RNL-2	(4) RNL-3	(5) RNL-4
β_1	Pt	Promedio	-0.0693	0.0369	0.0182	0.0064	0.0020
		Mínimo	-0.1021	-0.0161	0.0023	0.0008	-0.0001
		Máximo	-0.0365	0.0900	0.0342	0.0120	0.0042
β_2	Pt-1	Promedio	0.0519	-0.0147	-0.0201	-0.0115	-0.0056
		Mínimo	0.0179	-0.0755	-0.0375	-0.0174	-0.0078
		Máximo	0.0858	0.0461	-0.0026	-0.0056	-0.0034
β_3	Pt-2	Promedio	-0.0252	0.0230	0.0303	0.0180	0.0089
		Mínimo	-0.0610	-0.0438	0.0116	0.0119	0.0067
		Máximo	0.0105	0.0899	0.0489	0.0242	0.0112
β_4	Pt-3	Promedio	0.1421	0.0186	0.0240	0.0117	0.0048
		Mínimo	0.1041	-0.0474	0.0041	0.0047	0.0021
		Máximo	0.1801	0.0848	0.0438	0.0186	0.0075
β_5	Pt-4	Promedio	-0.1442	0.0111	0.0051	0.0036	0.0020
		Mínimo	-0.1882	-0.0237	-0.0040	0.0007	0.0010
		Máximo	-0.1002	0.0460	0.0144	0.0064	0.0029
β_6	Pt-5	Promedio	-0.2504	0.0166	-0.0020	-0.0037	-0.0024
		Mínimo	-0.2918	-0.0276	-0.0137	-0.0072	-0.0035
		Máximo	-0.2091	0.0608	0.0097	-0.0002	-0.0013
β_7	Pt-6	Promedio	0.0860	-0.0252	-0.0272	-0.0123	-0.0047
		Mínimo	0.0605	-0.0524	-0.0337	-0.0141	-0.0052
		Máximo	0.1115	0.0019	-0.0207	-0.0105	-0.0041
β_8	Pt-7	Promedio	0.1147	0.0059	0.0012	0.0002	6.2E-05
		Mínimo	0.0829	0.0017	0.0003	8.56E-05	1.92E-05
		Máximo	0.1466	0.0101	0.0020	0.0004	0.0001
β_9	Pt-8	Promedio	0.2595	0.0051	0.0012	0.0002	4.76E-05
		Mínimo	0.2305	0.0026	0.0009	0.0002	3.92E-05
		Máximo	0.2885	0.0076	0.0015	0.0003	5.6E-05
β_{10}	Pt-9	Promedio	0.0294	0.0043	0.0008	0.0001	2.61E-05
		Mínimo	0.0258	0.0018	0.0005	0.0001	1.8E-05
		Máximo	0.0331	0.0069	0.0011	0.0002	3.42E-05
β_{11}	Pt-10	Promedio	-9.75E-05				
		Mínimo	-0.0040				
		Máximo	0.0038				
β_{12}	Pt-11	Promedio	0.0056				
		Mínimo	0.0014				
		Máximo	0.0098				

Ajuste de Modelo para Lluvia-Escorrentía basado en Redes Neuronales Artificiales

El modelo de RNA desarrollado en esta investigación consiste de tres capas, una de entrada, una oculta, y una de salida. Los datos de entrada al modelo RNA están constituidos por doce ordenadas de la lluvia de cada tormenta; los datos de salida, por doce ordenadas de escorrentía de los hidrogramas de escorrentía. Setenta y tres conjuntos de datos entrada/salida son normalizados para obtener media cero y varianza uno (0, 1). Se investiga una arquitectura RNA de 12-N-12, donde el número de neuronas ocultas N de 20 es el que proporciona el mínimo error de entrenamiento; es decir, el modelo es (12-20-12).

En la Tabla 9 se presentan los resultados del desempeño de los modelos para la estimación de la escorrentía observada a partir de lluvias de tormentas de duración correspondiente a una y dos horas. Los valores dados en la tabla indican que: para eventos de 1 y 2 horas de duración el ajuste de los modelos RLM y RNA es satisfactorio, ya que R^2 , en ambos casos es mayor que 0.99; mientras que para los modelos RNLM polinómicos, R^2 está alrededor de 0.5, mejorando para lluvias de 1 hora. Sobre la base de estos resultados, se puede afirmar que, en términos de R^2 , el proceso lluvia-escorrentía se ajusta mejor a los modelos que usan la herramienta RNA que a aquellos que usan las técnicas clásicas de optimización. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Jain y otros (2001); Jain y otros (2002); Jain y otros (2004); Kumar, (2001); Srinivasulu y otros (2006).

Tabla 9
Resultados en la Calibración de los Modelos lluvia- Escorrentía

Modelo	R^2 (D=1H)	R^2 (D=2H)
RLM	0.999816	0.999791
RNLM-1	0.999275	0.594182
RNLM-2	0.98903	0.559346
RNLM-3	0.954918	0.481252
RNLM-4	0.893898	0.33729
RNA 12-20-12	1	0.99585

4.2.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos

A continuación se presentan los resultados de la modelación de la erosión y el transporte de sedimentos, que incluyen los ajustes de los parámetros de los siguientes modelos de erosión: basados en procesos físicos, entre los cuales uno de los procesos involucrados es el transporte de sedimentos; modelos de regresión y técnicas de inteligencia artificial.

Calibración de los Modelos de Erosión basados en Procesos Físicos

A continuación se presenta la calibración de los componentes de los modelos de erosión basados en procesos físicos: WEPP, DWEPP; EUROSEM y CIHAM-UC; que incluyen los siguientes procesos: desprendimiento de partículas sólidas, transporte de sedimentos y deposición.

Calibración de los Procesos de Erosión en Surcos Usando la Serie Total

Ajuste del Modelo de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c). En la Tabla 10 se presentan los resultados de los parámetros del modelo de regresión para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas (D_c) empleado como un componente dentro de los modelos WEPP y DWEPP, como se indicó el Capítulo II.

En la Tabla 10 se muestran los parámetros de la Ecuación (40), empleada para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo en surcos. En general, se pueden realizar las siguientes afirmaciones acerca de los parámetros K_c y τ_c : a) K_c varió entre 1.31E-06 y 1.525E-06 s/m, b) τ_c varió entre 0.704 y 1.489 Pa; c) el error estándar de estimación de los intervalos resultó bajo en todos los casos. En la Tabla 11 se muestran los estadísticos del ajuste de la Ecuación (40) al conjunto de observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0.8%, 1%, 1.5%, 2.5% y 13%. Los resultados de los estadísticos se resumen como sigue: R^2 : resultó igual a 0.682. R^2_{ajust} : resultó igual a 0.681, su reducción es poco significativa en relación al R^2 .

Cp de Mallows: disminuyó ligeramente en relación al número de variables independientes en la ecuación. **Estadístico de Durbin-Watson:** resultó igual a 0.66. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y la validación haciendo énfasis en el error porcentual medio absoluto (EPMA) y el error porcentual medio (EPM). El primero varió entre 47.87 y 57.9; el segundo entre -20.52 y -33.74. En general, los errores no variaron significativamente entre las etapas de la calibración y la validación. El resto de los errores puede ser observado en la Tabla 11.

Tabla 10
Parámetros de Modelo para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c)

Ec.	Variable	Parámetro	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
40	D_c	K_r	s/m	0.000001418	5.43497E-8	0.00000131163	0.0000015255
	(kg/s/m ²)	τ_c	Pa	1.09707	0.199697	0.704172	1.48997

Tabla 11
Resultados en la Calibración del Modelo para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c)

Ec.	p	n	R ²	(R ²)adj.	Cp	S _{xy}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	n	EPMA	EPM
a) Durante la Calibración													b) Durante la Validation		
40	1	320	0.682	0.681	0	2.45E-6	0.66	6.04E-12	2.08E-06	47.87	-7.72E-13	-20.52	84	57.9	-33.74

Ec.: Ecuación; p: Número de variables independientes en el modelo; n: Número de datos observados; R²: Coeficiente de determinación; (R²)adj.: coeficiente de determinación ajustado; Cp: Coeficiente de Mallows; S_{xy}: Error estándar de estimación; d: estadístico de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; EMA: Error Medio Absoluto; EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto (%); EM: Error Medio; EPM: Error Porcentual Medio (%).

Proceso de Transporte de Sedimentos

En la Tabla 12 se muestran los parámetros de las Ecuaciones (42), (48) y (50) para la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos en los surcos de las siguientes pendientes: 0.8%; 1%; 1.5%; 2.5%, y 13%. En general, se pueden realizar las siguientes afirmaciones acerca de los parámetros K_b , b y c : **Coeficiente de transporte (K_b):** a) las unidades difieren entre las Ecuaciones (42), (48) y (50); b) los rangos encontrados para las Ecuaciones (42), (48) y (50) variaron como sigue: 9.92906E-8 y 1.52669E-7; 7.634 y 34.583; 0.421274 y 0.89279, respectivamente, c) el error estándar de estimación de los intervalos es moderadamente bajo en todos los casos. **Parámetro b :** a) los rangos encontrados para las Ecuaciones (42), (48) y (50) variaron como sigue: 1.51934 y 1.70542; 0.3985 y 1.2993; 2.0877 y 2.22844; respectivamente, b) el error estándar de

estimación de los intervalos resultó bajo en todos los casos. **Parámetro c:** a) el rango encontrado para la Ecuación (15) varió entre 1.09 y 1.193; b) el error estándar de estimación de los intervalos es bajo en todos los casos.

En la Tabla 13 se muestran los estadísticos del ajuste de las Ecuaciones (42), (48) y (50) al conjunto de observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0.8%, 1%, 1.5%, 2.5% y 13%. R^2 : varía entre 0.72 y 0.88. R^2_{ajust} : para todas las ecuaciones se encontró una reducción poco significativa en relación al R^2 . **Cp de Mallows:** para todas las ecuaciones se encontró que disminuye ligeramente en relación al número de variables independientes en cada ecuación. **Estadístico de Durbin-Watson:** en las Ecuaciones (42), (48) y (50) resultó igual a 0.719; 1.09 y 0.74, respectivamente. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y la validación haciendo énfasis en el EPMA y EPM en las ecuaciones (42), (48) y (50): el primero varía entre 56.319 y 63.0818; 12.125 y 13.482; 29.585 y 29.894. El segundo varía entre -13.365 y -31.831; -1.831 y 1.974; -16.597 y -18.547. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación. El resto de los errores puede ser observado en la Tabla 13.

Tabla 12

Coefficientes de Regresión de los Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos

Ec.	Variable	Parámetros	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
42	Tc kg m ⁻¹ s ⁻¹	K _t	kg ^{1-b} m ^{-(1-b)} s ^{-(1-2b)}	1,2598E-7	1,35793E-8	9,92906E-8	1,52669E-7
		b		1,61238	0,0473371	1,51934	1,70542
48		K _t	kg m ^{-(b+1)} s ^{-(1-b)}	21,1093	6,843	7,634	34,583
		b		0,8489	0,2287	0,3985	1,2993
		ϕ _c	m s ⁻¹	-0,05414	0,0221	-0,0978	-0,0104
50		K _t	kg m ^(1-b-c) s ^{-(1+b)}	0,657032	0,120287	0,421274	0,89279
		a		2,15807	0,0359035	2,0877	2,22844
		b		1,14551	0,0244874	1,09751	1,1935

Tabla 13

Resultados en la Calibración del Modelo para la Estimación de la Capacidad de Transporte de Sedimentos

Ec.	p	n	R ²	(R ²)adj.	Cp	S _{xy}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	a) Durante la Calibración			b) Durante la Validation		
													n	EPMA	EPM	n	EPMA	EPM
42	1	437	0,73	0,73	0	1,10E-06	0,71	1,22E-12	9,16E-07	63,08	4,24E-08	-31,83	100	56,31	-13,36			
48	1	320	0,72	0,72	0	0,34	1,09	0,115	0,287	12,12	0,0028	-1,83	96	13,48	1,974			
50	2	700	0,88	0,88	1	1,64E-06	0,74	2,70E-12	1,08E-06	29,58	-5,75E-08	-16,59	165	29,89	-18,54			

Ec.: Ecuación; p: Número de variables independientes en el modelo; n: Número de datos observados; R²: Coeficiente de determinación; (R²)adj.: coeficiente de determinación ajustado; Cp: Coeficiente de Mallows; S_{xy}: Error estándar de estimación; d: estadístico de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; EMA: Error Medio Absoluto; EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto (%); EM: Error Medio; EPM: Error Porcentual Medio (%).

Combinación de los Procesos de Erosión en Surcos

En la Figura 19 se muestra la representación de los procesos de erosión en surcos de pendientes 0.8%, 1%, 1.5% y 2.5%, mediante las Ecuaciones (42), (48) y (50) para la estimación de la capacidad de transporte de los sedimentos (Figuras (19a), (19c), (19e) y (19h)), y de las Ecuaciones (39) y (47) para la estimación de la capacidad de desprendimiento neto (Figuras (19b), (19d), (19f) y (19g)). El ciclo de siembra bajo riego se ha dividido en tres etapas; cada etapa representa 1/3 de la duración total correspondiente a 12 semanas; obteniendo valores promedio de los datos para cada etapa.

En cuanto a la capacidad de transporte de los sedimentos (Figuras (19a), (19c), (19e) y (19h)), la línea continua representa la carga de los sedimentos observada en los surcos; mientras que las barras representan las estimaciones mediante las Ecuaciones (42), (48) y (50). En general se observa que; (a) la Ecuación (50) sobreestima el valor de la capacidad de transporte observada y el resto la subestima y (b) la carga de los sedimentos observada en las etapas desde la 1 hasta la 3 variaron como sigue: entre 1000 y 2500 mg/s; 2000 y 500 mg/s; menor a 500 mg/s. Los valores estimados por la Ecuación (42) en las etapas desde la 1 hasta la 3 variaron como sigue: 500 y 1000 mg/s; 0 y 500 mg/s; menos de 500 mg/s. Los valores estimados por la Ecuación (48) en las etapas desde la 1 hasta la 3 variaron como sigue: entre 1000 y 2500 mg/s; 2000 y 500 mg/s; menor a 500 mg/s. Los valores estimados por la Ecuación (50) en las etapas la 1 hasta la 3 variaron como sigue: 1500 y 3500 mg/s; 500 y 2000 mg/s; 500 y 1000 mg/s; c) la diferencia entre los valores observados y estimados es significativa en la primera etapa del ciclo y disminuye hacia la segunda y tercera etapa. De acuerdo con la teoría de los modelos basados en procesos físicos, cuando la capacidad de transporte de los sedimentos es excedida por la carga de los sedimentos del flujo ocurre el proceso de la deposición (Foster y Meyer, 1975; Morgan et al., 1998).

El proceso de deposición estimado mediante las Ecuaciones (39) y (47) se muestra en las Figuras (19b), (19d) y (19f) y (19g), donde se observan los siguientes aspectos: (a) la mayoría de las veces la Ecuación (47) estima valores más altos que la Ecuación (39); (b) los valores estimados por la Ecuación (39) en

las etapas desde 1 a 3 variaron como sigue: 2 y 6 kg/m²; 0 y 4 kg/m²; 0 y 2 kg/m². Los valores estimados por la Ecuación (47) en las etapas desde 1 a 3 variaron como sigue: 6 y 12 kg/m²; 2 y 6 kg/m²; 2 y 4 kg/m²; (c) la diferencia entre los valores observados y estimados es significativa en la primera etapa del ciclo y disminuye hacia la segunda y tercera etapa.

Calibración de los Procesos de Erosión Usando la Serie según la Pendiente de los Surcos

A continuación se describe el ajuste de los modelos basados en procesos físicos a los datos observados de acuerdo con las pendientes de los surcos que se indican como sigue: 0.8%; 1%; 2.5% y 13%.

Calibración y validación de modelos de estimación de la capacidad de desprendimiento

La relación que se suele asumir entre la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas del suelo (D_c) y el esfuerzo cortante del flujo (τ) se basa en una función lineal (Figura 20). La pendiente de la línea describe esta relación, la cual representa a la erodabilidad del suelo (K_c). El valor del esfuerzo cortante del flujo se puede asociar con el esfuerzo cortante crítico del suelo (τ_c) cuando la tasa de desprendimiento de las partículas del surco es igual a cero, el cual corresponde al intercepto de la línea con el eje del esfuerzo cortante.

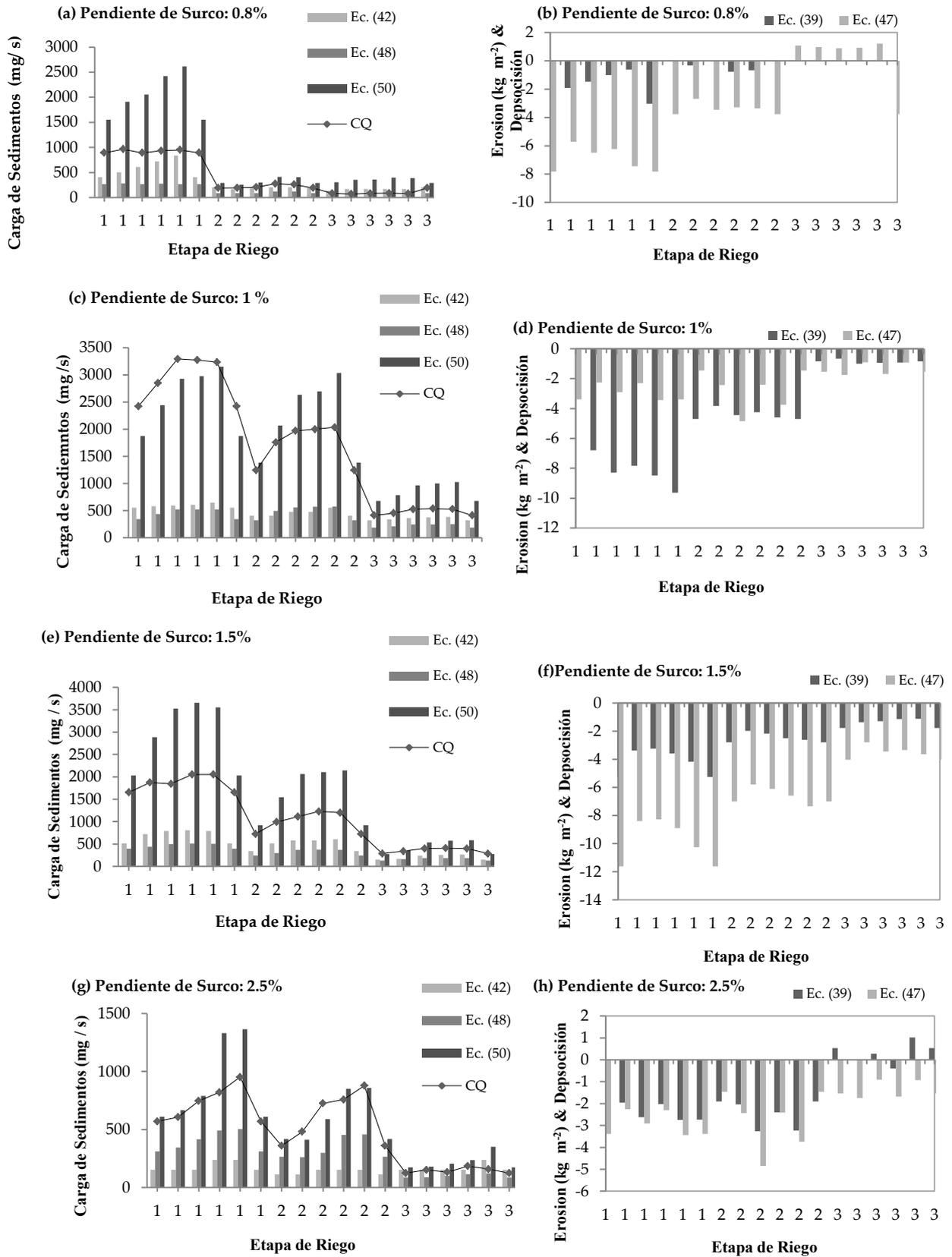


Figura 19. Comparación de los procesos de erosión en surcos simulados con los datos observados

En la Figura 20 se muestra que las pendientes de las funciones lineales son similares para los gradientes de pendientes que variaron entre 0.8 y 2.5%. La recta más inclinada corresponde a la pendiente de 13%. En cuanto al esfuerzo cortante crítico, se observa que el intercepto de las funciones lineales con el eje del esfuerzo cortante varía aproximadamente entre 2 y 5 Pa para gradientes de pendiente entre 0.8 y 2.5%; siendo menor a 1 Pa para surcos con pendiente igual al 13%. En general, aún cuando se observa que existe un buen ajuste entre las observaciones y la función lineal, en algunos casos se aprecia una tendencia hacia la curvatura (Figuras 20(b), 20(c) y 20(e)). Otras relaciones lineales y no lineales entre D_c y τ serán descritas más adelante.

En la Figura 21 se muestra la comparación de la capacidad de desprendimiento estimada mediante las Ecuaciones (40) y (53) a (72) y la obtenida mediante las pruebas de campo en los surcos de pendientes que varían entre 0.8 y 13%. En las Figuras 21(a), 21(c) y 21(d) se observa que los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea 1:1, lo que indica que las Ecuaciones (7) a (27) se aproximan satisfactoriamente a los datos. En las Figuras 21(b) y 21(e) se aprecia una ligera curvatura.

En las Tablas (14), (16), (18), (20) y (22) se muestran los parámetros de las Ecuaciones (40) y (53) a (72) para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo en surcos de diversas pendientes. K_c : a) presenta una diferencia entre las unidades que depende de las variables incluidas en las Ecuaciones (40) y (53) a (72), b) varió entre 2.01×10^{-6} y 8.5×10^{-5} s/m para la Ecuación (40). τ_c (Pa): a) resultó negativo para algunas ecuaciones. De acuerdo con la teoría, τ_c debería ser un esfuerzo cortante positivo por debajo del cual no existe desprendimiento (Shields, 1936), b) varió entre 0.7925 y 5.1703 Pa para la Ecuación (40), c) varía entre -2.7305 y 2.814 para la Ecuación (40). b : a) para las Ecuaciones (53) y (54) varió como sigue: 0.6782 y 3.4677; 1.15 y 5.79, respectivamente, b) resultó negativo en el ajuste de las Ecuaciones (24) y (25).

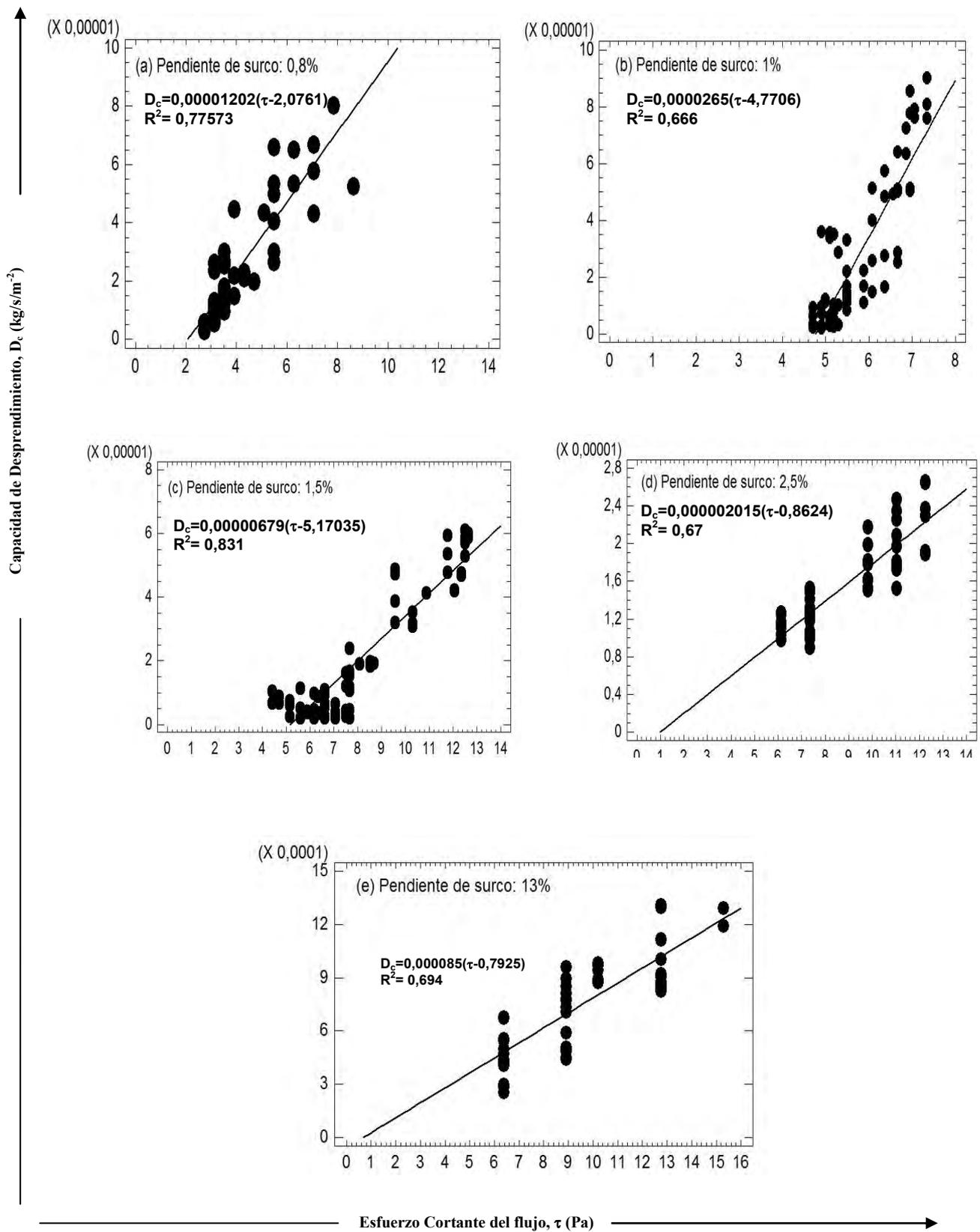


Figura 20. Relación entre la capacidad de desprendimiento y el esfuerzo cortante del flujo.

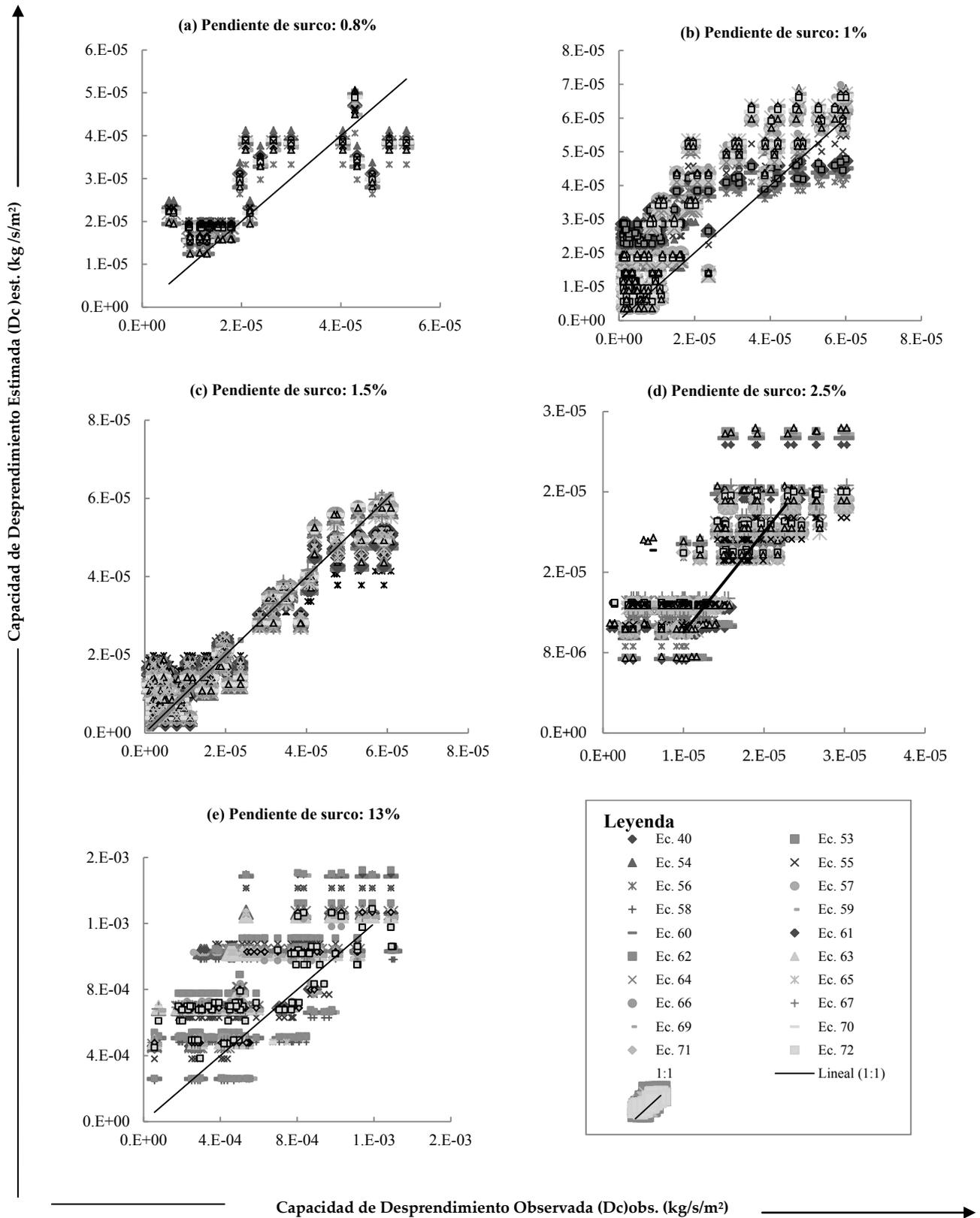


Figura 21. Comparación de la capacidad de desprendimiento observada mediante métodos experimentales en surcos con pendientes diferentes y la estimada con las Ecuaciones (40) y (53) a (72).

En las Tablas (15), (17), (19), (21) y (23) se muestran los estadísticos del ajuste de las Ecuaciones (40), (53) a (72) durante las etapas de calibración y validación al conjunto de observaciones. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a 0.60, exceptuando las Ecuaciones (55) y (58) a (62). R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . Cp de Mallows: disminuyó ligeramente en relación al número de variables independientes en cada ecuación. En cuanto a los errores, mediante la selección del error porcentual medio, se aprecia que resultó negativo en todos los casos. Las mayores desviaciones entre los valores observados y estimados se encontraron para las Ecuaciones (58) a (62). En general, los errores no variaron significativamente entre las etapas de calibración y validación.

Calibración y Validación de Modelos de Estimación de la Capacidad de Transporte de los Sedimentos

En la Figura 22 se muestra la comparación de la capacidad de transporte estimada mediante las Ecuaciones (42), (50) y (73) y la obtenida mediante las pruebas de campo en los surcos de pendientes que variaron entre 0.8 y 13%. En las Figuras 22(a), 22(d) y 22(e) se observa que los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea 1:1, lo que indica que las ecuaciones se aproximan satisfactoriamente a los datos. En las Figuras 22(b) y 22(c) se aprecia una ligera curvatura, lo que indica que es posible que un modelo curvilíneo se ajuste mejor a las observaciones. En las Tablas (24), (26), (28), (30) y (32) se muestran los parámetros de las Ecuaciones (42), (48), (50) y (73). K_t : los rangos encontrados para la Ecuaciones (42) y (48) variaron como sigue: 0.00000001 y 0.01 kg/m/s, 1.5 y 111.57 kg/m³, respectivamente. b : los rangos encontrados para la Ecuaciones (42) y (48) variaron como sigue: 0.72 y 6.57; 0.25 y 1.16, respectivamente. α_1 , α_2 y α_3 (Ec. 30): α_1 tiene una alta variabilidad, α_2 varió entre 0.8 y 3.33, y α_3 entre 0.93 y 1.5135. A y B (Ec. 31): A varió entre 0.01 y 0.15, y B entre 0.93 y 1.5135.

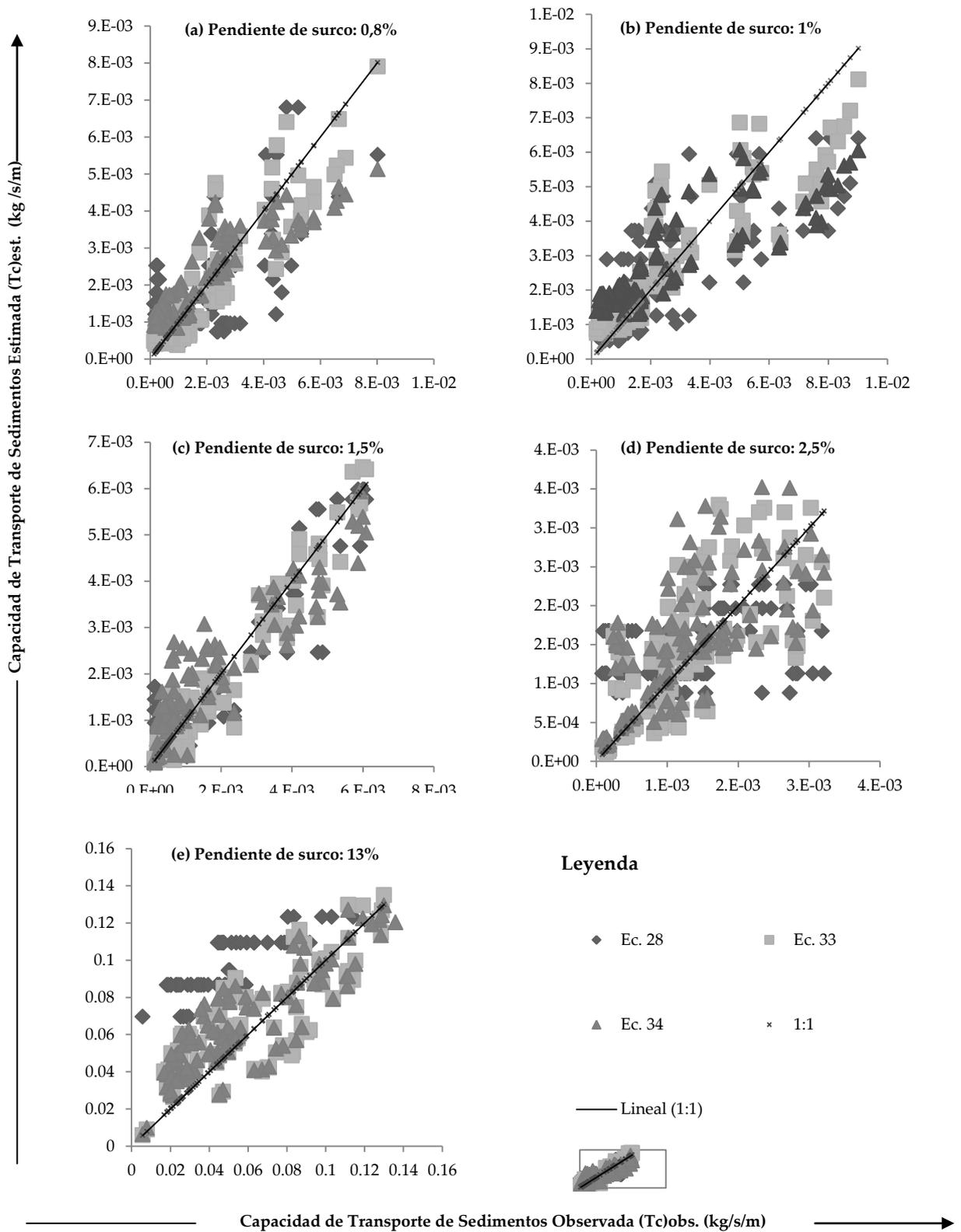


Figura 22. Comparación de la capacidad de transporte observada mediante métodos experimentales en surcos con pendientes diferentes y la estimada con las Ecuaciones (42), (50) y (73).

Tabla 14

Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 0.8%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40		K_c	$s\ m^{-1}$	1,20283E-05	7,84E-07	1,04632E-05	1,35933E-05
		τ_c	Pa	2,0761	0,179474	1,71797	2,43424
53		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,13818E-05	4,25035E-06	1,28981E-05	2,98656E-05
		τ_c	Pa	2,62402	0,241646	2,14169	3,10635
		b		0,678277	0,12779	0,423207	0,933347
54		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,13531E-06	5,46E-07	1,04659E-06	3,22403E-06
		b		1,71	0,14926	1,4134	2,00909
55		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,62133E-06	1,22E-07	2,37756E-06	2,86511E-06
56		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$	1,55813E-05	4,07517E-06	7,44943E-06	2,37132E-05
		τ_c	Pa	1,60639	2,91E-01	1,0261	2,18668
57		K_c	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-2}$	5,56E-07	2,58E-08	5,05E-07	6,08E-07
		τ_c	Pa	-6,61005	3,62E-11	-6,61005	-6,61005
58		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	9,87671E-05	3,93779E-06	9,09094E-05	0,000106625
		τ_c	Pa	1,01246	6,90E-17	1,01246	1,01246
59		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,0012078	4,06254E-05	0,00103971	0,00120184
		τ_c	Pa	0,0872895	5,62E-16	0,0872895	0,0872895
60		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-4}$	0,000113658	4,78692E-06	0,000104106	0,00012321
		τ_c	Pa	0,419056	7,54E-17	0,419056	0,419056
61		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	5,95E-07	2,43E-08	5,47E-07	6,44E-07
		τ_c	Pa	0,753136	9,95E-17	0,753136	0,753136
62		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	6,12E-07	2,90E-08	5,54E-07	6,71E-07
		τ_c	Pa	1,91963	1,27E-17	1,91963	1,91963
63		K_c	$s\ m^{-2}$	6,24345E-05	2,38828E-06	5,76687E-05	6,72002E-05
		τ_c	Pa	-3,72537	5,40E-11	-3,72537	-3,72537
64		K_c	$s\ m^{-2}$	0,012055	0,00195958	0,00814469	0,0159653
		τ_c	Pa	-0,39165	0,911831	-2,21118	1,42788
65		K_c	$s\ m^{-2}$	5,44E-07	2,18E-08	5,01E-07	5,88E-07
		τ_c	Pa	-2,78033	7,03E-11	-2,78033	-2,78033
66		K_c	$s\ m^{-2}$	5,40E-08	2,01E-09	4,99E-08	5,80E-08
		τ_c	Pa	-3,39108	5,31E-11	-3,39108	-3,39108
67		K_c	$s\ m^{-2}$	1,31159E-06	5,58E-08	1,20024E-06	1,42294E-06
		τ_c	Pa	-3,44685	6,68E-11	-3,44685	-3,44685
68		K_c	$s\ m^{-2}$	2,00E-07	7,84E-09	1,84E-07	2,15E-07
		τ_c	Pa	-2,70058	6,29E-11	-2,70058	-2,70058
69		K_c	$s\ m^{-2}$	1,43E-06	6,00E-08	1,31E-06	1,55E-06
		τ_c	Pa	-2,9897	7,29E-11	-2,9897	-2,9897
70		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000416253	1,45483E-05	0,000387215	0,000445292
		τ_c	Pa	-1,06002	1,06E-10	-1,06002	-1,06002
		b		-0,5223	8,09E-12	-0,5223	-0,5223
71		K_c	$s\ m^{-2}$	0,149806	0,00548649	0,138854	0,160757
		τ_c	Pa	-2,96102	6,42E-11	-2,96102	-2,96102
		b		-1,38453	8,74E-12	-1,38453	-1,38453
72	w	α_1	$kg\ m^{-3}\ s^{-1}$	-4,46878E-05	1,22699E-05	-6,91719E-05	-2,02036E-05
	τ	α_2	$s\ m^{-1}$	9,87656E-06	9,32E-07	8,01748E-06	1,17356E-05

Tabla 15

Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 0.8%.

Ec.	p	N	R ²	(R ²) _{aj.}	Cp	S _{XV}	d	ACRR	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	
														EPM	EPM
a) Calibración														b) Validación	
40	1	70	0,77	0,77	0	9,9E-06	1,42	0,26	1,30E-10	7,8E-06	42,6	-2,42E-12	-22,8	35,6	-7,9
53	1	70	0,68	0,67	0	1,02E-05	1,12	0,43	1,04E-10	8,3E-06	42,1	1,55E-08	-18,4	42,2	-30,4
54	1	70	0,67	0,66	0	9,92E-06	1,04	0,47	9,83E-11	8E-06	46,0	-2,76E-07	-26,3	50,8	-26,6
55	1	70	0,61	0,61	0	1,1E-05	1,12	0,42	1,21E-10	9E-06	67,5	-6,49E-07	-47,0	71,9	-50,1
56	1	70	0,65	0,64	0	1,1E-05	1,10	0,43	1,22E-10	9,2E-06	43,6	9,68E-11	-21,7	49,4	-22,8
57	1	70	0,60	0,60	0	1,15E-05	1,22	0,37	1,33E-10	9,6E-06	53,7	-4,11E-07	-32,6	53,7	-31,7
58	2	70	0,68	0,67	1	1,1E-05	1,62	0,17	1,20E-10	8,7E-06	38,3	1,44E-06	-10,2	38,0	-7,2
59	3	70	0,72	0,71	2	9,66E-06	1,04	0,45	9,33E-11	7,8E-06	39,3	1,07E-06	-12,9	42,5	-18,9
60	3	70	0,64	0,63	2	1,04E-05	1,31	0,33	1,07E-10	8,1E-06	39,2	1,39E-06	-10,3	34,1	0,24
61	3	70	0,68	0,67	2	1,03E-05	1,29	0,33	1,07E-10	8,2E-06	41,5	1,11E-06	-14,5	33,8	-2,8
62	4	70	0,74	0,74	3	9,9E-06	1,19	0,38	9,80E-11	7,8E-06	40,7	6,68E-07	-16,8	44,9	-21,3
63	2	70	0,68	0,68	1	1,03E-05	1,05	0,46	1,06E-10	8,5E-06	46,2	-1,53E-07	-25,4	66,9	-53,6
64	3	70	0,68	0,68	2	1,09E-05	1,30	0,34	1,18E-10	8,6E-06	48,6	1,32E-07	-26,4	33,6	-7,7
65	3	70	0,65	0,65	2	1,11E-05	1,14	0,41	1,24E-10	9,3E-06	41,6	6,03E-08	-19,0	63,2	-46,3
66	5	70	0,66	0,66	4	1,06E-05	0,95	0,51	1,12E-10	8,9E-06	49,7	7,73E-08	-27,0	48,0	-28,6
67	4	70	0,62	0,62	3	1,02E-05	1,19	0,39	1,05E-10	8,5E-06	56,1	-3,66E-07	-34,5	40,4	-13,9
68	4	70	0,69	0,68	3	1,04E-05	1,25	0,36	1,08E-10	8,5E-06	48,5	-2,20E-07	-27,7	46,8	-22,4
69	4	70	0,68	0,68	3	1,17E-05	1,15	0,41	1,36E-10	9,3E-06	55,9	-5,24E-07	-37,3	33,6	-5,1
70	4	70	0,76	0,75	3	9,9E-06	1,21	0,36	9,79E-11	8,1E-06	42,5	-5,45E-08	-22,0	55,1	-35,2
71	4	70	0,68	0,68	3	1,08E-05	1,31	0,33	1,16E-10	9E-06	47,4	-2,95E-08	-25,2	55,8	-39,8
72	3	70	0,89	0,89	2	1,08E-05	0,96	0,50	1,17E-10	9,1E-06					

Tabla 16

Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40		K_c	$s\ m^{-1}$	2,65E-05	2,27E-06	2,19E-05	3,10E-05
		τ_c	Pa	4,77069	0,101326	4,56849	4,97288
53		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	3,50E-07	9,78E-08	1,55E-07	5,45E-07
		τ_c	Pa	2,48703	0,340462	1,80746	3,1666
		b		3,4677	6,19E-11	3,4677	3,4677
54		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	8,25E-10	8,93E-10	-9,56E-10	2,61E-09
		b		5,79607	0,506996	4,78437	6,80777
55		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,20034E-06	1,68E-07	1,86548E-06	2,53521E-06
56		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$	0,000142344	1,35324E-05	0,000115341	0,000169347
		τ_c	Pa	4,86618	0,0894774	4,68763	5,04473
57		K_c	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-2}$	3,92263E-06	3,02E-07	3,31919E-06	4,52606E-06
		τ_c	Pa	4,75387	0,108106	4,53815	4,9696
58		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	9,61539E-06	6,75E-07	8,26808E-06	1,09627E-05
		τ_c	Pa	0,103895	1,53E-15	0,103895	0,103895
59		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,000365151	3,00814E-05	0,000305124	0,000425177
		τ_c	Pa	0,0464504	2,78E-15	0,0464504	0,0464504
60		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-4}$	1,45738E-06	1,10E-07	1,23876E-06	0,000001676
		τ_c	Pa	0,00614452	1,94E-14	0,00614452	0,00614452
61		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	6,28E-07	4,70E-08	5,34E-07	7,22E-07
		τ_c	Pa	0,725639	1,47E-16	0,725639	0,725639
62		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	8,28E-07	6,00E-08	7,09E-07	9,48E-07
		τ_c	Pa	2,36271	4,46E-17	2,36271	2,36271
63		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000347131	0,000034586	0,000278115	0,000416146
		τ_c	Pa	4,59586	0,152143	4,29227	4,89946
64		K_c	$s\ m^{-2}$	0,0350286	0,00319965	0,0286438	0,0414134
		τ_c	Pa	4,60262	0,133811	4,33561	4,86964
65		K_c	$s\ m^{-2}$	3,88457E-06	3,39E-07	3,20861E-06	4,56053E-06
		τ_c	Pa	4,72522	0,120275	4,48521	4,96522
66		K_c	$s\ m^{-2}$	4,59E-07	3,96E-08	3,80E-07	5,38E-07
		τ_c	Pa	4,79941	0,110004	4,5799	5,01891
67		K_c	$s\ m^{-2}$	1,07221E-05	9,96E-07	8,7337E-06	1,27105E-05
		τ_c	Pa	4,65811	0,138072	4,38259	4,93363
68		K_c	$s\ m^{-2}$	1,44811E-06	1,29E-07	1,19059E-06	1,70563E-06
		τ_c	Pa	4,5953	0,136707	4,32251	4,8681
69		K_c	$s\ m^{-2}$	1,13023E-05	9,14E-07	9,47946E-06	1,31252E-05
		τ_c	Pa	4,69553	0,116184	4,46369	4,92737
70		K_c	$s\ m^{-2}$	1,03E-07	5,39E-09	9,20E-08	1,14E-07
		τ_c	Pa	1,56364	6,59E-11	1,56364	1,56364
		b		4,6631	1,15E-09	4,6631	4,6631
71		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000170618	8,07161E-06	0,000154507	0,000186729
		τ_c	Pa	4,72224	1,35E-09	4,72224	4,72224
		b		0,407825	8,73E-11	0,407825	0,407825
72	h	α_1	$kg\ m^{-3}\ s^{-1}$	0,00267433	0,00015968	0,00235797	0,00299069
	w	α_2	$kg\ m^{-3}\ s^{-1}$	-0,000371836	2,67853E-05	-0,000424903	-0,00031877

Tabla 17

Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²) _{aj.}	Cp	S _{NV}	d	ACRR	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	b) Validación	
														EPMA	EPM
a) Calibración															
40	1	70	0,66	0,66	0	1,4E-05	0,90	0,54	1,98E-10	1,1E-05	84,1	-3,81E-12	-37,6	75,7	-35,2
53	1	70	0,76	0,76	0	1,3E-05	0,82	0,58	1,73E-10	9,83E-06	70,5	1,88E-07	-46,8	86,6	-63,2
54	1	70	0,73	0,73	0	1,3E-05	0,73	0,62	1,72E-10	1,01E-05	88,8	1,26E-07	-63,7	69,5	-52,2
55	1	70	0,34	0,34	0	2E-05	0,28	0,84	3,86E-10	1,74E-05	127,2	-2,93E-06	-104,2	149,2	-131,2
56	1	70	0,69	0,69	0	1,4E-05	1,10	0,44	2,05E-10	1,12E-05	89,1	1,49E-10	-43,1	72,3	13,3
57	1	70	0,77	0,77	0	1,2E-05	1,07	0,45	1,44E-10	8,97E-06	76,9	6,05E-08	-28,8	54,2	-10,4
58	2	70	0,45	0,44	1	2E-05	0,24	0,86	3,94E-10	1,78E-05	198,9	-3,83E-06	-177,6	255,1	-243,0
59	3	70	0,41	0,40	2	1,9E-05	0,20	0,87	3,79E-10	1,69E-05	221,8	-4E-06	-202,6	142,7	-113,9
60	3	70	0,42	0,41	2	1,9E-05	0,23	0,85	3,49E-10	1,62E-05	204,3	-3,61E-06	-184,7	178,7	-152,8
61	3	70	0,44	0,44	2	1,8E-05	0,28	0,83	3,27E-10	1,6E-05	190,0	-3,75E-06	-170,1	200,8	-176,5
62	4	70	0,44	0,43	3	2E-05	0,20	0,87	4,01E-10	1,78E-05	187,8	-3,87E-06	-167,4	252,3	-236,8
63	2	70	0,68	0,67	1	1,3E-05	0,89	0,54	1,78E-10	1,03E-05	71,5	6,19E-08	-37,6	81,7	-53,2
64	3	70	0,71	0,70	2	1,3E-05	1,05	0,46	1,62E-10	9,68E-06	81,4	7,62E-08	-47,7	76,2	-51,8
65	3	70	0,73	0,72	2	1,2E-05	1,15	0,41	1,46E-10	9,08E-06	67,2	4,94E-08	-30,3	69,6	-15,9
66	5	70	0,73	0,72	4	1,2E-05	0,99	0,48	1,45E-10	9,45E-06	74,5	2,80E-08	-31,7	55,7	8,4
67	4	70	0,70	0,70	3	1,4E-05	0,84	0,56	1,98E-10	1,08E-05	78,5	1,12E-07	-45,3	77,4	-46,0
68	4	70	0,73	0,72	3	1,3E-05	0,65	0,66	1,68E-10	9,71E-06	80,6	5,45E-08	-50,4	83,2	-60,9
69	4	70	0,76	0,75	3	1,2E-05	1,47	0,25	1,43E-10	9,09E-06	71,2	4,27E-08	-32,3	74,1	-37,3
70	4	70	0,72	0,71	3	1,3E-05	1,00	0,48	1,60E-10	9,43E-06	74,3	2,13E-07	-39,5	60,2	-13,9
71	4	70	0,71	0,70	3	1,3E-05	0,97	0,50	1,81E-10	1,02E-05	68,0	8,76E-08	-30,1	74,9	-27,9
72	3	70	0,85	0,85		1,3E-05	0,77	0,60	1,81E-10	1,06E-05					

Tabla 18

Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1.5%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40		K_c	$s\ m^{-1}$	6,79E-06	3,71E-07	6,04748E-06	7,52973E-06
		τ_c	Pa	5,17035	0,185067	4,80105	5,53964
53		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	5,52E-07	1,06252E-06	-1,56885E-06	2,67275E-06
		τ_c	Pa	2,81443	1,80229	-0,782953	6,41182
54		b		2,05146	0,624895	0,804158	3,29875
		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,67E-08	1,15E-08	3,74E-09	4,96E-08
55		b		3,05514	0,178934	2,69808	3,4122
		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	9,73E-07	4,81E-08	8,77E-07	1,06878E-06
56		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$	3,35509E-05	2,62516E-06	2,83125E-05	3,87894E-05
		τ_c	Pa	5,0036	0,179516	4,64538	5,36182
57		K_c	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-2}$	5,23E-07	3,83E-08	4,47E-07	6,00E-07
		τ_c	Pa	4,12	0,39	3,34	4,91
58		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	1,59427E-05	5,28E-07	1,48882E-05	1,69972E-05
		τ_c	Pa	0,342741	1,56E-16	0,342741	0,342741
59		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,00108114	4,78744E-05	0,000985606	0,00117667
		τ_c	Pa	0,376948	1,10E-16	0,376948	0,376948
60		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-4}$	1,21772E-06	4,80E-08	1,12197E-06	1,31348E-06
		τ_c	Pa	0,00970158	3,42E-15	0,00970158	0,00970158
61		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	4,82E-07	1,56E-08	4,51E-07	5,13E-07
		τ_c	Pa	0,693399	5,79E-17	0,693399	0,693399
62		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	1,50E-07	6,57E-09	1,37E-07	1,64E-07
		τ_c	Pa	0,582072	5,26E-17	0,582072	0,582072
63		K_c	$s\ m^{-2}$	7,89E-05	5,39E-06	6,81E-05	8,97E-05
		τ_c	Pa	4,13405	3,77E-01	3,38192	4,88617
64		K_c	$s\ m^{-2}$	0,00527264	0,000340128	0,00459392	0,00595136
		τ_c	Pa	4,4446	0,354119	3,73796	5,15123
65		K_c	$s\ m^{-2}$	1,22E-06	8,85E-08	1,05E-06	1,40E-06
		τ_c	Pa	4,3458	0,360171	3,62669	5,06491
66		K_c	$s\ m^{-2}$	1,34E-07	9,33E-09	1,15E-07	1,53E-07
		τ_c	Pa	4,13727	0,373065	3,39283	4,88171
67		K_c	$s\ m^{-2}$	2,95829E-06	2,00E-07	2,55839E-06	3,3582E-06
		τ_c	Pa	3,89564	0,36503	3,16723	4,62405
68		K_c	$s\ m^{-2}$	4,68E-07	2,48E-08	4,19E-07	5,17E-07
		τ_c	Pa	4,37385	0,287501	3,80366	4,94404
69		K_c	$s\ m^{-2}$	3,57458E-06	2,30E-07	3,11621E-06	4,03296E-06
		τ_c	Pa	4,32904	3,50E-01	3,62995	5,02813
70		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000085967	2,57108E-06	8,08351E-05	9,10989E-05
		τ_c	Pa	-0,251349	1,87E-11	-0,251349	-0,251349
		b		4,2374	1,07E-10	4,2374	4,2374
71		K_c	$s\ m^{-2}$	3,55E-07	9,29E-09	3,37E-07	3,74E-07
		τ_c	Pa	4,34817	9,15E-11	4,34817	4,34817
		b		1,5441	1,80E-11	1,5441	1,5441
72	G	α_1	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$	-2,77916E-05	3,52698E-05	-9,76743E-05	4,20911E-05
	τ	α_2	$s\ m^{-1}$	6,78888E-06	2,92E-07	6,21102E-06	7,36674E-06
	w	α_3	$kg\ m^{-3}\ s^{-1}$	0,000112654	0,000268745	-0,00041983	0,000645138

Tabla 19

Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 1.5%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj.}$	C_p	S_{XY}	d	ACRR	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	
														EPMA	EPM
a) Calibración														b) Validación	
40	1	70	0,831	0,828	0	7,10E-06	0,96	0,45	5,08E-11	5,47E-06	108,82	-8,92E-11	-52,98	122,87	-55,3
53	1	70	0,851	0,846	0	6,46E-06	1,35	0,24	4,18E-11	4,68E-06	85,34	2,75E-07	-50,81	83,82	-62,3
54	1	70	0,869	0,867	0	6,389E-06	1,27	0,27	4,08E-11	4,58E-06	94,50	-2,17E-07	-69,76	65,58	-38,3
55	1	70	0,711	0,711	0	1,03E-05	0,20	0,86	1,07E-10	8,84E-06	163,19	-3,51E-06	-152,99	222,14	-214
56	1	70	0,864	0,862	0	6,82E-06	0,37	1,17	4,66E-11	5,43E-06	99,42	-9,86E-10	-38,04	154,10	-121
57	1	70	0,863	0,861	0	6,05E-06	1,43	0,19	3,66E-11	4,33E-06	70,80	5,59E-08	-41,24	112,10	-71,7
58	2	70	0,848	0,846	1	6,78E-06	0,61	0,67	4,60E-11	5,32E-06	98,62	-1,98E-06	-88,99	226,98	-218
59	3	70	0,778	0,774	2	8,06E-06	0,45	0,71	6,51E-11	6,23E-06	163,43	-2,47E-06	-152,00	101,18	-88
60	3	70	0,808	0,805	2	7,34E-06	0,44	0,71	5,39E-11	5,58E-06	118,48	-2,28E-06	-109,17	169,63	-153
61	3	70	0,775	0,772	2	8,32E-06	0,37	0,69	6,93E-11	6,53E-06	163,27	-2,58E-06	-153,12	108,15	-96
62	4	70	0,775	0,771	3	8,35E-06	0,42	0,74	6,97E-11	6,59E-06	152,68	-2,54E-06	-142,24	125,56	-113
63	2	70	0,883	0,881	1	5,74E-06	1,54	0,12	3,51E-11	4,53E-06	73,25	1,15E-07	-40,98	119,29	-86
64	3	70	0,889	0,887	2	6,07E-06	1,23	0,35	3,69E-11	4,59E-06	95,33	1,29E-07	-61,14	71,51	-18
65	3	70	0,863	0,861	2	6,36E-06	1,50	0,17	4,04E-11	4,86E-06	73,35	8,88E-08	-40,83	127,52	-103
66	5	70	0,869	0,867	4	6,15E-06	1,54	0,14	3,79E-11	4,53E-06	73,18	1,22E-07	-39,01	122,87	-93
67	4	70	0,875	0,873	3	5,30E-06	1,64	0,15	2,81E-11	4,14E-06	85,64	1,10E-07	-52,03	97,01	-68,5
68	4	70	0,905	0,903	3	5,43E-06	1,21	0,41	2,95E-11	3,94E-06	86,71	8,62E-08	-51,63	80,74	-34,8
69	4	70	0,891	0,889	3	5,99E-06	1,56	0,19	3,59E-11	4,41E-06	86,06	9,45E-08	-49,80	91,82	-70,0
70	4	70	0,874	0,87	3	6,44E-06	1,35	0,29	4,16E-11	4,98E-06	90,69	1,28E-07	-54,75	82,40	-49,8
71	4	70	0,915	0,912	3	5,46E-06	1,38	0,27	2,98E-11	4,19E-06	80,82	1,17E-07	-46,81	85,12	-36,7
72	3	70	0,913	0,911	2	7,23E-06	0,92	0,50	5,23E-11	5,65E-06					

Tabla 20

Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 2.5%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40		K_c	$s\ m^{-1}$	2,01549E-06	4,07E-08	1,93422E-06	2,09677E-06
		τ_c	Pa	0,862425	1,14E-11	0,862425	0,862425
53		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,84E-07	4,99E-09	2,74E-07	2,94E-07
		τ_c	Pa	-2,73057	7,69E-12	-2,73057	-2,73057
		b		1,63792	5,65E-11	1,63792	1,63792
54		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	1,09065E-06	2,31E-07	6,30E-07	1,55138E-06
		b		1,223	0,0926685	1,03798	1,40802
55		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	5,65E-07	1,13E-08	5,43E-07	5,87E-07
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-2}$	2,27399E-06	4,26E-08	2,18891E-06	2,35907E-06
56		τ_c	Pa	1,10048	1,11E-11	1,10048	1,10048
		K_c	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-2}$	3,62E-08	6,37E-10	3,49E-08	3,74E-08
57		τ_c	Pa	-39,3237	2,69E-13	-39,3237	-39,3237
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	6,64992E-06	1,57E-07	6,33677E-06	6,96307E-06
58		τ_c	Pa	0,13937	1,17E-16	0,13937	0,13937
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,00030177	7,31E-07	2,87174E-05	3,16367E-05
59		τ_c	Pa	0,0158335	5,19E-16	0,0158335	0,0158335
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-4}$	1,00586E-06	2,41E-08	9,58E-07	1,05387E-06
60		τ_c	Pa	0,00765442	1,44E-15	0,00765442	0,00765442
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	6,03E-07	1,82E-08	5,67E-07	6,40E-07
61		τ_c	Pa	0,522253	1,44E-17	0,522253	0,522253
		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	4,58E-07	1,37E-08	4,31E-07	4,85E-07
62		τ_c	Pa	1,03932	7,32E-18	1,03932	1,03932
		K_c	$s\ m^{-2}$	1,29103E-05	2,48E-07	1,24149E-05	1,34057E-05
63		τ_c	Pa	-25,6179	5,86E-13	-25,6179	-25,6179
		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000146459	3,06857E-06	0,000140335	0,000152582
64		τ_c	Pa	-106,852	5,40E-14	-106,852	-106,852
		K_c	$s\ m^{-2}$	3,58E-07	6,95E-09	3,44E-07	3,72E-07
65		τ_c	Pa	-21,9605	6,75E-13	-21,9605	-21,9605
		K_c	$s\ m^{-2}$	2,79E-08	6,08E-10	2,67E-08	2,91E-08
66		τ_c	Pa	-35,274	4,21E-13	-35,274	-35,274
		K_c	$s\ m^{-2}$	5,38E-07	1,15E-08	5,15E-07	5,61E-07
67		τ_c	Pa	-46,2548	2,44E-13	-46,2548	-46,2548
		K_c	$s\ m^{-2}$	7,53E-08	1,53E-09	7,23E-08	7,84E-08
68		τ_c	Pa	-47,1625	2,36E-13	-47,1625	-47,1625
		K_c	$s\ m^{-2}$	3,72E-07	8,22E-09	3,56E-07	3,88E-07
69		τ_c	Pa	-75,4299	1,14E-13	-75,4299	-75,4299
		K_c	$s\ m^{-2}$	6,97E-07	1,51E-08	6,67E-07	7,27E-07
70		τ_c	Pa	-30,6291	4,88E-13	-30,6291	-30,6291
		b		0,48452	3,23E-12	0,48452	0,48452
		K_c	$s\ m^{-2}$	2,10134E-06	4,22E-08	2,01719E-06	2,1855E-06
71		τ_c	Pa	-52,0774	1,97E-13	-52,0774	-52,0774
		b		0,623004	3,12E-12	0,623004	0,623004
		K_c	$s\ m^{-1}$	1,74589E-06	2,42E-08	1,69791E-06	1,79386E-06
72	τ	α_1	$s\ m^{-1}$	1,74589E-06	2,42E-08	1,69791E-06	1,79386E-06

Tabla 21

Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 2.5%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²)aj.	Cp	S _{XV}	d	ACRR	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a)Calibración														b)Validación	
40	1	70	0,67	0,66	0	2,86E-06	1,10	0,43	8,19E-12	2,381E-06	15,13	-6,02E-16	-2,79	13,923	-10,9
53	1	70	0,8	0,79	0	2,37E-06	1,66	0,16	5,60E-12	1,855E-06	12,80	8,96E-09	-2,06	16,37	-7,62
54	1	70	0,73	0,73	0	2,65E-06	1,10	0,42	7,03E-12	2,081E-06	13,51	1,58E-08	-2,18	14,786	-5,37
55	1	70	0,68	0,68	0	2,72E-06	1,27	0,35	7,39E-12	2,248E-06	14,99	3,34E-07	1,48	15,304	2,978
56	1	70	0,72	0,71	0	2,64E-06	1,44	0,27	6,95E-12	2,097E-06	13,19	-2,49E-10	-2,32	16,385	-9,84
57	1	70	0,76	0,76	0	2,38E-06	1,65	0,14	5,65E-12	1,994E-06	13,27	1,16E-09	-2,22	11,307	0,784
58	2	70	0,68	0,67	1	3,15E-06	1,17	0,39	9,93E-12	2,625E-06	17,37	9,99E-07	8,80	17,959	10,88
59	3	70	0,62	0,61	2	3,15E-06	1,69	0,14	9,92E-12	2,619E-06	17,27	8,97E-07	7,46	17,966	10,31
60	3	70	0,62	0,61	2	3,09E-06	1,27	0,35	9,53E-12	2,541E-06	16,86	8,80E-07	7,78	19,151	13,09
61	3	70	0,42	0,41	2	3,97E-06	1,12	0,43	1,57E-11	3,097E-06	19,75	1,1E-06	8,33	25,521	7,03
62	4	70	0,42	0,41	3	4,02E-06	0,90	0,54	1,62E-11	3,151E-06	19,61	1,1E-06	7,79	25,484	3,44
63	2	70	0,71	0,71	1	2,61E-06	1,55	0,22	6,83E-12	2,11E-06	13,77	1,55E-07	-0,82	16,038	-1,38
64	3	70	0,64	0,63	2	2,74E-06	1,33	0,30	7,50E-12	2,292E-06	15,51	6,27E-08	-2,38	14,7	2,92
65	3	70	0,72	0,71	2	2,53E-06	1,63	0,17	6,38E-12	2,03E-06	13,90	1,29E-07	-1,08	17,816	0,58
66	5	70	0,67	0,66	4	3E-06	1,25	0,36	9,00E-12	2,499E-06	16,30	1,18E-07	-2,03	16,902	-2,18
67	4	70	0,62	0,61	3	2,79E-06	1,31	0,34	7,78E-12	2,35E-06	16,10	1,28E-07	-1,70	15,461	-1,74
68	4	70	0,67	0,66	3	2,7E-06	1,59	0,19	7,27E-12	2,169E-06	14,56	1,34E-07	-1,32	18,199	-5,90
69	4	70	0,61	0,6	3	2,71E-06	1,28	0,33	7,36E-12	2,199E-06	14,96	1,66E-07	-1,22	16,993	0,162
70	4	70	0,68	0,67	3	2,81E-06	1,34	0,32	7,91E-12	2,244E-06	15,18	1,33E-07	-1,57	16,498	0,107
71	4	70	0,69	0,68	3	2,67E-06	1,48	0,25	7,14E-12	2,231E-06	15,24	9,46E-08	-1,75	15,87	-5,81
72	1	70	0,98	0,98	0	2,33E-06	1,21	0,38	5,44E-12	1,905E-06					

Tabla 22

Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 13%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40		K_c	$s\ m^{-1}$	8,50798E-05	6,85113E-06	7,14086E-05	9,87511E-05
		τ_c	Pa	0,792582	0,784594	-0,773054	2,35822
53		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	0,000109849	0,000159997	-0,000209507	0,000429204
		τ_c	Pa	1,69199	4,06485	-6,4215	9,80549
		b		0,932695	0,457538	0,0194439	1,84595
54		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	5,34253E-05	1,43542E-05	0,000024782	8,20687E-05
		b		1,15072	0,109359	0,932495	1,36894
55		K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	0,000023666	6,06E-07	2,24579E-05	2,48741E-05
56		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^2$	0,000114751	7,30169E-05	-3,09519E-05	0,000260455
		τ_c	Pa	1,26546	0,715937	-0,163169	2,6941
57		K_c	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-2}$	6,85E-07	1,65E-08	6,52E-07	7,18E-07
		τ_c	Pa	-104,257	2,18E-10	-104,257	-104,257
58		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,000111398	2,84654E-06	0,000105718	0,000117079
		τ_c	Pa	0,0149718	2,06E-12	0,0149718	0,0149718
59		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,00114617	3,09789E-05	0,00108435	0,00120799
		τ_c	Pa	0,0185261	1,43E-12	0,0185261	0,0185261
60		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-4}$	0,00122331	2,98541E-05	0,00116374	0,00128289
		τ_c	Pa	0,0507023	6,15E-13	0,0507023	0,0507023
61		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	0,000114254	3,02399E-06	0,000108219	0,000120288
		τ_c	Pa	0,107515	2,93E-13	0,107515	0,107515
62		K_c	$kg\ s^{-1}\ m^{-3}$	6,48389E-05	1,64536E-06	6,15557E-05	6,81222E-05
		τ_c	Pa	0,163175	0	0,163175	0,163175
63		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000644628	1,38108E-05	0,000617069	0,000672187
		τ_c	Pa	-147,73	9,72E-11	-147,73	-147,73
64		K_c	$s\ m^{-2}$	0,0123449	0,000276716	0,0117927	0,0128971
		τ_c	Pa	-50,8837	5,96E-10	-50,8837	-50,8837
65		K_c	$s\ m^{-2}$	0,00012913	2,67583E-06	0,000123791	0,00013447
		τ_c	Pa	-93,1846	2,20E-10	-93,1846	-93,1846
66		K_c	$s\ m^{-2}$	2,68695E-05	6,79E-07	2,55136E-05	2,82254E-05
		τ_c	Pa	-40,8395	1,08E-09	-40,8395	-40,8395
67		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000168755	3,80916E-06	0,000161154	0,000176356
		τ_c	Pa	-199,464	6,32E-11	-199,464	-199,464
68		K_c	$s\ m^{-2}$	5,74739E-06	9,83E-08	5,55124E-06	5,94355E-06
		τ_c	Pa	-869,917	3,03E-12	-869,917	-869,917
69		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000393575	9,03242E-06	0,000375551	0,000411599
		τ_c	Pa	-80,4816	3,06E-10	-80,4816	-80,4816
70		K_c	$s\ m^{-2}$	1,80664E-05	0,00053271	-0,00104523	0,00108136
		τ_c	Pa	-87,6201	3,07E-10	-87,6201	-87,6201
		b		1,50863	13,6285	-25,6941	28,7113
71		K_c	$s\ m^{-2}$	0,000125306	0,0039266	-0,00771223	0,00796284
		τ_c	Pa	-145,22	1,34E-10	-145,22	-145,22
		b		1,33139	14,5569	-27,7244	30,3872
72	h	α_1	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$	-0,00221963	0,000838711	-0,00388143	-0,000557827
	w	α_2	$kg\ m^{-3}\ s^{-1}$	0,113427	0,00679862	0,0999568	0,126898
	S_f	α_3	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$	0,044678	0,0171937	0,0106108	0,0787451

Tabla 23

Estadísticos de Ajuste de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Pendiente 13%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²)aj.	Cp	S _{XY}	d	ACRR	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a) Durante la Calibración														b) Validación	
40	1	70	0,69	0,69	0	1,60E-04	2,13	-0,08	2,55E-08	0,00014	20,39	-5,07E-10	-5,29	26,91	-10
53	1	70	0,68	0,67	0	1,63E-04	2,19	-0,11	2,66E-08	0,00014	22,35	2,34E-09	-6,31	23,66	-8,98
54	1	70	0,61	0,61	0	1,67E-04	2,00	-0,03	2,79E-08	0,00015	24,06	-9,47E-07	-7,3	19,79	2,778
55	1	70	0,69	0,69	0	1,70E-04	2,07	-0,05	2,88E-08	0,00015	22,67	1,36E-05	-2,81	23,55	2,90
56	1	70	0,70	0,7	0	1,65E-04	2,05	-0,03	2,73E-08	1,45E-04	22,93	2,34E-08	-6,44	22,87	-9,38
57	1	70	0,67	0,67	0	1,63E-04	1,9	-0,005	2,66E-08	0,00015	23,27	-2E-06	-7,41	22,93	-8,24
58	2	70	0,67	0,67	1	1,75E-04	1,95	0,02	3,05E-08	0,00014	17,87	3,69E-05	5,187	18,83	14
59	3	70	0,66	0,66	2	1,92E-04	1,70	0,13	3,70E-08	1,54E-04	18,46	4,44E-05	6,26	16,33	7,392
60	3	70	0,74	0,74	2	1,65E-04	1,64	0,15	2,73E-08	0,00013	17,01	3,5E-05	5,432	18,46	-3,84
61	3	70	0,68	0,68	2	1,82E-04	2,07	-0,06	3,29E-08	0,00014	17,57	3,8E-05	5,237	17,71	6,234
62	4	70	0,73	0,73	3	1,66E-04	1,47	0,22	2,75E-08	0,00013	16,58	3,38E-05	4,914	18,66	6,529
63	2	70	0,71	0,71	1	1,44E-04	1,45	0,24	2,07E-08	0,00012	17,97	-1,3E-06	-4,51	19,51	-9,01
64	3	70	0,71	0,72	2	1,54E-04	1,62	0,17	2,36E-08	0,00014	22,95	1,34E-07	-7,23	21,17	-0,99
65	3	70	0,71	0,71	2	1,52E-04	1,74	0,10	2,31E-08	0,00013	19,98	-1,9E-06	-6,45	27,64	-14,8
66	5	70	0,71	0,71	4	1,64E-04	2,10	-0,06	2,70E-08	0,00015	24,46	-5,36E-07	-7,68	18,96	7,186
67	4	70	0,67	0,67	3	1,59E-04	2,12	-0,08	2,54E-08	0,00014	20,26	4,45E-07	-5,61	26,64	-14,6
68	4	70	0,73	0,73	3	1,24E-04	1,85	0,05	1,54E-08	0,0001	13,69	3,99E-06	-1,92	16,65	-6,44
69	4	70	0,73	0,73	3	1,43E-04	1,73	0,12	2,04E-08	1,24E-04	21,46	-2E-06	-6,81	22,56	-4,43
70	4	70	0,69	0,68	3	1,62E-04	2,08	-0,05	2,62E-08	1,37E-04	21,15	1,46E-06	-6,12	25,97	-14,2
71	4	70	0,69	0,68	3	1,64E-04	1,83	0,07	2,70E-08	0,00014	22,87	4,69E-07	-7,46	23,63	-15,1
72	3	70	0,96	0,97	2	1,53E-04	1,59	0,19	2,33E-08	0,00013					

En las Tablas (25), (27), (29), (31) y (33) se muestran los estadísticos del ajuste de las Ecuaciones (42), (48), (50) y (73) al conjunto de observaciones obtenidas. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a 0.6 para todas las ecuaciones. R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . Cp : disminuyó ligeramente en relación al número de variables independientes en cada ecuación. En cuanto a los errores, seleccionando el error porcentual medio se encontró que en todos los casos resultó negativo y moderadamente bajo a alto. En general, los errores no variaron significativamente entre las etapas de calibración y validación.

Tabla 24
Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 0.8%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
42	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	0,000103089	4,00E-05	2,31812E-05	0,000182997
	b		1,908	0,199448	1,51	2,30599
48	K_t	$kg\ m^{-3}$	111,575	66,2694	-20,6995	243,85
	ω_c	$m\ s^{-1}$	0,002378	0,000488222	0,0014035	0,00335249
	b		0,585631	0,126	0,334496	0,836767
50	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	78,1997	58,9336	-39,4325	195,832
	a		1,79054	0,12742	1,53621	2,04488
	b		1,16591	0,115892	0,934586	1,39723
73	A	$s^2\ m^{-5}$	0,108729	0,00883632	0,0912229	0,126236
	B	$s^2\ m^{-5}$	8,67949E-06	5,31935E-06	-1,85912E-06	1,92181E-05

Tabla 25
Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de transporte de sedimentos en surcos de pendiente de 0.8%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj}$	Cp	S_{yx}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a) Calibración													b) Validación	
42	1	70	0,62	0,61	0	0,0012	0,96	1,5E-06	0,00093	100,21	-4,93E-05	-74,97	159,8	-133,8
48	1	70	0,67	0,66	0	1,16	0,74	1,34989	0,90169	37,31	-0,000988	-19,21	57,8	-39,2
50	2	70	0,82	0,82	1	0,0007	0,77	5,39E-07	0,00054	51,76	-7,13E-06	-30,22	76,9	-52,34
73	4	70	0,70	0,7	3	0,0009	0,46	8,80E-07	0,00071	105,33	-0,000239	-95,33	96,6	-81,2

Tabla 26
Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
42	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	1,43E-08	1,74E-08	-2,05E-08	4,91E-08
	b		6,57256	0,599676	5,37592	7,76919
48	K_t	$kg\ m^{-3}$	174,915	129,964	-84,4949	434,325
	ω_c	$m\ s^{-1}$	0,00281866	0,000833348	0,00115529	0,00448203
	b		0,599176	0,163639	0,27255	0,925802
50	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	2943,15	2747,93	-2541,76	8428,06
	a		3,33277	0,361858	2,6105	4,05505
	b		0,934362	1,31262E-05	0,934336	0,934388
73	A	$s^2\ m^{-5}$	0,137709	0,0105436	0,11682	0,158598
	B	$s^2\ m^{-5}$	1,93946E-05	6,59044E-06	6,33774E-06	3,24515E-05

Tabla 27
Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de transporte de sedimentos en surcos de pendiente de 1%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj}$	Cp	S_{yx}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a) Calibración													b) Validación	
42	1	70	0,69	0,69	0	0,001	1,34	1,4E-06	0,0008	56,3	3,23E-05	-25,6	54,3	-9,0
48	1	70	0,61	0,60	0	1,84	0,73	3,39966	1,48	38,5	-0,0016	-18,5	43,7	-12,4
50	2	70	0,74	0,74	1	0,0011	0,50	1,39E-06	0,0007	26,6	-1,2E-05	-11,1	34,3	-20,1
73	4	70	0,63	0,62	3	0,0014	0,13	2,09E-06	0,0011	58,6	-0,000225	-44,2	75,4	-68,8

Tabla 28

Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 1.5%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
42	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	2,56923E-06	1,21078E-06	1,53E-07	4,98531E-06
	b		3,05	0,193917	2,66722	3,44113
48	K_t	$kg\ m^{-3}$	1,51027	2,36496	-3,21022	6,23075
	ω_c	$m\ s^{-1}$	0,00184733	0,00156933	-0,00128507	0,00497973
	b		1,15984	0,379125	0,403106	1,91658
50	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	1169,15	305,294	559,775	1778,52
	a		2,27473	0,109443	2,05628	2,49318
	b		1,45926	9,45E-07	1,45926	1,45926
73	A	$s^2\ m^{-5}$	0,0163071	0,00754496	0,00135913	0,031255
	B	$s^2\ m^{-5}$	-3,03334E-05	5,97325E-06	-4,21676E-05	-1,84993E-05

Tabla 29

Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de transporte de sedimentos en surcos de pendiente de 1.5%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj.}$	C_p	S_{yx}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	a)Calibración		b)Validación	
													EPMA	EPM	EPMA	EPM
42	1	70	0,83	0,83	0	0,0006	1,37	4,59E-07	0,00049	107,79	-8,16E-06	-79,8	167,8	-148,5		
48	1	70	0,68	0,67	0	0,0015	0,26	2,31E-06	0,00121	71,81	4,66E-06	-40,3	77,1	-61,7		
50	2	70	0,96	0,95	1	0,0003	1,07	1,36E-07	0,00025	36,50	-1,61E-05	-19,4	38,7	-23,2		
73	4	70	0,84	0,84	3	0,00067	0,44	4,49E-07	0,00046	64,13	-0,00012	-47,6	65,4	-49,3		

Tabla 30

Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 2.5%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
42	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	6,35445E-05	1,70494E-05	2,95E-05	9,75661E-05
	b		1,44376	0,115768	1,21275	1,67477
48	K_t	$kg\ m^{-3}$	20,9881	12,0544	-3,07254	45,0488
	ω_c	$m\ s^{-1}$	-0,0116829	0,01498	-0,0415831	0,0182174
	b		0,605713	0,261209	0,084337	1,12709
50	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	178,463	132,811	-88,0421	444,968
	a		1,60588	0,242586	1,1191	2,09267
	b		1,5135	3,08746E-06	1,51349	1,5135
73	A	$s^2\ m^{-5}$	0,0175087	0,00226236	0,0130265	0,0219908
	B	$s^2\ m^{-5}$	-1,88053E-06	8,85E-07	-3,63391E-06	-1,27E-07

Tabla 31

Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de transporte de sedimentos en surcos de pendiente de 2.5%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj.}$	C_p	S_{yx}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	a)Calibración		b)Validación	
													EPMA	EPM	EPMA	EPM
42	1	70	0,67	0,67	0	0,0003	1,51	1,24E-07	0,00029	26,073	4,37E-06	-7,84	19,09	-5,29		
48	1	70	0,64	0,63	0	0,5602	1,28	0,313907	0,44247	14,998	-4,36E-05	-3,50	15,56	-8,17		
50	2	70	0,73	0,72	1	0,0007	0,69	5,65E-07	0,00054	49,814	2,16E-05	-21,5	60,54	-35,04		
73	4	70	0,72	0,71	3	0,0007	0,66	5,17E-07	0,00051	40,126	-4E-05	-22,4	43,57	-23,87		

Tabla 32

Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de Pendiente 13%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
42	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	0,0174242	0,00251662	0,0124024	0,0224461
	b		0,725133	0,0598115	0,605781	0,844485
48	K_t	$kg\ m^{-3}$	15,081	4,10739	6,88261	23,2794
	ω_c	$m\ s^{-1}$	-0,0758903	1,79263	-3,65401	3,50223
	b		0,250423	0,110212	0,0304385	0,470408
50	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	9,637	6,46112	-3,25948	22,5335
	a		0,80384	0,138784	0,526825	1,08086
	b		1,0125	0,104864	0,803187	1,22181
73	A	$s^2\ m^{-5}$	0,0311714	0,00271985	0,0257829	0,0365599
	B	$s^2\ m^{-5}$	-3,25E-09	4,86E-08	-9,94E-08	9,29E-08

Tabla 33

Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de transporte de sedimentos en surcos de pendiente de 13%.

Ec.	p	n	R^2	$(R^2)_{aj.}$	C_p	S_{yx}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	a)Calibración		b)Validación	
													EPMA	EPM	EPMA	EPM
42	1	70	0,701	0,697	0	0,01	1,99	0,00015	0,009	11,0	-0,00012	-2,52	14,76	-0,13		
48	1	70	0,603	0,591	0	1,77	1,70	3,15648	1,49	6,9	1,13E-05	-0,65	7,35	0,30		
50	2	70	0,666	0,656	1	0,02	0,88	0,000412	0,016	33,1	-9,29E-05	-14,6	44,0	-26,50		
73	4	70	0,673	0,669	3	0,02	0,80	0,000411	0,015	31,6	9,47E-05	-13,7	38,22	-14,45		

Comparación de los procesos de erosión estimados con los datos observados

Durante eventos de riego. En la Figura 23(a) se muestra una relación $wT_c > CQ$, lo que indica que está ocurriendo un flujo poco concentrado, luego en los dos últimos intervalos se muestra que $wT_c < CQ$. En la Figura 23(b) se muestra que ocurre el proceso de erosión y seguidamente el de deposición al final del evento de riego. En la Figura 23(c) se muestra una relación $wT_c < CQ$ durante todo el evento. En la Figura 23(d) se muestra que sólo ocurre deposición. Estos resultados se podrían explicar con base en una pendiente baja y previa acumulación de sedimentos en el surco. En la Figura 23(e) se muestra una relación $wT_c > CQ$ durante todo el evento. En la Figura 23(e) se muestra que solo ocurre erosión. En estos resultados se evidencia la influencia en el incremento de la pendiente.

Durante el ciclo de siembra. En la Figura 24 se muestran aproximaciones a los procesos que ocurren durante el ciclo de siembra dividido en tres etapas. Los datos usados para la evaluación en los modelos han sido promediados por etapa, tomando cada etapa integrada por cuatro semanas. En la Figura 24(a) se observa que en la primera etapa predominan la erosión y el transporte; en la segunda etapa predominan la deposición y el transporte, en la tercera la erosión y el transporte. En la Figura 24(b) se observa que en la primera y segunda etapa predominan la deposición y el transporte, en la tercera erosión y el transporte. En las Figuras 24 (c), 24(d) y 24(e) se observa que en la primera etapa predominan la deposición y el transporte; en la segunda y tercera etapa predominan la erosión y el transporte.

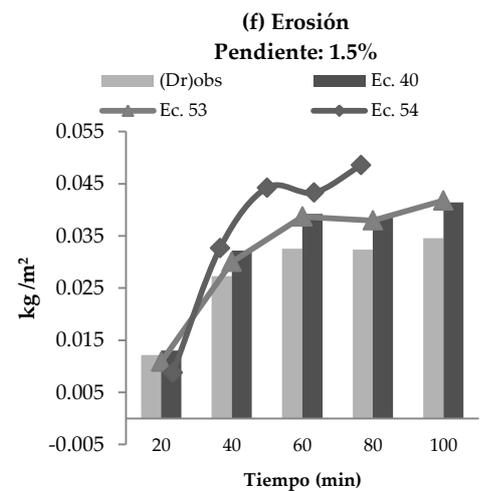
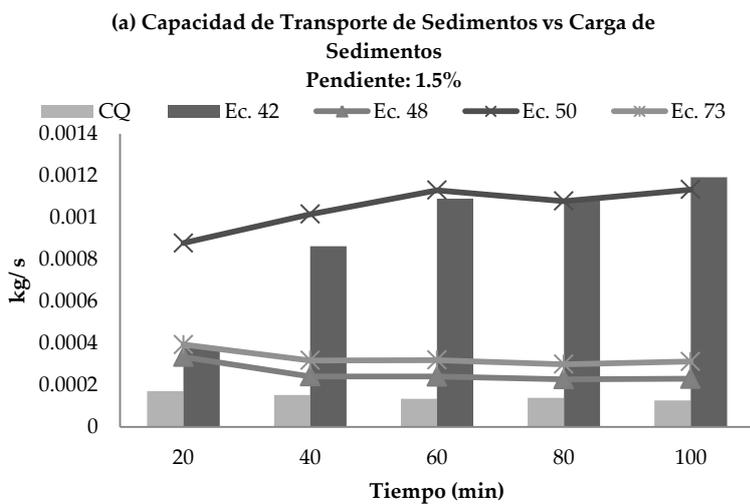
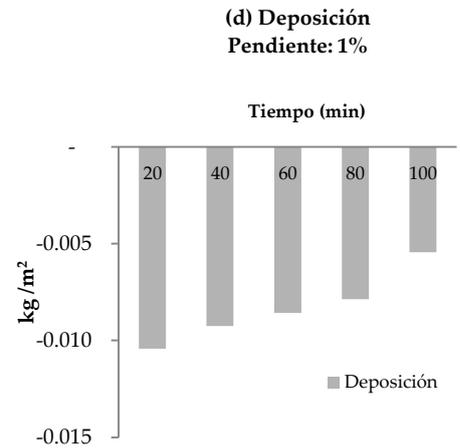
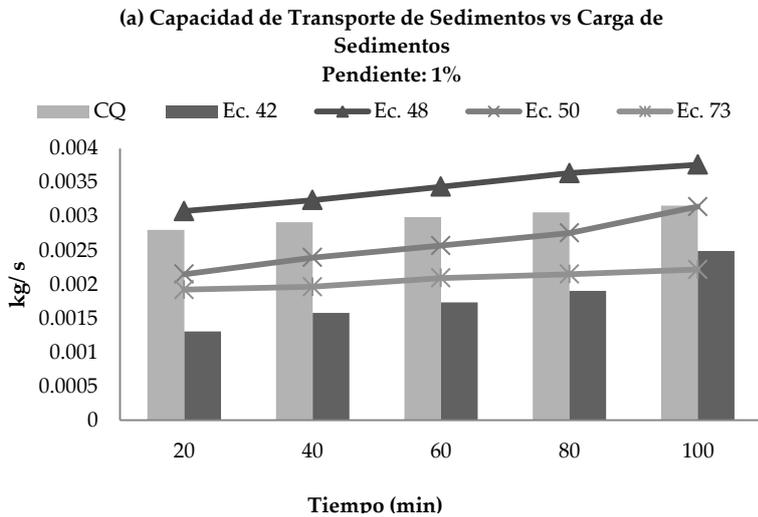
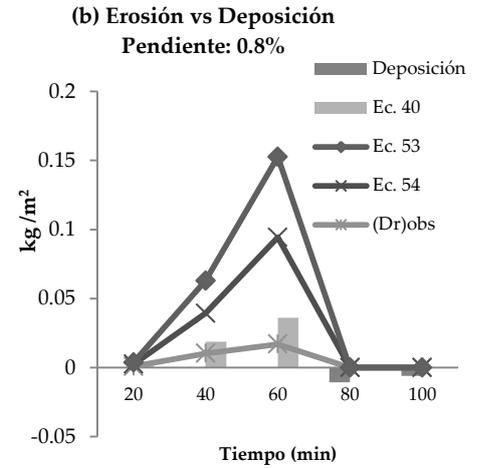
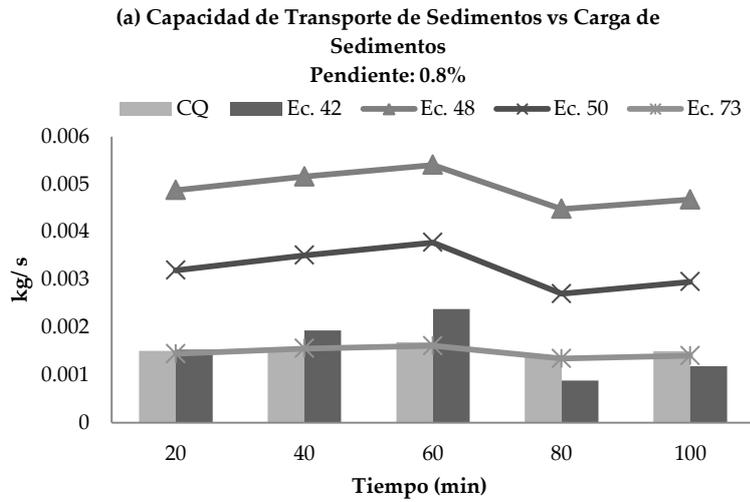


Figura 23. Comparación de los procesos de erosión estimados con las observaciones de la carga de sedimentos en la salida de un surco durante un evento de riego en parcelas de diversas pendientes

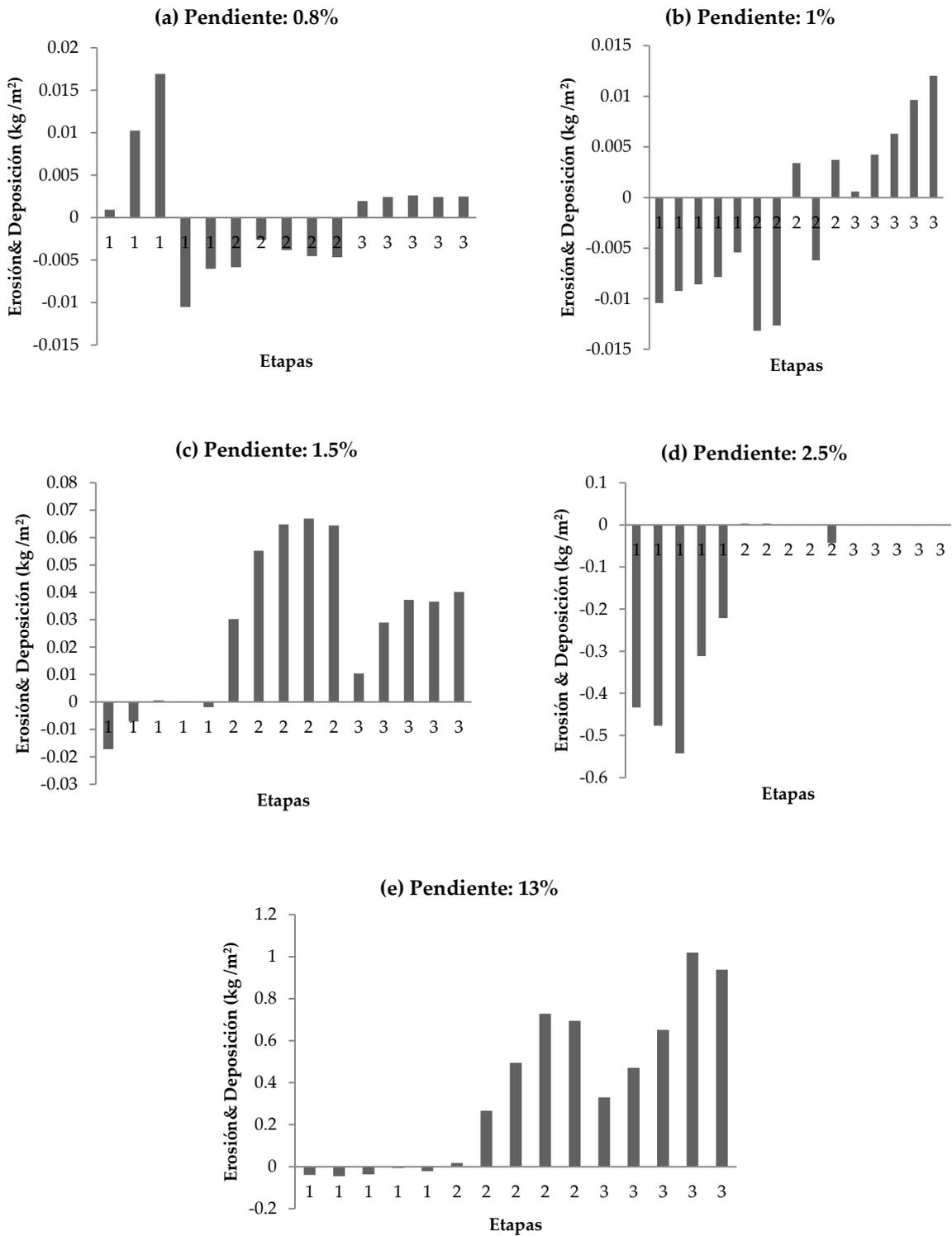


Figura 24. Erosión y deposición estimadas durante eventos de riego en la salida de un surco empleando datos promediados por etapa en parcelas de diversas pendientes (cada etapa representa 1/3 del tiempo del ciclo de siembra).

4.2.2 Ajustes de Modelos de Erosión en Surcos basados en Regresiones

En la Tabla 34 se muestran los valores de los parámetros en los modelos de la erosión en surcos basados en regresiones lineales, Ecuaciones 74(a) y 74(b); así como no lineales, Ecuaciones 75(a) hasta la 75(e). En general, se pueden realizar las siguientes afirmaciones acerca de los parámetros β_i : en la Ecuación 74(a) variaron entre -4,267 y 4,3829; en la Ecuación 74(b) entre -7,5 y 9,14; en la ecuación 75(a) entre -0,031 y 0,2697; en la Ecuación 75(b) entre -0,014 y 0,093; en la Ecuación 75(c) entre -0,629 y 1,938; en la Ecuación 75(d) entre -0.046 y 1.012.

En la Tabla 35 se muestran los estadísticos del ajuste de los modelos de la erosión en surcos basados en regresiones al conjunto de observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0.8%, 1%, 1.5%, 2.5% y 13%. R^2 : varió entre 0.90 y 0.53; disminuye a medida que aumenta la potencia del polinomio. R^2_{ajust} : para todas las ecuaciones se encontró una reducción poco significativa en relación al R^2 . *Cp de Mallows*: para todas las ecuaciones se encontró que disminuye ligeramente en relación al número de variables independientes en cada ecuación. *Estadístico de Durbin-Watson*: varió entre 0.7 y 1.68. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y validación haciendo énfasis en el EPMA y EPM: en el primero varía entre 6.21 y 12.57. En el segundo varió entre -0.71 y 6.78. En general, (a) los errores tendieron a ser más bajos en la etapa de calibración con respecto a la de validación y (b) se incrementaron a medida que aumentó la potencia del polinomio. El resto de los errores puede ser observado en la Tabla 35.

Tabla 34

Coefficientes de Regresión de los Modelos de Erosión basados en RLM y RNLM

Ec.	Variable Dependiente	Variable Independiente	Parámetro	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
74 (a) RLM n=1 D=1H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	-1,398583862	1,442760413	-4,267676785	1,47050906
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	0,833406797	1,784933149	-2,716135469	4,382949064
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	0,731227333	1,392642416	-2,03820026	3,500654927
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	0,183129882	1,814769332	-3,425745022	3,792004785
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	0,737812187	1,250395401	-1,748741065	3,224365439
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,559520883	0,731816989	-0,895780305	2,014822071
74 (b) RLM n=1 D=2H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	-0,794050629	1,4177439	-3,585879266	1,997778008
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	-2,195990758	2,69409942	-7,5012253	3,109243783
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	0,780383734	3,769700299	-6,642929634	8,203697103
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	2,177019018	1,357605748	-0,496385258	4,850423294
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	4,541647609	2,338266456	-0,062878815	9,146174033
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,099997046	0,333760338	-0,557245543	0,757239634
75 (a) RNLM n=2 D=1H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	0,119031048	0,073909116	-0,031707895	0,269769991
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	0,055276888	0,084390798	-0,116839631	0,227393406
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	0,066816629	0,061319061	-0,058244676	0,191877933
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	0,050906233	0,084917164	-0,122283818	0,224096283
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	0,075651656	0,055759098	-0,038070006	0,189373318
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,05458908	0,025644464	0,002286744	0,106891417
75 (b) RNLM n=3 D=1H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	0,065622334	0,013487094	0,038182579	0,093062088
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	0,014849305	0,014240642	-0,014123558	0,043822168
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	0,002274855	0,007430699	-0,012843047	0,017392756
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	0,01600253	0,014611824	-0,013725509	0,045730568
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	0,008392722	0,009444179	-0,010821644	0,027607088
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,006471389	0,003122043	0,000119533	0,012823245
75 (c) RNLM n=2 D=2H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	0,565467014	0,170384074	0,227999229	0,902934798
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	0,060856563	0,260216264	-0,454535539	0,576248665
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	1,110633143	0,418014423	0,282701296	1,938564991
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	0,334619992	0,145250564	0,046932389	0,622307595
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	-1,53E-01	0,240668154	-0,629188284	0,324160779
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,042533197	0,020393795	0,002140637	0,082925756
75 (d) RLNM n=3 D=2H	D _R mg/m ² /s	Pt	β ₁	mg /m ² /s/ mm	0,305101494	0,068845599	0,168692499	0,44151049
		Pt-1	β ₂	mg /m ² /s/ mm	0,1154	0,0815	-0,0460	0,2769
		Pt-2	β ₃	mg /m ² /s/ mm	0,691301164	0,161871969	0,370571984	1,012030344
		Pt-3	β ₄	mg /m ² /s/ mm	0,08363529	0,049106013	-0,013662171	0,18093275
		Pt-4	β ₅	mg /m ² /s/ mm	-0,3610	0,0819	-0,5233	-0,1988
		Pt-5	β ₆	mg /m ² /s/ mm	0,01057652	0,003464163	0,003712711	0,017440329

Tabla 35

Estadísticos de ajuste de los modelos de erosión basados en RML y RNLM

Ec.	O	D	p	n	R ²	(R ²) _{aj.}	C _p	S _{xy}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	a) Durante la Calibración		
															n	EPMA	EPM
74 (a)	1	1	6	90	0,9	0,89	5	2,85	0,14	8,17	2,12						
74 (b)	1	2	6	264	0,8	0,89	5	4,22	0,16	17,87	3,17						
75 (a)	2	1	6	37	0,7	0,67	5	0,78	0,18	0,60	0,59	7,18	0,0008	-0,71	8	9,1	6,7
75 (b)	3	1	6	39	0,7	0,66	5	0,84	0,70	0,90	0,70	8,48	0,0024	-0,78	6	6,2	-2,3
75 (c)	2	2	6	122	0,7	0,71	5	1,50	0,94	2,25	1,18	10,06	0,0685	-0,45	10	6,8	4,0
75 (d)	3	2	6	118	0,5	0,51	5	1,90	1,68	3,62	1,43	11,85	0,2065	0,90	14	12,5	3,3

Ec.: Ecuación; O: Orden o exponente; D: duración de la lluvia; p: Número de variables independientes en el modelo; n: Número de datos observados; R²: Coeficiente de determinación; (R²)_{aj.}: coeficiente de determinación ajustado; C_p: Coeficiente de Mallows; S_{xy}: Error estándar de estimación; d: estadístico de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; EMA: Error Medio Absoluto; EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto (%); EM: Error Medio; EPM: Error Porcentual Medio (%).

En la Figura 25 se muestra una comparación de los resultados de la erosión estimada mediante las Ecuaciones (74a), (74b), (75a), (75b), (75c) y (75d) a la observada bajo riego en los surcos de pendientes 0.8%, 1%, 1.5% y 2.5%. Adicionalmente, se incluye una comparación con el modelo de procesos físicos representado por la Ecuación (51); así como la técnica de inteligencia artificial basada en las redes neuronales, la cual será ampliamente discutida en la próxima sección. El ciclo de siembra bajo riego se ha dividido en tres etapas; cada etapa representa 1/3 de la duración total correspondiente a 12 semanas; obteniendo valores promedio de los datos para cada etapa.

En la Figura 25 se han representado mediante líneas continuas los modelos que realizan la mejor aproximación a los datos observados de la erosión en surcos, así como en barras los modelos restantes, cuyos valores estimados difieren significativamente con respecto a los datos observados. En general, se encuentra que: (a) la Ecuación (74b) realizó una mejor aproximación que el resto de los modelos lineales y no lineales; aunque carece de ajuste en la estimación de los valores al inicio y al final de cada evento de riego; (b) la Ecuación (51) realizó una mejor estimación que los modelos basados en regresiones lineales y no lineales (Ecuaciones (74) y (75)); incrementando el ajuste para las pendientes mayores a 0.8%; (c) los valores estimados de la erosión mediante la aplicación de la técnica de RNA son los que mejor se ajustaron a los valores observados, mejorando los resultados obtenidos con las Ecuaciones (51), (74) y (75).

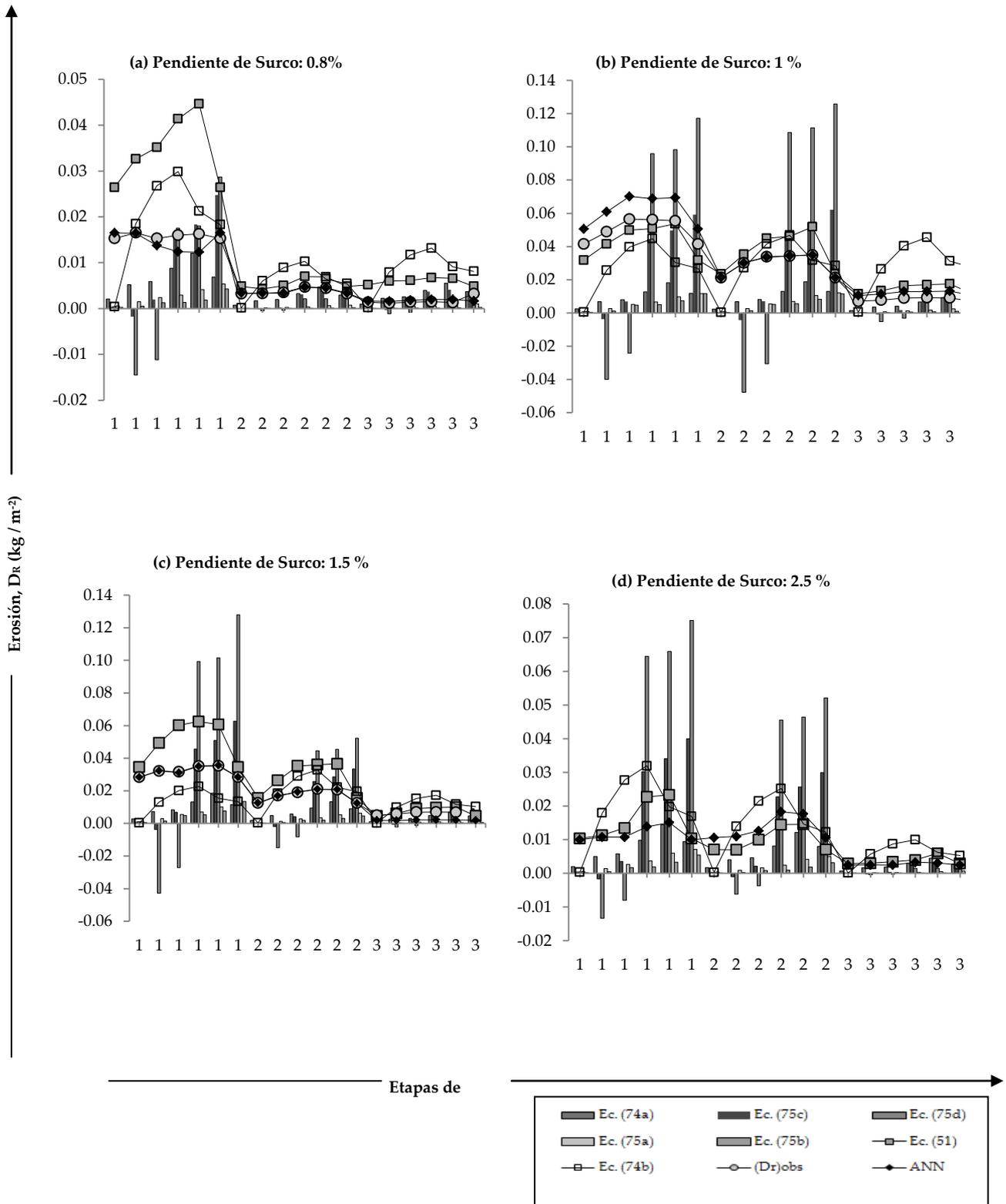


Figura 25. Comparación de la erosión en surcos simulada mediante modelos de regresión con los datos observados

4.2.3 Ajustes basados en Técnicas de Inteligencia Artificial

En esta sección se presentan los resultados de la modelación empleando las siguientes técnicas de inteligencia artificial: redes neuronales artificiales y lógica difusa.

En la Tabla 36 se muestran los estadísticos del ajuste de una función sigmoideal empleando la técnica de RNA al conjunto de observaciones de lluvia-erosión para los eventos de una hora (RNA1) y dos horas con diferente cantidad de datos (RNA2) y (RNA3). Los estadísticos en las etapas de entrenamiento, validación y prueba variaron como sigue para las redes mencionadas: R^2 : RNA1 es igual a 0.686; 0.897 y 0.876; RNA2 resultó igual a 0.39; 0.615 y 0.49; RNA3 resultó igual a 0.758; 0.831 y 0.786. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y la validación haciendo énfasis en el EAP: el cual varió entre 0.1 y 0.14. En general, se encuentra que: (a) los errores no variaron significativamente entre las etapas de calibración, validación y prueba; (b) tendieron a ser más bajos a medida que la variabilidad en los datos resultó menor, lo que favoreció un mejor aprendizaje de la red con relación a las observaciones.

Tabla 36

Estadísticos de Ajuste de los Modelos de Erosión mediante las Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Modelo	N	D	EAP	R^2
(a) Durante la Calibración				
RNA 1: 6-20-6	144	1	0,13962	0,686
RNA 2: 6-100-6	438	2	0,1750	0,390
RNA 3: 6-100-6	219	2	0,1283	0,758
(b) Durante la Validación				
RNA 1: 6-20-6	144	1	0,146	0,897
RNA 2: 6-100-6	438	2	0,166	0,615
RNA 3: 6-100-6	219	2	0,103	0,831
(c) Durante la Prueba				
RNA 1: 6-20-6	144	1	0,146	0,876
RNA 2: 6-100-6	438	2	0,166	0,490
RNA 3: 6-100-6	219	2	0,1039	0,786

N: número de datos observados; D: duración de los eventos de lluvia y riego; AAE: Error Absoluto Promedio; R^2 : coeficiente de determinación; RNA: Redes Neuronales Artificiales

En la Figura 26 se muestra la comparación de los valores estimados mediante la aplicación de las RNA's a los datos observados de la erosión en surco bajo

eventos de lluvia y riego de una y dos horas de duración durante las etapas de entrenamiento/calibración, validación y prueba. En el eje vertical se representa la erosión simulada (D_r est.) y en el eje horizontal se representa la erosión observada (D_r obs.), cada par de coordenadas se representa mediante un punto. Las líneas en las Figuras (26a) a (26i) representan la relación 1:1, donde la aproximación de los puntos a las líneas es una medida que indica qué tan bien es la correlación entre el conjunto de los valores estimados de la erosión con la ecuación sigmoideal mediante la técnica de RNA y los valores obtenidos mediante las pruebas de campo en los surcos para las diferentes pendientes. En las Figuras (26a) a (26c) y (26g) a (26i) se observa que los puntos se aproximan aleatoriamente alrededor de la línea 1:1, lo que indica que la red ha aprendido satisfactoriamente el patrón mostrado por las observaciones durante los eventos de lluvia. En las Figuras (26d) a (26f) se observa que existe una aproximación moderadamente satisfactoria de los puntos a la recta 1:1, lo que se explica en que existe una cierta variabilidad en las observaciones que la red no es capaz de simular.

Modelación de la Erosión en Surcos Mediante un Sistema de Inferencia Difuso

En la Tabla 37 se muestran los coeficientes de las dos funciones de pertenencia correspondientes a las dos variables de entrada a cada Sistema de Inferencia Difuso (SID). Los SID caracterizados son tres: el SID 1 corresponde a los eventos de lluvia natural de duración igual a una hora; el SID 2 corresponde a los eventos de lluvia natural de duración igual a dos horas y el SID 3 corresponde a los eventos de riego de duración igual a dos horas. La entrada 1 está representada por las mediciones de la lluvia natural y simulada (riego) dentro de los eventos de duración igual a una hora, cada 10 minutos; y dos horas, cada 20 minutos; mientras que la entrada 2 está representada por los valores de la infiltración medida para los intervalos mencionados antes.

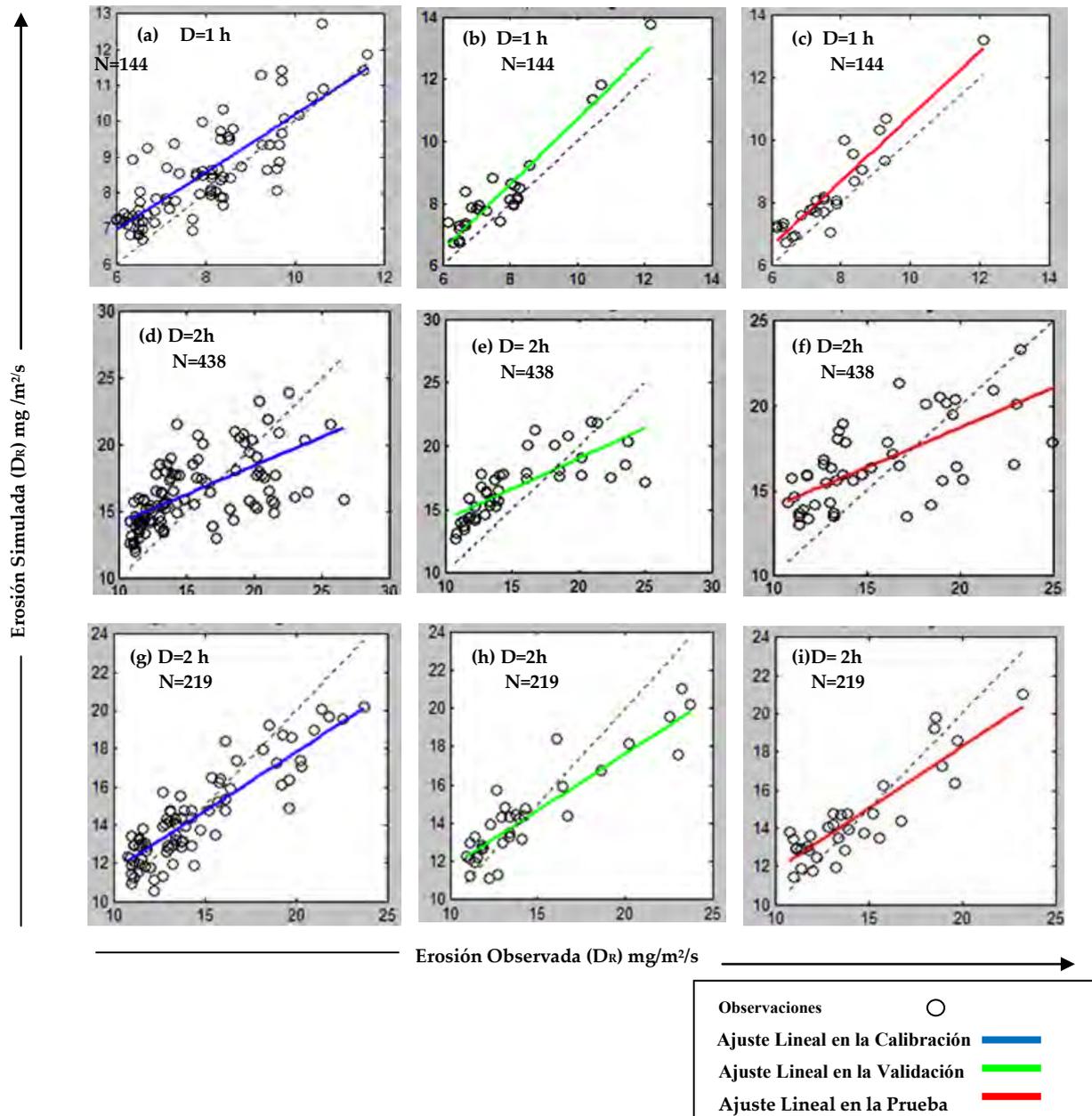


Figura 26 Comparación de la erosión simulada mediante Redes Neuronales Artificiales con las observaciones de eventos de lluvia de 1 h y 2 h

Como un ejemplo se describe el SID 1; el cual resultó representado para cada entrada por funciones de pertenencia del tipo trapezoidal. Las dos funciones trapezoidales para la representación de la lluvia tienen los siguientes parámetros: en la primera: 1.827; 2.974; 4.557 y 5.928; en la segunda: 4.677; 5.705; 7.562 y 8.709. Las dos funciones trapezoidales para la representación de la infiltración

tienen los siguientes parámetros: en la primera: -0.508; 0.0293; 0.859; 1.381; en la segunda: 3.637; 4.676, 7.46 y 9.147. El resto de los valores puede ser observado en la Tabla 37.

Tabla 37

Coefficientes de las Funciones de Pertenencia para diversos SID

Modelo	Entradas	Función de Pertenencia	Parametro- 1	Parametro- 2	Parametro- 3	Parametro- 4
SID 1	Entrada 1	Trapmf-1	1,827	2,974	4,557	5,928
	Entrada 1	Trapmf-2	4,677	5,705	7,562	8,709
	Entrada 2	Trapmf-1	-0,508	0,0293	0,859	1,381
	Entrada 2	Trapmf-2	3,637	4,676	7,46	9,147
SID 2	Entrada 1	Trapmf-1	-0,9727	0,7139	3,089	5,373
	Entrada 1	Trapmf-2	3,637	4,676	7,46	9,147
	Entrada 2	Trapmf-1	-0,5081	0,0293	0,8595	1,381
	Entrada 2	Trapmf-2	3,637	4,676	7,46	9,147
SID 3	Entrada 1	Trapmf-1	-5,071	-1,601	4,226	7,563
	Entrada 1	Trapmf-2	5,466	7,789	12,28	15,75
	Entrada 2	Trapmf-1	-0,501	0,021	0,859	1,381
	Entrada 2	Trapmf-2	0,979	1,398	2,179	2,717

En la Tabla 38 se muestran los estadísticos del ajuste de la modelación de la erosión bajo eventos de lluvia y riego mediante los diversos SID's al conjunto de las observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0.8%, 1%, 1.5%, 2.5% y 13%. Se comparan los resultados del error absoluto promedio durante las etapas de la calibración, validación y prueba; variando como sigue: en la primera: 1.108; 1.5147 y 1.489. En la segunda: 2.403; 2.5977 y 2.676. En la tercera: 1.4; 2.396 y 1.565. En general, no existen diferencias significativas entre los errores en las etapas de calibración, validación y prueba.

Tabla 38

Estadísticos de Ajuste de los Modelos de Erosión basados en SID

Modelo	N	D	EAP
a) Durante la Calibración			
FIS 1 (trapmf)	88	1	1,108
FIS 2 (trapmf)	262	2	2,007
FIS 3 (trapmf)	180	2	1,400
b) Durante la Validación			
FIS 1 (trapmf)	28	1	1,5147
FIS 2 (trapmf)	88	2	2,1407
FIS 3 (trapmf)	60	2	2,396
c) Durante la Prueba			
FIS 1 (trapmf)	28	1	1,489
FIS 2 (trapmf)	88	2	2,367
FIS 3 (trapmf)	60	2	1,565

N: número de datos observados; D: duración de los eventos de lluvia y riego; EAP: Error Absoluto Promedio

En la Figura 27 se muestra un ejemplo comparativo de los valores estimados mediante la aplicación del SID a los datos observados de la erosión en surcos bajo los eventos de lluvia de duración igual a dos horas durante las etapas de entrenamiento/calibración, validación y prueba; empleando una muestra de 35 datos. La cantidad total de los datos en cada etapa se puede observar en la Tabla 38. En el eje vertical se representa la erosión simulada (D_r est.) y observada (D_r obs.) y en el eje horizontal se representa un número asignado a cada dato, cada par de coordenadas se representa mediante un punto. En la Figura 27(a), se muestran los resultados en la etapa de entrenamiento del SID, donde se observa que los puntos de los datos (círculos) se aproximan satisfactoriamente a los del SID (asteriscos). En las Figuras 27(b) y 27(c) se observa que existe una buena aproximación de los puntos al SID.

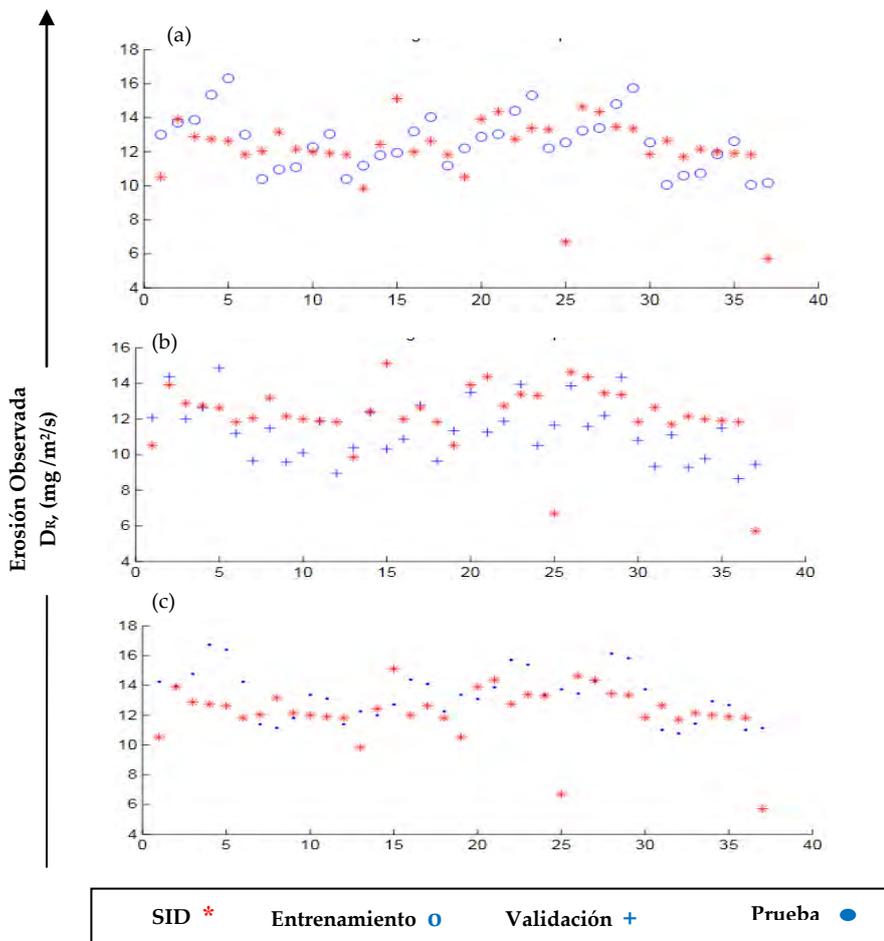


Figura 27. Comparación de la erosión simulada mediante Sistema de Inferencia Difuso con observaciones de eventos de lluvias de 2 h

4.3 Validación de los Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos

4.3.1 Ajustes de Modelos de Erosión Basados en Procesos Físicos

4.3.1.1 Ajustes de Modelos de Infiltración

Basado en los resultados de la calibración se validan únicamente los modelos de infiltración dependientes del tiempo: Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Kostiakov Modificado.

Análisis Cualitativo

La inspección visual de los gráficos de la tasa de infiltración observada con la estimada mediante los modelos de Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Kostiakov Modificado mostró la mayor parte de los valores se encuentran dentro de un intervalo de confianza al 95%, más detalles se muestran en las Figuras 33 a 37 del Anexo XL.

Análisis Cuantitativo

En la Tabla 39 se presentan los resultados de la validación de los modelos de infiltración dependientes del tiempo: Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Kostiakov Modificado en relación a los valores observados de infiltración. A partir de los resultados mostrados en la Tabla 39 se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

Modelo de Philip: el coeficiente de correlación r resultó igual a 0.842661, el coeficiente de determinación R^2 resultó igual a 0.710077, el error estándar del estimado resultó igual a 123.202 y el error estándar absoluto medio es 89.2139.

Modelo de Mishra Singh: el coeficiente de correlación r resultó igual a 0.838515, el coeficiente de determinación R^2 resultó igual a 0.703107, el error

estándar del estimado resultó igual a 131.361 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 66.4955.

Modelo de Horton: el coeficiente de correlación r resultó igual a 0.839431, el coeficiente de determinación R^2 resultó igual a 0.704644, el error estándar del estimado es 127.374 y el error estándar absoluto medio es 66.0692.

Modelo de Kostiakov: r resultó igual a 0.845266, R^2 resultó igual a 0.714475, el error estándar del estimado es 132.222 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 67.1202.

Modelo de Smith (Kostiakov Modificado): r resultó igual a 0.837822, R^2 resultó igual a 0.701945, el error estándar del estimado resultó igual a 127.76 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 64.5312.

Tabla 39

Resultados en la Validación de los Modelos de Infiltración

Modelo	Coefficiente de Correlación (r)	Coefficiente de Determinación (R^2)	Error estándar del estimado	Error absoluto medio
Philip	0.842661	0.710077	123.202	89.2139
Mishra - Singh	0.838515	0.703107	131.361	66.4955
Horton	0.839431	0.704644	127.374	66.0692
Kostiakov	0.845266	0.714475	132.222	67.1202
Kostiakov Modificado	0.837822	0.701945	127.76	64.5312

Con base en los resultados obtenidos en la etapa de validación, en términos del coeficiente de correlación, coeficiente de determinación y errores estándar del estimado y absoluto medio, se puede concluir que los modelos de Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Smith (Kostiakov Modificado) estiman satisfactoriamente el proceso de infiltración.

4.3.1.2 Ajustes de Modelos de Lluvia-Escorrentía

En la Tabla 40 se presentan los resultados obtenidos en la etapa de validación de los modelos lluvia-escorrentía basados en regresiones lineales y no lineales múltiples, así como RNA.

Los valores del ajuste de los datos de la escorrentía observada durante eventos de lluvia de 1 hora a los modelos, dados en la tabla indican lo siguiente: **RLM**: el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual a 0.999939. **RNLM-1**: R^2 para un modelo polinómico de orden 2 resultó igual a 0.999554. **RNLM-2**: para un modelo polinómico de orden 3, R^2 resultó igual a 0.999554. **RNLM-3**: para un modelo polinómico de orden 4, R^2 resultó igual a 0.972053. De manera general, para todos los modelos se encontró un ajuste satisfactorio a los datos de escorrentía observada para tormentas de una hora.

Los valores del ajuste de los datos de la escorrentía observada durante eventos de lluvia de 2 horas a los modelos, dados en la tabla indican lo siguiente: **RLM**: R^2 resultó igual a 0.999796. **RNLM**: para un modelo polinómico de orden 2, R^2 resultó igual a 0.583006, lo que indica un ajuste moderadamente satisfactorio. **RNLM-2**: para un modelo polinómico de orden 3, R^2 resultó igual a 0.547437, lo que indica un ajuste moderadamente satisfactorio. **RNLM-3**: para un modelo polinómico de orden 4, R^2 resultó igual a 0.46855, lo que indica un ajuste moderadamente satisfactorio en la etapa de validación. **RNLM-4**: para un modelo polinómico de orden 5, R^2 resultó igual a 0.932972, lo que indica un ajuste satisfactorio. **RNLM-4**: para un modelo polinómico de orden 5, R^2 resultó igual a 0.322779, lo que indica un ajuste moderadamente satisfactorio en la etapa de validación. Se encontró que los modelos RNA-12-20-12 se ajustan satisfactoriamente a los datos de escorrentía observados. Los valores dados en la Tabla 40 indican que, R^2 resultó mayor a 0.99.

Tabla 40

Resultados en la Validación de los Modelos Lluvia - Escorrentía

Modelo	R^2 (D=1H)	R^2 (D=2H)
RLM	0.999939	0.999796
RNLM-1	0.999554	0.583006
RNLM-2	0.992946	0.547437
RNLM-3	0.972053	0.46855
RNLM-4	0.932972	0.322779
RNA 12-20-12	1	0.99835

Para eventos de lluvia de 1 h y 2 h de duración, en la etapa de validación el ajuste de los modelos RLM y RNA resultó satisfactorio, ya que R^2 , en ambos casos es mayor que 0.99; mientras que para los modelos RNLM polinómicos, R^2 está alrededor de 0.5, mejorando para lluvias de 1 hora. Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos de R^2 , el proceso lluvia-escorrentía se ajusta mejor a los modelos que usan la herramienta RNA que a aquellos que usan las técnicas clásicas de optimización.

4.3.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos

En la Tabla 41 se presentan los resultados de la validación de los modelos de erosión basados en procesos físicos: WEPP, DWEPP, EUROSEM y CIHAM-UC. La validación se ha realizado mediante la aplicación de los modelos de procesos, cuyos parámetros se han obtenido en la etapa de calibración.

Los valores dados en la tabla indican lo siguiente:

Modelo WEPP: el error medio absoluto resultó igual 1.13102 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.653454.

Modelo DWEPP: el error medio absoluto resultó igual 1.31921 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.663816.

Modelo EUROSEM: el error medio absoluto resultó igual 0.383274 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.725507.

Modelo CIHAM-UC: el error medio absoluto es igual 3.14075 y el coeficiente de determinación, R^2 es igual a 0.700249.

De manera general, se encontró un ajuste satisfactorio en la etapa de validación.

Tabla 41***Resultados en la Validación de los Modelos de Erosión basados en Procesos Físicos***

Ecuación	Modelo	EMA	R²
39	Modelo de procesos físicos WEPP	1.13102	0.653454
39	Modelo de procesos físicos DWEPP	1.31921	0.663816
47	Modelo de procesos físicos EUROSEM	0.383274	0.725507
51	Modelo de procesos físicos CIHAM-UC	3.14075	0.700249

Con base en los resultados obtenidos en la etapa de validación, se puede afirmar que los modelos de erosión basados en procesos físicos WEPP, DWEPP, EUROSEM y CIHAM-UC, realizan una estimación satisfactoria del proceso de erosión hídrica observada.

4.3.2 Ajustes de Modelos de Erosión basados en Regresiones

En la Tabla 42 se presentan los resultados de la validación de los modelos de regresión para la estimación de la erosión. Los valores dados en la tabla indican que: en el caso de los modelos de regresión múltiple, en el modelo 74(a) el error medio absoluto resultó igual a 0.86343 y R^2 resultó igual a 0.704111; en el modelo 74(b) el error medio absoluto es 1.24031 y R^2 es 0.67048; en el modelo 75(a) el error medio absoluto resultó igual a 0.169316 y R^2 resultó igual a 0.872292; en el modelo 75(b) el error medio absoluto es 0.184068 y R^2 resultó igual a 0.843254; en el modelo 75(c) el error medio absoluto es 1,12962 y R^2 resultó igual a 0.656051 y en el modelo 75(d) el error medio absoluto resultó igual a 1,12962 y R^2 resultó igual a 0.58673.

Sobre la base de los resultados obtenidos se puede concluir que, para eventos de 1 hora de duración el ajuste de los modelos RML y RMNL a los datos de erosión observada resultó satisfactorio, ya que R^2 , en ambos casos varió entre 0.70 y 0.90; mientras que para eventos de 2 horas, R^2 disminuyó ligeramente variando entre 0.60 y 0.89, encontrando valores alrededor de 0.65 para las dos últimas etapas.

Tabla 42***Resultados en la Validación de los Modelos de Regresión para Estimación de Erosión***

Ecuación	Modelo		EMA	R²	
74 (a)	Modelo de Regresión Múltiple Lineal		D=1H	0.86343	0.700924
74 (b)	Modelo de Regresión Múltiple Lineal		D= 2H	1.53617	0.603988
75 (a)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 1	n=2	D= 1H	0.163194	0.898978
75 (b)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 2	n=3	D= 1H	0.183253	0.871664
75 (c)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 3	n=2	D= 2H	1.07028	0.650878
75 (d)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 4	n=3	D= 2H	1.13165	0.58213

4.3.3 Ajustes Basados en Técnicas de Inteligencia Artificial

Se presentan los resultados de la validación de los modelos empleando las siguientes técnicas de inteligencia artificial: redes neuronales artificiales y lógica difusa.

Ajustes de Modelos de Erosión basados en RNA

En la Tabla 43 se presentan los resultados de la validación de los modelos de redes neuronales artificiales para la estimación de la erosión. Los valores dados en la tabla indican que, en el caso de los modelos basados en RNA para tormentas de 1 hora: en el modelo RNA-1, el error medio absoluto es igual a 0.139621 y R^2 resultó igual a 0.686627; en el modelo RNA-2, el error medio absoluto resultó igual a 0.1750 y R^2 resultó igual a 0.3902 y en el modelo RNA-3, el error medio absoluto resultó igual a 0.12835 y R^2 resultó igual a 0.7588. Para tormentas de dos horas: en el modelo RNA-1, el error medio absoluto resultó igual a 0.146329 y R^2 resultó igual a 0.876376; en el modelo RNA-2, el error medio absoluto resultó igual a 0.166 y R^2 resultó igual a 0.61556 y en el RNA-3, el error medio absoluto resultó igual a 0.1039 y R^2 resultó igual a 0.831342. Para eventos de 1 hora de duración el ajuste de los modelos RNA a los datos observados es satisfactorio, ya que R^2 , varió entre 0.68 y 0.87; mientras que para eventos de 2 horas ($n = 438$

datos), R^2 varió entre 0.39 y 0.61, mejorando para una cantidad de datos menor (n = 219 puntos).

Tabla 43

Resultados en la Validación de los Modelos de Redes Neuronales Artificiales para Estimación de la Erosión

Modelo			EMA	R^2
RNA 1: 6-20-6	N=144 puntos	D=1H	0.146	0.89709
RNA 2: 6-100-6	N=438 puntos	D= 2H	0.166	0.61556
RNA 3: 6-100-6	N=219 puntos	D=2H	0.103	0.831342

Ajustes de Modelos de Erosión basados en Sistema de Inferencia Difusa

En la Tabla 44 se presentan los resultados de la validación de los modelos de sistema de inferencia difusa para la estimación de la erosión. Los valores dados en la tabla indican que, en el caso de los modelos basados en sistemas de inferencia difusa para tormentas de 1 y 2 horas, en el modelo SID 1 el error medio absoluto es igual a 1.5147; en el modelo SID 2 el error medio absoluto es 2.6766. Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos del error medio absoluto, el proceso de erosión se ajusta mejor en el SID para eventos de 1 hora que para eventos de 2 horas.

Tabla 44

Resultados en la Validación de los Modelos de Sistema de Inferencia Difusa para la Estimación de Erosión

Modelo			EMA
SID 1 (trapmf)	N=144 puntos	D=1H	1.5147
SID 2 (trapmf)	N=219 puntos	D=2H	2.5977

4.4 Generalización de los Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos

La generalización de los modelos de erosión y transporte de sedimentos se lleva a cabo mediante una prueba adicional con un conjunto diferente de los datos usados en las etapas de la calibración y la validación para los modelos basados en procesos físicos, regresiones y los modelos ajustados usando técnicas de inteligencia artificial. Una vez cumplida la fase de la prueba, se seleccionará el modelo que mejor represente cada proceso, indicando la utilidad y la influencia que la aplicación de esta herramienta pueda tener sobre la ejecución de mejores prácticas agrícolas que contribuyan a la conservación del suelo y del agua en la cuenca del río Chirgua.

4.4.1 Ajustes de Modelos de Erosión Basados en Procesos Físicos

4.4.1.1 Ajustes de Modelos de Infiltración

Basado en los resultados de la calibración se realiza una prueba que permita afirmar la generalización de los modelos de infiltración dependientes del tiempo, los cuales han dado como resultado ajuste satisfactorio a los datos observados: Philip, Mishra-Singh, Horton, Kostiakov y Kostiakov Modificado.

Análisis Cualitativo

La inspección visual de la relación entre la tasa de infiltración observada con la tasa de infiltración estimada mediante los modelos propuestos por Philip (1957, 1969), Mishra Singh (2002), Horton (1938), Kostiakov (1932) y Kostiakov modificado por Smith (1972) da como resultados que la mayor parte de los valores se encuentran dentro de un intervalo de confianza al 95%, más detalles se muestran en las Figuras 38 a 41 del Anexo XLI.

Análisis Cuantitativo

En la Tabla 45 se presentan los resultados obtenidos del ajuste de los modelo de infiltración a los datos observados en la etapa de prueba. Los valores dados en la tabla indican lo siguiente:

Modelo de Philip: el coeficiente de correlación (r) resultó igual a 0.867617, el coeficiente de determinación (R^2) resultó igual a 0.752759, el error estándar del estimado resultó igual a 114.499 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 85.4945.

Modelo de Mishra-Singh: r resultó igual a 0.851117, R^2 resultó igual a 0.724401, el error estándar del estimado resultó igual a 127.773 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 64.7226.

Modelo de Horton: r resultó igual a 0.853327, R^2 es 0.728168, el error estándar del estimado resultó igual a 123.349 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 64.5458.

Modelo de Kostikov: r resultó igual a 0.859247, R^2 resultó igual a 0.738305, el error estándar del estimado resultó igual a 127.771 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 64.1488.

Modelo de Smith (Kostikov Modificado): r resultó igual a 0.850206, R^2 resultó igual a 0.72285, el error estándar del estimado resultó igual a 124.379 y el error estándar absoluto medio resultó igual a 62.8564.

Tabla 45

Resultados en la Prueba de los Modelos de Infiltración

Modelo	Coefficiente de Correlación (r)	de	Coefficiente de Determinación (R^2)	de	Error estándar del estimado	Error absoluto medio
Philip	0.867617		0.752759		114.499	85.4945
Mishra - Singh	0.851117		0.724401		127.773	64.7226
Horton	0.853327		0.728168		123.349	64.5458
Kostikov	0.859247		0.738305		127.771	64.1488
Kostikov Modificado	0.850206		0.72285		124.379	62.8564

Con base en los resultados obtenidos en las etapas de validación y prueba del ajuste mediante el análisis cualitativo y cuantitativo, se puede concluir que, en

términos del coeficiente de correlación, coeficiente de determinación y errores estándar del estimado y absoluto medio, el modelo de Horton es el que mejor estima la tasa de infiltración para diferentes condiciones de humedad y tipo de suelo en la cuenca del río Chirgua, seguido por los modelos de Mishra-Singh Philip y Kostiakov. El modelo de Horton se caracteriza por la siguiente ecuación y parámetros:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (27)$$

Donde f_c es el valor de f para el estado estable, f_o es el valor de f en $t=0$, y k es el factor de decaimiento de la infiltración. Los parámetros encontrados para las series total, según el contenido de humedad y según el tipo de suelo se indican en la Tabla 46.

Tabla 46
Parámetros del Modelo para la Estimación de la Tasa de Infiltración de Horton

Serie	Estadísticos	Parámetros			R ²
		fc (mm/h)	fo (mm/h)	a	
Total	Mín.	16.1341	2618.26	72.7281	0.6742
	Máx.	44.2106	4145.38	98.3681	
	Prom	30.1723	3381.82	85.5481	
Humedad Alta	Mín.	-3.53384	84,3015	0.75920	0.7729
	Máx.	10.4419	107,462	2.0821	
	Prom	3.45401	95,8819	1.42065	
Humedad Baja	Mín.	12.9876	2636.08	72.7851	0.6762
	Máx.	45.5974	4329.15	100.505	
	Prom	29.2925	3482.62	86.6449	
Arena Limosa	Mín.	-4.2709	4831.77	86.7913	0.876
	Máx.	50.6575	10024.9	128.108	
	Prom	23.1933	7428.36	107.45	
Limo Orgánico	Mín.	16.7709	1119.18	41.0422	0.6899
	Máx.	40.7979	1629.55	59.9513	
	Prom	28.7844	1374.36	50.4968	
Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	Mín.	-10.6795	1311.27	55.6868	0.6175
	Máx.	69.0287	5832.82	128.953	
	Prom	29.1746	3572.05	92.3198	

Mediante los parámetros del modelo de Horton, los diseñadores y administradores de unidades agrícolas productivas de la cuenca del río Chirgua, pueden generar una curva que relacione la tasa de infiltración con el tiempo. Mediante la curva de la tasa de infiltración se pueden estimar las características que intervienen en la programación de los eventos de riego, tales como la lámina

y el tiempo de aplicación del agua a los cultivos para diferentes condiciones de humedad inicial y tipos de suelo. La lámina de agua requerida por el suelo se obtiene por integración, como el área bajo la curva entre las etapas; inicial y de estabilización; mientras que el tiempo de riego se obtiene como el intervalo hasta el cual se inicia el proceso de estabilización de la tasa de infiltración debido a la saturación del suelo; lo que favorece la reducción de la programación del riego, reduciendo la escorrentía y la erosión del suelo. La importancia de este conocimiento radica en que se pueden realizar aplicaciones de agua al suelo ajustadas a las necesidades según la etapa del ciclo del cultivo bajo riego, al inicio del ciclo el suelo progresivamente se va saturando en el perfil correspondiente a la zona de aireación, lo cual se lleva a cabo aproximadamente durante las primeras 4 a 6 semanas, requiriendo tiempos de aplicación que varían entre 2 y 3 horas. Una vez que se satura el perfil de la zona de aireación del suelo la humedad que se pierde por evaporación o consumo del cultivo entre riegos es rápidamente completada en la próxima aplicación, requiriendo tiempos de aplicación entre 30 y 45 minutos. Si embargo, en la práctica se mantiene una lámina y un tiempo de riego constante, desde el inicio hasta el final del ciclo, siendo algunas veces disminuido a una hora las dos últimas semanas del ciclo.

4.4.1.2 Ajustes de Modelos de Lluvia-Escorrentía

En la Tabla 47 se muestran los resultados obtenidos del ajuste del modelo lluvia – escorrentía a los datos observados en la etapa de prueba; incluyendo regresiones lineales, no lineales múltiples y RNA.

La prueba del ajuste se realiza mediante una relación lineal de la escorrentía medida durante eventos de tormentas de 1 hora con la estimada a través de la aplicación de los modelos de regresión. Los valores dados en la Tabla 47 indican lo siguiente: ***RLM***: R^2 resultó igual a 0.999939. ***RNLM-1***: para un modelo polinómico de orden 2, R^2 resultó igual a 0.999554. ***RNLM-2***: para un modelo polinómico de orden 3, R^2 resultó igual a 0.999554. ***RNLM-3***: para un modelo polinómico de orden 4, R^2 es igual a 0.972053. ***RNLM-4***: para un modelo

polinómico de orden 5, R^2 resultó igual a 0.932972. En general, se encontró un ajuste satisfactorio de los datos de escorrentía para tormentas de 1 hora de duración a los modelos de regresión.

La prueba se realiza mediante una relación lineal de la escorrentía medida durante eventos de tormentas de 2 horas con la estimada a través de la aplicación de los modelos de regresión. Los valores dados en la Tabla 55 indican lo siguiente: **RLM**. R^2 resultó igual a 0.999796. **RNLM-1**. R^2 resultó igual a 0.583006. **RNLM-2**. R^2 resultó igual a 0.547437. **RNLM-3**. R^2 resultó igual a 0.46855. **RNLM-4**. R^2 resultó igual a 0.322779.

En general, se encontró un ajuste moderadamente satisfactorio de los datos de escorrentía para tormentas de 2 horas de duración a los modelos de regresión.

En cuanto a los modelos RNA, los valores dados en la Tabla 53 indican que la estructura del modelo RNA-12-20-12 se ajustó satisfactoriamente a los datos de escorrentía, R^2 resultó mayor a 0.99.

Tabla 47

Resultados en la Prueba de los Modelos Lluvia – Escorrentía

Modelo	R^2	R^2
	(D=1H)	(D=2H)
RLM	0.999939	0.999796
RNLM-1	0.999554	0.583006
RNLM-2	0.992946	0.547437
RNLM-3	0.972053	0.46855
RNLM-4	0.932972	0.322779
RNA 12-20-12	1	0.99835

Para eventos de 1 y 2 horas de duración, en la etapa de prueba el ajuste de los modelos RLM y RNA resultó satisfactorio, ya que R^2 , en ambos casos resultó mayor que 0.99; mientras que para los modelos RNLM polinómicos, R^2 resultó alrededor de 0.5, mejorando para lluvias de 1 hora, como se muestra en la Tabla 46. Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos de R^2 , el proceso lluvia-escorrentía se ajusta mejor a una función sigmoideal ajustada mediante la técnica de RNA que a aquellos que usan las técnicas clásicas de optimización, seguido por el modelo de regresión lineal múltiple. La técnica de RNA se encuentra programada en el programa MATLAB, desde esa plataforma se pueden hacer las simulaciones o nuevos ajustes empleando datos adicionales. A

continuación se presentan la ecuación y los parámetros del modelo de regresión múltiple lineal, el cual le sigue en calidad de ajuste a las RNA's (Tabla 48).

$$Q_t = \beta_1 P_t + \beta_2 P_{t-1} + \beta_3 P_{t-2} + \beta_4 P_{t-3} + \dots + \beta_{12} P_{t-11} \quad (34)$$

Donde β_s es el coeficiente de regresión a ser determinado, Q_t es la escorrentía en L/s; P_s representa la lluvia en mm y el índice t es el tiempo.

Tabla 48
Coefficientes de Regresión de Modelos de Lluvia-Escorrentía

Modelo		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}
<i>RLM</i> (<i>D=1h</i>)	Promedio	-0.05	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02						
	Mínimo	-0.06	0.01	0.018	-0.002	0.01	0.01						
	Máximo	-0.04	0.04	0.042	0.02	0.03	0.03						
<i>RLM</i> (<i>D=2h</i>)	Promedio	-0.06	0.05	-0.025	0.14	-0.14	-0.25	0.086	0.114	0.259	0.029	-9E-5	0.005
	Mínimo	-0.1	0.017	-0.061	0.104	-0.18	-0.29	0.06	0.082	0.230	0.025	-0.004	0.001
	Máximo	-0.03	0.085	0.010	0.18	-0.10	-0.21	0.111	0.146	0.288	0.033	0.003	0.009

El proceso de lluvia-escorrentía puede ser caracterizado usando los parámetros dados del modelo de regresión múltiple lineal, mediante el cual se puede estimar la magnitud de la escorrentía dentro de un evento de lluvia. El conocimiento de la escorrentía permite: (1) estimar la carga de sedimentos que se transporta o que se deposita por efecto de la acción de la lluvia artificial (riego) o natural sobre el suelo, (2) estimar la producción de sedimentos de la granja agrícola y el aporte hacia los arroyos o ríos, (3) dimensionar estanques para tratar el efluente de la granja agrícola, (4) dimensionar sistemas para el almacenamiento del flujo tratado con fines de reutilización en el proceso agrícola, (5) estimar por diferencia entre la lluvia y la escorrentía la cantidad de agua que se almacena en el suelo, (6) estimar la longitud de los surcos para favorecer que la mayor parte del agua que escurre se infiltre, (7) analizar la sensibilidad de los parámetros debido a un cambio en la tecnología del riego. Los aspersores de baja presión, que están aumentando en popularidad, han reducido la anchura del patrón e incrementado las tasas de aplicación. Los tamaños de la gota de aspersión también son influenciados por la presión de la boquilla, velocidad de descarga y el tipo de boquilla. Las gotas más grandes tienen mayor energía de impacto en el suelo, que a su vez afecta a la

infiltración, escorrentía, y el desprendimiento del suelo. El diseñador del riego tiene control sobre la cantidad, intensidad, área y la programación de aplicación del agua (Bjorneberg et al., 2000). Una descripción más detallada de los métodos de tratamiento del efluente de las granjas agrícolas se proporciona más adelante.

4.4.1.3 Ajustes de Modelos de Erosión y Transporte de Sedimentos

En la Tabla 49 se presentan los resultados de la prueba de los modelos de erosión basados en procesos físicos: WEPP, DWEPP, EUROSEM y CIHAM-UC. La prueba se ha realizado mediante la aplicación de los modelos de procesos, cuyos parámetros se han obtenido en la etapa de calibración. Los valores dados en la tabla indican lo siguiente:

Modelo WEPP: el error medio absoluto resultó igual 0.831794 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.615208.

Modelo DWEPP: el error medio absoluto resultó igual 1.29797 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.625332.

Modelo EUROSEM: el error medio absoluto resultó igual 0.881738 y el coeficiente de determinación, R^2 resultó igual 0.575991.

Modelo CIHAM-UC: el error medio absoluto es igual 3.20949 y el coeficiente de determinación, R^2 es igual a 0.702978.

De manera general, se encontró un ajuste satisfactorio en la etapa de la prueba.

Tabla 49

Resultados en la Validación de los Modelos de Erosión basados en Procesos Físicos

Ecuación	Modelo	EMA	R^2
39	Modelo de procesos físicos WEPP	0.831794	0.615208
39	Modelo de procesos físicos DWEPP	1.29797	0.625332
47	Modelo de procesos físicos EUROSEM	0.881738	0.575991
51	Modelo de procesos físicos CIHAM-UC	3.20949	0.702978

Sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas de la validación y la prueba se selecciona el modelo de erosión en surcos bajo riego basado en procesos físicos desarrollado por el CIHAM-UC, ya que arrojó resultados satisfactorios en términos de R^2 y los errores, así como se obtuvieron tasas de

transporte de sedimentos con una buena aproximación a las observadas y tasas de deposición desde bajas a moderadas en comparación con el resto de los modelos, lo que se ajusta al proceso observado en campo con base en la alta proporción del sedimento en suspensión, más del 70% de partículas finas (arena fina, limo y arcilla), las cuales tienen tiempos de sedimentación altos a muy altos. El modelo de CIHAM-UC, incluye los procesos de desprendimiento de partículas, transporte y deposición o sedimentación, y se expresa mediante la Ecuación (39) y la Ecuación (51):

$$D_R = D_c \left(1 - \frac{CQ}{wT_c} \right), \quad CQ \leq wT_c \quad (39)$$

Donde D_R la tasa de erosión por flujo, T_c la capacidad de transporte del flujo en el surco (kg/s/m), w el ancho del surco, V_s la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), Q la descarga del flujo (m³/s), y D_c la capacidad de desprendimiento de suelo por flujo (kg/s/m²) se calcula mediante la ecuación propuesta por Duboys (1879):

El proceso de desprendimiento de partículas sólidas se encontró que es mejor estimado mediante la Ecuación (40), la cual ha sido ajustada a las series de datos clasificadas según la pendiente de los surcos. La Ecuación (40) y los parámetros se indican a continuación:

$$D_c = \begin{cases} K_c(\tau_s - \tau_c), & \tau_s \geq \tau_c \\ 0, & \tau_s \leq \tau_c \end{cases} \quad (40)$$

$$\tau = \rho_w gSR \quad (41)$$

Donde K_c es la erodabilidad del surco (s/m), τ el esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo (Pa), τ_c el esfuerzo cortante crítico (Pa), ρ_w la densidad del agua (Kg/m³), g la aceleración debida a la gravedad (m/s²), S la pendiente (m/m), R el radio hidráulico (m). Los surcos se asumen que son rectangulares con anchos que dependen de la tasa del flujo.

Tabla 50
Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Diversas Pendientes.

Ecuación	Pendiente	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40	0.8%	K_c	$s\ m^{-1}$	1,20283E-05	7,84E-07	1,04632E-05	1,35933E-05
		τ_c	Pa	2,0761	0,179474	1,71797	2,43424
40	1%	K_c	$s\ m^{-1}$	2,65E-05	2,27E-06	2,19E-05	3,10E-05
		τ_c	Pa	4,77069	0,101326	4,56849	4,97288
40	1.5%	K_c	$s\ m^{-1}$	6,79E-06	3,71E-07	6,04748E-06	7,52973E-06
		τ_c	Pa	5,17035	0,185067	4,80105	5,53964
40	2.5%	K_c	$s\ m^{-1}$	2,01549E-06	4,07E-08	1,93422E-06	2,09677E-06
		τ_c	Pa	0,862425	1,14E-11	0,862425	0,862425
40	13%	K_c	$s\ m^{-1}$	8,50798E-05	6,85113E-06	7,14086E-05	9,87511E-05
		τ_c	Pa	0,792582	0,784594	-0,773054	2,35822

La capacidad de transporte de sedimentos en surcos es estimada a través de la ecuación de Simons, Li y Fullerton, (1981), la cual constituye una solución derivada de la ecuación de transporte de material de lecho de ríos propuesta por Meyer-Peter y Müller, (1948) y el método de Einstein para la descarga de sedimentos suspendidos desde el lecho de corrientes y canales naturales, se expresa como:

$$T_c = K_t h^a V^b \quad (50)$$

Donde T_c es la capacidad de transporte de sedimentos del flujo (mg/s/m), a, b y c son parámetros estimados mediante ajuste empírico, V la velocidad del flujo (m/s) y h la profundidad del flujo (m). Los parámetros encontrados para el ajuste de la Ecuación (50) se obtuvieron para surcos de diversas pendientes y se indican en la Tabla 51.

Tabla 51
Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de diversas Pendientes

Ecuación	Pendiente	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
50	0.8%	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	78,1997	58,9336	-39,4325	195,832
		a		1,79054	0,12742	1,53621	2,04488
		b		1,16591	0,115892	0,934586	1,39723
50	1%	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	2943,15	2747,93	-2541,76	8428,06
		a		3,33277	0,361858	2,6105	4,05505
		b		0,934362	1,31262E-05	0,934336	0,934388
50	1.5%	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	1169,15	305,294	559,775	1778,52
		a		2,27473	0,109443	2,05628	2,49318
		b		1,45926	9,45E-07	1,45926	1,45926
50	2.5%	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	178,463	132,811	-88,0421	444,968
		a		1,60588	0,242586	1,1191	2,09267
		b		1,5135	3,08746E-06	1,51349	1,5135
50	13%	K_t	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	9,637	6,46112	-3,25948	22,5335
		a		0,80384	0,138784	0,526825	1,08086
		b		1,0125	0,104864	0,803187	1,22181

La ecuación para estimar la tasa de erosión cuando la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los sedimentos y los parámetros se indican a continuación:

$$D_R = T_c / w - f_s C V_s, \quad CQ \geq wT_c \quad (51)$$

Donde V_s es la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), w es el ancho del surco (m), $f_s = A_{ce} / A_{surco}$, A_{ce} el área del cilindro experimental de la prueba del hidrómetro (D422) (American Society for Testing Material, 2007).

4.4.2 Ajustes de Modelos de Erosión basados en Regresiones

En la Tabla 52 se presentan los resultados de los estadísticos: error medio absoluto y coeficiente de determinación (R^2) obtenidos en la etapa de prueba correspondientes a los modelos de estimación de la tasa de erosión probados en esta investigación.

Los valores dados en la tabla indican lo siguiente: en la Ecuación 74(a) el error medio absoluto es igual a 0.843322 y R^2 resultó igual a 0.700924; en la Ecuación 74(b) el error medio absoluto resultó igual a 1.24031 y resultó igual a 0.67048; en la Ecuación 75(a) el error medio absoluto resultó igual a 0.184068 y R^2 resultó igual a 0.871664; en la Ecuación 75(b) el error medio absoluto resultó igual a 0.184068 y R^2 es 0.843254; en la Ecuación 75(c) el error medio absoluto resultó igual a 1.06599 y R^2 resultó igual a 0.656051 y en la Ecuación 75(d) el error medio absoluto resultó igual a 1.12962 y R^2 resultó igual a 0.58673.

Para eventos de 1 hora de duración el ajuste de los modelos RML y RMNL resultó satisfactorio, ya que R^2 , en ambos casos varió entre 0.70 y 0.90 en las etapas de calibración, validación y prueba; mientras que para eventos de 2 horas, R^2 disminuyó ligeramente variando entre 0.60 y 0.89, encontrando valores alrededor de 0.65 para las dos últimas etapas. Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos de R^2 , el proceso de erosión se ajusta de manera

satisfactoria a los modelos RLM y RMNL, mejorando su estimación para eventos de 1 hora.

Tabla52

Resultados en la Prueba de los Modelos de Regresión para la Estimación de Erosión

Ecuación	Modelo		EMA	R ²
74 (a)	Modelo de Regresión Múltiple Lineal	D=1H	0.843322	0.704111
74 (b)	Modelo de Regresión Múltiple Lineal	D= 2H	1.24031	0.67048
75 (a)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 1	n=2 D= 1H	0.169316	0.872292
75 (b)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 2	n=3 D= 1H	0.184068	0.843254
75 (c)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 3	n=2 D= 2H	1.06599	0.656051
75 (d)	Modelo de Regresión Múltiple No Lineal 4	n=3 D= 2H	1,12962	0.58673

Sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas de la validación y la prueba se selecciona el modelo de erosión en surcos bajo lluvia natural basado en una regresión lineal múltiple para eventos de una hora y dos horas, ya que estos modelos arrojaron resultados satisfactorios en términos de R² y los errores. Sin embargo, a pesar de haber encontrado un ajuste estadístico satisfactorio en relación a las regresiones polinómicas, el análisis cualitativo de las gráficas mostró que existe una carencia en el ajuste de los modelos a los valores bajos de la tasa de erosión observados al inicio y al final de eventos de lluvia de duración correspondiente a una y dos horas. Los parámetros encontrados el modelo de regresión lluvia-erosión se indican en la Tabla 53.

El modelo de Regresión Múltiple Lineal (RLM) que se utiliza se basa en la estructura dada por:

$$D_R = \beta_1 P_t + \beta_2 P_{t-1} + \beta_3 P_{t-2} + \dots + \beta_{12} P_{t-6} \quad (74)$$

Donde D_R es la tasa de erosión por flujo (mg/s/m²) en el tiempo t , β_s representa los coeficientes de regresión a ser determinados; P_s representa la lluvia correspondiente a intervalos de tiempo definidos dentro de una tormenta particular; y t es el índice que representa el tiempo.

Tabla 53

Coefficientes de Regresión de los modelos de erosión basados en RLM y RNLN

Ec.	Variable Dependiente	Variable Independiente	Parámetro	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
74 (a)	D_R	Pt	β_1	mg /m ² /s/ mm	-1,398583862	1,442760413	-4,267676785	1,47050906
RLM	mg/m ² /s	Pt-1	β_2	mg /m ² /s/ mm	0,833406797	1,784933149	-2,716135469	4,382949064
n=1		Pt-2	β_3	mg /m ² /s/ mm	0,731227333	1,392642416	-2,03820026	3,500654927
D=1H		Pt-3	β_4	mg /m ² /s/ mm	0,183129882	1,814769332	-3,425745022	3,792004785
		Pt-4	β_5	mg /m ² /s/ mm	0,737812187	1,250395401	-1,748741065	3,224365439
		Pt-5	β_6	mg /m ² /s/ mm	0,559520883	0,731816989	-0,895780305	2,014822071
74 (b)	D_R	Pt	β_1	mg /m ² /s/ mm	-0,794050629	1,4177439	-3,585879266	1,997778008
RLM	mg/m ² /s	Pt-1	β_2	mg /m ² /s/ mm	-2,195990758	2,69409942	-7,5012253	3,109243783
n=1		Pt-2	β_3	mg /m ² /s/ mm	0,780383734	3,769700299	-6,642929634	8,203697103
D=2H		Pt-3	β_4	mg /m ² /s/ mm	2,177019018	1,357605748	-0,496385258	4,850423294
		Pt-4	β_5	mg /m ² /s/ mm	4,541647609	2,338266456	-0,062878815	9,146174033
		Pt-5	β_6	mg /m ² /s/ mm	0,099997046	0,333760338	-0,557245543	0,757239634

4.4.3 Ajustes Basados en Técnicas de Inteligencia Artificial

Se presentan los resultados en la etapa de la prueba de los modelos empleando las siguientes técnicas de inteligencia artificial: redes neuronales artificiales y lógica difusa.

Ajustes de Modelos de Erosión basados en RNA

En la Tabla 54 se muestran los resultados de los estadísticos: error medio absoluto y coeficiente de determinación (R^2) obtenidos en la etapa de prueba correspondientes para el caso de los modelos basados en RNA para eventos de lluvias de 1 y 2 horas, identificados como RNA-1, RNA-2 y RNA-3.

Los valores dados en la tabla indican lo siguiente: en el modelo RNA-1 el error medio absoluto resultó igual a 0.146329 y R^2 resultó igual a 0.876376; en el RNA-2 el error medio absoluto resultó igual a 0.166 y R^2 es 0.490504 y en el modelo RNA-3 el error medio absoluto resultó igual a 0.1039 y R^2 resultó igual a 0.831342.

Para eventos de 1 hora de duración el ajuste de los modelos RNA resultó satisfactorio, ya que R^2 , varió entre 0.68 y 0.87 en las etapas de calibración, validación y prueba; mientras que para eventos de 2 horas ($n = 438$ datos), R^2 varió entre 0.39 y 0.61, mejorando para una cantidad de datos menor ($n = 219$

puntos). Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos de R^2 , el proceso de erosión se ajusta de manera satisfactoria a los modelos RNA.

Tabla 54

Resultados en la Prueba de los Modelos de Redes Neuronales Artificiales para Estimación de Erosión

Modelo			EMA	R²
RNA 1: 6-20-6	N=144 puntos	D=1H	0.146	0.876376
RNA 2: 6-100-6	N=438 puntos	D= 2H	0.166	0.490504
RNA 3: 6-100-6	N=219 puntos	D=2H	0.103	0.78669

Sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas de la validación y la prueba se ha encontrado que el modelo sigmooidal ajustado mediante técnicas de RNA ha proporcionado ajustes satisfactorio en la estimación del proceso lluvia-erosión, en términos de R^2 y los errores. Sin embargo, a pesar de haber encontrado un ajuste estadístico satisfactorio en este modelo de caja negra, siempre será conveniente conocer más detalles sobre las condiciones físicas bajo las cuales se está efectuando el ajuste, lo que puede ser bastante simplificado con estos modelos, y como consecuencia ser una limitación para su uso. Así mismo, la forma de empleo de la RNA se lleva a cabo desde el programa MATLAB, a partir del cual se pueden realizar nuevos ajustes de la red con datos adicionales o simulaciones.

Ajustes de Modelos de Erosión basados en Sistema de Inferencia Difusa

En la Tabla 55 se presentan los resultados de los estadísticos: error medio absoluto y el coeficiente de determinación (R^2) obtenidos en las etapas de calibración, validación y prueba para el caso de los modelos basados en sistemas de inferencia difusa para tormentas de 1 y 2 horas, identificados como SID-1 y SID-2.

Los valores dados en la tabla indican lo siguiente: en el modelo SID-1 el error medio absoluto resultó igual a 1.4897; en el modelo SID-2 el error medio

absoluto resultó igual a 2.6766. Sobre la base de estos resultados, se puede concluir que, en términos del error medio absoluto, el proceso de erosión se ajusta mejor en SID para eventos de 1 hora que para eventos de 2 horas.

Tabla 55

Resultados en la Prueba de los Modelos de Sistema de Inferencia Difusa para Estimación de Erosión

Modelo			EMA
SID 1 (trapmf)	N=144 puntos	D=1H	1.4897
SID 2 (trapmf)	N=219 puntos	D=2H	2.6766

Sobre la base de los resultados obtenidos en las etapas de la validación y la prueba se ha encontrado que las operaciones de la lógica difusa sobre modelos trapezoidales, al igual que en las técnicas de RNA ha proporcionado ajustes satisfactorio en la estimación del proceso lluvia-erosión, en términos de R^2 y los errores. Sin embargo, como se ya se ha indicado, siempre será conveniente conocer más detalles sobre las condiciones físicas bajo las cuales se está efectuando el ajuste, lo que puede ser bastante simplificado con estos modelos, y como consecuencia ser una limitación para su uso. Así mismo, la forma de empleo de la RNA se lleva a cabo desde el programa MATLAB, a partir del cual se pueden realizar nuevos ajustes de la red con datos adicionales o simulaciones.

4.5 Discusión de Resultados

A continuación se discuten los resultados del ajuste de los parámetros de los modelos para la estimación de la erosión y el transporte de los sedimentos a las observaciones en campo en las etapas de calibración, validación y prueba. En la primera parte, se discuten los resultados del ajuste de los modelos a la serie total de los datos. En la segunda parte, se discuten los resultados del ajuste de los modelos a las series de datos agrupados de acuerdo con la pendiente de los surcos. Finalmente, se evalúa cuál de las series mencionadas se ajustó mejor a las observaciones en campo.

Calibración y Validación de los Procesos de Erosión en Surcos usando la Serie Total

En esta sección se realizan las discusiones sobre: (1) ajustes de los procesos del modelo de erosión con base física, (2) comparación de los modelos ajustados con las observaciones y (3) comparación de las técnicas de modelación de la erosión

Ajustes de los Procesos del Modelo de Erosión con Base Física

Proceso de Desprendimiento de Partículas. Como se mostró en la sección de resultados, el rango de valores de la erodabilidad del flujo concentrado K_c y el esfuerzo cortante crítico τ_c , obtenido a partir del ajuste de la Ecuación (40) varió entre 1.31E-06 y 1.525E-06 s/m; 0.704 y 1.489 Pa. Knapen et al., (2007) realizaron una revisión de la literatura, recopilando los valores de K_c y τ_c reportados para diferentes suelos y condiciones de labranza. Estos estudios incluyen (a) experimentos sobre el flujo concentrado mediante levantamientos en campo y (b) experimentos en canales de laboratorio. Las características de los métodos experimentales se resumen en las Tablas 56 y 57, respectivamente.

Los rangos de los valores que han sido determinados empíricamente para la ecuación lineal del esfuerzo cortante excedente (Ecuación (40)) de K_c , τ_c ; incluyendo el tamaño de la muestra, mediante experimentos en el campo y en el laboratorio son los siguientes: 0.000001 y 0.1 s/m (n=151), 0.01 y 20 Pa (n=161); 0.00001 y 0.7 s/m (n=185), 0.03 y 60 Pa (n=220), respectivamente. Al comparar estos rangos de valores con los reportados en la Tabla 17 para la Ecuación (40) se encuentra que: (a) los valores de K_c se incluyen dentro del intervalo correspondiente a los experimentos en el campo y son inferiores a los encontrados a partir de los experimentos de laboratorio, (b) los valores de τ_c se incluyen totalmente dentro del rango reportado para experimentos en el campo y en el laboratorio.

De lo antes expuesto se aprecia que, el rango de valores de K_c obtenido en esta investigación difiere significativamente del reportado por Knapen et al. (2007); mientras que se encuentra una variabilidad menor en el rango de valores para τ_c . Existen varias razones para estas diferencias, entre las cuales, dos de las

principales son: (1) las diferencias en las condiciones experimentales en las cuales los datos son recolectados y (2) la variación de los tipos de suelos y las condiciones ambientales. Comparando las condiciones experimentales y ambientales de esta investigación descritas en la sección de metodología con las reseñadas en las Tablas 56 y 57 se puede apreciar que existe cierta similitud sólo con los estudios de campo realizados por Bjorneberg et al., (1999). Con respecto a los experimentos en laboratorio no existen casos con los cuales realizar una comparación. Los rangos de los valores encontrados de K_c y τ_c por Bjorneberg et al., (1999) varían como sigue: desde 0.0003 hasta 0.006 s/m y, desde 1.2 hasta 1.8 Pa, respectivamente. A pesar de las similitudes en las condiciones experimentales mostradas en la Tabla 56, el rango de valores de K_c es significativamente diferente, las causas de las diferencias parecen ser debidas a las condiciones ambientales, principalmente el clima y las prácticas agrícolas, ya que las pruebas de Bjorneberg et al., (1999) fueron realizadas en campos cultivados con frijol y maíz, donde las secuencias de humedecimiento y secado, la consolidación y los residuos pueden ser factores que contribuyen a la variabilidad en K_c ; mientras que los residuos ejercen influencia sobre los valores de τ_c .

En general, con respecto a los estadísticos de ajuste de la Ecuación (40) se observa un ajuste satisfactorio de la mayoría de las ecuaciones, por las siguientes razones: (1) el coeficiente de determinación R^2 , resultó aproximado a 0.7 (Ramírez et al., 2004) (2) el estadístico de Durbin-Watson presentó valores que evidencian que existe una ligera aleatoriedad entre los residuos consecutivos, lo que indica que alguna tendencia en el tiempo no ha sido explicada, (3) los errores porcentuales medio absoluto y medio resultaron moderadamente bajos.

Tabla 56

Características de las pruebas de campo a partir de las cuales se obtienen los parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo debido al flujo en surcos

País	Suelos (Nº)	Pendiente (%)	Q (l min ⁻¹)	I _{lluvia} (mm h ⁻¹)	τ (Pa)	Dim. surcos en parcela (m x m)	Condición de la superficie	Fuente
Irán	1	n.d.	132-1693	n.a.	2,2-13,2	15 x 0,3	I, Cobertura vegetal	Adelpour et al. (2004)
USA	1	0,5-1,33	30-40	n.a.	n.d.	Long.:110-256	I, Cultivada	Bjorneberg et al. (1999)
Brasil	1	n.d.	n.a.	n.d.	n.a.	9 x 0,5	I, Cultivada	Braida et al. (1996)
Brasil	1	6,7	0-50	74	n.a.	n.a.	I, Cultivada	Cantalice et al. (2005)
USA	2	3-15	96-768	n.d.	4,0-37,3	10 x 0,75	I, Cultivada	Franti et al. (1985,1999)
Brasil	1	n.d.	0	60	n.a.	9 x 0,5	I, Cultivada	Giasson et al.(1996)
USA	30	4-13	7-35	62	n.a.	9 x 0,46	I, Cultivada	Gilley et al. (1993)
USA	4	0,5-3	n.d.	n.d.	1-36	30,5x0,91	I, Sin cobertura	Hanson (1989,1990a,b)
USA	1	1-3	4-17.10 ⁴	n.d.	12-55	29x1,8	I, Sin cobertura	Hanson y Cook (1999)
USA	2	5-11	n.d.	n.d.	n.a.	10,7x3	I, Cobertura vegetal	Hussein et al.(1982)
USA	2	4	11-189	64	0,7-14	4x0,2	I, Cultivo variable	King et al. (1995)
USA	2	3-15	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.a.	Lafren (1987)
USA	56	2-13	0,1-0,6	63	0-22	9-11x0,5-3	I, Cultivada	Lafren et al. (1991); Elliot et al. (1989)
USA	1	3-6	8-38	n.d.	2-10	5,5x2	I, Cultivada	Mamo et al. (2001b)
Canadá	3	12-14	n.a.	25-30	n.a.	10x0,8	I, Vegetación libre	Merz et al. (1993)
USA	1	4-6	8-38	51	1,3-6,1	68,6x6,1	I, Cultivada	Morrison et al. (1994)
USA	2	3-5	8-53	64	0-6	6,1x0,76	I, Cultivada	Norton et al.(1992)
USA	1	27	16-23	n.d.	24-192	6x0,3	I, Vegetación	Prosser et al. (1995)
Australia	1	1-12,7	1,7-8	n.d.	n.a.	20x1	I, Vegetación con altura variable	Prosser (1996)
Brasil	1	10	12-120	65	2,5-19	6x0,2	n.a.	Reichert et al. (2001)
USA	1	2-31	8-60	60	2-7	4,6x0,3	I, Residuos removidos	West et al. (1992)
USA	1	0,52-1,33	15-46	n.d.	n.d.	204-256	I, Cultivada	Trout, et al. (2001)

n.d.: no disponible. n.a.: no aplicable, Suelos: número de suelos probados; TS: número de tipos de tratamientos de suelos; Pendiente: pendiente de la superficie del suelo; Q: caudal de entrada simulado; I_{lluvia}: intensidad de lluvia simulada; τ: rango de esfuerzo cortante del flujo aplicado; Flujo: origen del flujo (R: lluvia simulada, I: aporte), Dim. Surcos dimensiones de surcos (longitud x ancho), Condición de humedad: tratamiento del suelo antes de la prueba; Condición de la superficie: (S: suavizada; I: irregular)

Tabla 57

Características de los experimentos de laboratorio a partir de los cuales se obtienen los parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas de suelo debido al flujo en surcos

País	Suelos (Nº)	Pendiente (%)	Q (l min ⁻¹)	I (mm h ⁻¹)	τ (Pa)	Dimensiones de canal (m x m x m)	Fuente	Obs.
Italia	6	10-40	2,4-18	n.a.	1-12	1,5 x 0,2	Ciampallini y Torri (1998)	a
Australia	1	2-7	2,5-40	n.a.	n.d.	1,8 x 0,6 x 0,2	Crouch y Novruzi (1989)	b,e
México	1	0	n.d.	n.a.	1,1-38,2	4,9 x 0,3 x 2,5	Ghebreyessus et al. (1994)	
Bélgica	2	5-21	3,3-60	n.a.	1-24	4 x 0,4 x 0,45	Giménez y Govers (2002)	
Bélgica	2	9-21	6,7-60	n.a.	1-16	2 x 0,10 x 0,09	Giménez y Govers (2002)	
Bélgica	2	1,5-7	0,7-10,4	n.a.	0,1-1,3	6 x 0,12	Govers (1985)	b,e
Bélgica	1	20-30	18-114	n.a.	4,4-22,4	2 x 0,1 x 0,09	Gyssels et al., 2006	
Canadá	5	n.d.	n.d.	n.a.	n.d.	9,1 x 0,15	Kamphuis y Hall (1983)	b,e
EUA	5	0,2	n.d.	n.a.	n.d.	18,3 x 0,77 x 0,46	Lafren y Beasley (1960)	a,e
EUA	7	0,2	n.d.	n.a.	n.d.	22 x 0,4 x 0,76	Lyle y Smerdon (1965)	a,e
EUA	1	3-5	7,6-37,9	n.a.	n.d.	4 x 0,2 x 0,05	Mamo y Bubenzer (2001*)	
Canadá	1	14	n.a.	34	n.d.	10 x 0,8 x 0,2	Merz y Bryan (1993)	b,c,e
EUA	8	n.d.	6,1-30,3	n.a.	0-3,2	1,84 x 0,1 x 0,19	Moody y Smith, (2005)	e
Bélgica	1	10-35	5,6-11,5	n.a.	1,6-5,7	2 x 0,1 x 0,09	Nachtergaele y Poesen (2002)	
EUA	1	n.d.	n.d.	n.a.	0,1-1,3	18,3 x 0,3 x 0,38	Partheniades (1965)	e
S-África	12	2-20	0,08-0,32	n.a.	0,2-4,9	0,5 x 0,05 x 0,13	Rapp (1998)	
Israel	3	2-20	0,08-0,32	n.a.	0,2-4,9	0,5 x 0,05 x 0,13	Rapp (1998)	
Bélgica	1	2,6-14	n.d.	n.a.	n.d.	2 x 0,4	Rauws (1987)	
Bélgica	1	3-33	n.d.	20	n.d.	2,5 x 0,6	Rauws y Govers (1988)	b,c,e
EUA	1	2-20	0,04-0,2	n.a.	0,4-4,8	0,5 x 0,05 x 0,12	Shainberg et al. (1994)	b,e
Israel	3	5	0,04-0,32	n.a.	0,8-1,8	0,5 x 0,05 x 0,12	Shainberg et al. (1996)	
Australia	16	5-30	0,1-1,8	100	n.d.	3 x 0,8 x 0,15	Sheridan et al. (2000*)	d
Canadá	1	9	n.d.	35	n.d.	15 m largo	Slattery y Bryan (1992)	
EUA	11	0-1	n.d.	n.a.	n.d.	18,3 x 0,77 x 0,46	Smerdon y Beasley, (1959)	
EUA	5	0,1-0,2	n.d.	0-127	n.d.	22 x 0,8	Smerdon (1964)	
Italia	4	1-31	n.d.	15-110	0-3,3	2 x 0,5 x 0,1	Torri et al. (1987)	
EUA	1	7	2-4	n.a.	1,9-3,9	2,73 x 0,46 x 0,88	Van Klavern y McCool (1998)	
China	1	10,5-21,2	2,5-6,5	n.a.	1-10	5x0,3	Zhang et al. (2005)	a
EUA	5	1,5-5	3,8-15,1	n.a.	0,5-2,5	6,4 x 0,15 x 0,05	Zhu et al. (1995)	
EUA	5	0-5,5	n.d.	n.a.	0,5-2,5	6,4 x 0,15 x 0,05	Zhu et al. (2001)	

n.d.: no disponible, n.a.: no aplicable, Suelos: número de suelos probados; pendiente: pendiente de canal; Q: caudal, I: intensidad de lluvia simulada τ: rango de esfuerzo cortante del flujo; Flujo: origen del flujo (R: lluvia simulada, I: aporte, *recirculación de agua); dim. de canal: longitud x ancho x (profundidad); Dimensiones de las muestras diámetro de las muestras circulares o longitud x ancho para muestras rectangulares; Condición de humedad de las muestras antes de la prueba: Observaciones (Obs.): (a) valores para K_c y/o τ_c deducido a partir de gráficas, (b) valores calculados a partir de la velocidad de corte crítica, (c) valores para suelos poco cohesivos o no cohesivos, (d) pruebas en suelos de minas de carbón, (e) ecuación de esfuerzo cortante excedente no fue utilizada para obtener K_c y τ_c. (f) mediciones de desprendimiento de partículas.

Proceso de Transporte de los Sedimentos. Los rangos de los parámetros K_t y b reportados en la sección de resultados para los modelos de capacidad de transporte de sedimentos representados por las Ecuaciones (42), (48) y (50) varían como sigue: $9.92906E-8$ y $1.52669E-7$; 7.634 y 34.583; 0.421274 y 0.89279, respectivamente. Los rangos de los valores reportados por Finkner, (1989) y Trout, (1999) para la Ecuación (42) mediante pruebas de campo (Tabla 58), difieren significativamente de los indicados en la Tabla 19. En cuanto a la Ecuación (48), el valor de la potencia de la corriente unitaria crítica ω_c encontrado es negativo y ligeramente diferente de cero, el cual difiere del propuesto por Yang (1973) según el cual ω_c es igual a 0.002 m/s; a pesar de las diferencias se puede observar que en ambos casos tiende a cero. Teóricamente, el valor de ω_c debería ser positivo. Los valores negativos de ω_c no tienen un significado físico. La disminución del significado físico de ω_c , en este estudio se fundamenta debido a que se obtiene como una entidad matemática que resulta de la regresión empleando una técnica de ajuste de curvas de la capacidad de transporte versus la corriente unitaria del flujo. Con respecto a la Ecuación (50), no se pueden establecer comparaciones con los valores propuestos por Simons, Li, Fullerton (1981) ya que los valores reportados corresponden al flujo en ríos. En general, los estadísticos de ajuste de los modelos (42), (48) y (50) indican que éstos se aproximan satisfactoriamente a las observaciones, por las siguientes razones: (1) el coeficiente de determinación R^2 varía entre 0.72 y 0.88, según Ramírez et al. (2004), (2) el coeficiente R^2 ajustado se reduce de una manera poco significativa, (c) el estadístico de Durbin-Watson presenta valores que evidencian que existe cierta aleatoriedad entre los residuos consecutivos, (3) los errores porcentuales medio absoluto y medio resultaron moderadamente bajos a bajos.

Tabla 58

Parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo en surcos y características de las pruebas de campo para su obtención

$T_c = K_t(\tau)^b$											
Fuente	T_c (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	K_t	τ (Pa)	b	Pendiente (%)	Q (l min ⁻¹)	I_{lluvia} (mm h ⁻¹)	Dim. surco (m) o (mxm)	SS	Tipo de suelo	OP
Finkner et al. (1989)	0,0006-0,2366	0,015-0,05	1-6	1,5	2-20	n.d.	80-83	10, 50 y 100 m de longitud	n.d.	Franco limoso	Ec. Yalin (1963)
Trout (1999)	0,002-0,035	0,017-0,065	n.d.	2	1,3	6-18	n.d.	204 m de longitud	Cultivado con frijol	Franco limoso	A
	0,001-0,02	0,015-0,15	n.d.	4	0,5	6-45,6	n.d.	256 m de longitud	Cultivado con maíz	Franco limoso	A
$T_c = c[(\omega - \omega_c) / V_s]^b$											
Fuente	T_c (ppm)	c	ω_c (m s ⁻¹)	b	Pendiente (%)	Q (l min ⁻¹)	I_{lluvia} (mm h ⁻¹)	Dim. surco (m) o (mxm)	SS	Tipo de suelo	OP
Loch (1984)	41.000-87.000	n.d.	0,002	n.d.	4	15-107	95	0,4x(1,5-22,5)	Cultivado	d_{50} : (0,1; 0,46) mm	Ec. Yang (1973)

n.d.: no disponible. n.a.: no aplicable, T_c : valores observados de la capacidad de transporte de sedimentos. K_t : valores estimados del coeficiente de transporte. τ : Esfuerzo cortante del flujo. b: exponente, c: coeficiente, ω : potencia de la corriente unitaria, ω_c : potencia de la corriente unitaria crítica. Suelos: número de suelos probados; Pendiente: pendiente de la superficie del suelo; Q: caudal de entrada simulado; I_{lluvia} : intensidad de lluvia simulada; τ : rango de esfuerzo cortante del flujo aplicado; Flujo: origen del flujo (R: lluvia simulada, I: aporte), Dim. Surcos dimensiones de surcos (longitud x ancho), SS: Superficie del suelo, Tipo de suelo: d_{50} . Tamaño medio de partícula. OP: origen de los parámetros (A: Ajustado mediante técnicas de curvas)

Comparación de los Procesos de Erosión en Surcos Simulados con las Observaciones Experimentales

Modelos Basados en Procesos Físicos. En la Figura 19 se muestra que la capacidad de transporte de los sedimentos estimada mediante las Ecuaciones (42) y (48) es menor a la carga de los sedimentos observada en el flujo para diferentes pendientes de surcos durante las tres etapas del ciclo bajo riego; lo que indica la ocurrencia de un flujo concentrado y el proceso de deposición. En cuanto a la Ecuación (50), se encuentra que estima los valores de la capacidad de transporte de los sedimentos muy aproximados a la carga de sedimentos de la corriente, por lo tanto los procesos de deposición ocurren a bajas tasas. De acuerdo con la teoría, la mayor proporción de los sedimentos que se desprenden son transportados fuera del surco (Nearing et al., 1989; Morgan, 1998; Bulygina et al., 2006).

Trout (1996) encontró que en el extremo de los surcos de los cultivos de frijol, la erosión se incrementa desde el inicio hasta el final de ciclo de 1 hasta 5 Mg/ha; mientras que se invierte el proceso en los cultivos de maíz, ya que la erosión disminuye desde 2 hasta 0.1 Mg/ha hacia el final del ciclo. El proceso de deposición ocurre hacia $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la longitud del surco; la cual varía entre 10 y 15 Mg/ha para surcos de frijol, así como entre 2 y 8 Mg/ha para surcos de maíz. En este estudio, la variabilidad entre las tasas de erosión a lo largo del surco es poco significativa basado en la uniformidad en el suministro de agua a los surcos a través del riego por aspersión, ya que mediante este sistema los aspersores: (a) se encuentran ubicados equidistantes a lo largo de los surcos, (b) aportan el mismo caudal y (c) tienen la igual frecuencia de humedecimiento a cada surco. La tasa de erosión desde el inicio del ciclo hasta el final varió como sigue: desde 0.6 hasta 0.1 Mg/ha (Figura 25), este rango es más bajo que el encontrado por Trout (1996) para el frijol y se aproxima por debajo al correspondiente al maíz.

Trout(1999) reportó tasas de transporte de sedimentos en surcos de pendientes de 1.3% y 5.2% para los cultivos de maíz y frijol que disminuyeron desde el inicio hasta el final del ciclo como sigue: desde 20000 hasta 4000 mg/s/m; desde 25000 hasta 5000 mg/s/m, respectivamente; las cuales son más altas a las encontradas en este estudio; cuya variación en el ciclo es como sigue: desde 1428 hasta 10000 mg/s/m (miligramos de sedimentos por metro de perímetro húmedo por segundo).

Modelos de Erosión en Surcos Basados en Regresiones. Se encontró que los modelos lineales múltiples se aproximan mejor a las observaciones que los modelos no lineales basados en polinomios. En los modelos lineales se observa que estiman satisfactoriamente la máxima carga de sedimentos durante eventos de lluvia artificial y natural, así como existe carencia de ajuste para los valores al inicio y al final de tales eventos; lo que coincide con los resultados de Jain et al., (2004); Kumar, (2001); Srinivasulu et al., (2006) (Figura 25). En los modelos basados en polinomios se observa que la estimación de la variable observada disminuye a medida que la potencia aumenta.

Redes Neuronales Artificiales. Se encontró que la estimación de la erosión en surcos empleando las RNA's fue satisfactoria durante las etapas de calibración, validación y prueba, en términos del coeficiente de determinación y el error absoluto promedio, obteniendo aproximación de moderada a alta con respecto a las observaciones de erosión por lluvia natural y artificial. Aunque se encontró que la estimación mejora a medida que la variabilidad en los datos para el entrenamiento y prueba de la red disminuyen, lo que favorece el aprendizaje de la red del patrón contenido en los datos. La aplicación de las RNA's ha sido empleada satisfactoriamente para otros procesos hidrológicos de lluvia-escorrentía por Jain et al., (2001); Jain et al., (2002); Jain et al., (2004); Kumar, (2001); Srinivasulu y otros (2006); lo que valida su uso para la simulación de procesos hidrológicos.

Sistema de Inferencia Difuso. Se encontró que la estimación de la erosión en surcos empleando los SID's fue satisfactoria durante las etapas de calibración, validación y prueba, en términos del error absoluto promedio, obteniendo aproximación de moderada a alta con respecto a las observaciones de erosión por lluvia natural y artificial. El patrón en los datos de entrada fue mejor representado empleando dos funciones trapezoidales para la lluvia y la infiltración, cuya salida representada por una función lineal múltiple dio como resultado valores aproximados en las etapas de validación y prueba (Figura 27). Igualmente que en las RNA's, se encontró que la estimación mediante los SID's mejora a medida que la variabilidad en los datos para el entrenamiento y prueba disminuyen, lo que favorece el aprendizaje de la red del patrón contenido en los datos. La aplicación de las RNA's ha sido empleada satisfactoriamente para modelación de operación de embalses por Panigrahi (2000), lo que valida su uso para la simulación de procesos hidrológicos.

Comparación de los Modelos para la Estimación de la Erosión en Surcos

La estimación de la erosión en surcos mediante los modelos basados en procesos físicos permite estimar el efecto combinado de la erosión y el transporte de los sedimentos; así como la deposición y el transporte de los sedimentos, aunque la validez de la estimación de cada componente debe ser estudiada para una mayor diversidad de aplicaciones en los campos agrícolas. Por otra parte, se ha observado que es conveniente hacer una calibración de los modelos para surcos diferenciados por las pendientes, ya que existe una mayor variabilidad en la concentración de los sedimentos que contrasta con la baja variabilidad de la lámina del flujo entre surcos de diferentes pendientes; en consecuencia las ecuaciones se ajustan bien un subconjunto de los datos totales mientras que a otros se aproximan ligeramente, lo que causa un impacto sobre el establecimiento con precisión de un umbral para la capacidad de transporte de los sedimentos en el surco, y la ocurrencia de la erosión o bien de la deposición. Por lo antes expuesto, se cree conveniente que se realice un estudio del ajuste de los modelos de procesos físicos para cada pendiente de surco.

Las diferencias entre las versiones dinámicas de los modelos WEPP y EUROSEM son significativas en las magnitudes de los eventos, sin embargo mediante ambos se hizo posible realizar la estimación de los procesos de erosión, transporte de los sedimentos y deposición (Figura 19). En cuanto al modelo del CIHAM-UC, se distingue de WEPP y EUROSEM en que produce estimaciones más pequeñas del proceso de deposición.

La comparación entre los diferentes modelos indican el siguiente orden en la calidad de la estimación de la erosión en surcos: las técnicas de inteligencia artificial, los modelos basados en procesos físicos y las regresiones lineales y finalmente las no lineales (Figura 25).

Modelación de la Erosión según la Pendiente de los Surcos

La modelación de la erosión según la pendiente de los surcos ha sido enfocada únicamente sobre los modelos basados en procesos físicos por las siguientes razones: (1) investigar si existen mejores ajustes y (2) el resto de las técnicas dieron resultados satisfactorios para la serie total, por ello no se consideraron para esta prueba.

Ajustes de los Procesos del Modelo de Erosión con Base Física

Proceso de Desprendimiento de Partículas. Como se mostró en la sección de resultados, el rango de valores de la erodabilidad del flujo concentrado K_c y el esfuerzo cortante crítico τ_c , obtenidos a partir del ajuste de las Ecuaciones (40) a (71) es muy amplio. Como se mencionó arriba, los rangos de los valores que han sido determinados empíricamente para la Ecuación (40) de K_c , τ_c , incluyendo el tamaño de la muestra, mediante experimentos en el campo y en el laboratorio son los siguientes (Knapen et al., 2007): 0.000001 y 0.1 s/m (n=151), 0.01 y 20 Pa (n=161); 0.00001 y 0.7 s/m (n=185), 0.03 y 60 Pa (n=220), respectivamente. Al comparar estos rangos de valores con los reportados en las Tablas (14), (16), (18), (20) y (22) se encuentra que: (a) los valores de K_c se incluyen dentro del intervalo correspondiente a los experimentos en el campo y son inferiores a los encontrados a partir de los experimentos de laboratorio, (b) los valores de τ_c se incluyen totalmente dentro del rango reportado para experimentos en el campo y en el laboratorio. De lo antes expuesto se aprecia que, el rango de valores de K_c obtenido en esta investigación difiere significativamente del reportado por Knapen et al. (2007); mientras que se encuentra una variabilidad menor en el rango de valores para τ_c . Existen varias razones para estas diferencias, entre las cuales, dos de las principales son: (1) las diferencias en las condiciones experimentales en las cuales los datos son recolectados y (2) la variación de los tipos de suelos y las condiciones ambientales.

Comparando las condiciones experimentales y ambientales de esta investigación descritas en la sección de metodología con las reseñadas en las Tablas (53) y (54) se puede apreciar que existe cierta similitud sólo con los estudios de campo realizados por Bjorneberg et al., (1999). Con respecto a los experimentos en el laboratorio no existen casos con los cuales realizar una comparación. Los rangos de los valores encontrados de K_c y τ_c por Bjorneberg et al., (1999) varían como sigue: 0.0003 – 0.006 s/m y 1.2-1.8 Pa, respectivamente. A pesar de las similitudes en las condiciones experimentales mostradas en la Tabla 56, el rango de valores de K_c es significativamente diferente, las causas de las diferencias parecen ser debidas a las condiciones ambientales, principalmente el clima y las prácticas agrícolas, ya que las pruebas de Bjorneberg et al., (1999) fueron realizadas en campos cultivados con frijol y maíz, donde las secuencias de humedecimiento y secado, la consolidación y los residuos pueden ser factores que contribuyen a la variabilidad en K_c ; mientras que los residuos ejercen influencia sobre los valores de τ_c . En cuanto a las relaciones entre D_c - τ no lineales, pocos investigadores han hecho intentos por ajustar sus datos a funciones de potencia (Foster et al., 1984; Zhu et al. (1995); Franti et al., 1999; Zhu et al., 2001). Los rangos de los valores reportados por Zhu et al., (2001) para K_c , τ_c y b en la Ecuación (53) varían como sigue: 0.00004 y 0.0447 $\text{kg}^{(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)} \text{m}^{-(2-b)}$; -1.04 y 3.30 Pa; 1.87 y 6.14. Así mismo, en la Ecuación (54) K_c y b varían como sigue: 0.00084 y 0.0518 $\text{kg}^{(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)} \text{m}^{-(2-b)}$; 3.03 y 4.95. Al comparar estos rangos de valores con los reportados en las Tablas (14), (16), (18), (20) y (22) para las Ecuaciones (53) y (54) se encuentra que: (a) K_c : son inferiores a los reportados por Zhu et al. (2001); (b) τ_c y b : se aproximan a los reportados por Zhu et al. (2001). En cuanto a las Ecuaciones (56) a (72) se encontraron valores de K_c y τ_c en el rango de los mencionados para la Ecuación (53). En general, con respecto a los estadísticos de ajuste de los modelos (40) a (72) se observa un ajuste satisfactorio de la mayoría de las ecuaciones, excluyendo el grupo de Ecuaciones (58) a (62) ya que R^2 es bajo y los errores porcentuales medio absoluto y medio entre los valores observados y estimados resultaron altos con respecto al resto de los modelos.

Proceso de Transporte de los Sedimentos. Los rangos de los parámetros K_t y b reportados en la sección de resultados para los modelos de capacidad de transporte de sedimentos representados por las Ecuaciones (42) y (48) resultaron significativamente variables para las diferentes pendientes de surcos. Según Finkner, (1989) y Trout, (1999) mediante pruebas de campo, K_t y b varían entre: 0.0015-0.05 ($\text{kg}^{1-b} \text{ m}^{-(1-b)} \text{ s}^{-(1-2b)}$) y 1.5; 0.017-0.15 ($\text{kg}^{1-b} \text{ m}^{-(1-b)} \text{ s}^{-(1-2b)}$) y 2 - 4; respectivamente; aproximándose a algunos de los indicados en las Tablas (24), (26), (28), (30) y (32), sin embargo la variabilidad es alta. En cuanto a la Ecuación (48), el valor de la potencia de la corriente unitaria crítica ω_c , es similar a los encontrados en esta investigación. Con respecto a las Ecuaciones (50) y (73), no se pueden establecer comparaciones con los valores propuestos por Simons, Li, Fullerton (1981) y con Bagnold (1966) ya que se ha hecho una adaptación al flujo en surcos. En general, con respecto a los estadísticos de ajuste de los modelos (42), (48), (50) y (73) se observa un ajuste satisfactorio a las observaciones de la mayoría de las ecuaciones, algunas de las razones son: (1) el coeficiente de determinación R^2 varía entre 0.60 y 0.97; (2) el coeficiente R^2 ajustado se reduce de una manera poco significativa, (3) los errores porcentuales medio absoluto y medio entre los valores observados y estimados resultaron moderadamente bajos.

Comparación de los Procesos de Erosión en Surcos Estimados con los Datos Experimentales para Diversas Pendientes.

Influencia de la capacidad de desprendimiento de partículas sobre los procesos de erosión en surcos. a) Durante eventos de riego. La erosión o desprendimiento neto (D_r) estimada varía dependiendo de la ecuación de la capacidad de desprendimiento (D_c) que sea seleccionada para la estimación y de la pendiente del surco, cuyo principal factor es la erodabilidad (K_c), la cual varía ampliamente. En la Figura 23(b) se observa que el modelo que se aproxima mejor al rango de datos seleccionados para el caso de una pendiente de 0.8% es el lineal (Ecuación (40)), las Ecuaciones (53) y (54) sobreestiman D_r . En la Figura 23(e) se observa

que mediante la aplicación de las Ecuaciones (40), (53) y (54) se obtienen estimaciones la erosión en surcos de pendiente 1.5% aproximadas al valor observado. **b) Durante el ciclo de siembra.** Trout (1996) y Bjorneberg et al., (1999) encontraron que la erosión en la salida de surcos de pendiente entre 0.5 y 1.3% para cultivos de frijol y maíz varía como sigue: 0.1-0.3 kg/m² y 0.05-0.1 kg/m², respectivamente. En esas mismas condiciones, se encontró que el proceso de deposición varía entre: 0.8-1.8 kg/m² y 0.2-0.6 kg/m², respectivamente. En esta investigación se encontró en promedio que la erosión para pendientes entre 0.8-1.5% es menor a 0.08 kg/m², alcanzando valores hasta de 1 kg/m² para pendientes del 13% (Figura 24). Así mismo, el proceso de deposición para pendientes entre 0.8-1.5% varía como sigue: 0.01-0.5 km/m², los cuales se aproximan a los reportados en Trout (1996) y Bjorneberg et al., (1999). De lo antes expuesto, se aprecia la influencia que las prácticas agrícolas tienen sobre la erosión del suelo.

Influencia de la capacidad de transporte de sedimentos sobre los procesos de erosión en surcos. a) Durante eventos de riego. En la Figura 23 se muestra la interacción entre la capacidad de transporte de sedimentos de surcos y los procesos de erosión, seleccionando una muestra de las pendientes probadas. En las Figuras 23(a)-(e) se observa que generalmente la capacidad de transporte se incrementa rápidamente con el tiempo. Los resultados indican cómo la capacidad de transporte limita la ocurrencia de los procesos de sedimentación a medida que la pendiente del surco es mayor, **b) Durante el ciclo de siembra.** A partir de la Figura 24 se deduce la interacción entre la capacidad de transporte de sedimentos de surcos y los procesos de erosión. En la primera etapa, la capacidad de transporte tiende a ser menor que la carga de sedimentos, favoreciendo la ocurrencia de los procesos de deposición, lo que es influenciado por la pre-existencia de sedimentos en el surco y la ubicación del punto sobre el surco en el cual se realice la evaluación (salida del surco). En la segunda etapa, disminuye la carga de sedimentos en la corriente y comienza a tener mayor efecto el transporte. En la última etapa, la capacidad de transporte de sedimentos es mayor que la carga de sedimentos, favoreciendo la ocurrencia del proceso de erosión del surco, lo que se incrementa con la pendiente.

Comparación entre los resultados del ajuste de los modelos de erosión en surcos a la serie total de los datos y a la serie para las pendientes. El ajuste de los modelos de los procesos de erosión (desprendimiento de partículas y transporte de los sedimentos) a las observaciones de campo mejoró ligeramente para la serie de pendientes de surco en relación con la serie total, en términos del coeficiente de determinación y los errores, por lo que el uso de las expresiones empleando cualquiera de las series produce resultados similares.

4.6 Lineamientos sobre el Plan de Manejo de la Cuenca, utilizando el Modelo de Erosión de la Cuenca

El enfoque de Manejo de Cuencas depende del tipo de agencia u organismo que se ocupa de los planes de desarrollo, así como de la administración, manejo, ordenamiento y protección de las cuencas. CEPAL (1992, 1994, 1995) usa una concepción basada en los siguientes elementos de juicio:

- Por la acción genérica: toda la cuenca y sus recursos.
- Por los fines específicos de la acción genérica: suministro y conservación de recursos, producción de bienes y control de eventos.
- Por el objetivo último: desarrollo sustentable, mejoramiento del nivel de vida, crecimiento económico, etc.

De acuerdo con los elementos de juicio indicados, el concepto más utilizado es *Proyecto de Aprovechamiento y Conservación de Recursos Hídricos*, con las fases siguientes:

- Fase previa, de ordenamiento, de planificación del uso de recurso y diseño de la mejor alternativa para lograrlo.
- Fase intermedia o de habilitación que comprende la construcción de todas las obras contempladas en la evaluación de la alternativa factible de los proyectos de la fase previa.

- Fase permanente o de manejo que comprende la operación y mantenimiento de todas las obras construidas en la fase intermedia y todas aquellas requeridas para la presentación de los recursos de la cuenca.

El manejo de la cuenca se concibe como el conjunto de acciones de gestión en la fase permanente del proceso de desarrollo de una cuenca, extensivas a todos los recursos, sean estos naturales o contruidos por el usuario; incluye, por lo tanto, manejo de suelos agrícolas, fauna, silvicultura, pastos, cuerpo de agua y áreas ribereñas, nieve, escorrentía, sitios de construcción urbana, minería y vías de comunicación. Luego en el Manejo de Cuencas se pueden diferenciar dos rangos de alcances diferentes: Uno que se refiere exclusivamente al recurso agua, es la concepción hidrológico-forestal, y el otro que abarca todos los otros recursos de la cuenca, o concepción, integral (FAO, 1986, 1989).

En esta investigación el interés se centra en el primero de los alcances mencionados, según el cual el Manejo de Cuencas se orientaría básicamente a la Protección, Conservación y Desarrollo de los recursos hídricos, teniendo como objetivo principal, entre otros: minimizar los riesgos de erosión y sedimentación.

Las acciones directas de manejo que procuran a la vez evitar situaciones negativas y contribuir al aprovechamiento de la cuenca son la preservación, conservación, rehabilitación, mejoramiento y tratamiento de recursos, tanto naturales, como contruidos por el hombre. Para responder a estos objetivos es esencial hacer estimaciones exactas del proceso de erosión y sedimentación en la cuenca. A partir de esta investigación, se ha encontrado que el modelo desarrollado en el CIHAM-UC puede producir aproximaciones satisfactorias para la estimación de la erosión en surcos de parcelas agrícolas en la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo. El modelo de erosión en surcos del CIHAM-UC se compone de los siguientes procesos: desprendimiento, transporte y deposición.

El modelo de erosión en surcos basado en procesos físicos desarrollado por el CIHAM-UC, arrojó resultados satisfactorios en términos de R^2 y los errores, así como se obtuvieron tasas de transporte de sedimentos con una buena aproximación a las observadas y tasas de deposición desde bajas a moderadas en comparación con el resto de los modelos, lo que se ajusta al proceso observado en campo con base en la alta proporción del sedimento en suspensión, más del 70% de partículas finas (arena fina, limo y arcilla), las cuales tienen tiempos de sedimentación altos a muy altos. En el modelo de CIHAM-UC, los procesos de desprendimiento de partículas, transporte y deposición o sedimentación, se expresan mediante la Ecuación (39) y la Ecuación (51):

$$D_R = D_c \left(1 - \frac{CQ}{wT_c} \right), \quad CQ \leq wT_c \quad (39)$$

Donde D_R la tasa de erosión por flujo, T_c la capacidad de transporte del flujo en el surco (kg/s/m), w el ancho del surco, V_s la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), Q la descarga del flujo (m³/s), y D_c la capacidad de desprendimiento de suelo por flujo (kg/s/m²) se calcula mediante la ecuación propuesta por Duboys (1879):

El proceso de desprendimiento de partículas sólidas se encontró que es mejor estimado mediante la Ecuación (40), la cual ha sido ajustada a las series de datos clasificadas según la pendiente de los surcos. La Ecuación (40) y los parámetros se indican a continuación:

$$D_c = \begin{cases} K_c(\tau_s - \tau_c), & \tau_s \geq \tau_c \\ 0, & \tau_s \leq \tau_c \end{cases} \quad (40)$$

$$\tau = \rho_w gSR \quad (41)$$

Donde K_c es la erodabilidad del surco (s/m), τ el esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo (Pa), τ_c el esfuerzo cortante crítico (Pa), ρ_w la densidad del agua

(Kg/m³), g la aceleración debida a la gravedad (m/s²), S la pendiente (m/m), R el radio hidráulico (m). Los surcos se asumen que son rectangulares con anchos que dependen de la tasa del flujo.

Tabla 50
Parámetros de Modelos de Capacidad de Desprendimiento en Surcos de Diversas Pendientes.

Ecuación	Pendiente	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
40	0.8%	K_c	s m ⁻¹	1,20283E-05	7,84E-07	1,04632E-05	1,35933E-05
		τ_c	Pa	2,0761	0,179474	1,71797	2,43424
40	1%	K_c	s m ⁻¹	2,65E-05	2,27E-06	2,19E-05	3,10E-05
		τ_c	Pa	4,77069	0,101326	4,56849	4,97288
40	1.5%	K_c	s m ⁻¹	6,79E-06	3,71E-07	6,04748E-06	7,52973E-06
		τ_c	Pa	5,17035	0,185067	4,80105	5,53964
40	2.5%	K_c	s m ⁻¹	2,01549E-06	4,07E-08	1,93422E-06	2,09677E-06
		τ_c	Pa	0,862425	1,14E-11	0,862425	0,862425
40	13%	K_c	s m ⁻¹	8,50798E-05	6,85113E-06	7,14086E-05	9,87511E-05
		τ_c	Pa	0,792582	0,784594	-0,773054	2,35822

La capacidad de transporte de sedimentos en surcos es estimada a través de la ecuación de Simons, Li y Fullerton, (1981), la cual constituye una solución derivada de la ecuación de transporte de material de lecho de ríos propuesta por Meyer-Peter y Müller, (1948) y el método de Einstein para la descarga de sedimentos suspendidos desde el lecho de corrientes y canales naturales, se expresa como:

$$T_c = K_t h^a V^b \quad (50)$$

Donde T_c es la capacidad de transporte de sedimentos del flujo (mg/s/m), a , b y c son parámetros estimados mediante ajuste empírico, V la velocidad del flujo (m/s) y h la profundidad del flujo (m). Los parámetros encontrados para el ajuste de la Ecuación (50) se obtuvieron para surcos de diversas pendientes y se indican en la Tabla 51.

Tabla 51

Parámetros de Modelos de Capacidad de Transporte de Sedimentos en Surcos de diversas Pendientes

Ecuación	Pendiente	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
50	0.8%	K_t	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	78,1997	58,9336	-39,4325	195,832
		a		1,79054	0,12742	1,53621	2,04488
		b		1,16591	0,115892	0,934586	1,39723
50	1%	K_t	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	2943,15	2747,93	-2541,76	8428,06
		a		3,33277	0,361858	2,6105	4,05505
		b		0,934362	1,31262E-05	0,934336	0,934388
50	1.5%	K_t	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	1169,15	305,294	559,775	1778,52
		a		2,27473	0,109443	2,05628	2,49318
		b		1,45926	9,45E-07	1,45926	1,45926
50	2.5%	K_t	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	178,463	132,811	-88,0421	444,968
		a		1,60588	0,242586	1,1191	2,09267
		b		1,5135	3,08746E-06	1,51349	1,5135
50	13%	K_t	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	9,637	6,46112	-3,25948	22,5335
		a		0,80384	0,138784	0,526825	1,08086
		b		1,0125	0,104864	0,803187	1,22181

La ecuación para estimar la tasa de erosión cuando la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los sedimentos y los parámetros se indican a continuación:

$$D_R = T_c / w - f_s CV_s, \quad CQ \geq wT_c \quad (51)$$

Donde V_s es la velocidad de sedimentación de las partículas (m/s), w es el ancho del surco (m), $f_s = A_{ce} / A_{surco}$, A_{ce} el área del cilindro experimental de la prueba del hidrómetro (D422) (American Society for Testing Material, 2007).

Las principales variables que intervienen y las condiciones bajo las cuales se desarrolló el modelo CIHAM-UC se describen a continuación:

(1) Al inicio del ciclo bajo riego, se encontró una alta capacidad del suelo para almacenar el agua la cual resulta de un alto déficit de humedad del suelo en la zona de aireación creado por el proceso de evaporación que ocurre en el lapso entre el cual finaliza el ciclo bajo lluvia y se inicia el ciclo del cultivo bajo riego; predominando en esta etapa, el proceso de infiltración a medida que el agua se traslada a lo largo de los surcos. Según Berg y Carter, (1980) y Kemper et al., (1985), el perfil del contenido de agua del suelo influye fuertemente en la tasa de erosión. En el riego por surcos, la erosión varía progresivamente a lo largo de la ruta de riego. Por el contrario, en la mayoría de los paisajes agrícolas de secano

los suelos tienen perfiles similares de humedad para todos los puntos en el paisaje en cualquier momento dentro de un evento de lluvia. Por otra parte, la erosión inducida por riego resulta de una serie predecible de aplicaciones de agua casi uniforme y manejable que deben tenerse en cuenta en cualquier modelo conceptual que se utiliza para estimar o predecir la erosión (Sojka, 1997).

(2) Además de las condiciones iniciales del suelo, el follaje de los cultivos influyó sobre la distribución de la caída de la lluvia generada por el riego. El proceso de saturación del suelo se completó luego de un periodo, en el cual el cultivo alcanzó una etapa donde la cobertura comienza a ser un factor importante para disminuir el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. A medida que el cultivo se desarrolló, más lluvia fue interceptada por el follaje de los cultivos antes de que impactara la superficie del suelo.

(4) Las bajas pendientes de los surcos de menos de 3%, disminuyeron tanto el desprendimiento como el transporte de los sedimentos.

Como se ha descrito, la erosión ocurre cuando las condiciones son favorables para los procesos de desprendimiento y transporte de las partículas de suelo; para reducirla se propone el modelo CIHAM-UC como herramienta para la estimación de los procesos intervinientes, luego con base en este conocimiento seguir una metodología que se centra en los criterios desarrollados para la Conservación de Cuencas, cuya administración efectiva se basa en tres principios básicos de control (Guevara, 1997, 2000; Sheng, 1986, 1990, 1992; Sheng y Barret, 1995), Smith, 1996):

- Incrementar la resistencia del suelo a las fuerzas erosivas
- Reducir el impacto de caída de las gotas de lluvia sobre el suelo
- Reducir la fuerza erosiva de flujo (volumen y velocidad)

Mediante el modelo lineal de esfuerzo cortante excedente, se puede cuantificar la relación entre el esfuerzo cortante del flujo y el esfuerzo cortante crítico del suelo. La resistencia del suelo a las fuerzas erosivas se incrementa mejorando la

estructura y la estabilidad del suelo (incorporación de materia orgánica o de otras sustancias químicas, como cal, yeso o fertilizantes, labores agrícolas). El impacto de caída de las gotas de lluvia sobre el suelo se reduce mediante una cobertura permanente que proteja a la superficie del suelo.

Mediante el modelo de transporte de sedimentos de Simons, Li Fullerton, (1981) se puede cuantificar la relación entre la lámina y la velocidad de lámina de agua que escurre en los surcos. La reducción de la fuerza erosiva del flujo se logra reduciendo el volumen de escorrentía superficial y la velocidad del flujo (uso de mulch, construcción de barreras, cultivo en contorno, tanto surcos, como fajas y terrazas; uso de estructuras hidráulicas de retención, conducción y control).

Las actividades que se relacionan con la conservación y rehabilitación, en el contexto del manejo agrícola son: tratamiento de suelos ácidos; aplicación de fertilizantes; aplicación de residuos vegetales y guano de corral; uso de residuos vegetales; sistemas de labranza: Cero labranza y labranza mínima, labranza mulch, labranza de bordes y surcos, subsolación; manejo de cultivos (medidas agronómicas de conservación: Cobertura vegetal, Manejo de monocultivos, cultivo en fajas, Fajas buffer y cultivo de cobertura).

A continuación se presenta un resumen de las prácticas de conservación más importantes que se han desarrollado para la agricultura de regadío. Las prácticas difieren en la facilidad de adopción, la eficacia y el costo de implementación, pero ofrecen una gama de opciones para adaptarse a la mayoría de las situaciones. Estas prácticas y factores relacionados se han discutido en mayor detalle en varias publicaciones recientes (Carter, 1990; Carter et al, 1993; Sojka y Carter, 1994).

4.6.1 Opciones de Manejo de la Erosión

La erosión y la pérdida de los sedimentos desde las tierras de regadío y de secano han sido problemas reconocidos como graves durante aproximadamente 60 años (Israelson et al., 1946). Sólo durante los últimos 30 años se han hecho

progresos significativos hacia el control de la erosión. Algunos de los primeros intentos por relacionar la pérdida de suelo con el tamaño de la corriente y la pendiente de los surcos fueron realizados por Gardner y Lauritzen, (1946) y Mach, (1959). Sin embargo, poca atención fue prestada a estos estudios, y el problema de la erosión por surcos continuó sin muchos esfuerzos por corregirlo por otros 25 años (Carter y Miller; 1987). Al principio de la década de 1970, en Estados Unidos de América, la legislación de la calidad del agua fue orientada hacia la reducción de los sedimentos, nutrientes y biocidas en los flujos de retorno de los riegos (Carter, 1985). A medida que los científicos comenzaron a desarrollar métodos para mejorar la calidad de los flujos de retorno del riego en respuesta a esta legislación, surgieron una gran cantidad de preguntas con respecto a las fuentes de estos contaminantes. Carter, (1976) revisó y evaluó la información disponible antes de 1976 y propuso un conjunto de directrices para controlar la erosión y la pérdida de los sedimentos de las tierras de surcos irrigados. Brown et al., (1974) midieron la concentración de los sedimentos y el fósforo (P) en los drenajes de las aguas o flujos de retorno como riego, la cual varió entre 20 y 15000 mg/L. Las concentraciones de P resultaron proporcionales a la de los sedimentos. Berg y Carter, (1980) condujeron investigaciones de la entrada/salida de los sedimentos a partir de 50 surcos en campos de regadío; concluyendo que en promedio un 50% del agua aplicada escurrió sobre la superficie. Estos datos se usaron para desarrollar estimaciones de las pérdidas para diferentes cultivos y pendientes (Everts, 1981). Durante los últimos treinta años, una cantidad considerable de investigaciones han sido enfocadas hacia la evaluación de las prácticas actuales para reducir la erosión y la pérdida de los sedimentos sobre las tierras de surcos irrigados.

Inicialmente, la mayoría de estas investigaciones fueron dirigidas hacia la reducción de la concentración de los sedimentos en los flujos de retorno. Actualmente, el mayor énfasis se ha puesto sobre la reducción de la erosión y la pérdida de los sedimentos sobre campos individuales. En conjunto con la evaluación de las prácticas conocidas se han desarrollado y evaluado nuevas alternativas de manejo para el control de la erosión y la pérdida de los sedimentos.

La prevención de la erosión en las tierras bajo riego es, sin duda, más importante que en las tierras de secano. La producción de las tierras de regadío es más del doble de las de secano, con casi el triple del valor de la cosecha por hectárea (Bjorneberg et al., 2000). En esta sección se cumplen dos objetivos: 1) se describen los métodos de manejo de la erosión inducida por riego, definidos como aquellos procedimientos que evitan la degradación de las tierras agrícolas por la aplicación del riego, tal como manejo del agua del riego, suelos y de cultivos; 2) se proponen opciones de manejo de la erosión hídrica en las parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo.

Manejo de la Erosión Inducida por Riego

La erosión inducida tanto por el riego como por la lluvia resulta de los mismos procesos físicos y químicos. Sin embargo, los procesos interactúan de manera muy diferente en cada caso (Trout y Neibling., 1993; Sojka, 1998; Bjorneberg et al., 2000; Sojka y Bjorneberg, 2002). La magnitud de las diferencias depende del tipo de sistema de riego y de las propiedades del suelo y el agua. En resumen, las diferencias más importantes se derivan de las propiedades del agua y de los suelos; las características químicas del agua, los patrones de aplicación del agua y de la infiltración, la tasa de humedad del suelo, y, en el riego por gravedad, la ausencia del impacto de las gotas de lluvia. Estos factores son la base para el manejo de la erosión inducida por el riego (Carter et al., 1990; Sojka et al., 1994; Sojka, 1998).

La mayor parte del impulso inicial para la conservación del suelo en la agricultura de regadío es la protección de las zonas ribereñas debido a que éstas reciben los flujos de retorno del riego. Al principio, esto condujo a una estrategia centrada principalmente en las cuencas de sedimentación, para los sedimentos en los sistemas de flujo de retorno. Posteriormente, los esfuerzos se han concentrado en la prevención de la pérdida del suelo desde las granjas de producción agrícola. Un objetivo paralelo de estas dos estrategias de contención era retornar los sedimentos capturados a los sitios erosionados en las tierras agrícolas. Debido a

que cada granja es única, un método determinado de contención de los sedimentos no puede ser igual de adecuado para todas las situaciones. Los agricultores deberían determinar cuál método o métodos se adecuan a su situación particular. En última instancia, los métodos de reducción de la erosión que se utilizan son más valiosos que los métodos que no se utilizan, independientemente de la eficacia relativa potencial de un determinado método. El cumplimiento de las normas de agua potable puede llegar a exigir que los flujos de retorno que salen de una granja cumplan determinadas normas de calidad del agua. Estas normas pueden ser las normas voluntarias o pueden estar vinculadas a potentes incentivos o desincentivos financieros.

A continuación se describen los métodos para el control de la erosión más importantes que se han desarrollado hasta el presente para la agricultura de regadío, sin embargo, sólo en una extensión tal que permita comprender el alcance de las opciones de manejo de la erosión inducida por riego, las cuales podrían ser aplicadas en un contexto como el de la cuenca del río Chigua, como una de las principales zonas agrícolas del Estado Carabobo-Venezuela. Los métodos difieren en la facilidad de adopción, la eficacia y el costo de implementación, pero ofrecen una gama de opciones para adaptarse a la mayoría de las situaciones. Estos métodos y los factores relacionados se han discutido en mayor detalle en varias publicaciones recientes (Carter, 1990; Carter et al, 1993; Sojka y Carter, 1994; Bjornerberg et al., 2002).

Manejo del Agua

Implica mejorar la gestión en la entrada / salida del agua: mejorar la calidad del agua para el riego, selección de un sistema de riego eficiente, medición de la infiltración y la programación del riego. Estas actividades podrían reducir la aplicación de agua y por lo tanto, las cantidades de escorrentía, reduciendo la erosión como un beneficio adicional (Trout et al., 1994).

Calidad del Agua. En una investigación de campo en Kimberly, ID; (Lentz et al., 1993, 1996) encontraron que una elevada relación de adsorción de sodio (RAS) en el agua de riego para los surcos, con una baja conductividad eléctrica (CE) aumentó la erosividad de la corriente del surco. Los sedimentos de la escorrentía se incrementaron más del doble cuando se utilizó agua con las siguientes características: RAS 12 y CE 0.5 dS/m, en comparación con RAS 0.7 y CE 2.0 dS/m de agua (Figura 28). La pérdida de los sedimentos se incrementó en 1.5 veces, comparado con el agua del Río Snake (RAS 0.7 CE 0.5 dS/m). La mayoría de las granjas tienen múltiples fuentes de agua (por ejemplo, pozos y canales de agua), de calidad variable. Corresponde a los agricultores aplicar un agua menos erosiva sobre los terrenos más inclinados o más erosivos, y/o la mezcla de las aguas, cuando sea posible, para reducir el riesgo de erosión. Estos resultados demuestran que los modelos de erosión basados en procesos deben considerar los efectos de la calidad del agua. También subrayan la necesidad de conocer la calidad del agua que se utiliza en los simuladores de la erosión a fin de validar la interpretación de los datos.

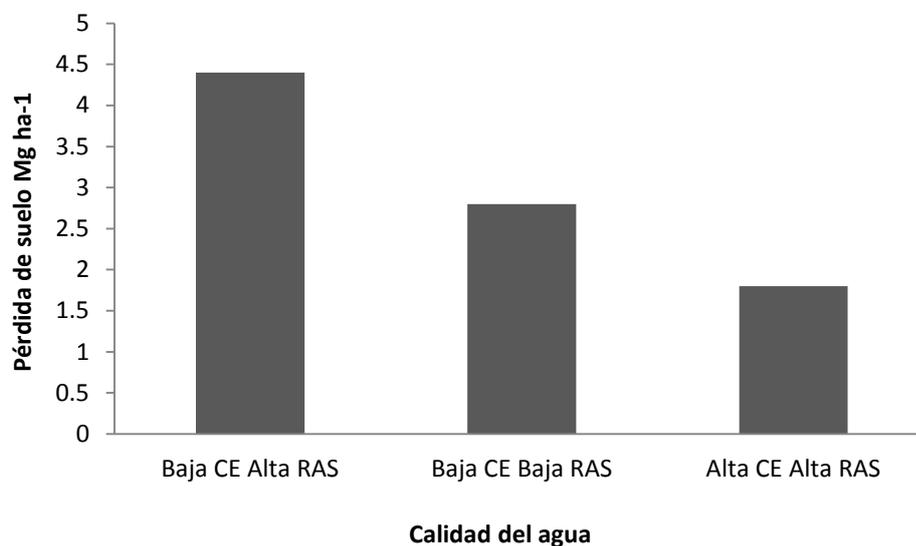


Figura 28. Efecto de la calidad del agua sobre la pérdida de suelo en surcos bajo riego (Lentz et al., 1993,1996)

Tratamiento con Poliacrilamida del Agua de Riego. El tratamiento avanzado del agua de riego de los surcos (sólo) con 10 ppm de poliacrilamida (PAM) ha reducido la pérdida de los sedimentos en la escorrentía desde 85 hasta 99%; mientras que aumenta la infiltración hasta 15% (Lena et al., 1992; Lentz y Sojka, 1994; Sojka y Lena, 1993, 1994). Esto se traduce en alrededor de 1 kg / ha de PAM utilizadas por riego tratado. PAM, es un floculante industrial utilizado para la elaboración de alimentos y tratamiento de aguas, se comercializa ampliamente para el control de la erosión. Los resultados han sido altamente consistentes en una amplia variedad de suelos y condiciones, mostrando una alta efectividad, bajo costo, y la falta de efectos importantes en las prácticas agrícolas (Figura 29). Con 10 ppm PAM, el aporte de agua inicial puede ser más del doble (disminuye una vez el agua ha avanzado a través del campo), prácticamente sin erosión. Esto permite una mayor uniformidad de la infiltración del campo. Las investigaciones en curso sobre PAM por los conservacionistas y los fabricantes, están proporcionando rápidamente mejores materiales y más protocolos para un uso efectivo.

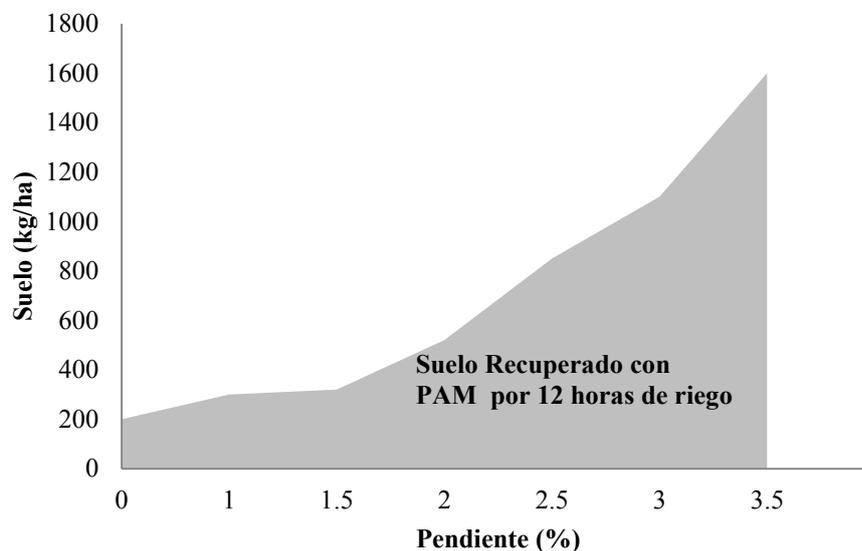


Figura 29. Efecto de 10 ppm sobre el agua de riego sobre el suelo en la salida de los surcos, luego de 12 horas de riego (Sokja, 1996)

Conversión al Sistema de Riego por Aspersión. Un método eficaz de prevenir la erosión inducida por el riego es la conversión del riego por gravedad al tipo por aspersión. Mediante la conversión al riego por aspersión, el beneficio de la conservación del suelo es proporcional a la reducción de la escorrentía.

El riego por aspersión tiene mayores requerimientos técnicos, de capital, energía y de infraestructura que el riego por gravedad. Por lo tanto, los aspersores son utilizados sobre una fracción pequeña del área de irrigación total del campo.

Los sistemas de riego por aspersión, adecuadamente diseñados y administrados eliminan el 100% de las pérdidas de los sedimentos a la salida del sitio. Sin embargo, existe la tendencia a extender el uso de este tipo de riego hacia las pendientes pronunciadas o más erosivas. En las tierras inclinadas, la erosión ocurre cuando los sistemas de riego están mal concebidos o administrados.

En los pivotes centrales ocurren problemas de erosión debido al escurrimiento del agua en los surcos para el paso del tractor, en el sentido descendente de las pendientes, o por causa de las altas tasas de aplicación en los tramos donde ocurre el pivoteo (Gilley y Mielke, 1980).

Rociadores de Baja Presión y Área Extensa. La geometría de los sistemas de riego de pivote central requiere muy altas tasas de aplicación de agua en el tercio más externo del pivote. Cuanto mayor sea el pivote mayor es el problema. Mediante el uso de boquillas de pulverización, con un tamaño más pequeño de las gotas, éstas se extienden sobre un área mayor, la energía se conserva y la escorrentía y la erosión se reducen considerablemente en comparación con los sistemas estándar de carga de impacto (Kincaid et al., 1990).

Modificación de los Sitios

Diversos enfoques de "ingeniería" se han utilizado para reducir las pérdidas de los sedimentos desde la superficie irrigada de los campos. El más común es el uso de un conjunto de estanques de decantación, para facilitar la sedimentación de las partículas en la escorrentía recolectada desde los campos hasta de 20 hectáreas.

Una variante de los estanques es la instalación de tuberías y desagües enterrados para regular el nivel del agua en los extremos de las zanjas.

Estanques para la Retención de los Sedimentos. Son lagunas artificiales de sedimentos que pueden abarcar hasta 0.11 ha (1/4 de acre), mediante las cuales se puede prestar servicio a campos desde 16,2 hasta 24,3 ha (40 - 60 acres), cuya configuración puede ser también denominada como “mini-cuencas”; almacenando temporalmente la escorrentía proveniente desde 6 hasta 12 surcos. En los estanques se reducen las tasas flujo y retiene brevemente el agua, lo que permite la deposición de las partículas suspendidas y la reducción de la desorción del fósforo. La eficacia del estanque de retención depende de la carga de los sedimentos, las tasas de flujo, el tiempo de retención, y la textura de las partículas en suspensión. Alrededor de 2/3 de los sólidos pueden ser removidos de los flujos de retorno (Figura 30), pero sólo aproximadamente 1/3 de la arcilla en suspensión y el P total (Brown et al., 1981). La arcilla, en la que con frecuencia se encuentra la mayor parte del residuo del fósforo P desciende lentamente hasta el fondo del estanque. Por lo tanto, la práctica es más eficaz para los suelos de textura media, que para los suelos arcillosos.

El tamaño del estanque de asentamiento depende del área servida, la velocidad y el volumen de la escorrentía, las concentraciones y la distribución de los tamaños de las partículas en los sedimentos. La ubicación de los estanques pequeños de decantación a lo largo de la parte inferior de los campos de irrigación superficial, facilita el manejo al final de la temporada, cuando el sedimento atrapado se puede retornar de nuevo al campo mediante el uso de maquinaria agrícola. Los estanques grandes requieren un equipo de gran escala para labores de construcción, limpieza y redistribución del suelo. La eficacia disminuye a medida que el estanque se llena con los sedimentos; reduciendo el tiempo de residencia del agua.

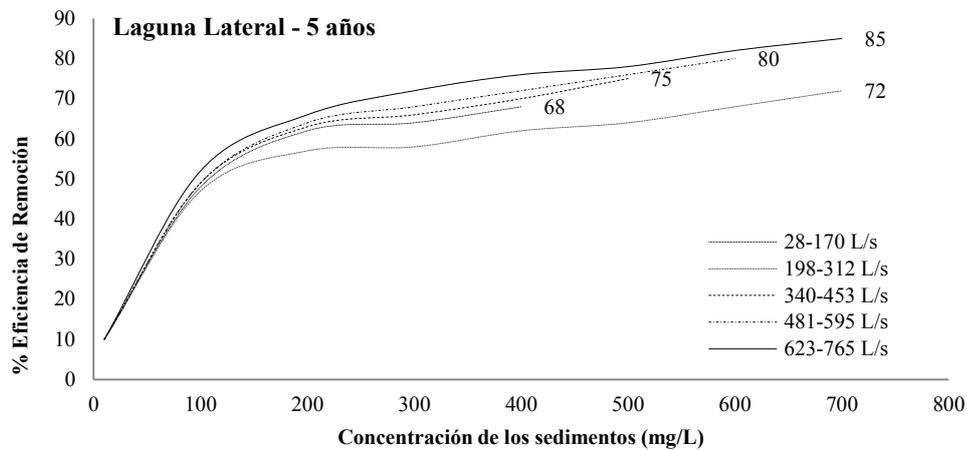


Figura 30. Efecto de la concentración de los sedimentos y la tasa de flujo sobre la eficiencia de remoción de los sedimentos (Brown et al., 1981).

Sistemas de Control de la Erosión basados en Tuberías Enterradas. Estos sistemas están constituidos por tubos de drenaje enterrados provistos de conductos verticales que permiten la entrada del agua de riego en el extremo de los surcos, la cual es trasladada hacia la laguna o estanque ubicado en la parte inferior del campo. Estos sistemas promueven la retención de los sedimentos en los estanques y con frecuencia son un adjunto de las mini-cuencas. El método es el más adecuado para evitar los extremos de campo tipo cóncavo. La eficacia se aproxima al 90%; mientras que el vaso del estanque se están llenando, pero se reduce a la eficiencia del estanque una vez que éste se llena (Carter y Berg, 1983).

Sistemas de Reutilización del Agua. Los estanques de retención pueden ser mejorados a un costo insignificante, para recircular el agua cargada de los sedimentos e incorporarla al suministro de agua de riego para los surcos. Esto no pretende detener o retardar la erosión en sí, sino en gran medida automatizar la sustitución de los sedimentos en los campos de los que proceden. Las ventajas incluyen la maximización de la eficiencia del suministro de agua y el 100% en la retención de los sedimentos agrícolas (Carter et al, 1993). Los costos de capital y de energía, y el desgaste acelerado de las bombas son desventajas. Asimismo, puede existir mezcla de inóculo de enfermedades, semillas de malas hierbas, y productos químicos, cuando los flujos son recirculados. En una escala más grande,

sin embargo, muchos distritos de riego superficial han sido diseñados y son operados con una asunción de que los flujos de retorno forman parte del suministro de riego de gran parte del distrito. La eliminación de todos los flujos de retorno podría causar escasez en algunos tramos de los sistemas existentes o requerir la modificación de la capacidad del canal principal para proporcionar agua a las granjas en los tramos más bajos del sistema de entrega, si una parte del agua es transportada a través de los sistemas de flujo de retorno.

Tratamiento de Suelos

En el tratamiento de los suelos se puede requerir: (1) tratar la acidez, (2) aplicar suero y (3) aplicar residuos vegetales.

Tratamiento de Suelos Ácidos. La mayoría de los cultivos que se llevan a cabo en suelos minerales bien drenados de las regiones templadas crecen bien a valores de pH entre 6.5 y 7; mientras que en los trópicos y subtropicos el crecimiento es mejor en suelos orgánicos con pH entre 5.0 y 5.5. Para lograr un crecimiento adecuado de los cultivos y mejorar las condiciones físicas de los suelos ácidos, se ha generalizado la aplicación de la cal agrícola, ya sea bajo la forma de carbonato de calcio (CaCO_3) o carbonato de calcio y magnesio (CaMgCO_3). En las regiones tropicales los suelos son de naturaleza ácida y los suelos en general, se acidifican cuando el contenido de Ca y Mg es removido o neutralizado por la acción del riego, la lluvia ácida, por las cosechas, por el uso de fertilizantes, y por la erosión y lavado del suelo. La pérdida de Ca y Mg debido a la erosión acelerada y lavado de los suelos agrícolas y áreas de pastoreo alcanza valores de 1.5% para el Ca y 0.7% para el Mg. Los suelos más sensibles a acidificación son aquellos de textura gruesa, pobres en contenido de Ca y Mg. Los suelos menos sensibles a la acidificación son los arcillosos con alto contenido de Ca y Mg. Los requerimientos dependen de la textura y el grado de acidez inicial. En suelos arenosos con una acidez inicial de 4.5, para elevar el pH en 0.4 puede requerirse unas 6 t/ha, considerando un perfil de unos 18 cm de profundidad, mientras que en suelos arcillo-limosos, dicho requerimiento se eleva a unas 18 t/ha. Para elevar el pH de 6.0 a 6.4, los requerimientos disminuyen a 1 y 4 t/ha respectivamente para

las dos condiciones texturales dadas antes. Para valores intermedios de pH, los requerimientos también toman magnitudes intermedias. Por cada cinco centímetros de incremento en la profundidad del perfil del suelo los requerimientos de enmienda se incrementan en 15%. (Donahue et al., 1990; Adams, 1984).

Aplicación de Suero. Algunas zonas de regadío se encuentran cercanas a plantas de procesamiento de lácteos. Para muchos procesadores la disposición del suero ácido del queso es un problema. El suero ácido aplicado al suelo acelera la rehabilitación de los subsuelos expuestos a la cal y conserva los nutrientes. Si se combina con la aplicación de la paja, el suero de la leche puede reducir la erosión inducida por el riego de los surcos hasta 98% y aumentar la infiltración en más del 20% (Robbins y Lehrsch, 1992; Brown y Robbins, 1995; Lehrsch y Robbins, 1994). Las desventajas de este método son el costo, la inconveniencia del transporte a granel y la aplicación del suero en el campo. Por lo general, los procesadores, que a menudo necesitan sitios de aplicación sobre los terrenos, proveerán de suero de leche sin costo alguno.

Aplicación de Residuos Vegetales y Guano del Corral. La aplicación de materia orgánica no sólo es una fuente de nutrientes para las plantas, sino también constituye un medio para mejorar las condiciones físicas del suelo. Existen muchas fuentes de materia orgánica, entre las principales tenemos los residuos vegetales, estiércol de establos, lodos residuales del tratamiento de aguas servidas, residuos de la industria maderera, residuos de la industria de procesamiento de alimentos, residuos industriales orgánicos, basuras municipales orgánicas, productos de cultivo de leguminosas y compost.

Uso de Residuos Vegetales. El manejo de residuos es una herramienta muy poderosa para el control de la erosión del suelo, para mantener la fertilidad del suelo y para regular la incidencia de plagas y enfermedades. El grado de protección que ejercen los residuos vegetales sobre el suelo es aproximadamente

proporcional al porcentaje de cobertura, la vía más fácil para conservar el suelo y el agua es dejando los residuos sobre la superficie; los residuos que se entierran dejan de suministrar cobertura superficial. Cualquier tipo de labranza que se lleve a cabo sobre los residuos afecta su valor como mulch. La aradura de rejas puede cubrir la mayor parte de los residuos y dejar al suelo con poca o ninguna protección superficial, la aradura de discos puede cubrir el 50% de los restos vegetales y la rastra deja una cobertura del 80%. La práctica de dejar una cantidad significativa de residuos sobre la superficie durante el periodo entre la cosecha y la siguiente siembra se denomina *rastrojo o mulch de tallos*.

A continuación se resumen las ventajas y desventajas del uso de residuos vegetales. Ventajas: (1) reduce la erosión por el agua y por el viento, (2) incrementa la infiltración, (3) incrementa la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, (4) incrementa la disponibilidad de agua para las plantas, (5) disminuye la temperatura del suelo durante el verano y la aumenta durante el invierno, (6) incrementa la cantidad de humus en el suelo, (7) disminuye la formación de costras en la superficie del suelo, (8) mantiene o incrementa la producción de los cultivos, (9) incrementa la población de animales benéficos, como los gusanos de tierra. Desventajas: (1) no se adecúa a muchos suelos de las áreas templadas, (2) propicia el incremento de insectos, enfermedades, malezas y roedores, (3) retarda la germinación de las semillas debido al incremento de la humedad y el descenso de la temperatura en la superficie del suelo y a la generación de toxinas solubles en el agua, (4) propicia un mayor requerimiento de fertilizantes hidrogenados; sin embargo después de pocos años con labranza mínima el N puede ser suplido por el proceso de descomposición del residuo.

Sistemas de Labranza

La forma más práctica de proteger al suelo de la erosión es manteniendo una cobertura vegetal densa y de poca altura en forma permanente. Sin embargo, el agricultor se ve obligado a llevar a cabo labores culturales que constituyen una perturbación mecánica de los campos agrícolas, exponiendo el suelo a los agentes

erosivos durante ciertos intervalos de tiempo. Para disminuir los riesgos de la pérdida de suelo, deben llevarse a cabo esfuerzos para asegurar que los cultivos vivos y los residuos vegetales provean tanta protección al suelo como sea posible.

Los sistemas de labranza tienen tres objetivos fundamentales: 1) preparar la cama para las semillas y las raíces, dando a la superficie del suelo condiciones que favorezcan el emplazamiento y germinación de las semillas, una pronta emergencia, un desarrollo y un crecimiento no limitados de las plantas, 2) controlar malezas, con la finalidad de eliminar la competencia para los cultivos por humedad, nutrientes, espacio y luz; las labores culturales pueden enterrar las semillas y destruir las malas hierbas; los herbicidas químicos no siempre controlan toda la maleza y se requiere de algún tipo de labranza para eliminar las especies existentes. Sin embargo, la labranza en exceso en suelos de textura gruesa no es beneficiosa al cultivo, en cuyo caso es suficiente una limpieza superficial o la simple aplicación de herbicidas. El crecimiento de las plantas, por el contrario se beneficia del exceso de labranza, especialmente en suelos de baja permeabilidad y pobres en materia orgánica, 3) establecer condiciones superficiales del suelo que favorezcan la infiltración y controlen la erosión, es decir conservar el suelo y agua. Las labores agrícolas que incrementan la rugosidad del suelo al romper las costras y superficies duras, incrementan la infiltración y reducen la erosión; sin embargo, el efecto puede ser sólo de corta duración debido a que el riego tiende a uniformizar la superficie. Los residuos de cultivos dejados sobre la superficie reducen la erosión por el agua; por lo tanto se recomiendan las labores que dejan las hojas y tallos sobre la superficie en vez de enterrarlos.

Ningún sistema de labranza controla totalmente la erosión, el efecto varía con el suelo y con el clima; por ello, ha surgido el concepto de labranza de conservación, el cual incluye todas las opciones incluso con remota aplicación en el control o reducción de la erosión. La labranza de conservación se define como aquella cuya secuencia reduce las pérdidas del suelo o agua, en relación con la

labranza convencional; frecuentemente se refiere a un tipo de labranza de no inversión del suelo que retiene una cierta cantidad de mulch sobre la superficie (Resource Conservation Glossary, 1982). También se define como aquellos sistemas de labranza y cultivo en los cuales por lo menos el 30% de la superficie del suelo queda cubierto por residuos vegetales después de la siembra por el control de la erosión hídrica (Schertz, 1988).

Mediante la aplicación de la labranza de conservación y la siembra de cultivos bajo sistemas de riego por surcos, la reducción de la erosión a escala de parcela en más del 90%, reduce los costos de producción; proporcionando además algunos incrementos en la producción (Carter y Berg, 1991; Sojka y Carter, 1994). Una vez establecidos, estos sistemas pueden proporcionar a largo plazo, la eliminación del costo efectivo de la erosión. Una desventaja de este enfoque es la renuencia de muchos agricultores a adoptar esos cambios que incluyen la totalidad de sus operaciones. El riego por surcos requiere suficiente uniformidad y que no existan obstáculos para el avance del agua en los surcos de manera constante y oportuna. Esto a veces es un problema en los sistemas intensivos de residuos. La labranza de conservación puede ser aplicada tanto; en los sistemas de riego por surcos como en los de secano.

Muchos enfoques desarrollados para controlar la erosión inducida por las precipitaciones pueden prevenir la erosión inducida por el riego, particularmente en los sistemas de riego por aspersión, por ejemplo, la siembra bajo la modalidad de cero labranza, se basa en hacer que permanezcan la mayor parte de los residuos del cultivo anterior para proteger la superficie del suelo. Sin embargo, a pesar de obtener una reducción superior al 90% de la erosión, frecuentemente con un aumento de los rendimientos, la siembra directa y la labranza de conservación pocas veces son practicadas por los regantes (Carter y Berg, 1991).

Existen dos conceptos claves que deben ser incluidos en la labranza de conservación: (1) mulch residual y (2) incremento de la rugosidad de la superficie. El primero puede ser satisfecho por técnicas de cero labranza, labranza mínima y sistemas agrícolas que contemplan el uso de mulch; el segundo criterio se logra

mediante araduras, labranza en fajas, sistemas de labranza en surcos y métodos de labranza que ocasionan la inversión del perfil del suelo. La inversión del suelo, cuando se efectúa al contenido de humedad correcto y con el equipo adecuado, puede acondicionar el suelo para servir de cama para las semillas con la rugosidad adecuada y mejorar la infiltración. A pesar de que el uso del mulch es un criterio muy útil, su disponibilidad en las cantidades suficientes puede ser una limitante en algunas regiones ecológicas y para ciertos sistemas agrícolas; en este último caso la labranza de conservación debe incluir otras técnicas, tales como bordos en contorno, bordos interconectados, sistemas de camas convexas y sistemas de surco de base ancha, aspectos que determinan el requerimiento de una definición más amplia, como la siguiente: labranza de conservación se refiere a aquellos sistemas que crean un ambiente tan adecuado como posible para el crecimiento de los cultivos y que optimizan la conservación de los recursos suelo y agua, concordante con una práctica económica sana (Whitmus et al, 1973).

Cero Labranza. La modalidad de cero labranza o no labranza es un sistema agrícola donde la planta se siembra directamente sin ningún tipo de preparación previa del suelo desde la última siembra. Esta técnica posee las siguientes características:

- a) No se efectúa ningún tipo de labranza mecánica previo a la siembra.
- b) La mayor parte de los residuos vegetales del cultivo anterior permanecen sobre la superficie del terreno
- c) Las malezas se controlan mediante sustancias químicas, mediante el uso de un cultivo de cobertura vigoroso, o mediante una combinación de ambas técnicas.
- d) La siembra se efectúa utilizando una sembradora implementada con un arado de doble disco que abre el suelo y coloca los residuos hacia los lados.

Si el cultivo anterior requiere de una remoción mecánica del suelo para efectos de la cosecha, el siguiente deja de ser un sistema de cero labranza, tal es el caso de papas, remolacha azucarera, yuca, batata, etc.

Labranza Mínima. El término de mínima labranza ha sido de confusión y controversia, debido a que el crecimiento exitoso de las plantas requiere de un sistema de labranza que varía desde cero hasta un rango completo de operaciones de labranza primaria y secundaria, dependiendo del tipo de suelo, clima y cultivo. Este sistema de labranza se define como la mínima manipulación del suelo requerida para la producción de cultivos o para cumplir con los requerimientos de labranza bajo condiciones existentes de suelo y clima (Resource Conservation Glossary, 1982). Frecuentemente se refiere a cualquier técnica de labranza con menos operaciones que la convencional. Sin embargo, el término labranza convencional también varía de un lugar a otro, en algunas partes de los trópicos, los sistemas basados en fuentes de fuerza manual o en tracción animal, son diferentes a los de tracción mecánica o motorizados de los países desarrollados. Los sistemas de labranza más ampliamente difundidos en los trópicos son la labranza en surcos y en bordos. En algunos casos, la labranza tradicional se limita a la apertura de huecos mediante palas donde se vierte la semilla para la siembra inmediatamente después de la ocurrencia de las primeras lluvias. En los países desarrollados, por el contrario, la labranza convencional significa una combinación de operaciones de labranza primaria y secundaria, orientadas a la preparación del terreno para recibir las semillas, para un cultivo determinado en un área geográfica específica. Por lo tanto debido a las diferencias expuestas es necesario estandarizar la terminología para evitar las confusiones.

Labranza mínima también puede referirse al sistema denominado *cama tendida* o *cama plana*, donde se efectúa una inversión del suelo mediante una aradura de rejas al final del ciclo anterior (Lal, 1990); el siguiente cultivo se siembra con un mínimo de preparación del suelo, tal como una rastra de discos realizada con la aparición de las primeras lluvias.

Labranza Mulch. Los sistemas de labranza que aseguran una máxima retención de residuos vegetales sobre la superficie del terreno se denominan *labranza mulch o de rastrojo*. Consiste en preparar el terreno de tal modo que los residuos vegetales u otro tipo de mulch permanezcan sobre o cerca de la superficie. Este término es también amplio y comprende prácticas tales como cero labranza, aradura de discos, de rejas, y sistemas de labranza en fajas.

Los cultivos de cobertura, usualmente leguminosas, poseen las funciones específicas de interrumpir el ciclo de crecimiento para producir material mulch, para mejorar la estructura del suelo y para incrementar el contenido de materia orgánica. Este sistema se denomina *barbecho*, es decir que después de la labranza se deja intacto el terreno hasta el próximo ciclo. En las regiones templadas se utiliza una variación denominada barbecho de verano, en la cual la maleza se controla mediante una labranza superficial o por productos químicos. Los cultivos se siembran dejando un año de por medio o cada tres años. Este tipo de barbecho se suele usar en los climas áridos con la finalidad de preservar la humedad del suelo.

Labranza en bordos o surcos. La técnica de siembra y cultivo en surcos es ampliamente difundida; las plantas se ubican a ambos lados del camellón o en el surco. La labranza en bordos facilita los sistemas de cultivos mixtos, es decir la producción simultánea de dos o más cultivos en la misma parcela de terreno. Esta práctica es usual en los trópicos y subtropicos. Dependiendo del tipo de cultivo, y de la disponibilidad de maquinaria, los surcos son de diferentes amplitudes, variando desde pocos centímetros para ajos, cebollas y verduras, 60 a 73 cm en maíz, tomates, etc., y hasta 120 cm en papas, algodón, etc. Los surcos pueden hacerse en cada estación y requerir solo reparaciones al inicio del ciclo. Los surcos pueden trazarse siguiendo homogéneamente las líneas de contorno, con sistemas de desagües vegetados en los extremos inferiores, o pueden contener interrupciones transversales de trecho en trecho para crear pozas de almacenamiento de agua. Este último sistema viene a ser la labranza en cuencas, pozas, de surcos amarrados o interconectados.

Labranza en pozas o cuencas. Consiste en crear pequeños hoyos entre las hileras de los cultivos (denominada labranza de estanques, diques o labranza de cuenca) para prevenir o reducir la escorrentía. Esta técnica es adecuada tanto para la agricultura de tierras secas y de riego por aspersión. Los aspersores utilizados en los campos de pendiente irregular, especialmente en los tramos externos de los pivotes centrales, donde las tasas de aplicación son altas, pueden inducir a la escorrentía y la erosión excesiva. La labranza de pozas ha eliminado alrededor del 90% de los escurrimientos del riego y las pérdidas relacionadas con la erosión (Kincaid et al., 1990).

Otros Métodos de Labranza. Existen otros métodos de labranza desarrollados para resolver problemas específicos de los suelos, tal como para suelos con problemas salinos, con problemas de drenaje, o suelos afectados por problemas que harpan en los horizontes superficiales. En los terrenos salinos no irrigados la sal tiende a acumularse cerca de la superficie. La labranza acelera la desalinización al mezclar las sales fácilmente solubles con los agregados de los horizontes inferiores del perfil del suelo, aflojando los suelos más densos. En suelos mal drenados, se suele utilizar la subsolación, es decir una aradura profunda que rompe los estratos duros impermeables del perfil, incrementando la infiltración y favoreciendo el desarrollo de las raíces hacia los perfiles inferiores. El mejoramiento de la infiltración y de la permeabilidad ayudará al lavado de las sales solubles y también a las no solubles intercambiables cuando las prácticas de labranza van acompañadas de la aplicación de enmiendas. En los casos en los cuales no resulta económico el mejoramiento del drenaje y la desalinización, se podría intentar como alternativa al uso de cultivos resistentes a dichos problemas.

Subsolación Local. Dado que la mayoría de los suelos de regadío del mundo han estado en producción por menos de 100 años, la compactación sólo recientemente ha sido reconocida como un problema potencial. La compactación deteriora la estructura del suelo, así como impide la infiltración. Ambos

perjudican la producción agrícola y contribuyen a la escorrentía y la erosión. La subsolación local mejoró la producción y el grado de las papas de surcos irrigados y aumentó la infiltración hasta 14%, mientras que la reducción de la pérdida de suelo en la escorrentía fue hasta de 64% (Sojka, et al., 1993a, 1993b).

Técnicas de Cultivo

La protección natural del suelo contra la erosión es la cobertura natural, ya sea ésta de árboles, pastos u otro tipo de plantas. Cuando se destruye dicha vegetación para convertir los campos en áreas agrícolas, se pierde esa protección, por lo que los sistemas de cultivos, es decir las técnicas utilizadas para la producción tienen que ser seleccionadas de tal modo que eviten en lo posible la erosión del suelo. El resultado de los sistemas de cultivos pobres, es decir aquellos que no proveen protección, es la pérdida acelerada del suelo y la consiguiente reducción de la productividad y la contaminación del ambiente. Muchos sistemas de cultivos dejan una gran porción de la superficie expuesta durante parte del año, en cuyas condiciones, el impacto del agua sobre la superficie incrementa la tasa de erosión ocasionando serios daños. Estos daños se pueden reducir utilizando sistemas de cultivos que minimicen la exposición del suelo a tales agentes erosivos. Los sistemas de cultivo deben diseñarse para proteger la productividad actual y futura proveyendo de una cobertura vegetal adecuada con la finalidad de controlar la erosión.

Cobertura Vegetal. Un aspecto importante a considerar en el manejo de los cultivos viene a ser un aseguramiento de una cobertura vegetal temprana. Los riesgos de erosión son menores mientras más rápido se cubre el suelo con el cultivo. El fundamento del control de la erosión del suelo está en los sistemas agrícolas; el manejo de la erosión es por lo tanto un concepto holístico que involucra la adopción de un procedimiento integral que incluye los siguientes subsistemas, cuya consideración detallada e implementación científica deberían

eliminar o reducir las medidas de control de la erosión (Lal, 1990): (a) Uso apropiado de la tierra, (b) selección apropiada del tipo de cultivo, (c) siembra o plantación temprana, (d) variedad adecuada de cultivos, (e) densidad y tamaño adecuado y población óptima de plantas, (f) aplicación balanceada de fertilizantes, (g) control de malezas, (h) control de plagas y enfermedades, (i) métodos adecuados de cosecha, (j) rotación de cultivos y sistemas de cultivos, y (k) buen manejo de los residuos.

La selección de las especies adecuadas a las condiciones de suelo y ambiente permite el establecimiento rápido de una cobertura vegetal. Los tipos de cultivos se pueden agrupar en: cultivos en línea o surcos, cultivos de grano pequeño, forraje y árboles. Muchos tipos de cultivos se siembran tradicionalmente en líneas espaciadas a un metro; entre ellos se encuentran: el maíz y las papas, entre otros. Las líneas facilitan las labores de labranza, el control de malezas, la aplicación de fertilizantes y la cosecha, pero crean problemas de conservación del suelo, debido a que quedan áreas no protegidas entre las líneas, el suelo queda suelto y erosionable con la labranza y las líneas favorecen la formación de canales de circulación del agua y por lo tanto de la erosión. En los cultivos en línea o surcos, la densidad se incrementa disminuyendo el espaciamiento entre líneas, reduciendo el espaciamiento entre plantas o ambos a la vez. Es preferible el uso de líneas más estrechas porque favorece una mejor exposición de las hojas al sol, controla mejor la erosión, disminuye la evaporación e incrementa la infiltración y la producción.

Colocación de Cultivos de Cobertura en los Surcos. El uso de los residuos vegetales o los cultivos de cobertura que coexisten en los surcos irrigados puede ser muy eficaz para detener la erosión. El pasto en los surcos en forma permanente detiene aproximadamente el 100% de la erosión (Cary, 1986), sin efectos adversos en el rendimiento de la cebada, trigo, frijoles y el maíz. La técnica requiere un cortador de surcos especial para mantener los surcos establecidos. La paja u otros residuos manejables pueden ser colocados selectivamente en los surcos para producir desde 52 hasta 71% de la reducción de la pérdida de los sedimentos (Miller et al, 1987; Aarstad y Miller, 1981; Brown, 1985; Brown y

Kemper, 1987). Las desventajas de estas técnicas subyacen en la gestión de los surcos con césped, las operaciones adicionales tales como; el establecimiento y / o mantenimiento de los cultivos de cobertura, así como los equipos necesarios para colocar la paja, y la migración de los desechos a lo largo de los surcos con aplicación de mulch. Las actividades requeridas por los cultivos de cobertura pueden ocurrir en momentos inconvenientes para los administradores de los cultivos, o causar problemas durante los cultivos. Las pajas algunas veces se mueven en la corriente del surco, causando represamiento del agua en los surcos y haciendo que el flujo sobrepase hacia filas en surcos adyacentes.

Manejo de Monocultivos. El monocultivo es un sistema que consiste en cultivar año tras año el mismo tipo de planta en el mismo terreno. Para evitar los efectos dañinos que pueden ocurrir con el uso de sistemas intensivos de cultivo se pueden emplear muchas herramientas, tales como limitando dichos sistemas a los suelos apropiados, sembrando en líneas estrechas, proveyendo enmiendas y fertilizantes en suficiente cantidad, mejorando el drenaje y, dejando suficientes residuos vegetales sobre la superficie del terreno.

Cultivos Múltiples. El sistema de cultivos múltiples generalmente se define como el crecimiento de más de un cultivo en el mismo terreno durante un año y comprende esquemas como cultivo intercalado (al mismo tiempo) y cultivos en secuencia (dos o más cultivos en un año de secuencia). Desde el punto de vista del control de la erosión, todos estos sistemas son beneficiosos, debido a la mayor cobertura vegetal que brindan, comparados con los monocultivos. En el sistema de cultivos intercalados se superponen los periodos vegetativos de dos o más cultivos, como es el caso de maíz y frijoles, típico de la agricultura de subsistencia de los países en desarrollo.

El sistema de cultivo múltiple en secuencia es similar a una rotación de cultivos, pero durante el mismo año. La rotación de cultivos consiste en cultivar diferentes plantas en secuencia recurrente en la misma área y durante el mismo tiempo.

Cultivos en Fajas. El sistema de cultivos en fajas es una práctica que consiste en dividir el terreno en parcelas largas y estrechas en el sentido transversal al patrón general de la dirección en que actúa la fuerza erosiva del agua. Estas parcelas denominadas también franjas o bandas, normalmente con cobertura vegetal densa, reducen la escorrentía y la velocidad del viento y atrapan el suelo erosionado de las franjas más expuestas. Las fajas de cereales, hierba o alfalfa (desde 3 a 6 m de ancho) sembradas a lo largo de los extremos inferiores de los campos de surcos irrigados, reducen los sedimentos en la escorrentía desde 40 hasta 60%. Los surcos que aportan pasan a través del área de la faja filtrante. Las fajas de filtro cosechadas producen entre 30 y 50% por debajo de lo normal para una cosecha en faja (Carter et al., 1993).

Plantación de Fila Estrecha y de Doble Fila. La siembra de maíz lo más cerca posible a ambos lados de un surco de riego para formar espaciamentos de doble fila (Figura 31); redujo a la mitad la pérdida de sedimentos del campo durante dos años de observación (Sojka et al., 1992). Los resultados para espaciamentos entre filas más estrechos de lo normal fueron más variables, sin embargo mostraron ser satisfactorios para campos de remolacha azucarera, maíz y frijol. La remolacha azucarera se sembró mediante espaciamentos entre surcos de 0.56 y 0.76 (Figuras 1(b) y 1(d)). El maíz se sembró mediante filas gemelas (Figuras 1(a), 1(b) y 1(d)). En el frijol se aplicaron espaciamentos de 0.56, 0.76 o doble fila de 0.76 (Figuras 1(b), 1(d) y 1(c)). El efecto es el resultado de una combinación de factores, incluyendo el enlazamiento de las raíces dentro del suelo en las proximidades de la corriente, la introducción de residuos vegetales dentro de la corriente del surco, y el aumento sistemático del número de surcos (y por lo tanto, el perímetro mojado); reduciendo la duración establecida del riego necesaria para suministrar las cantidades equivalentes de agua. Esto disminuye el tamaño de la corriente y el período de escurrimiento en relación con el del aporte total.

En esta investigación, los modelos fueron ajustados a observaciones realizadas en plantaciones de hilera única para el cultivo bajo lluvia (maíz) natural y riego

(papa), en el primer caso el patrón de siembra corresponde a la Figura 1(a) y en el segundo caso a la Figura 1(d). El cambio a la plantación de hilera doble sólo reduciría la cantidad de surcos que aportan siendo aún válidas las expresiones encontradas para la estimación de la erosión.

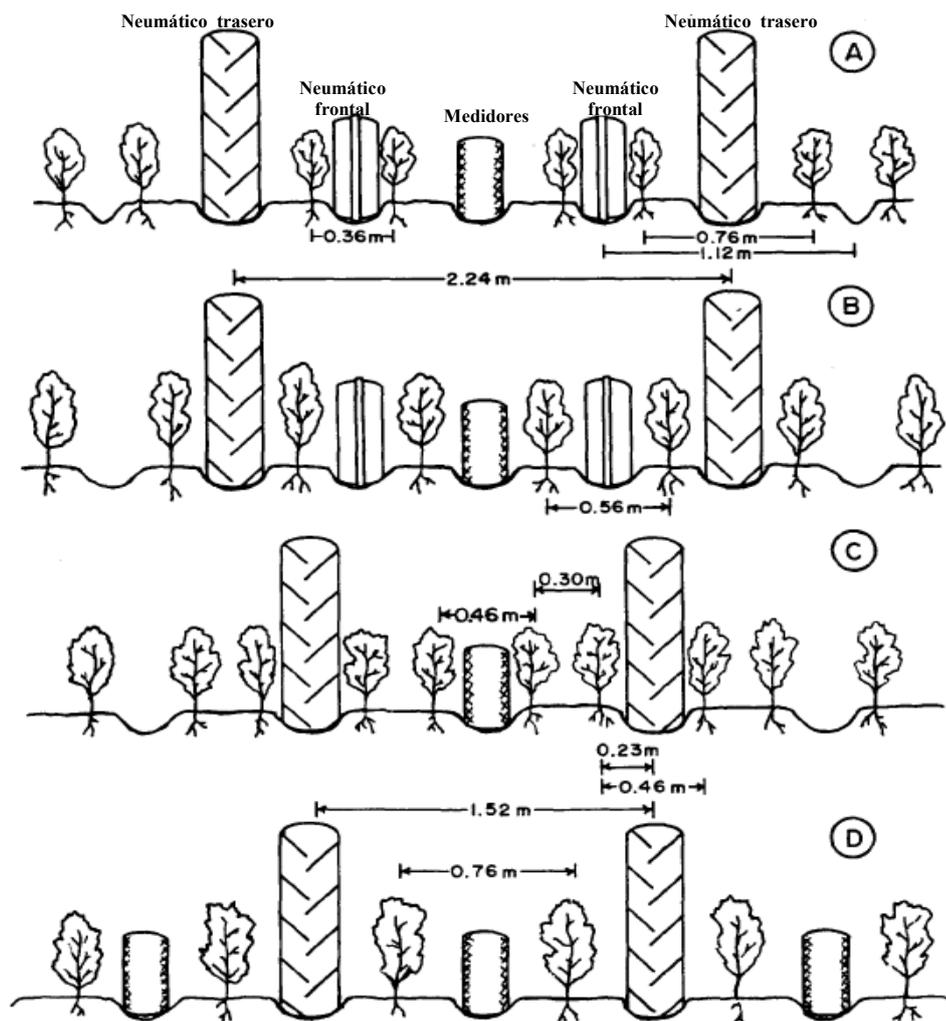


Figura 31. Esquema demostrativo de plantas, surcos, y situación de los neumáticos para cuatro propuestas de espaciamento utilizados. Los patrones son: A, filas doble de 1.12 m; B, fila sencilla de 0,56 m; C, fila doble de 0.76 m; D, fila sencilla de 0,76 m. (Sokja et al., 1992)

Aplicación

La cuenca del río Chirgua tiene usos principalmente agrícolas, aproximadamente un 88% del área se utiliza para este propósito, como se mostró en la Tabla 2.

Manejo Agrícola

El manejo agrícola se caracteriza mediante los siguientes tipos: manejo del agua, manejo del suelo y manejo de los cultivos; los cuales se describen a continuación:

a) Manejo del Agua. El agua empleada para el desarrollo de los cultivos proviene de tres fuentes: la lluvia, el escurrimiento superficial y la explotación de fuentes subterráneas mediante pozos. En algunos casos, el agua que se extrae desde las fuentes superficiales o subterráneas es almacenada temporalmente en una laguna adyacente al área de siembra, la cual tiene las siguientes dimensiones; desde 7 hasta 10 m de ancho, 30 a 40 m de largo, 2 a 3 m de profundidad. El agua que se emplea para el riego no recibe tratamiento químico.



Figura 32.Extracción del agua mediante captación directa desde el río Chirgua

Una vez que ingresa al área de cultivos, una parte del agua penetra en el suelo mediante el proceso de infiltración y otra escurre superficialmente hacia la salida de la parcela o granja; siendo su destino de disposición el río Chirgua. De acuerdo con el MPPAT, (2006) existen 120 equipos de bombeo y 43 pozos, más detalles se indican en el Anexo XLII.

b) Manejo del Suelo. El manejo del suelo durante las estaciones; seca y lluviosa se describe mediante los siguientes aspectos: (1) programación para la producción, (2) sistema de labranza.

b.1) Manejo del Suelo durante la Estación Seca. En la estación seca se lleva a cabo la producción de papas (*Solanum Tuberosum*) mediante la aplicación del agua a través de un sistema de riego.

Programación para la Producción. Generalmente, las actividades se realizan desde noviembre hasta marzo del siguiente año. En el mes de noviembre se realizan las siguientes actividades: incorporación de materia orgánica: mediante la trituración de los residuos que permanecen sobre el terreno desde la cosecha anterior (maíz), arado del terreno, nivelación y formación de surcos, siembra y fertilización. En el mes de diciembre, se inician las actividades de riego, se realiza el control de malezas y plagas. En enero y febrero, sólo se realizan actividades de aplicación de riego. En marzo, se aplica el riego durante tres semanas y se recolecta la cosecha la última semana.

Sistema de Labranza. Se aplica una labranza de surcos interconectados (labranza en pozas). Las siguientes actividades se llevan a cabo:

Incorporación de Materia Orgánica: los residuos de la cosecha de maíz son mantenidos sobre el terreno hasta que se inicia el ciclo de siembra de la papa durante la estación seca, cuya práctica se denomina *rastrojo o mulch de tallos*. Al inicio del ciclo de siembra de la papa, se realiza un pase de rotativa para triturarlos e incorporados a los suelos, con equipo tradicional (arado-rastra) para mejorar la estructura, infiltración y contenido de humedad. El porcentaje de incorporación de

los residuos al suelo es de 100, dejándolo con poca o ninguna protección superficial.

Arado: se realiza un pase de maquinaria para realizar un arado de discos hasta profundidades que varían entre 20 y 30 cm; mezclando los residuos de la cosecha anterior (maíz) con el suelo.

Nivelación: se realizan aproximadamente entre cuatro y seis pases con una rastra para fraccionar adecuadamente los terrones producidos por el arado. La rastra está provista con un dispositivo en forma de V para formar los surcos de un ancho aproximado de 30 cm. La profundidad de los surcos varía entre 12 y 15 cm (Figura 64).

Siembra: la colocación de la semilla se realiza a una profundidad que varía entre 12 y 15 cm, en el mismo pase en cual se forman los surcos, mediante la inclusión de la sembradora como un implemento del tractor (Figura 64).

Fertilización: se emplea un fertilizante compuesto, la fórmula que se suele utilizar es 12-12-17 SP, en forma granular; indicando que contiene 12% en peso de nitrógeno total (N), 12% en peso de fósforo asimilable (P_2O_5) y 17% de potasio soluble en agua. La sigla colocada al final (SP) indica que la fuente de potasio es el sulfato de potasio. La forma de la colocación es en bandas, mediante la cual el fertilizante se coloca a un lado de la semilla. Esta operación se efectúa con equipos especiales que colocan el fertilizante normalmente entre 7 y 10 cm al lado y entre 2 y 2.5 cm debajo de la semilla. La fertilización se realiza simultáneamente con la operación de la siembra.



Figura 33.Preparación de tierras y siembra simultánea

Formación de Pozas: luego de la siembra se forman interrupciones transversales de trecho en trecho para crear pozas de almacenamiento de agua, como se muestra en la Figura 34.

Riego: se aplica el riego por aspersión, colocando una tubería provista dispositivos de fijación de los aspersores, a lo largo de los surcos para el pase del tractor de neumáticos durante el ciclo de siembra. La cobertura de cada aspersor es de un radio de aproximadamente 12 m. Los surcos tienen longitudes entre 100 y 200 m de longitud.



Figura 34. Labranza de bordos o surcos

Control de Plagas y Malezas: se realiza al inicio del ciclo mediante la aplicación de productos químicos, más detalles se indican en el Anexo XLIII.

Cosecha: se realiza de forma semi-mecanizada, realizando al inicio un pase de rotativa para eliminar el follaje del cultivo y luego mediante la cosechadora se logra el afloramiento a la superficie del suelo, el resto de la cosecha es realizada manualmente (ensacado).



Figura 35. Actividades en la etapa de la cosecha

b.2) Manejo del Suelo durante la Estación Lluviosa. En la estación lluviosa se lleva a cabo la producción de maíz (*Zea Mays*); obteniendo el agua principalmente desde la lluvia.

Programación para la Producción. Generalmente, las actividades se realizan desde mayo hasta octubre del mismo año. En el mes de abril se realizan las siguientes actividades: se realiza nivelación y formación de surcos. En el mes de mayo, se siembra y fertiliza, se aplica riego durante las tres primeras semanas, se realiza el control de malezas y plagas. En los meses de junio a septiembre, se desarrolla el cultivo bajo lluvia. En octubre, se aplica se recolecta la cosecha.

Sistema de Labranza. Se aplica una labranza mínima. Las siguientes actividades se llevan a cabo:

Nivelación: se realizan aproximadamente tres pases con una rastra para fraccionar adecuadamente los terrones. La rastra está provista con un dispositivo en forma de V para formar los surcos de un ancho aproximado de 30 cm. La profundidad de los surcos varía entre 12 y 15 cm.

Siembra: la colocación de la semilla se realiza a una profundidad que varía entre 12 y 15 cm, en el mismo pase en cual se forman los surcos, mediante la inclusión de la sembradora como un implemento del tractor.

Fertilización: se emplea un fertilizante compuesto, la fórmula que se suele utilizar es 10-20-20 CP, en forma granular; indicando que contiene 10% en peso

de nitrógeno total (N), 20% en peso de fósforo asimilable (P_2O_5) y 20% de potasio soluble en agua. La sigla colocada al final (CP) indica que la fuente de potasio es el Cloruro de potasio. La forma de la colocación es en bandas, mediante la cual el fertilizante se coloca a un lado de la semilla. Esta operación se efectúa con equipos especiales que colocan el fertilizante normalmente entre 7 y 10 cm al lado y 5 cm debajo de la semilla. La fertilización se realiza simultáneamente con la operación de la siembra.

Riego: se aplica tres riegos por aspersión al inicio del ciclo de desarrollo.

Control de Plagas y Malezas: se realiza al inicio del ciclo mediante la aplicación de productos químicos, más detalles se indican en el Anexo XLIV.

Cosecha: se realiza de manual.

c) Manejo de los Cultivos

Se realiza rotación de cultivos, durante la estación seca se siembran papas y durante la estación lluviosa se siembra maíz. Durante cada estación, se siembra un solo tipo de cultivo.

Propuesta para el Manejo de la Erosión

Diversos métodos pueden ser aplicados para el control de la erosión, por lo tanto es conveniente que los mismos sean realizados siguiendo un diseño experimental que permita elegir la combinación que brinde beneficios, tanto en la producción como en el control de la erosión.

Propuesta N°1: se recomienda un sistema de tratamiento de aguas servidas con las siguientes características: 1) tratamiento con poliacrilamida del agua de riego, estanques para retención de los sedimentos presentes en la escorrentía a la salida del campo, 3) sistema de recirculación del sobrenadante del agua en los estanque de sedimentación hacia una laguna de almacenamiento temporal para el agua de riego y 4) un sistema para la deshidratación de lodos. Se requeriría realizar una inversión inicial para la adquisición del equipo de dosificación de la poliacrilamida y del producto, construcción de estanques de sedimentación y la

laguna de almacenamiento temporal del agua tratada y sistema de tratamiento de lodos provenientes de los estanques de sedimentación, tales como lechos de secado. Los costos fijos involucrarían; personal para mantenimiento del sistema, adquisición del producto y mantenimiento de los equipos de bombeo. Sin embargo, la operación del sistema puede ser altamente automatizado, por lo que no se requeriría aumentos significativos en la mano de obra.

Propuesta N°2: uso de cultivos múltiples, en los trópicos se suelen emplear combinaciones de maíz con frijoles (Guevara, 2004). Sin embargo, los cultivos en asociación no producen cosechas tan altas como si se sembrasen separadamente (monocultivos). Debido a la gran densidad y a otros problemas agronómicos, la mecanización se dificulta y aumentan los requerimientos de la mano de obra (Delgado, 1987).

Propuesta N°3: uso de cultivos en fajas, específicamente el tipo conocido como cultivo en bandas, empleando algún tipo de vegetación permanente, colocadas en la parte inferior de las parcelas en sentido transversal a la dirección del flujo. Sería un método efectivo ya que los terrenos poseen pendientes que, en su mayoría no superan el 12%, según Guevara, (2004). A pesar de que el sistema constituye un medio económico en la reducción de la erosión, su implementación trae consigo ciertas desventajas, tales como limitación en el uso de la maquinaria pesada, susceptibilidad de los bordos ya que quedan expuestos a plagas y enfermedad.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Para la estimación de la erosión en surcos se propone el modelo CIHAM-UC, el cual incluye ecuaciones ajustadas para los procesos de desprendimiento de partículas y transporte de sedimentos. La ecuación para la estimación de la capacidad de desprendimiento está representada por el modelo lineal basado en el esfuerzo cortante excedente. El modelo de transporte de sedimentos está representado por la ecuación ajustada de Simons, Li, Fullerton, (1981). Con base en este conocimiento se puede seguir una metodología centrada en criterios para la Conservación de Cuencas.

2. Mediante el modelo lineal de esfuerzo cortante excedente, se puede cuantificar la relación entre el esfuerzo cortante del flujo y el esfuerzo cortante crítico del suelo. La resistencia del suelo a las fuerzas erosivas se incrementa mejorando la estructura y la estabilidad del suelo (incorporación de materia orgánica o de otras sustancias químicas, como cal, yeso o fertilizantes, labores agrícolas). El impacto de caída de las gotas de lluvia sobre el suelo se reduce mediante una cobertura permanente que proteja a la superficie del suelo.

3. Mediante el modelo de transporte de sedimentos de Simons, Li Fullerton, (1981) se puede cuantificar la relación entre la lámina y la velocidad de lámina de agua que escurre en los surcos. La reducción de la fuerza erosiva del flujo se logra reduciendo el volumen de escorrentía superficial y la velocidad del flujo (uso de

mulch, construcción de barreras, cultivo en contorno, tanto surcos, como fajas y terrazas; uso de estructuras hidráulicas de retención, conducción y control).

4. El modelo de infiltración permite determinar la lámina y tiempo requerido de aplicación del agua a los cultivos bajo diferentes condiciones de humedad y tipos de suelo. La ecuación que mejor se ajustó a las observaciones fue la de Horton.

5. Los modelos de lluvia-escorrentía basados en regresiones permiten estimar las tasas de escorrentía dentro de eventos de lluvias de 1 y 2 horas. Estos modelos constituyen herramientas para estimar la magnitud del proceso de infiltración y permiten caracterizar la situación actual de acuerdo con las prácticas de labranza en los campos agrícolas y diseñar medidas de control de la escorrentía.

6. Se recomienda aplicar las técnicas de inteligencia artificial cuando se disponga de escasa información, requiriendo sólo el conocimiento de las variables de entrada y salida del sistema de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackers, P., White, W. (1973). Sediment transport: New approach and analysis. *J. Hyd. Div. ASCE*, 99, no HY11: 2401-60.
- Aksoy, H., Kavvas L., (2003). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport model. *Catena* 64, pp 247-271.
- Archila A., Hernández D., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector El León. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo.* Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Araujo J., Mata F., (2009). *Caracterización espacial de propiedades físicas de suelo. Cuenca del río Chirgua-Sector El León, Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Período húmedo 2008.* Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo República Bolivariana de Venezuela.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (1995) Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, United States of America, Washington, DC, 19th Edition. 2–53.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2007) *Standard Test Methods for particle-size analysis of soils.* American Society for Testing and Materials International, United States of America, West Conshohocken. (Reapproved 2007), 1–8.
- Adelpour, A.A., Soufi, M. & Behnia, A.K. (2004) Channel erosion thresholds for different land uses assessed by concentrated overland flow on a silty loam. *Proc. International Soil Conservation Organisation Conference.* Brisbane, Australia.
- Alonso C.V., Neibling, W.H. & Foster, G.R. (1981) Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Trans. ASAE* 24(5), 1211–1220.
- Anselin, L. (1995). Local Indicator of Spatial Association-LISA. *Geographical Analysis*, 27(2): pp. 93-115.
- Alonso CV, Neibling WH, Foster GR. 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Transactions of the ASAE* 24(5): 1211–1220, 1226.
- Álvarez S., Chaivez E., Latuff A. (2008). *Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1%.* Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- Auerswald, K. and Schmidt, F. (1986). *Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen*, GLA-Fachberichte 1, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- Bagnold, R.A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US Geological Survey Paper 422, Washington. 1966.
- Bárcenas E., M., Angola A., (2010). *Validación de modelos matemáticos de infiltración. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Bagnold, R. A. (1956). Experiments on gravity – free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. Roy. Soc. Lond.* A225: 49-63.
- Basna S., Da Silva S., Araujo E., (2008). *Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 13%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo República Bolivariana de Venezuela.
- Bathurst JC, Lukey B. 1998. Modelling badlands erosion with SHETRAN at Draix, southeast France. *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes*, Summer W, Klaghafer E, Zhang W (eds). *IAHS Publication no. 249*. IAHS: Wallingford; 129–136.
- Betancourt D., Rendón, J. (2008). *Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Beer, C.F., y Johnson H.P. (1993). Factors in gully growth in the deep loes area of Western Iowa. *Tran. ASCE* 6: 237-240.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F. and Monke, E. J. (1982). ANSWERS: A model for watershed planning, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **23**, 938–944.
- Beven K, Freer J. 2001. A dynamic TOPMODEL. *Hydrological Processes* **15**: 1993–2011. Copyright 2003 John Wiley & Sons, Ltd.
- Brakensiek DL, Engleman RL, Rawls WJ. (1981). Variation within texture classes of soil water parameters. *Transactions of the ASAE* **24**(2):335–339.

- Bishop, C. M. (1994). Neural networks and their applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 65, 1803–1832.
- Brochet S, Meunier M. 1995. Erosion de badlands dans les Alpes du sud: synth`ese. In Meunier M (ed.). *Compte-Rendu de recherches n°3:BVRE de Draix, Equipements pour l'eau et l'environnement* no. 21. Cemagref-Editions: 141–174.
- Bjorneberg, D.L., Trout, R.E., Sojka, R.E. & Aase, J.K. (1999) Evaluating WEPP predicted infiltration, runoff and soil erosion for furrow irrigation. *Trans. ASAE* 42(6), 1733–1741.
- Boschi, V., Chisci, G. and Ghelfi, R. (1984). 'Effeto regimante del medicaio sul ruscellamento delle acque e l'erosione del suolo negli avvicendamenti collinari', *Agronomia*, 18(3/4), 199–215.
- Bulygin SY, Nearing MA, Achasov AB. (2002). Parameters of interrill erodibility in the WEPP model. *Eurasian Soil Science* 35(11): 1237– 1242.
- Bulygina, N. S., Nearing, M. A., Stone J. J., and Nichols M. H. (2006) DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms. *Earth Surface Processes and Landforms*. DOI: 10.1002/esp.1467.
- Briggs, D. and Giordano, A. (1992). *CORINE: soil erosion risk and important land resources*, Commission of the European Communities, Brussels, Publication No. EUR 13233 EN.
- Brooks, R. H., and Corey, A. T., (1964) "*Hydraulic Properties of Porous Media*," Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colo.,
- Brutsaert, W., "Some Methods of Calculating Unsaturated Permeability,"*Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 10, No. 3, 1967, pp. 400-404.
- Boschi, V. y Chisci, G. (1978). Influenza delle colture e delle sistemazioni superficiali sui deflussi e l'erosione in terreni argillosi di collina, *Genio Rurale*, 41(4), 7–16.
- Castro A., Peraza R., Lacau C., (2008). *Comparación De Modelos De Erosión Hídrica En Una Parcela Agrícola Ubicada En El Sector Potrerito. Cuenca Alta Del Rio Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Caso De Estudio: Ciclo*

De Maíz(zea Mays). Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Carter, D.L., R.D. Berg and B.J. Sanders. (1985). The effect of furrow irrigation erosion on crop productivity. 49(1):207-211.

Carter, D.L. (1990). Soil erosion on irrigated lands. In: Irrigation of Agricultural Crops, Ch. 37, Agronomy 30. pages 1143-1171. B.A. Stewart and D.R. Nielson, eds., Am. Soc. Agronomy, Madison, WI.

Carter, D.L. (1993). Furrow erosion lowers soil productivity. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.119:964-974.

Carter, D.L., C.E. Brockway, and K.K. Tanji. (1993). Controlling erosion and sediment loss from furrow-irrigated cropland. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 119:975-988.

Cahoon J. (1998). Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **124**(2): 127–130.

Chisci, G., Boschi, V. and Ghelfi, R. (1985). Ruscellamento superficiale ed erosione nei terreni declivi, *Genio Rurale*, **48**(10), 21–31.

Collis-George N. (1977). Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resources Research* **13**(2): 395–403.

Córdova Y., Jiménez J. M., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Casupito. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Venezuela.

Colby, B. R., (1964 a). Discharge of sands and mean velocity relationships in sand-bed streams. Professional paper 462-A. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey.

Colby, B.R. (1964 b). Practical computations of bed material discharge. *J. Hyd. Eng.*, 90, no. HY2: 217-46

Chacón Ch., Segura F., Sandoval A., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Cariaprima. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de República Bolivariana de Venezuela.

Da Graca E., Saturno Y., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Cariaprima. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*.

Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Demuth, H., Beale, M., Hagan, M., (2009). *Neural Network Toolbox. User Guide. MATLAB.*

Delgado F., (1987). *Prácticas Agronómicas de Conservación de Suelos.* Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida. Venezuela.

De Ploey, J. (1986). Soil erosion and possible conservation measures in loess loamy areas, in Chisci, G. and Morgan, R. P. C. (Eds), *Soil Erosion in the European Community: impact of changing agriculture*, Balkema, Rotterdam, 157–163.

Delgado E., Espinoza L., Peña E. (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan El Transporte De Sedimentos en una Parcela Agrícola ubicada en el Sector La Paredaña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De Pendiente* República Bolivariana de Venezuela.

De Roo APJ, Wesseling CG, Ritsema CJ. 1996. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. *Hydrological Processes* **15**: 1107–1117.

Diluigi S., Adragna M., Hernandez R., (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan erosión en una Parcela Agrícola ubicada en el Sector La Paredaña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De Pendiente Longitudinal 1%.* Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Desmet PJJ, Govers G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* **51**: 427–433.

Dubois, MP (1879). Etude du régime du Rhone et de l'action exercée par les eaux sur un lit á fond de graviers indéfiniment affouillable. *Ann. Ponts et Chaussées*, ser. 5 : 149-95.

Einstein, H. A. y Chien N. (1955). Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution. MRD Seriesno 8. Berkeley : University of California : Institute of Engineering Research : Omaha, Neb : U.S. Army

Engelund, F., Hansen, E., (1967) *A Monograph on Sediment Transport to Alluvial Streams.* Copenhagen : Teknik Vorlag

- Elliot, W. J., Laflen J.M, Kohl, K.D. (1989). Effect of soil properties on soil erodability. Paper N° 892150, American Society of Agricultural Engineers St. Joseph, Michigan.
- FAO, 2008. *The State of Food Insecurity in the World 2008*. FAO, Rome.
- Figueredo J., Rosillo E., (2009). *Caracterización espacial de propiedades físicas de suelo. Cuenca del río Chirgua-Sector La Colonia, Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Período húmedo 2008*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Venezuela
- Flanagan DC, Ascough JC, Nearing MA, Laflen JM. (2001). The Water Erosion Prediction Project model. In *Landscape Erosion and Evolution Modelling*, Harmon RS, Doe WW (eds) Kluwer: New York; pp 145–199.
- Flanagan DC, Nearing MA, eds. (1995). *USDA–Water Erosion Prediction Project (WEPP), Hillslope Profile and Watershed Model Documentation Technical Documentation*, NSERL Report 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, IN.
- Foster, G. R. (1990). Major developments in prediction of soil erosion by water. In: Soil Management for Sustainability (R. Lal and F. J. Pierce, eds.) *Soil and Water Conservation Society*, Ames, Iowa.
- Foster, G. R., Lane, L. J., (1987). User Requirements: USDA-WEPP (Draft 6.3). *National Soil Erosion Research Laboratory*, West Lafayette, Ind
- Foster GR, Young RA, Neibling WH. (1985). Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. *Transactions of the ASAE* **28**(1):133–139.
- Foster, G.R., (1982). Modeling the erosion process. In: Hahn, C.T. (Ed.), *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, pp. 295–380.
- Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M. and Young, R. A. (1981). Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **24**, 1253–1263.
- Foster, G. R., Meyer, L. D., (1975). Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics, pp. 190-207. *Present and Prospective Technology for predicting Sediment Yields and Sources*, ARS-S-40, USDA, Washington.
- Foster, G.R., Meyer, L.D., (1972). Transport of particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE* 15 (1). pp 99–102.

- Foster GR, Wischmeier WH. (1974). Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Transactions of ASAE* 17: 305–309.
- Flanagan DC, Ascough JC, Nearing MA, Laflen JM. (2001). The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. In *Landscape Erosion and Evolution Modelling*, Harmon RS, Doe WW (eds). Kluwer Academic: New York; 145–199.
- Getis A., and K. Ord. (1992). The Analysis of Spatial Association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*. (24): 189-206.
- Guevara, Y., Gaeta L., (2009). *Caracterización espacial de propiedades físicas de suelo. Cuenca del río Chirgua-Sector El León, Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Período húmedo 2008*. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Venezuela
- Guevara, E., Márquez, A., (2009). Modelación de la erosión y transporte de sedimentos en un campo agrícola bajo riego. *Tecnología y Ciencias del Agua*. México. (Actualmente en revisión)
- Guevara, E. Cartaya H. (2004). *Hidrología Ambiental*. Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad de Carabobo.
- Guevara, E. (2000). *Sistemas de conservación y rehabilitación de cuencas*. Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Guevara, E. (1997). Manejo Integrado de Cuencas. Documento de Referencia para los Países de América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Santiago, Chile. 542 pp.
- Guerrero J., (2009). *Elaboración De Un Modelo Matemático De Infiltración Basado En Propiedades Físicas De Suelo. Cuenca Del Río Chirgua. Municipio Bejuma. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Gómez J., González J., Terán J., (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan El Transporte erosión en una Parcela Agrícola Ubicada En El Sector La Paredeña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De Pendiente Longitudinal 1,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- Grayson, R. B., Moore, I. D., and McMahon, T. A. (1992). “Physically based hydrologic modeling—2. Is the concept realistic?” *Water Resour. Res.*, 28(10), 2659–2666.
- Green WH, Ampt CA.(1911) Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4: 1911. pp 1–24.
- Grigorjev VY, Iritz L. (1991). Dynamic simulation model of vertical infiltration of water in soil. *Journal of Hydrological Sciences* 36(2): 171–179.
- Govers, G. (1990). *Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow*, International Association of Hydrological Sciences, Publication 189, 45–63.
- Govers, G. (1987). Spatial and temporal variation in rill development processes at the Huldenberg experimental site, *Catena Supplement*, 8, 17–34.
- Guillen, J., Silva, O., (2005). Determinación de las prioridades de atención conservacionistas según los riesgos de erosión potencial y actual en la cuenca media del río Pao y Estados Carabobo y Cojedes. Trabajo Especial de Grado Universidad Central de Venezuela. República Bolivariana de Venezuela.
- Hernández, R., Fernández C., Baptista P., (2004). *Metodología de la investigación*. (3ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Hernández, A., Griffin S. (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan El Transporte De Sedimentos En Una Parcela Agrícola Ubicada En El Sector La Paredaña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De Pendiente Longitudinal 1,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Horton RI. (1938). The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. *Soil Science Society of America Proceedings* 3: 340–349.
- Holtan HN. (1961). *A concept of infiltration estimates in watershed engineering*. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
- Holtan, H.N., Stiltner, G.J., Hanson, W.H., y López N. C., (1985). USDAHL-74 revised model of watershed hydrology. USDA-ARS. Tech. Bull N° 1518.
- Hodgson, J.M. (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. España: Editorial Reverté.
- Hough, B., (1957). *Basic Soil Enigneering*, Ronald Press., New York.

- Huggins LF, Monke EJ. (1966) *The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds*. Technical Report No. 1, Purdue Water Resources Research Centre, Lafayette.
- Jain, A., and Ormsbee, L. E. (2002). Evaluation of short-term water demand forecast modeling techniques: Conventional v/s artificial intelligence. *J. Am. Water Works Assoc.*, 94 64–72.
- Jain, A., and Prasadt KV. (2003). Comparative analysis of event based rainfall-runoff model techniques –determinist, statistical and artificial neural networks- . *J. of Hydrologic Engineering.*, (8) 93–98.
- Jäger, S. (1994). Modelling regional soil erosion susceptibility using the universal soil loss equation and GIS, in Rickson, R. J. (Ed.), *Conserving Soil Resources: European Perspectives*, CAB International, Wallingford, UK, 161–177.
- Jetten V, De Roo APJ. (2001). Spatial analysis of erosion conservation measures with LISEM. In *Landscape Erosion and Evolution Modelling*, Harmon RS, Doe WW (eds). Kluwer Academic: New York; 429–445.
- Jetten V., Govers G., Hessel R.,(2003). Erosion Model: quality of spatial prediction. *Hydrol. Process.* **17**, 887–900. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1168.
- Julien, P. (1995). *Erosion and sedimentation*. University of Cambridge. New York.
- Juarez, E., Rico A., (1991). *Mecánica de los Suelos*. Tomo I. Edistorial Limusa. Mexico.
- Karim, F., Kennedy J. F., (1983) Computed based predictor for sediment discharge and friction factor of alluvial streams. Report no 242. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa.
- Kalisnke, A. A., (1942). Criteria for determining sand transport by surface creep and saltation. *Trnas. AGU*, 23, part 2: 639-43
- Kincaid DC, Heerman DF, Kruse EG. (1969). Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE* **12**(6): 790.
- Knapen A., Poesen J., Govers G., Gyssels G., Nachtergaele J., (2007). “Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review”. *Earth-Science Reviews* 80 (2007) 75–109.

- Knisel, W. G. (Ed.). (1980). *CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*, USDA Conservation Research Report No. 26.
- Knisel WG. (1991). CREAMS/GLEAMS: a development overview. In *Proceedings of the CREAMS/GLEAMS Symposium*, Beasley DB, Knisel WG, Rice AP (eds). Publication 4, Agricultural Engineering Department, University of Georgia, Athens, GA, USA; 9–17.
- Klik A, Savabi MR, Norton LD, Baumer O. (1995). Application of WEPP hillslope model on Austria. *Proceedings of the 31st Annual Conference of the American Water Resources Association (AWRA)*, 'Water Management in urban areas'. Houston, Texas: 313–322.
- Kostiakov AN. (1932) On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils. In *Sixth Commission, International Society of Soil Science, 1932. Part A*; 15–21.
- Koluek, P.K., Tanji, K.K. & Trout, T.J. (1993) Overview of soil erosion from irrigation. *J. Irrig. Drainage Engr. ASCE* 119(6), 929–946. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:6\(929\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:6(929)).
- Lambe, W., Whitman R., (1994). *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa. México.
- Larson, W.E., G.R. Foster, R.R. Allmaras and C.M. Smith (eds.). 1990. Proceedings of Soil Erosion and Productivity Workshop. University of Minnesota, St. Paul. 142 pages
- Laflen JM, Flanagan DC, Ascough JA, Weltz MA, Stone JJ. (1994). The WEPP model and its applicability for predicting erosion on rangelands. In *Variability of Rangeland Water Erosion Processes*, SSSA Special Publication 38.
- Laflen, J.M., J. Lane and G.R. Foster. (1991). The water erosion prediction project--a new generation of erosion prediction technology. *J. Soil and Water Conserv.* 46:34-38.
- Lal, R. (1990). *Soil erosion in the tropics. Principles and Management*. McGraw Hill. United States.
- Lal, R (1994). *Soil erosion research methods*. Second Edition. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Florida. United States.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Develop.* 12: 519-539. DOI: 10.1002/ldr472.

- Lei, T.W., Nearing, M.A., Haghighi, K., Bralts, V.F. (1998). Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. *Water Resources Research* 34 (11), 3157–3168.
- Lobo, D., Lozano Z., Delgado F., (2005) Water erosion assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena* 64: 297-306
- Leañez A., (2010). *Comparación espacial de propiedades físicas del suelo en la cuenca del río Chirgua. Municipio Bejuma. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Linares G., Morgado E. (2008) *Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredeña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- López M., De Ornelas I., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector La Colonia. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- López, A., Marín, C, Rojas Y. (2008). *Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredeña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 0,8%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Lugo, D., Ortega F., Ramos R. (2008). *Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredeña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- MacKenzie, Debora. 2008. The 21st-century land grab. *New Scientist*, 6 December 2008, p. 8.
- Machado A., León F., (2010). *Comparación De Patrones De Escorrentía En Parcelas Agrícolas Ubicadas En El Sector La Paredeña. Cuenca Del Río Chirgua-Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
- Manrique, O., Velásquez Y., Gómez Y (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredeña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- MATLAB. (2010). Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. The Mathworks Inc.
- Mantel, N. (1967). The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research* (27): 209- 220
- Mein RG, Larson CL. (1971). Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process. *WRRC Bull. 43*, Water Resources Research Center, University of Minnesota, Minneapolis.
- Meyer-Peter, E., and R. Müller (1948). Formulas for bed load transport. *Proc. 2d Meeting IAHR*, stockholm, pp. 39-64.
- Meyer, L.D., Wischmeier W.H., (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Tran. Am. Soc. Agric. Eng.* 12(6): 754-758, 762 e.
- Mishra SK, Tyagi JV, Singh VP. (2003). Comparison of infiltration models. *Journal of Hydrological Processes*, **17**, 2629–2652
- Mishra SK, Singh VP. (2002) *SCS-CN-based hydrologic simulation package*. In *Mathematical Models in Small Watershed Hydrology*.
- Mishra SK, Kumar SR, Singh VP. (1999). Calibration of a general infiltration model. *Journal of Hydrological Processes* **13**: 1691–1718.
- Mishra SK, SINGH VP. (1999). Another look at the SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* **4**(3): pp 257–264.
- Mishra SK. (1998) *Operation of a multipurpose reservoir*. Unpublished PhD thesis, University of Roorkee, Roorkee.
- Misra, R. K. and Rose, C. W. (1992). *A guide for the use of erosion-deposition programs*, Department of Earth Sciences, Griffith University, Australia.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, Instituto Nacional de Desarrollo Rural. (2006). *Proyecto de Desarrollo Rural del NUDE, Valle de Chirgua-Estado Carabobo*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2001). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2000*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2002). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2001*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2003). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2002*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2004). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2003*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2005). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2004*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2006). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2005*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2007). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2006*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2008). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2007*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2009). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2008*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ministerio de Agricultura y Tierras, (2010). *Plan de siembra del Estado Carabobo en 2009*. Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Morillo J., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el sector potrerito- cuenca del río Chirgua, municipio Bejuma - Estado Carabobo. Período húmedo 2008*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Morillo K., Morey R., (2009). *Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En El Sector La Colonia, Cuenca Del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Muñoz H., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector El León. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald K, Chisci G, Torri D, Styczen ME. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM):

a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* **23**(6): 527–544.

Naciones Unidas, (1992). Agenda 21. [Documento en línea]. Disponible: www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish. [Consulta, 2010, Mayo 30].

Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC. (1989). A process-based soil erosion model for USDA–Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE* **32**(5): pp 1587–1593.

Nearing MA, Bulygin SY, Kotova MM. (1998). Primary verification and adaptation of the WEPP model for Ukrainian conditions: problems, possible solutions, and perspectives. *Pochvovedenie* **31**(1): 96–99.

Nearing MA. (2000). Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surface Properties and Landforms* **25**: 1035–1043.

Niño J., Páez K. (2010). *Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Período 2009. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

O’Brien, M.P., Rindlaub, B.D.. (1934). The transportation of bed-load by streams. *Trans. Am. Geophys. Union* **15**, pp. 593–603.

Overton DE. (1964). Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. ARS 41–99, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.

Ogden FL, Sagafian B. (1997). Green and Ampt infiltration with redistribution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **123**(5): 386–393.

Oviedo H., Mora J. Quintero M. (2008). *Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 2,5%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Panigrahi D. P., Mujundar P. P., (2000). Reservoir operation modelling with fuzzy logic. *Water Resource Management*. **14**: 89–109.

Peraza Y., Ramos J., Silva, J. (2008) *Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La*

Paredaña-zona de pie de monte de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 13%. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Pérez, U., y López, R., (2000). *Estudio preliminar de la erosión hídrica en un inceptisol de los Andes Venezolanos bajo uso agrícola*. Mérida, Venezuela: Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes. República Bolivariana de Venezuela.

Philip JR. (1957). Theory of infiltration. *Soil Science* **83**(5):. pp 345–357.

Philip JR. (1969) *Theory of infiltration*. In *Advances in Hydrosience*, Chow VT (ed.). Academic Press: New York; 1969. pp 215–296.

Pla Sentis, I. (1977). *Metodología para la caracterización física de diagnostico de problema de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales*. Venezuela: Universidad Central de Venezuela. República Bolivariana de Venezuela.

Pérez G., Mendoza L., (2009). *Evaluación De Los Procesos Hidrológicos Y Patrones De Escorrentía Sobre Las Predicciones De Un Modelo Hidrológico*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

Pimentel, D. (1993). *World soil erosion and conservation*. Cambridge Univ. Press.

Puertas E., Urbina J., Blanck E., Granadillo D., Blanchard M., García J.A., Vargas P., Chiquito A., (1998). *Bioestadística. Herramienta de la investigación*. Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad de Carabobo.

Quinton., J.N., Rodríguez, F., (1999). Modelling the impact of live barriers on soil erosion in the Pairumani sub-catchment, Bolivia, *Mt. Res. Dev.* 19, 292-299.

Quintero A. y Altamiranda, K., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. Venezuela

Ranieri SBL, Sparovek G, Demaria IC, Flanagan DC. 1999. Erosion rate estimation using USLE and WEPP on a Brazilian watershed. In *Proceedings of 10th International Soil Conservation Organization Conference*. West Lafayette, IN.

- Raglione, M., Sfalanga, M. and Torri, D. (1980). Misura dell'erosione in un ambiente argilloso della Calabria, *Annali dell' Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo*, **11**, 159–181.
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Miller N. (1983). Green–Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering* **109**(1): 62–70.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC. (1997a). *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, USDA Agricultural Handbook 703. US Government Printing Office: Washington, DC.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP. (1997b). RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation* **49**(3): 213–220.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal Soil and Water Conservation* **46**(1): 30–33.
- Refsgaard JC, Storm B. 1995. MIKE SHE. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed.). Water Resources Publications: Colorado, USA.
- Risse LM, Nearing MA, Nicks AD, Laflen JM. (1993). Assessment of error in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal* **57**: 825–833.
- Richter, G. (1983). Aspects and problems of soil erosion hazard in the EEC countries, in Prendergast, A. G. (Ed.), *Soil Erosion*, Commission of the European Communities Report No. **EUR 8427 EN**, 9–17.
- Richter, G. (1980). On the soil erosion problem in temperate humid area of Central Europe, *Geo Journal*, **4**, 279–287.
- Richter, G. (1979). *Bodenerosion in Reblagen des Moselgebietes Ergebnisse quantitativer Untersuchungen 1974–1977*, Universität Trier Forschungsstelle Bodenerosion, Mertesdorf, Heft 3.
- Rincon W., (2009). *Validación De Un Modelo Matemático De Infiltración Basado En Propiedades Físicas De Suelo. Cuenca Del Río Chirgua. Municipio Bejuma. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- Rivera, F., Soto G., Ortiz L., Berezowski M., (2004). Modelo numérico bidimensional de fondo móvil con cambio granulométrico. Ingeniería Hidráulica en México. Julio-Septiembre,
- Rodríguez A., Rivero J., Reyna J., (2008). *Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 0,8%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Rodríguez J., Cedeño D., (2010). *Comparación De Patrones De Escorrentía En Parcelas Agrícolas Ubicadas En El Sector Potrerito. Cuenca Del Río Chirgua-estado Carabobo* . Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Rubio, J. L. (1988). Erosion risk mapping in areas of the Valencia Province (Spain), in Morgan, R. P. C. and Rickson, R. J. (Eds), *Erosion Assessment and Modelling*, Commission of the European Communities Report No. **EUR 10860 EN**, 25–39.
- Rose, C. W., Williams, J. R., Sander, G. C. and Barry, D. A. (1983). A mathematical model of soil erosion and deposition processes. 1. Theory for a plane element, *Soil Science Society of America Journal*, **47**, 991–995.
- Rode AA. (1965). *Theory of Soil Moisture*, Vol. 1 (translated from Russian). Published for USDA and NSF by the Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1969.
- Sánchez J., Sortino C., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Tesis de Grado. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Santana J., Márquez S, Quintana E (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan El Transporte De Sedimentos En Una Parcela Agrícola Ubicada En El Sector La Paredaña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De* República Bolivariana de Venezuela.
- Santana N., Tovar O., Arellano K., (2009). *Evaluación De Los Factores Que Originan El Transporte De Sedimentos En Una Parcela Agrícola Ubicada En El Sector La Paredaña, Cuenca Del Río Chirgua, Periodo 2009. Caso: Suelos De Pendiente Longitudinal 13%*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Savabi MR, Klik A, Grulich K, Mitchell JK, Nearing MA. (1996). Application of WEPP and GIS on small watersheds in USA and Austria. In.

- SCS (1956). *Hydrology*. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Santoro VC, Amore E, Modica C, Nearing MA. (2002). Application of two erosion models to a large Sicilian basin. In *Proceedings of the Third International Congress of European Society for Soil Conservation*, Valencia.
- Sfalanga, M. and Franchi, R. (1978). Relazioni tra carica solida in sospensione, caratteristiche fisiografiche e sollecitazioni energetiche in due piccoli bacini idrografici (Botro dell'Alpino Valdera), *Annali dell' Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo*, **9**, 183–201.
- Silva W., Sifontes C., (2009). Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Potrerito. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Singh VP, Yu FX. (1990). Derivation of infiltration equation using systems approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE **116**(6): 837–857.
- Simons D. B., Li R. M., Fullerton L. (1981). Theoretically derived sediment transport equations for Pima County, Arizona. Prepared for Pima County DOT and Flood Control District, Tucson, Ariz. Ft Collins, Colo.:
- Smith, R. E., Goodrich, D. and Quinton, J. N. (1995). 'Dynamic distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS2 and EUROSEM models', *Journal of Soil and Water Conservation*, **50**, 517–520.
- Smith RE, Parlange J-Y. (1978) A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, **14**(3): pp 533–538.
- Smith RE. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *Journal of Hydrology* **17**: pp 1–21.
- Schmidt J, Werner V, Michael A. (1999). Application of the EROSION 3D model to the Catsop watershed, The Netherlands. In *Modelling of Soil Erosion by Water on a Catchment Scale*, De Roo APJ (ed.). *Catena* **37**(3–4): 449–456.
- Schen, H.W., Hung C.S, (1972). An engineering approach to total bed material load by regression analysis. Proc. Sedimentation Symposium, ed. H W. Shen, Berkeley, Calif.: Water Resource Pub. Chap., 14.

- Schwertmann, U. (1986). Soil erosion: extent, prediction and protection in Bavaria, in Chisci, G. and Morgan, R. P. C. (Eds), *Soil Erosion in the European Community: impact of changing agriculture*, Balkema, Rotterdam, 185–200.
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil survey manual. Soil Conservation Service*. [Documento en línea]. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Disponible: <http://soils.usda.gov/technical/manual/>. [Consulta: 2010, Mayo 30]
- Takken, I., Govers G., Jetten V., Nachtergaele J , Steegen A, Poesen J., (2005). The influence of both process descriptions and runoff patterns on predictions from a spatially distributed soil erosion model. *Earth Surf. Process. Landforms* **30**, 213–229. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). **DOI:** 10.1002/esp.1176
- Terzaghi, K., y Peck, R., (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2da Ed. John Wiley and Sons, Nueva York.
- Trejo G., Pérez J., Seijas E., (2009). *Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En El Sector La Colonia, Cuenca Del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Periodo Seco 2009*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Tropeano, D. (1984). Rate of soil erosion processes in vineyards in Central Piedmont (NW Italy), *Earth Surface Processes and Landforms*, **9**, 253–266.
- Toro E., Zamora R., (2008). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo*. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Trout, T.J. & Neibling, W.H. (1993) Erosion and sedimentation processes on irrigated fields. *J. Irrig. Drainage Engr. ASCE* **119**(6), 947–963. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:6\(947\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:6(947)).
- Trout, T.J. (1999) *Sediment transport in irrigation furrows*. In: Sustaining the Global Farm: Selected Papers from the 10th Intl. Soil Conservation Organization Meeting, 710-716. In: Stott, D.E., Mothar, R.H. & Steinhardt, G.C. (eds.) West Lafayette, Ind.: Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Torri D, Regués D, Pellegrini S, Bazzoffi P. (1999). Within-storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms. *Catena* **38**: 131–150.
- US Army Corps of Engineers (2001). *Geotechnical investigations*. [Documento en línea]. Department US Army Corps of Engineers. Disponible:

<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-1804/toc.htm>.
[Consulta:2010, Mayo 30]

- Velásquez L., (2010). *Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En Una Parcela En El Sector La Paredaña- Cuenca Del Rio Chirgua, Municipio Bejuma*. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Veihe, A., Rey, J., Quinton, J.N., Strauss, P., Strauss, P., Sancho, F.M., Somarriba, M. (2001). Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. *Catena* 44, pp 187-203.
- Vivas R., Petit J., Palacio A., (2010). *Validar modelos matemáticos de infiltración en el sector La Paredaña, Cuenca alta del río Chirgua en el Municipio Bejuma*. República Bolivariana de Venezuela.
- Watson, D.A., y Laflen J.M., (1986). Soil strenght, slope and rainfall intensity effects on interrill erosion, *Trans., ASAE* 29: 98-102.
- Williams, J. R, Brendt (1972). Sediment yield computed with Universal Equation. *Pro. Am. Soc. Civil Eng.* 98 (HY12): 2087-2098.
- Williams, J.R. (1975). Sediment yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In “Present and Prospective Technology for Predicting Sediments Yields and Sources”. Publications ARS-S-40, USDA, pp. 244-252.
- Williams, J.R., Laseur W.V (1976). Water yield model using SCS curve numbers. *Proc. ASCE, J. Hydraulic Division*, 102: 1241-1253.
- Williams, J. R., (1978). A sediment yield routing model. In “Proc. Am. Soc. Civil Eng. Conference”, Verification of mathematical and physical models in hydraulic engineering. Pp 662-670. *Am. Soc. Civil Eng. New York*.
- Williams JR. (1985). The physical components of the EPIC model. In *Soil Erosion and Conservation*, El-Swaify Sa, Moldenhauer WC, Lo A (eds). Soil Conservation Society of America: Ankeny, IA; 272–284.
- Wicks, J.M., Bathurst, J.C., Shessed. (1996). A physically-based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE. hydrological modelling system. *Journal of Hydrology* 175, 1996. pp 213–238.
- Wischmeier WH, Smith DD., (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions – American Geophysical Union* 39(2): pp 285–291.

- Wischmeier, W.H., Smith D.D., (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Woolhiser D.A., Smith R.E., Goodrich D.C. KINEROS, (1990). a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual, ARS- 77. USDA-ARS.
- Woolhiser, D. A. (1969). Overland flow on a converging surface. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **12**, 460–462.
- Woolhiser, D. A. and Liggett, J. A. (1967). ‘Unsteady one-dimensional flow over a plane – the rising hydrograph’, *Water Resources Research*, **3**, 753–771.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. and Goodrich, D. C. (1990). *KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*, USDA Agricultural Research Service **ARS-77**.
- Yan, L.J., Yu, X.X., Lei, T.W., Zhang Q.W., Qu L.Q. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: A model study using the finite element method. *Geoderma* 146: 628-633, 2008.
- Yalin YS. (1963). An expression for bed-load transportation. *Journal of Hydraulics Division ASCE* **89**(HY3): 221–250.
- Yang, C. S., (1973). Incipient motion and sediment transport. *Hyd. Div. ASCE*, 99, no. HY10:16079-1704.
- Zhang, B., and Govindaraju, S. (2000). Prediction of watershed runoff using Bayesian concepts and modular neural Networks. *Water Resour.Res.*, 36(3), 753–762.
- Zhang XC, Nearing MA, Risse LM, McGregor KC. (1996). Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the ASAE* **39**(3): 855–863.
- Zelege G. (1999). Application and adaptation of WEPP to the traditional farming system of the Ethiopian highlands. In *Proceedings of 10th International Soil Conservation Organization Conference*, West.

ANEXO I

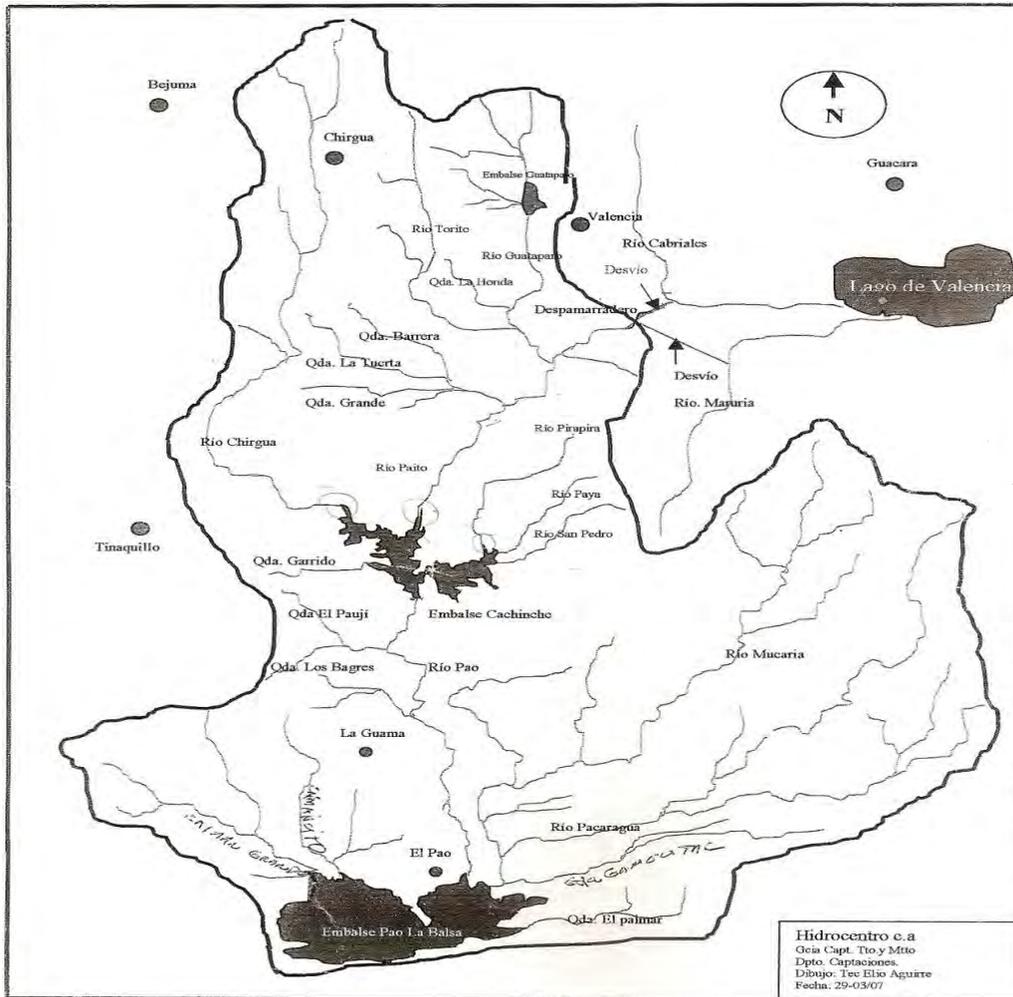


Figura 1. Cuenca del embalse Pao-Cachinche. Estado Carabobo. Fuente: HIDROCENTRO

ANEXO II

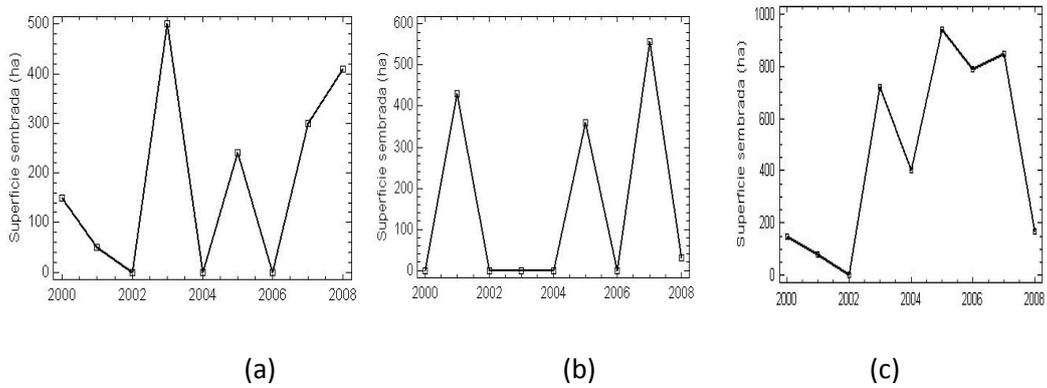


Figura 2. Serie de tiempo para la superficie sembrada con maiz (*Zea Mays*) (ha): (a) Municipio Valencia, (b) Municipio Libertador, (c) Municipio Bejuma. Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados de MPPAT, (2010). Fuente: Datos tomados del Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.

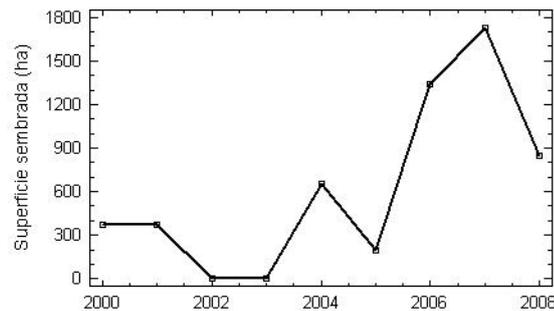


Figura 3. Serie de tiempo para la superficie sembrada con papa (*Solanum tuberosum*) (ha). Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados del Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.

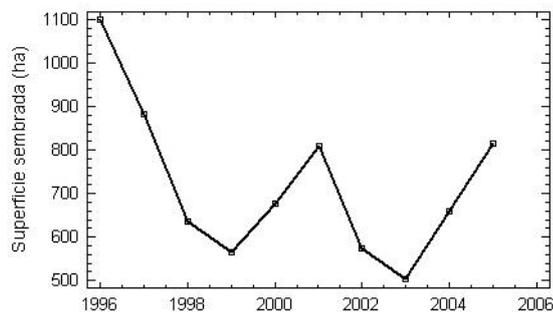


Figura 4. Serie de tiempo para la superficie sembrada con papa (*Solanum tuberosum*) (ha). Parroquia Simón Bolívar- Municipio Bejuma-Estado Carabobo. Fuente: Datos tomados del INDER-Ministerio de Agricultura y Tierras. Creación propia.

ANEXO III



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL
VALENCIA - VENEZUELA



Bárbula, 06 de Diciembre de 2007

CIH- 001

Señor:

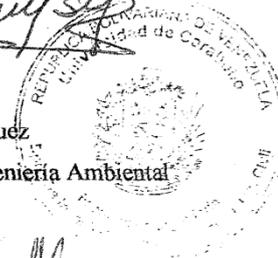
Dueño de parcela-Chirgua
Presente.-

Reciba un cordial saludo, me dirijo a usted para solicitar su autorización para realizar una investigación relativa a los procesos de erosión de suelos y el transporte de sedimentos en parcelas agrícolas. Esta investigación será llevada a cabo por la profesora Adriana Márquez, C.I. 12604007 en conjunto con un grupo alumnos en calidad de tesis. La información recolectada será utilizada con fines netamente académicos, así como la misma le será suministrada al finalizar el estudio. En el anexo se suministran los comprobantes de aceptación de los temas de tesis ante las autoridades de la Universidad de Carabobo.

Agradeciendo la atención brindada a la presente solicitud, se despide

Atentamente,

Prof. Adriana Márquez
Docente del Departamento de Ingeniería Ambiental



Mauricio
6-12-07
SIHON 100117
1366219

Adriana
6-12-07

ANEXO IV

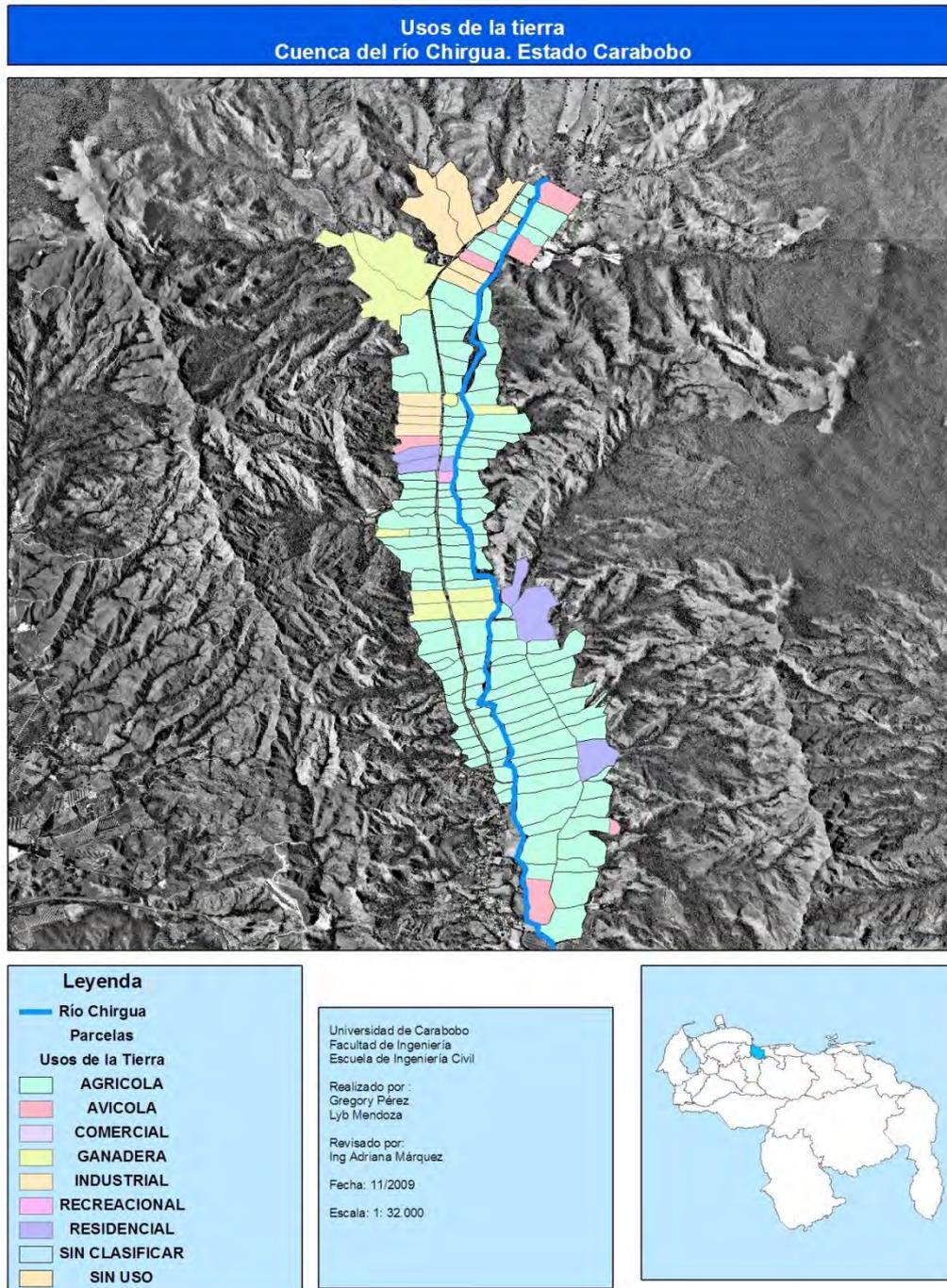


Figura 5. Mapa de usos de la tierra en la cuenca del río Chirgua. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO V

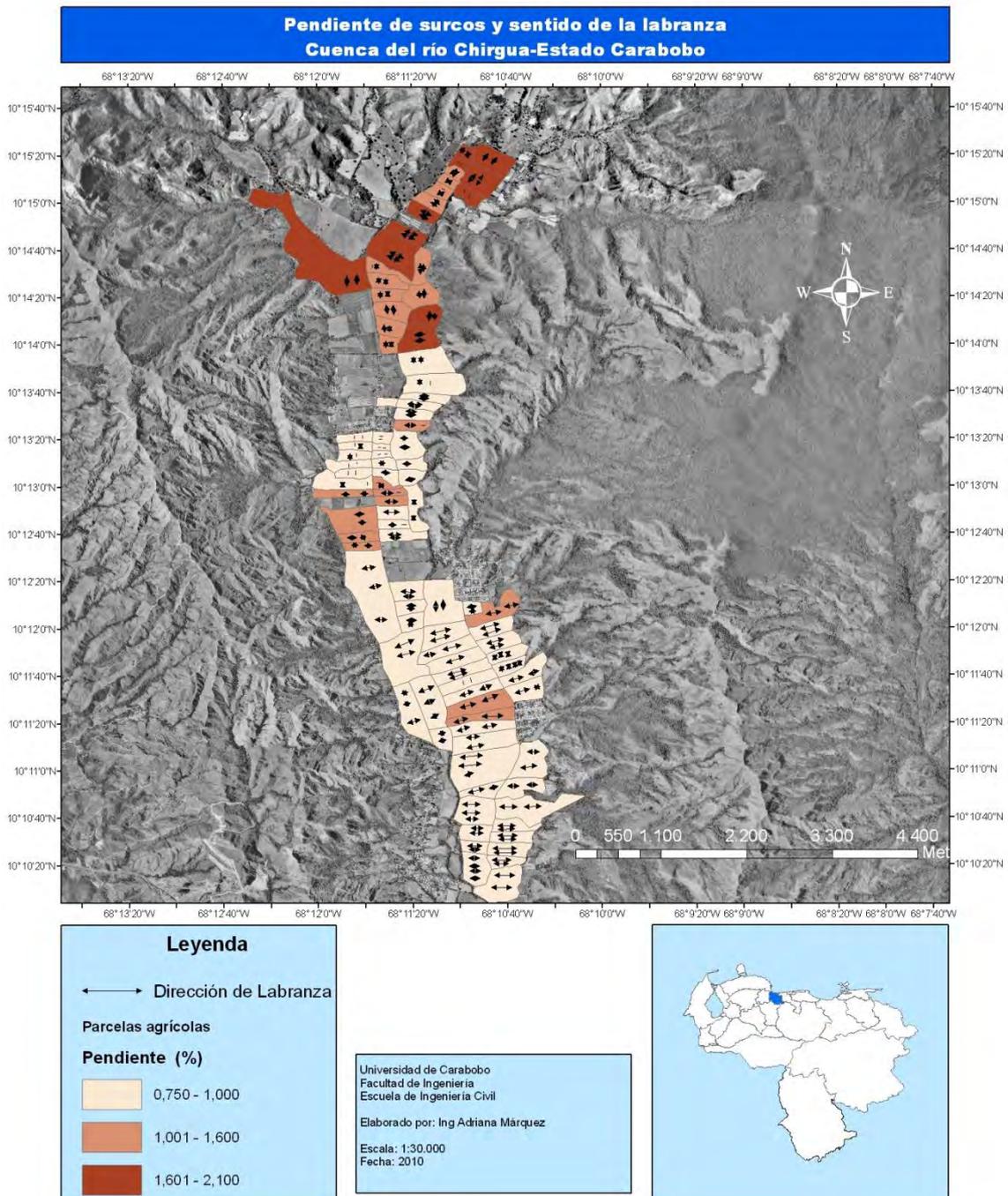


Figura 6. Mapa de pendientes de parcelas en la cuenca del río Chirgua. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO VI

Tabla 1

Muestreo para Determinar la Erosión

Pendiente Longitudinal Parcela	Fecha Muestreo	Fuente	Tamaño de muestra (Sitios de Muestreo)
0,8%	2008	López, A., Marín, C, Rojas Y. (2008).	30
	2008	Rodriguez A., Rivero J., Reyna J., (2008).	30
1%	2008	Álvarez S., Chaivez E., Latuff A. (2008).	30
	2008	Lugo, D., Ortega F., Ramos R. (2008)	30
	2009	Diluigi S., Adragna M., Hernandez R., (2009).	30
1,3%	2009	Santana J., Márquez S, Quintana E (2009).	30
1,5%	2008	Betancourt D., Rendón, J. (2008).	30
	2009	Hernández, A., Griffin S. (2009).	30
	2010	Niño J., Páez K. (2010).	30
2,5%	2009	Delgado E., Espinoza L., Peña E. (2009).	30
13%	2008	Silva J., Peraza Y., Ramos J., (2008)	30
	2008	Castro A., Peraza R., Lacau C., (2008).	30
	2008	Basna S., Da Silva S., Araujo E., (2008).	30
	2009	Santana N., Tovar O., Arellano K., (2009).	30
Total			420

Nota. Elaboración Propia

ANEXO VII

Método artesanal de medición de pendientes

En esta investigación se emplea un método artesanal apropiado para los trabajos de campo. Para determinar la pendiente, ver formato en el Anexo III:

1. A lo largo del eje de la pendiente, se mide la diferencia de nivel AC entre dos puntos A y B marcados en el suelo.
2. Se mide la distancia horizontal CB entre los puntos A y B se calcula la pendiente S en porcentaje, mediante la ecuación $S(\%) = (AC/CB)100$
3. La distancia horizontal CB se fija en 100 m y se obtiene $S\% = AC$ directamente en metros
4. La distancia horizontal CB se fija en cambio en 10 m y se obtiene $S\% = 10 AC$ en metros.

ANEXO VIII

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE SÓLIDOS					
Parcela: <u>Sector La Paredaña</u> Fecha de muestreo: 27/02/08					
Situación: <u>Estado Carabobo</u>					
Calicata N°: <u>1</u> Coordenada de Calicata: N 10°11'60"	W 68°11'30"				
Profundidad: <u>0-10 cm</u> Laboratorio: <u>Suelos-UC</u>					
Ensayo de Gravedad Especifica en suelos (ASTM D854-06)					
PROFUNDIDAD EN cm.	0-10				
N° DE LABORATORIO					
PICNOMETRO N°	Azul Clase A				
CAPACIDAD PICNOMETRO cm ³	250				
PESO EN GRAMOS	TARA DEL PICNOMETRO	95.58			
	PICNOMETRO+SUELO SECO	140.1			
	SUELO SECO (M _s)	44.52			
	PICNOM. +AGUA+SUELO (M _{pws,t})	371.21			
	PICNOM. +AGUA A CAPACIDAD TOTAL (M _{pw,t})	343.182037			
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	30.7				
GRAVEDAD ESPECIFICA REFERIDA A TEMPERATURA DE ENSAYO (G _T)	2.69948461				
GRAVEDAD ESPECIFICA REFERIDA A TEMPERATURA DE 20°C (G _{s 20°})	2.69003641				
CONVERSION "K" PARA VARIAS TEMPERATURAS					
TEMP °C	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K	TEMP °C	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K
19	0.9984347	1.0002	27	0.9965451	0.9983
20	0.9982343	1.0000	28	0.9962652	0.9980
21	0.9980233	0.9998	29	0.9959761	0.9977
22	0.9978019	0.9996	30	0.9956780	0.9974
23	0.9975702	0.9993	31	0.9953700	0.9971
24	0.9973286	0.9991	32	0.995050	0.9968
25	0.9970770	0.9989	33	0.9957700	0.9965
26	0.9968156	0.9986			

$$G_T = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

G_{s 20°} = G_T x FACTOR K

Observaciones: Este ensayo fue realizado con el material que pasa el tamiz N°4

Fecha de Evaluación: 27/02/2008

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



ENSAYO DE GRANULOMETRIA POR HIDRÓMETRO



Parcela: Sector La Paredaña

Fecha de muestreo: 10/02/2008

Situación: Estado Carabobo

Surco N°: _____

Calicata N°: 1

Coordenada de Calicata: N 68°11'30"

W 10°13'20"

Profundidad: 0-10 cm

Laboratorio:

Suelos-UC

Ensayo de Granulometría por Hidrómetro (ASTM D422)

Cilindro: 1 Hidrómetro N°: 152-H

Agente Defloculante: Hexametáfosfato de Sodio (40g/L)

Cantidad 125 ml

Corrección por agente defloculante y punto cero:

Corrección por menisco: Cm= 1 g/L

Cd= 6 a T=20,5°C

Gravedad Especifica de las partículas más finas (Gs)=

2,7

Peso Inicial de la muestra (W)= 50 g

Fecha	Tiempo	Tiempo Transcurrido (min)	Temperatura °C	Lectura de Hidrómetro (R')	Lectura (R'+Cm) corregida (R)	Prof Efectiva (L)	K	Diámetro de partículas (D) mm	Ct	R-Cd±Ct	Porcentaje más fino
											Total
13/02/2008	09:19 a.m.	1	22	34,00	35	10,6	0,01312	0,04264	0,6	29,60	58,61
		2	22	29,00	30	11,4	0,01312	0,03130	0,6	24,60	48,71
		5	22	26,00	27	11,9	0,01312	0,02022	0,6	21,60	42,77
		15	22	21,00	22	12,7	0,01312	0,01207	0,6	16,60	32,87
		30	22	16,00	17	13,5	0,01312	0,00880	0,6	11,60	22,97
		42	22	15,00	16	13,7	0,01312	0,00749	0,6	10,60	20,99
		60	21	14,00	15	13,8	0,01328	0,00638	0,5	9,45	18,71
		120	21	12,00	13	14,2	0,01328	0,004563006	0,9	7,90	15,64
	240	20	9,00	10	14,7	0,01344	0,003321588	0,6	4,60	9,11	
14/02/2008	09:19 a.m.	1440	22	8,00	9	14,8	0,01312	0,001331126	0,6	3,60	7,13

Observaciones: La muestra corresponde al material pasante el tamiz N° 10

Fecha de Evaluación: 13/02/2008

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE SÓLIDOS



Parcela: Sector La Paredaña

Fecha de muestreo: 10 / 02 / 2008

Situación: Estado Carabobo

Surco N°: _____

Calicata N°: 1

Coordenada de Calicata: N 68°11'30"

W 10°13'20"

Profundidad: 0-10 cm

Laboratorio: Suelos-UC

Ensayo de Gravedad Específica en suelos (ASTM D854-06)

PROFUNDIDAD EN cm.	0-10			
N° DE LABORATORIO				
PICNOMETRO N°	Azul Clase A			
CAPACIDAD PICNOMETRO cm ³	250			
PESO EN GRAMOS	TARA DEL PICNOMETRO (g)	95,58		
	PICNOMETRO+SUELO SECO (g)	140,1		
	SUELO SECO (M _s) (g)	44,52		
	PICNOM. +AGUA+SUELO (M _{ρws,t}) (g)	371,21		
	PICNOM. +AGUA A CAPACIDAD TOTAL (M _{ρw,t}) (g)	343,182		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	38,7			
GRAVEDAD ESPECIFICA REFERIDA A TEMPERATURA DE ENSAYO (G _T)	2,699490662			
GRAVEDAD ESPECIFICA REFERIDA A TEMPERATURA DE 20°C (G _s 20°)	2,690042445			

PARA VARIAS TEMPERATURAS

TEMP °C	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K	TEMP° C	DENSIDAD RELATIVA	FACTOR K
19	0,9984347	1,0002	27	0,9965451	0,9983
20	0,9982343	1,0000	28	0,9962652	0,9980
21	0,9980233	0,9998	29	0,9959761	0,9977
22	0,9978019	0,9996	30	0,9956780	0,9974
23	0,9975702	0,9993	31	0,9953700	0,9971
24	0,9973286	0,9991	32	0,9950500	0,9968
25	0,9970770	0,9989	33	0,9957700	0,9965
26	0,9968156	0,9986			

$$G_T = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{\rho w,t} - (M_{\rho ws,t} - M_s))}$$

G_s 20° = G_T x FACTOR K

Observaciones:

Fecha de Evaluación: 13/02/2008

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



ENSAYO DE GRANULOMETRIA POR TAMIZADO



Parcela: Sector La Paredaña, _____

Fecha: 10 / 02 / 2008

Situación: Estado Carabobo

Surco Nº: _____ Calicata Nº: 1

Coordenada de la calicata: N 68°11'30"

W 10°13'20"

Profundidad: 0,10 metros

Laboratorio: Suelos-UC

Peso Muestra Total (g)			PARCIAL				TOTAL		Peso Muestra (g) (Fraccion Gruesa)			
			A	B	C	D	E	F				
Canto o piedra	Tamiz usado	Diámetro en mm	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acum.(g)	% Retenido Acum.	% Pasante	% Retenido Acum.	% Pasante	Pm= 1			
	4"	101,6										
Fracción Gruesa	Grava	Gruesa	3"	76,6					Factor F ₀ F ₀ =100/Pm F ₀ = 100,000			
			2 ½"	63,5								
			2"	50,8								
			1 ½"	38,1								
			1"	25,4								
	Arena	Gruesa	Fina	¾"	19,1					C = B x F ₀ D = 100 - C		
				½"	12,7							
				3/8"	9,51							
				¼"	6,35							
				N°4	4,76							
Fracción fina	Arena	Gruesa	N°8	2,38					Peso Muestra (g) (Fraccion Fina)			
			N°10	2		1	100	0		98,04		
	Arena	Media	Fina	N°10	2	0	0	0	100	Pm= 50 Factor F ₁ F ₁ = 100/Pm F ₁ = 2,000 C = B x F ₀ D = 100 - C		
				N°16	1,19							
				N°20	0,84	1	1	2,00	98,00		3,92	96,08
				N°30	0,59							
		N°40		0,42	2	3	6,00	94,00	7,84		92,16	
		N°50		0,297								
		N°70		0,21								
		N°80		0,177								
N°100	0,149	6	9	18,00	82,00	19,61	80,39					
N°200	0,074	9	18	36,00	64,00	37,25	62,75					

Datos Retenidos

% R = Retenido en el Tamiz N°10= 1,96 %

%P = Pasante por el Tamiz N°10 = 98,04 %

Calculos

Fraccion Gruesa	Fraccion Fina
Fg = %R/100 = 0,020	Ff = %P/100 = 0,980
E = C x Fg	F = D x Ff
F = 100 - E	E = 100 - F

Realizado por: _____

Calculado por: _____

Aprobado por: _____



DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS



Parcela: Sector La Paredeña

Fecha: 10/02/2008

Situación: Estado Carabobo

Surco N°: _____

Calicata N°: 1

Coordenada de la calicata: N 68°11'30"

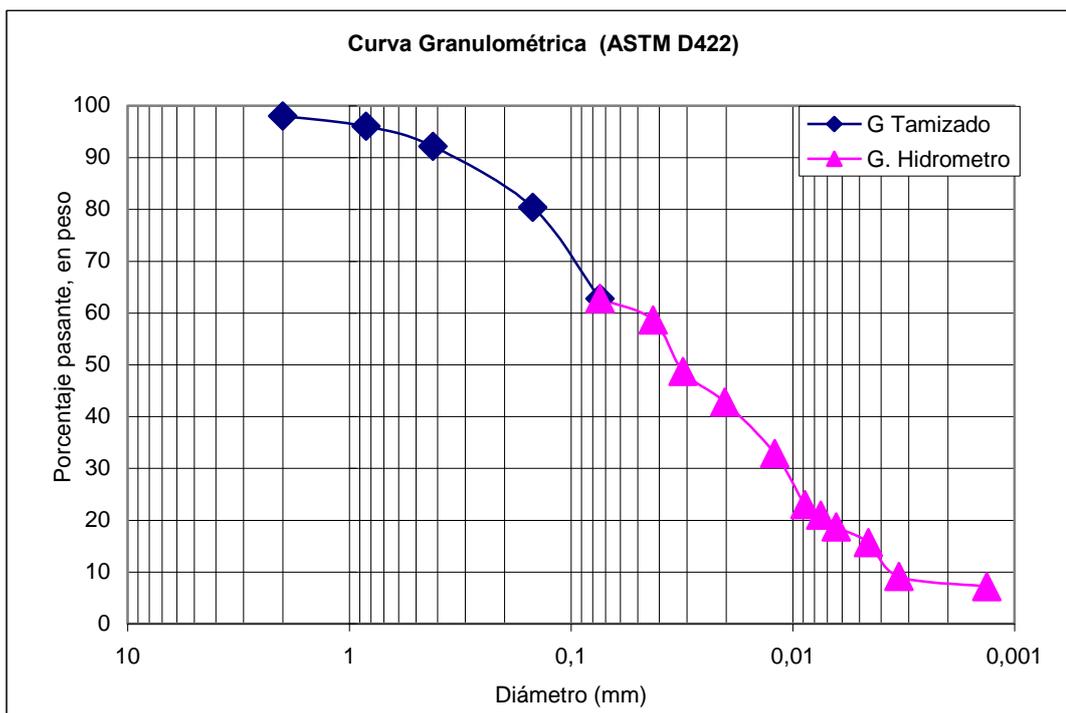
W 10°13'20"

Profundidad: 0,10 metros

Laboratorio: _____

Suelos-UC

Curva Granulométrica



Clasificación según MIT (Massachusetts Institute Technology)

	Tamaño, mm								
	2 -0,6	0,6-0,2	0,2-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	0,002-0,0006	0,0006-0,0002	
	Gruesa	Media	Fina	Grueso	Medio	Fino	Gruesa	Media	Fina (Coloide)
	Arena			Limo			Arcilla		
Porcentaje Parcial %	3	10	20	18	19	8	10		

Realizado por: _____

Calculado por: _____

Aprobado por: _____



LIMITES DE CONSISTENCIA



Parcela: Sector La Paredeña

Fecha: 31/01/2008

Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal 1%.
Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

Calicata N°: 1

Coordenada de la Calicata: N 10°11'36,92"

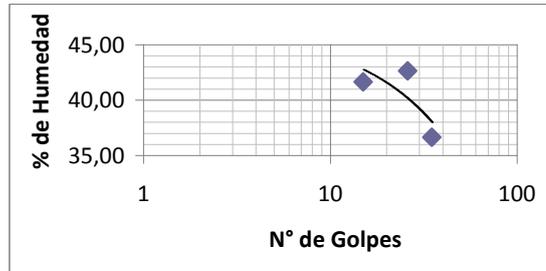
W 68°10'34,07"

Surco N°: 7

Laboratorio: Suelos-UC

LIMITE LIQUIDO

Profundidad (cm)	N° de golpes del platillo	Envase N°	Tara (g)	Tara+ suelo humedo (g)	Tara+ suelo seco (g)	Agua (g)	Suelo seco (g)	W Humedad %	Resultado Final LL%
10	15	1	23,78	31,16	28,99	2,17	5,21	41,65	42,6
10	26	2	23,72	29,81	27,99	1,82	4,27	42,62	
10	35	3	23,47	32,87	30,35	2,52	6,88	36,63	



LIMITE PLASTICO

Profundidad (cm)	Envase N°	Tara (g)	Tara+ suelo humedo (g)	Tara+ suelo seco (g)	Agua (g)	Suelo seco (g)	W Humedad %	Limite Plastico LP
10	1	23,78	31,16	28,99	2,17	5,21	41,65	42,1
10	2	23,72	29,81	27,99	1,82	4,27	42,62	

INDICE DE PLASTICIDAD

Limite Liquido LL	Limite Plastico LP	Indice de Plasticidad IP%
42,6	42,1	0,49

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



CLASIFICACIÓN DE SUELOS



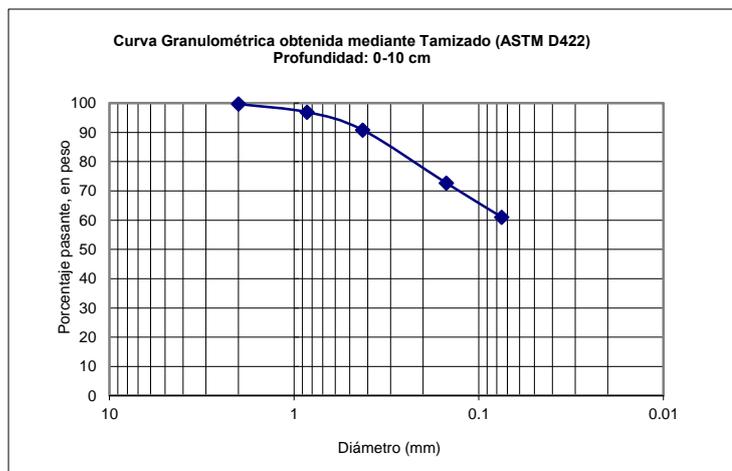
Parcela: Sector La Paredeña Fecha: 31/01/2008

Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal 1%. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

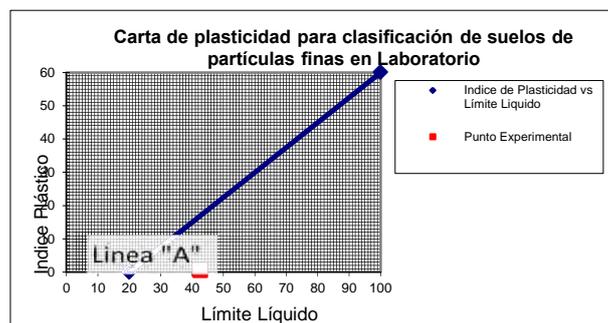
Surco N°: 7 Calicata N°: 1 Coordenada de la Calicata: N 10°11'36,92"

Profundidad: 0-10 cm W 68°10'34,07"

Tipo de Sistema de Clasificación: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D2487) Laboratorio: Suelos-UC



LIMITES DE ATTERBERG (ASTM D4318)		
Limite Líquido LL	Limite Plástico LP	Índice de Plasticidad IP%
42,6	42,1	0,49



Observaciones:

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



ENSAYO DE PERMEABILIDAD



Parcela: 1

Localización: Carabobo

Fecha de muestreo:

Calicata:

Coordenada de la calicata:

Profundidad: 20cm

Laboratorio: Suelos (U.C.)

Muestra N°: P(20)

Tipo de Ensayo: Permeabilidad (ASTM D2434)

H_1 (cm)	t_1 (seg)	H_m (cm)	t_m (seg)	H_2 (cm)	t_2 (seg)	K_m (cm/seg)
158,8	30	96,63	23	58,8	75	0,000433009

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE. PARTE I



Parcela: Sector La Paredaña Fecha: 31/01/2008

Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal 1%. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

Calicata Nº: 1 Coordenada de la Calicata: N 10°11'36,92" W 68°10'34,07"

Carga Vertical: (5+4,5)Kg		Esfuerzo Vertical: 0,26 Kg/cm2	
Deformación Horizontal(mm)	Dial de Carga (Div)	Fuerza de Corte Horizontal (Kg)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm2)
0,053	12	2,6352	0,0732
0,1	17	3,7332	0,1037
0,13	22	4,8312	0,1342
0,195	27	5,9292	0,1647
0,252	32	7,0272	0,1952
0,319	34	7,4664	0,2074
0,386	38	8,3448	0,2318
0,462	38	8,3448	0,2318
0,516	39	8,5644	0,2379
0,596	40	8,784	0,244
0,662	39	8,5644	0,2379
0,752	39	8,5644	0,2379

Carga Vertical: (10+4,5)Kg		Esfuerzo Vertical: 0,40 Kg/cm2	
Deformación Horizontal(mm)	Dial de Carga (Div)	Fuerza de Corte Horizontal (Kg)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm2)
0,052	11	2,4156	0,0671
0,106	16	3,5136	0,0976
0,142	20	4,392	0,122
0,206	26	5,7096	0,1586
0,28	33	7,2468	0,2013
0,345	39	8,5644	0,2379
0,417	44	9,6624	0,2684
0,484	49	10,7604	0,2989
0,543	53	11,6388	0,3233
0,551	67	14,7132	0,4087
0,692	67	14,7132	0,4087
0,754	67	14,7132	0,4087

Carga Vertical: (15+4,5)Kg		Esfuerzo Vertical: 0,54 Kg/cm2	
Deformación Horizontal(mm)	Dial de Carga (Div)	Fuerza de Corte Horizontal (Kg)	Esfuerzo Cortante (Kg/cm2)
0,046	12	2,6352	0,0732
0,072	23	5,0508	0,1403
0,134	31	6,8076	0,1891
0,203	40	8,784	0,244
0,265	48	10,5408	0,2928
0,331	54	11,8584	0,3294
0,409	59	12,9564	0,3599
0,471	61	13,3956	0,3721
0,55	62	13,6152	0,3782
0,613	63	13,8348	0,3843
0,682	63	13,8348	0,3843
0,762	63	13,8348	0,3843

Realizado por:

Calculado por:

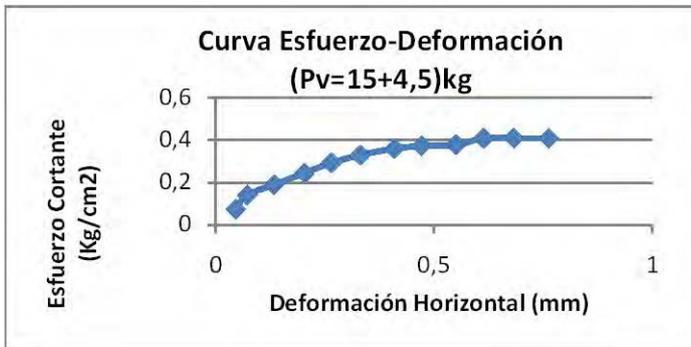
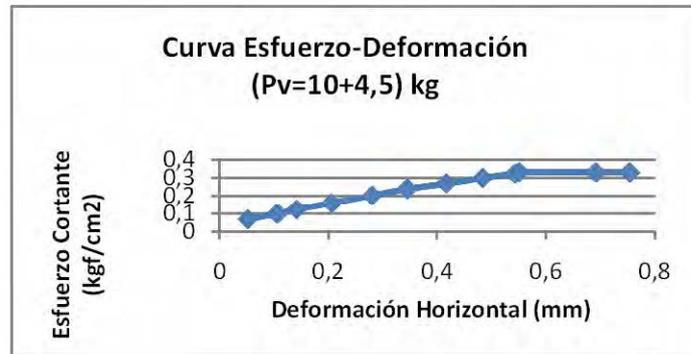
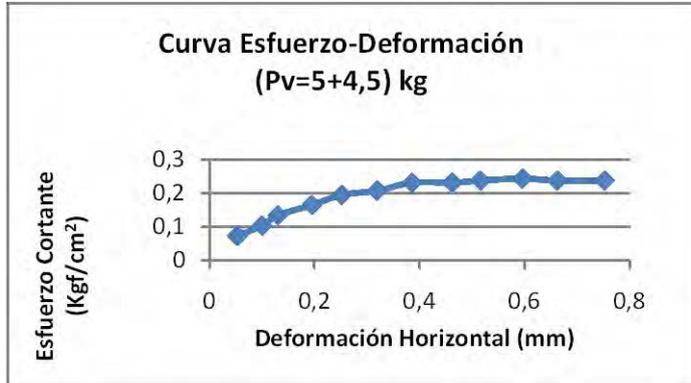
Aprobado por:



RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE. PARTE II



Parcela: Sector La Paredeña Fecha: 31/01/2008
 Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal 1%. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo
 Calicata Nº: 1 Coordenada de la Calicata: N 10°11'36,92" W 68°10'34,07"



Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	Esfuerzo cortante (kg/cm ²)
0,26	0,244
0,4	0,3233
0,54	0,3843

Angulo de fricción	Cohesión
30,46	0,244

Realizado por:

Calculado por:

Aprobado por:



PRUEBA DE CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN



LOCALIZACIÓN:					
FECHA:					
OPERADOR:					
IDENTIFICACION DEL PUNTO					
COORDENADAS					
<i>N</i>					
<i>W</i>					
<i>COTA (msnm)</i>		<i>PRECISION(m)</i>			
CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL					
<i>IDENTIFICACIÓN CAPSULA</i>	<i>Peso Capsula (g)</i>	<i>Peso Capsula+Muestra Húmeda (g)</i>	<i>Peso Capsula+Muestra Seca (g)</i>	<i>% w =</i>	
				<i>W_w =</i>	
				<i>W_s =</i>	
CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL					
<i>IDENTIFICACIÓN CAPSULA</i>	<i>Peso Capsula (g)</i>	<i>Peso Capsula+Muestra Húmeda (g)</i>	<i>Peso Capsula+Muestra Seca (g)</i>	<i>% w =</i>	
				<i>W_w =</i>	
				<i>W_s =</i>	
DATOS DE INFILTRACION					
HORA INICIO :					
Tiempo	Altura de agua añadida desde el comienzo	Intervalo de tiempo	Variación de la altura del agua	Capacidad de Infiltración	
t (min.)	h (cm)	Δt (min.)	Δh (cm)	f(mm/h)	
0					
1					
2					
7					
17					
47					
77					
107					



MEDICIÓN DE CAUDALES -01



Parcela: Sector La Paredeña. Fecha: /02/2007

Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal %. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

Surco N°: 5 Coordenada del surco: _____

Volumen: 500 ml Tipo de muestra: Compuesta X
 Por Intervalo _____

Hora de inicio del riego 10:00:00 a.m.

Hora de inicio del escurrimiento 10:30:00 a.m.

Medición	1	2	3	4	5	
Hora del muestreo	10:40	10:55	11:05	11:20	11:38	
Tiempos (Segundos)	1	2,92	2,74	2,75	2,68	2,69
	2	2,73	2,75	2,64	2,64	2,27
	3	2,52	2,68	3,19	2,39	3,16
	4	2,62	2,56	2,62	2,47	2,4
	5	2,78	3,36	2,78	2,48	2,88
	6	3,13	2,7	3,3	2,6	2,5
	7	2,66	2,86	2,81	2,7	2,93
	8	2,71	2,69	2,78	2,67	3,14
	9	2,72	2,83	2,26	2,51	3,36
	10	2,65	2,71	2,96	2,75	2,68
	11	2,02	3,45	2,62	2,46	2,74
	12	2,55	2,91	2,49	2,59	2,72
	13	1,99	3,06	2,52	2,7	2,34
	14	2,2	2,83	2,7	2,92	2,59
	15	2,3	2,94	2,6	2,6	0,82
	16	2,52	2,63	2,91	2,73	3,12
	17	2,12	2,53	2,24	2,88	2,91
	18	2,6	2,28	2,54	2,72	2,56
	19	2,32	2,68	2,89	2,67	2,56
	20	2,43	2,7	2,78	2,16	2,58

Características del flujo en el surco

Profundidad (cm)	2,5	4	4	4	4
Ancho (cm)	34	30	33	33	33
Temperatura (°C)	23,1	24,5	26	27	27,5

Realizado por: _____ Calculado por: _____ Aprobado por: _____



MEDICIÓN DE CAUDALES -02



Parcela: Sector La Paredaña

Fecha: _____

Situación: Zona de valle con pendiente longitudinal % Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

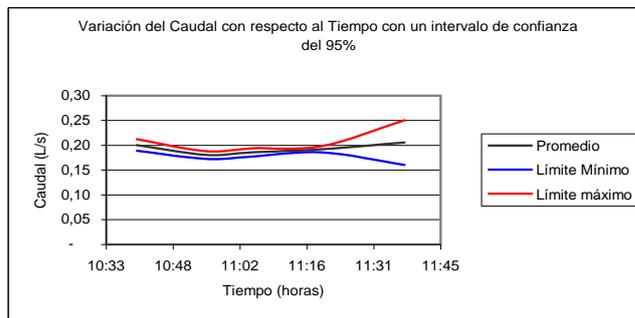
Surco Nº: 5

Coordenada del surco: _____

Volumen: 500 ml

Hora de inicio del riego		10:00				
Hora de inicio del escurrimiento		10:30				
Medición		1	2	3	4	5
Hora del muestreo		10:40	10:55	11:05	11:20	11:38
Caudales (L/s)	1	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
	2	0,18	0,18	0,19	0,19	0,22
	3	0,20	0,19	0,16	0,21	0,16
	4	0,19	0,20	0,19	0,20	0,21
	5	0,18	0,15	0,18	0,20	0,17
	6	0,16	0,19	0,15	0,19	0,20
	7	0,19	0,17	0,18	0,19	0,17
	8	0,18	0,19	0,18	0,19	0,16
	9	0,18	0,18	0,22	0,20	0,15
	10	0,19	0,18	0,17	0,18	0,19
	11	0,25	0,14	0,19	0,20	0,18
	12	0,20	0,17	0,20	0,19	0,18
	13	0,25	0,16	0,20	0,19	0,21
	14	0,23	0,18	0,19	0,17	0,19
	15	0,22	0,17	0,19	0,19	0,61
	16	0,20	0,19	0,17	0,18	0,16
	17	0,24	0,20	0,22	0,17	0,17
	18	0,19	0,22	0,20	0,18	0,20
	19	0,22	0,19	0,17	0,19	0,20
	20	0,21	0,19	0,18	0,23	0,19
Tamaño de la muestra (n)		20	20	20	20	20
Media muestral \bar{X}		0,20	0,18	0,19	0,19	0,21
Desviación Estándar (S)		0,02	0,02	0,02	0,01	0,10
Error Estándar de la Media S/\sqrt{n}		0,0055144	0,0036585	0,0040113	0,0030035	0,0217032
$t(\alpha/2)=t(2,5\%)$		2,0930241	2,0930241	2,0930241	2,0930241	2,0930241
Intervalo de confianza:						
Límite Inferior $\bar{X}-t_{\alpha/2} S/\sqrt{n}$		0,189237431	0,172729776	0,177124874	0,185680995	0,160117686
Límite Superior $\bar{X}+t_{\alpha/2} S/\sqrt{n}$		0,212320771	0,188044274	0,193916503	0,198253859	0,250968213

Nivel de significancia: $\alpha=5\%$
 Nivel de Confianza= $1-\alpha=95\%$
 Grados de libertad= $n-1= 20-1=19$



Realizado por: _____

Calculado por: _____

Aprobado por: _____

ANEXO IX

Tabla 2

Muestreo para Propiedades Físicas del Suelo

Sector	Fecha Muestreo	Tipo de Muestreo	Muestreo por Conglomerado		Fuente	Tamaño de muestra (Sitios de Muestreo)
			Nº Total Parcelas	Nº Total de Sitios de Muestreo		
1	2009	Simple	30	210	Benavides A., Maldonado G., Rivas C., (2009)	30
2	2009		41	188	Mata F., Araujo J., (2009)	30
					Cayama, A., Fuentes Y., Loaiza Y., (2009)	30
3	2009		35	120	Gaeta L., Guevara Y., (2009)	30
4	2009		24	120	Figueredo J., Rosillo E., (2009)	30
5	2009		55	220	Ferrari L., Martin V., (2009)	30
Todos	2010		205	903	Leañez, A. (2010)	30
Total			205	903		210

Nota. Elaboración Propia

ANEXO X

Tabla 3
Muestreo para Medir la Infiltración

Sector	Fecha Muestreo	Tipo de Muestreo		Muestreo por Conglomerado		Fuente	Tamaño de muestra (Sitios de Muestreo)
				Nº Total Parcelas	Nº Total de Sitios de Muestreo		
1	2008	Múltiple	1era Muestra	30	210	Toro E., Zamora R., (2008)	46
	2009		2da Muestra			Da Graca E., Saturno Y., (2009)	30
	2009		3era Muestra			Chacón C, Segura F., Sandoval A., (2009)	30
2	2008	Múltiple	1era Muestra	41	188	Quintero y Altamiranda, (2009)	30
	2009		2da Muestra			Silva W., Sifontes C., (2009)	30
	2009		3era Muestra			Morillo J., (2009)	30
3	2008	Múltiple	1era Muestra	35	120	Archila A., Hernández D., (2009)	30
	2009		2da Muestra			Muñoz H., (2009)	30
4	2008	Múltiple	1era Muestra	24	120	Morillo K., Morey R., (2009)	30
	2009		2da Muestra			López M., De Ornelas I., (2009)	30
	2009		3era Muestra			Trejo G., Pérez J., Seijas E., (2009)	30
5	2008	Múltiple	1era Muestra	55	220	Manrique, O., Velásquez Y., Gómez Y (2009)	30
	2009		2da Muestra			Sánchez J., Sortino C., (2009)	30
	2009		3era Muestra			Velásquez L., (2010)	30
	2009		4ta Muestra			Vivas R., Petit J., Palacio A., (2010)	30
6	2008	Simple	Una Muestra	20	45	Córdova Y., Jiménez J. M., (2009)	30
Todos	2010	Simple	Una muestra	205	903	Bárceñas E., Angola A., (2010)	30
Total				205	903		526

Nota. Elaboración Propia

ANEXO XI

Tabla 4

Datos para los Modelos

Modelo	Estación lluviosa				Estación Seca					
	Erodograma		Eventos de tormentas de lluvia		Hidrograma de Escorrentía Directa		Infiltración	PFF/PFC/PFS (De Tabla 1)	Erodogramas	PFF/PFC/PFS (De Tabla 1)
	1h	2h	1h	2h	1h	2h				
Modelos basados en procesos	144	438	24	73	24	73	-	582	300	300
Modelos de Regresión	144	438	24	73	-	-	-	-	-	-
RNA	144	438	24	73	-	-	-	-	-	-
SID	144	438	24	73	-	-	582	-	-	-

Nota. Elaboración Propia

ANEXO XII

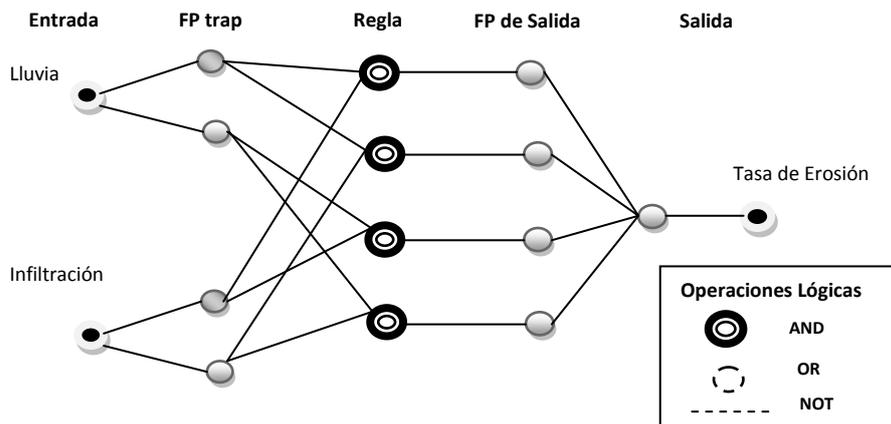


Figura 7. Estructura SID. Entrada 1: Lluvia. Entrada 2: infiltración. Salida: tasa de erosión.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XIII

Tabla 5

Errores de las Entradas Difusas para Tormentas de 2 Horas

Funciones de Pertenencia (FP)	N° MF Precipitación	N° MF Infiltración	Error (Iteración: 500)		
			Datos de Entrenamiento	Datos de Validación	Datos de Prueba
TRIMF	2	2	2.4097	2.6481	2.6741
TRAPMF	2	2	2.403	2.5977	2.6766
GBELLMF	2	2	2.6127	2.7217	2.8747
GAUSSMF	2	2	2.7162	2.7923	2.9866
GAUSS2MF	2	2	2.3782	2.7645	2.5969
PIMF	2	2	2.3656	2.7041	2.6047
DSIGFM	2	2	2.3172	2.722	2.5449
PSIGFM	2	2	2.3172	2.722	2.5449
TRIMF	3	3	2.4378	2.6037	2.7154
TRAPMF	3	3	2.4834	2.7548	2.7591
GBELLMF	3	3	2.7565	2.7654	3.0874
GAUSSMF	3	3	2.4931	2.8065	2.7557
GAUSS2MF	3	3	2.4725	2.6868	2.8539
PIMF	3	3	2.4157	2.6982	2.71
DSIGFM	3	3	2.448	2.7435	2.7157
PSIGFM	3	3	2.4472	2.7153	2.7434

ANEXO XIV

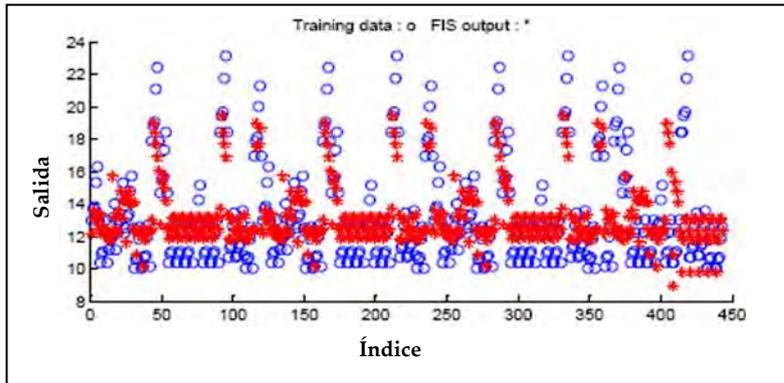


Figura 8. Datos de entrenamiento vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.

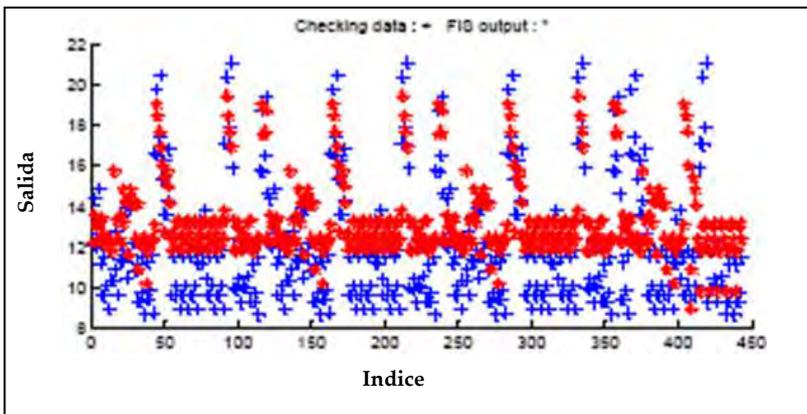


Figura 9. Datos de validación vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.

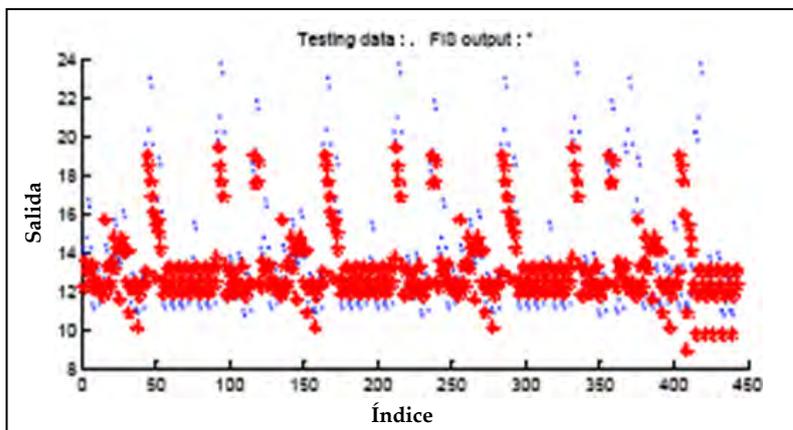


Figura 10. Datos de prueba vs Salida del SID para tormentas de 2 horas. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XV

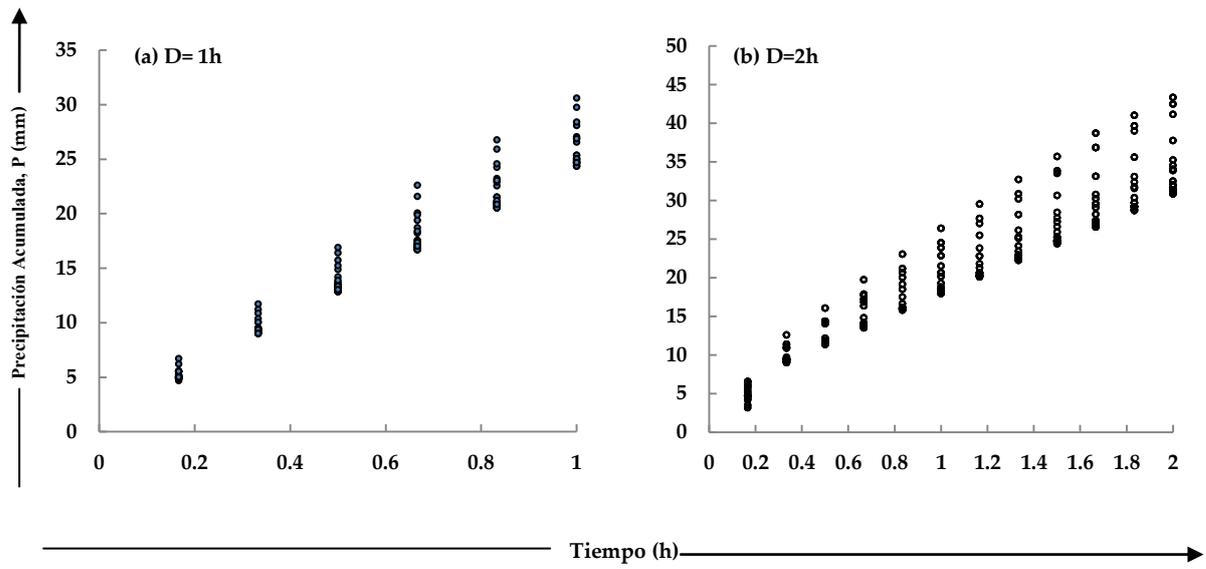


Figura 11. Lámina de Precipitación. Fuente: Elaboración propia

ANEXO XVI

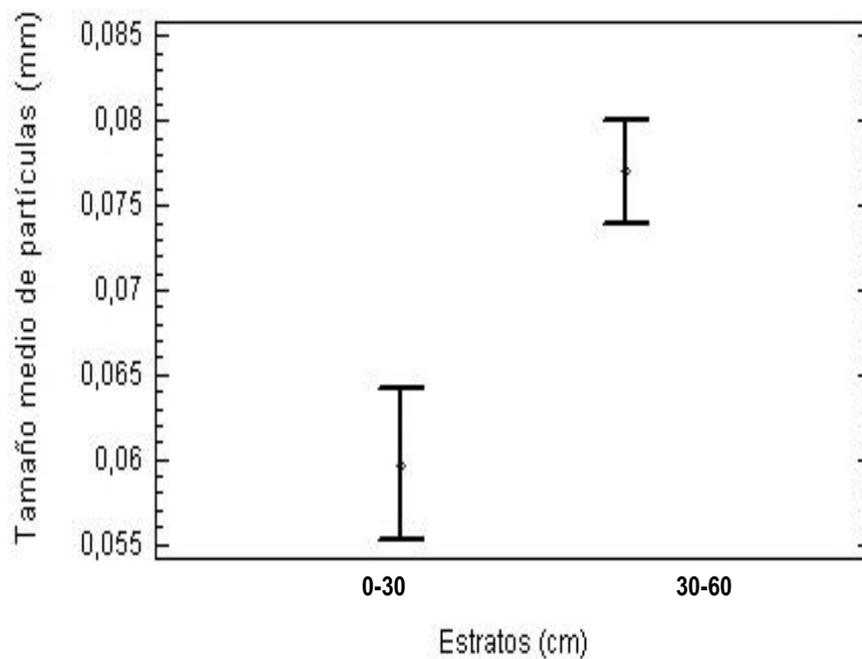


Figura 12. Tamaño medio de partículas del suelo de la Cuenca del río Chirgua-Estado Carabobo. Media e intervalos de confianza al 95%. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XVII

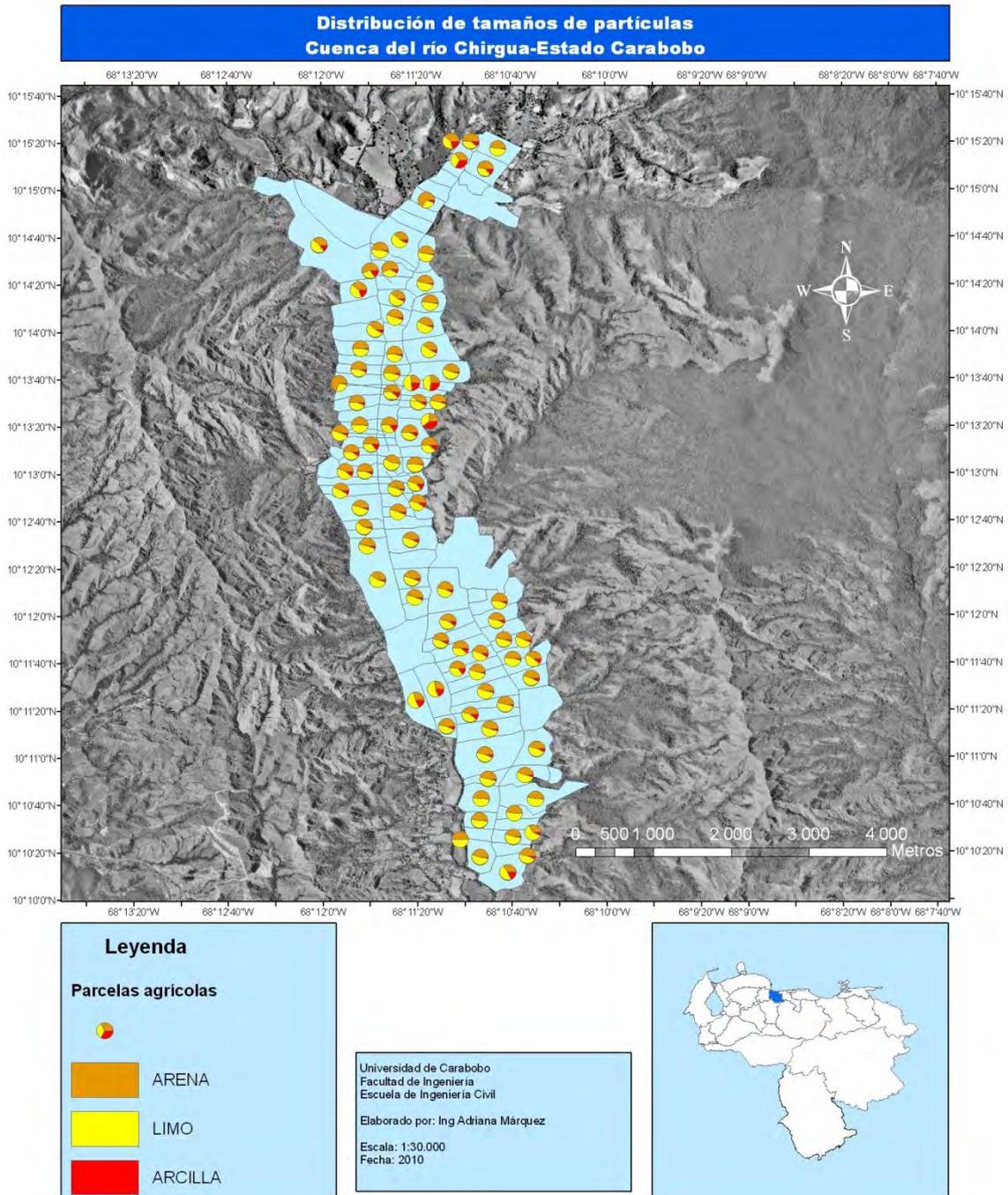


Figura 13. Distribución de tamaños de partículas. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XVIII

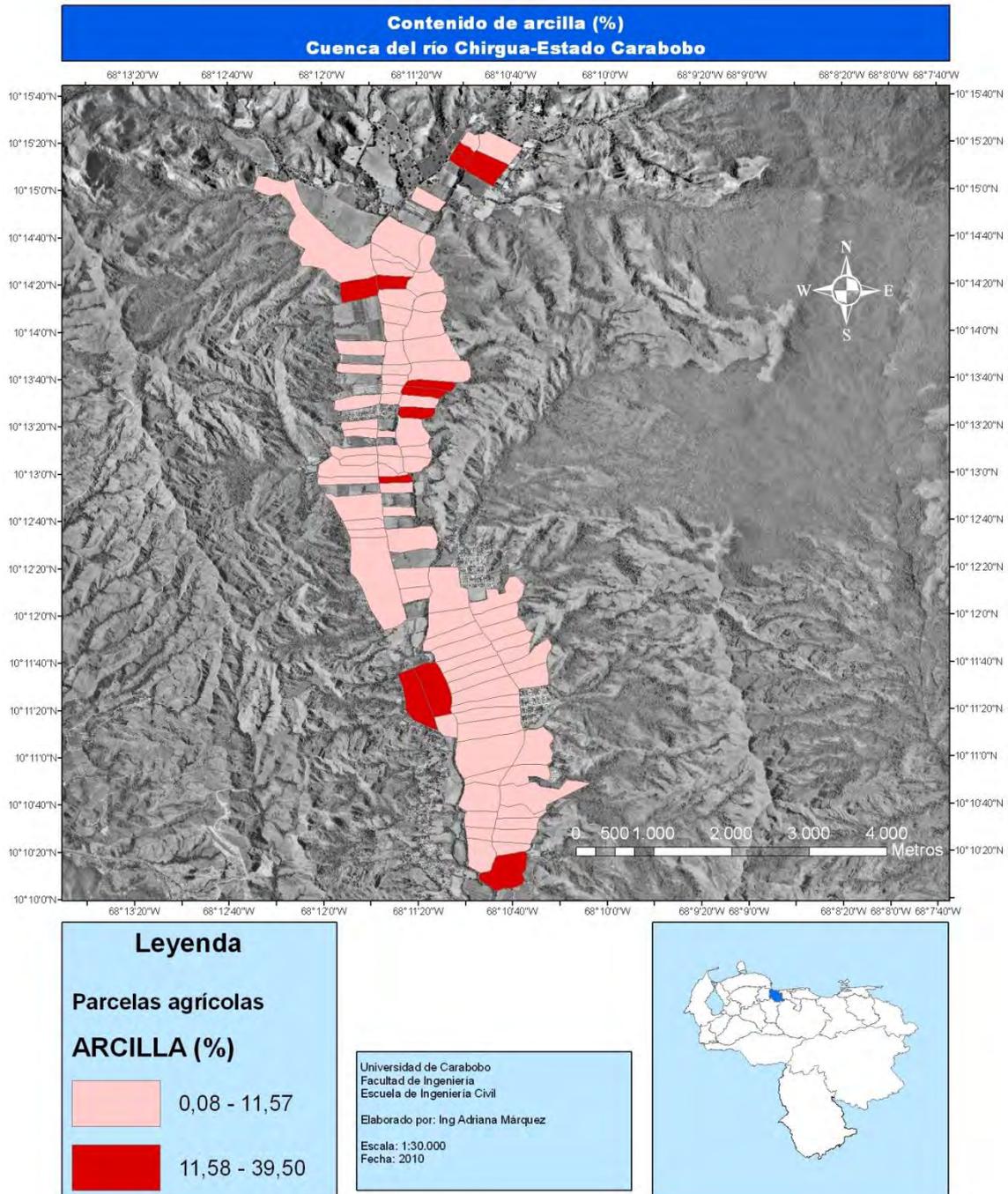


Figura 14. Contenido de arcilla. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XIX

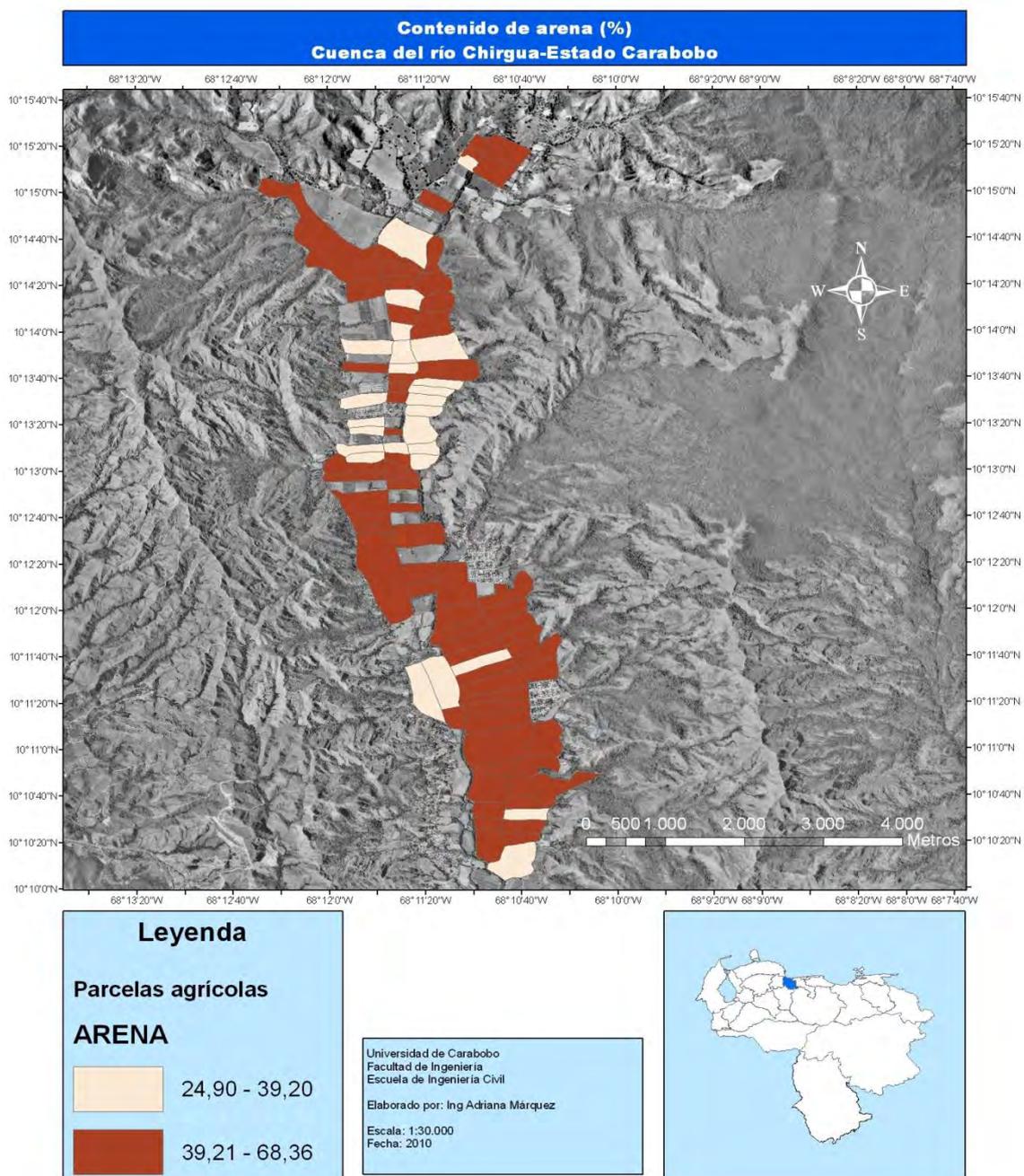


Figura 15. Contenido de arena. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XX

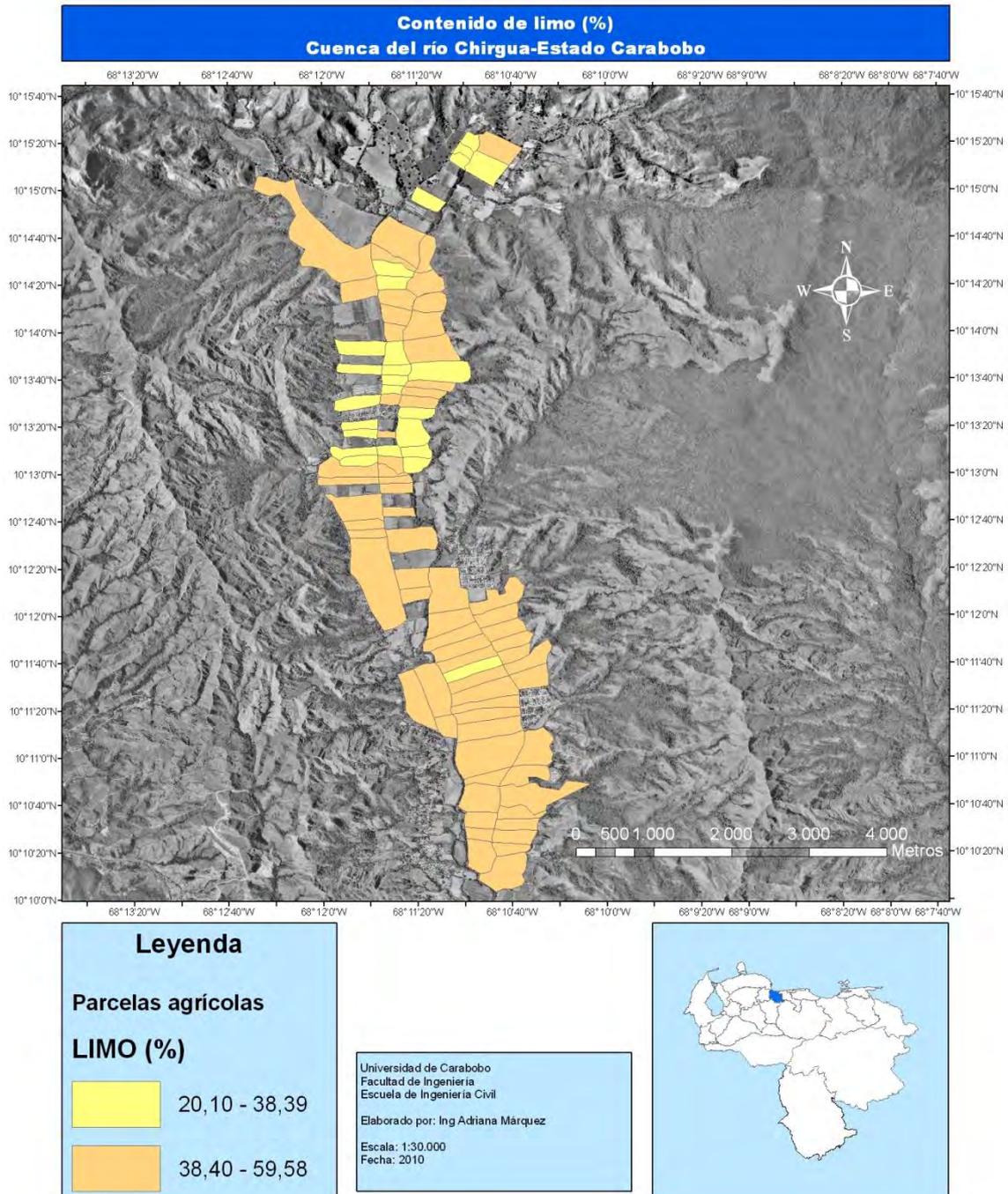


Figura 16. Contenido de limo. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXI

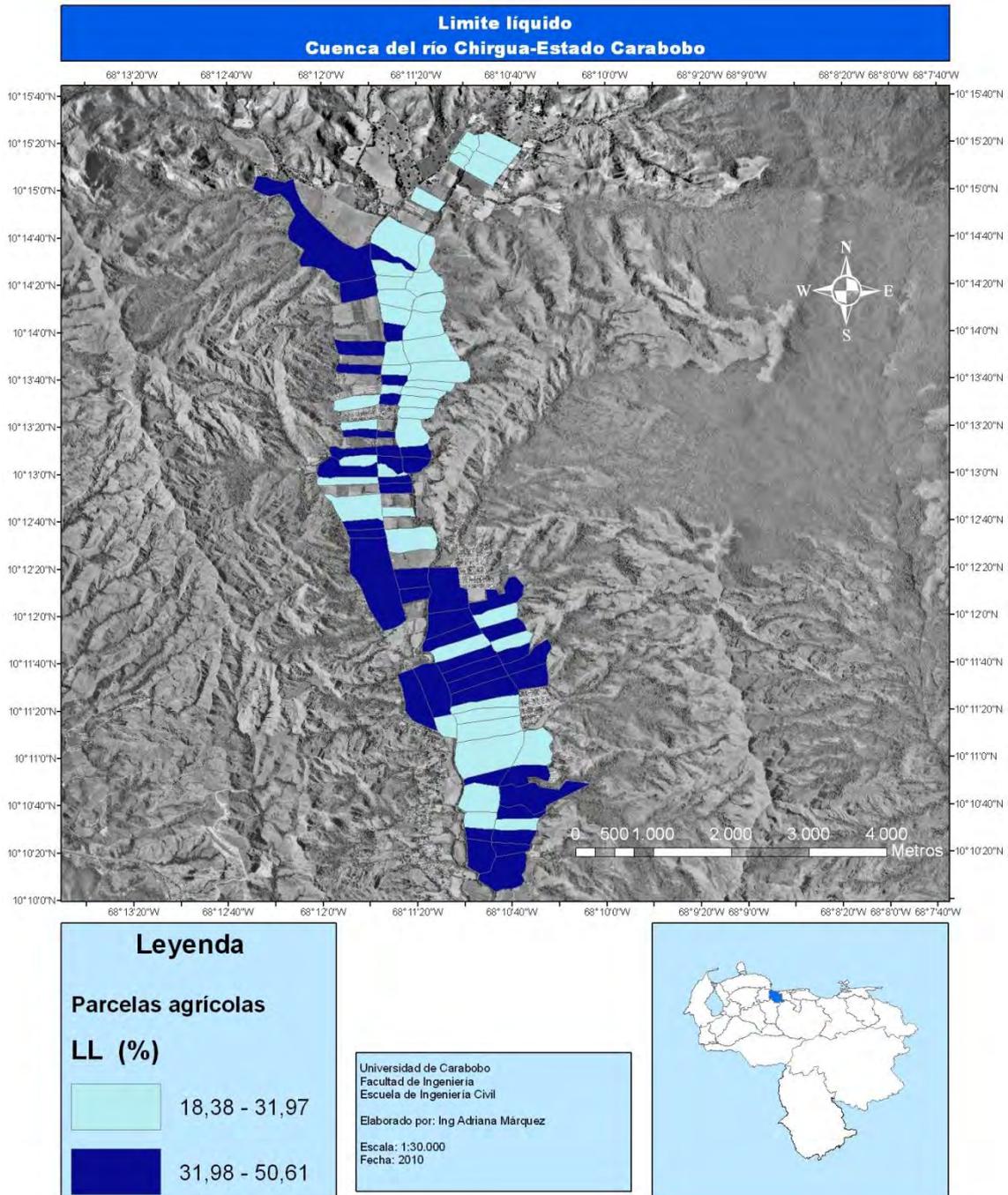


Figura 17. Límite líquido. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXII

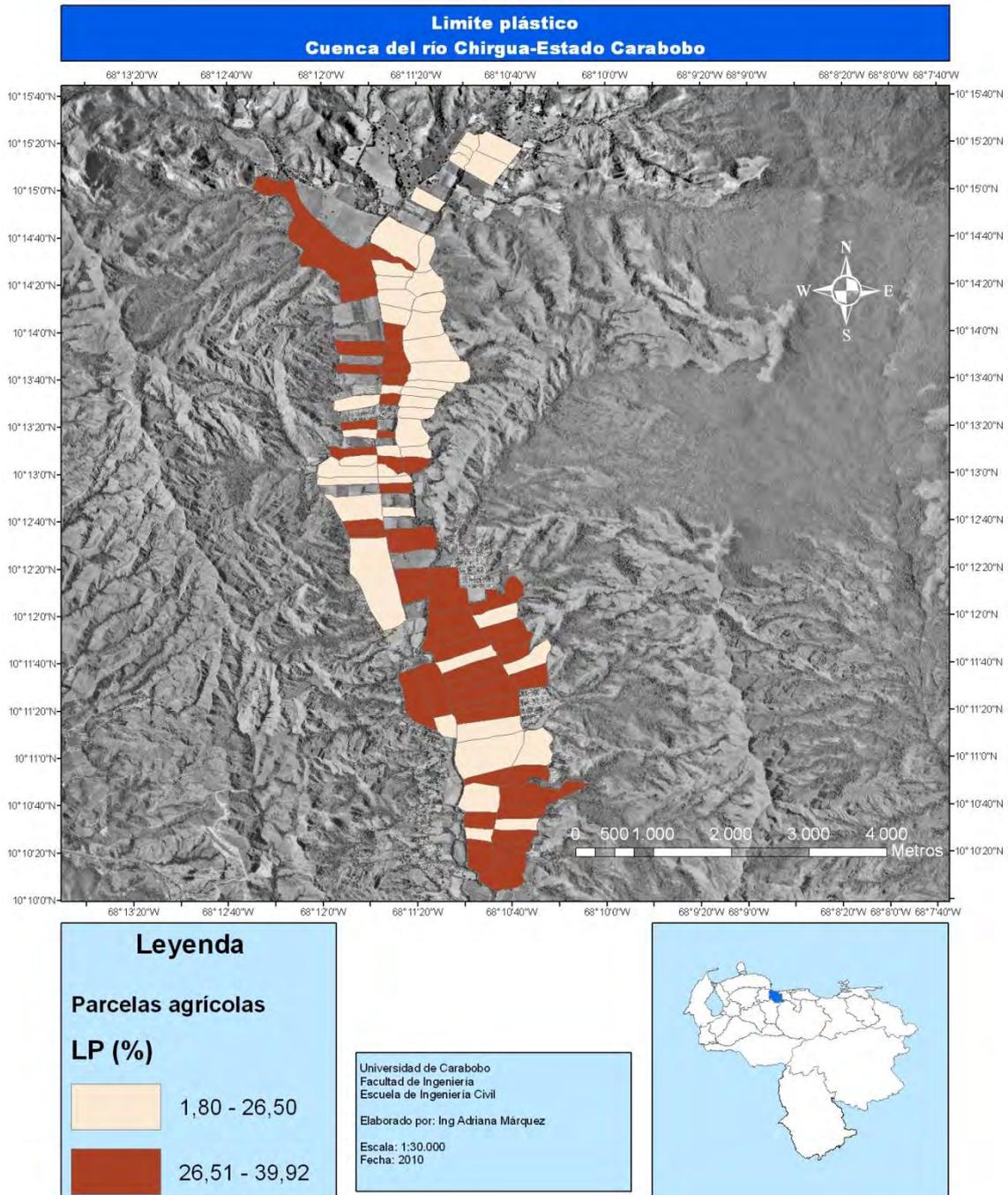


Figura 18. Límite plástico. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXIII

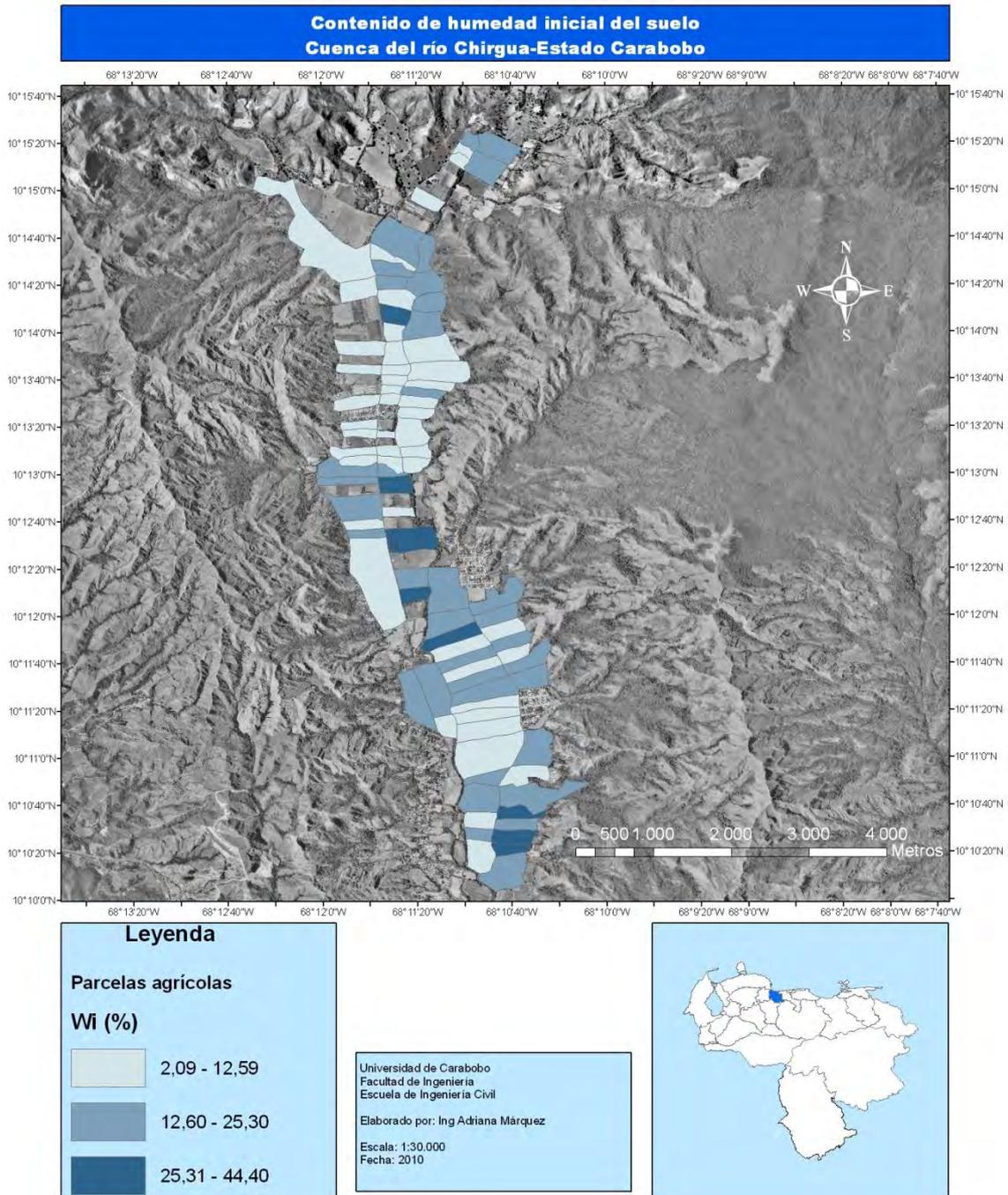


Figura 19. Contenido de humedad inicial del suelo. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo.
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXIV

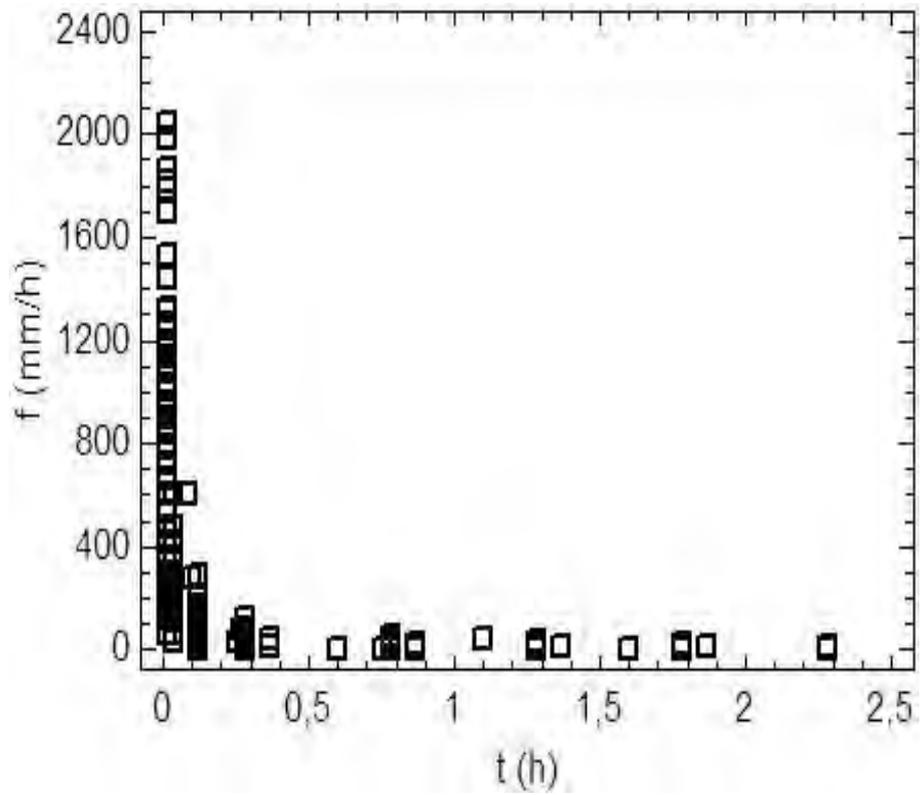


Figura 20. Tasa de Infiltración Observada en las Pruebas de Campo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXV

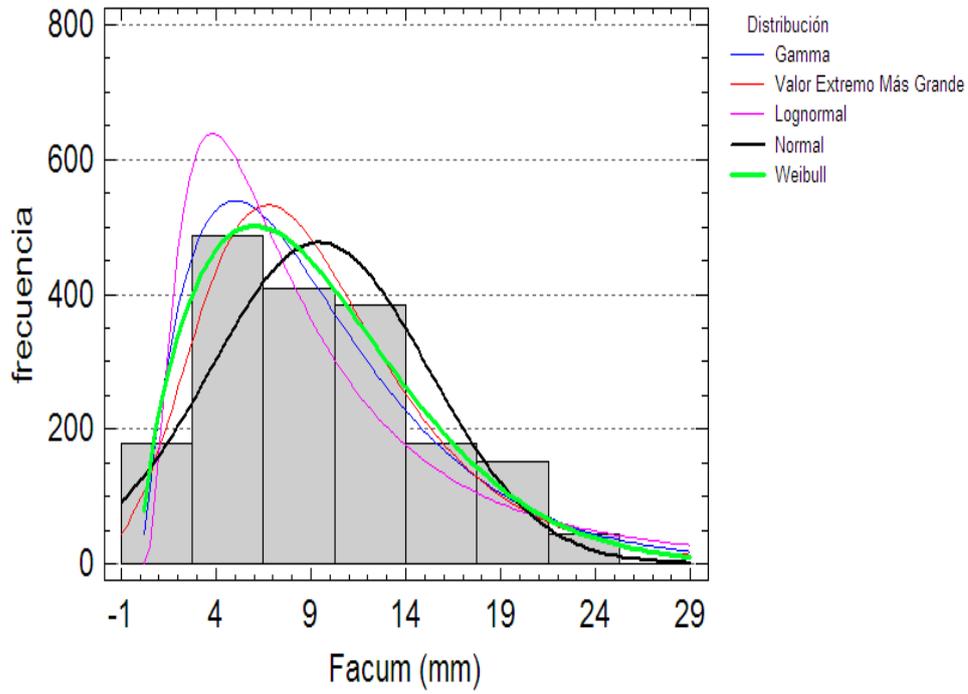


Figura 21. Ajuste cualitativo del histograma de frecuencias de la infiltración acumulada en el suelo de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo a las funciones de distribución estadísticas. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXVI

Tabla 6

Comparación de Distribuciones Alternas para la Infiltración Acumulada

<i>Distribución</i>	<i>Parámetros Est.</i>	<i>Log Verosimilitud</i>
Weibull	2	-5657.316109
Gamma	2	-5697.108039
Valor Extremo Máximo	2	-5733.163259
Normal	2	-5795.492835
Loglogística	2	-5839.011416
Logística	2	-5845.617973
Lognormal	2	-5861.163925
Uniforme	2	-5868.449936
Birnbaum-Saunders	2	-5925.302287
Exponencial	1	-5942.670926
Laplace	2	-5961.971221
Gaussiana Inversa	2	-6005.378323
Valor Extremo Mínimo	2	-6013.021177
Pareto	1	-999999999.9

Nota. Elaboración propia

ANEXO XXVII

Índices Globales de Asociación Espacial

En la Tabla 7 se muestra la comparación de los valores de la etapa inicial de la tasa de infiltración entre los años 2008 y 2009, donde se observa que z toma los siguientes valores: 4.29 y 8.04, respectivamente, siendo significativamente diferente el cambio temporal. En la etapa estable entre los años 2008 y 2009 se encuentra que z toma los siguientes valores: 2.30 y 2.33, respectivamente, siendo estadísticamente no significativo el cambio temporal, lo que indica que el suelo presenta fuertes variaciones en sus características físicas que influyen su capacidad de respuesta frente al ingreso del agua proveniente de la lluvia o del riego al inicio de estos eventos; sin embargo responde de la misma manera una vez que alcanza la saturación. La alta variabilidad en la tasa de infiltración inicial debe influenciar a los valores de la escorrentía y erosión que se emplean en la modelación de tales procesos.

Tabla 7

Índices Globales de Asociación Espacial

f_t	Índice Global	2008			2009		
		PC	z	T	PC	z	T
t= 2 min.	I	0.42	4.29	C	0.76	8.04	C
t= 47 min.	I	0.23	2.30	C	0.21	2.33	C
t= 2 min.	G	0.02	3.47	C	0.03	6.93	C
t= 47 min.	G	0.02	1.47	A	0.02	0.92	A

f: Tasa de infiltración para un tiempo t, I: Índice Global de Moran, G: Índice Global de Getis y Ord, PC: polígonos contiguos, C: Agrupado, A: Aleatorio, D: Disperso, Valor Crítico: $z=\pm 1.96$, Nivel de Significancia: 0.05.

Nota. Elaboración propia

ANEXO XXVIII

Indicadores Locales de Asociación Espacial

Patrón Local de Agrupación de la Tasa de Infiltración Observada en 2008. En la Figura 8(a) se muestran las agrupaciones con valores del índice local de Moran negativo, con valores entre -1.08 y -0.4, encontrándose con mayor frecuencia en las parcelas del sector alto de la cuenca, mientras que los valores positivos se observan en el sector medio y bajo.

En la Figura 8(b) se observa que los valores de z varían entre ± 1.65 en la mayoría de las parcelas resultando menor al valor crítico ± 1.96 , excepto en el sector medio, donde se observan valores de z estadísticamente significativos. Con base en la significancia, el patrón local de agrupación es aleatorio en gran parte de la cuenca y refleja valores significativamente similares en el sector medio. Con respecto al índice G_i^* , en la Figura 10(a) se observan valores z positivos significativos, > 2.58 para G_i^* representando las zonas con altas tasas de infiltración en el estado inicial, lo que supone un mayor grado de porosidad y contenido de humedad inicial bajo.

En la Figura 8(c) se observa que los valores positivos del Índice local de Moran varían entre 0.07 y 0.14 para la mayoría de las parcelas en toda la cuenca; encontrando que los valores más altos en el sector medio varían entre 0.36 y 14. En la Figura 8(d) se observa que los valores de z varían entre ± 1.65 en la mayoría de las parcelas resultando menor al valor crítico ± 1.96 ; mientras que en el sector medio se encontraron valores de z estadísticamente significativos. Mediante estos resultados se ha encontrado un patrón de agrupación aleatorio en gran parte de la cuenca y de valores significativamente similares en el sector medio. Con respecto al índice G_i^* , en la Figura 10(b) se observan valores z positivo significativos, > 2.58 indicando las zonas con la más alta tasas de infiltración en el estado estable, lo que se supone que existe mayor contenido de arena en la composición granulométrica del suelo en esta zona, ver Figura 10(b).

Patrón Local de Agrupación de la Tasa de Infiltración Observada en 2009. En la Figura 8(a) se muestran las agrupaciones de valores del índice local de Moran, donde se observa que los valores varían entre -0.48 y 0.09 en la mayoría de las parcelas de la cuenca, mientras que los valores positivos altos son notables en las parcelas ubicadas al

inicio del sector bajo. En la Figura 8(b) se observa que los valores de z varían entre ± 1.65 en la mayoría de las parcelas resultando menor al valor crítico ± 1.96 . Con base en la significancia, el patrón local de agrupación de la tasa de infiltración observada es aleatorio en gran parte de la cuenca y refleja valores significativamente similares en el sector medio. Con respecto al índice G_i^* , en la Figura 8(c) se observan valores z positivo significativos que varían entre 1.96 y 2.58, lo que indica la ocurrencia de la más alta tasa de infiltración en el estado inicial en la parcelas del sector medio.

En la Figura 9(c) se muestran los valores del índice local de Moran, donde se observa que los valores varían entre -0.6 y 0.06 en la mayoría de las parcelas de la cuenca, mientras que en el resto de las parcelas se observan valores positivos. En la Figura 9(d) se aprecia que los valores de z varían entre ± 1.65 en la mayoría de las parcelas resultando menor al valor crítico ± 1.96 . Con respecto al índice G_i^* , en la Figura 10(d) se muestran valores de z positivos significativos que varían entre 1.96 y 2.58, lo que indica la más alta tasa de infiltración en el estado estable en las parcelas del sector alto.

ANEXO XXIX

Distribución del Índice de Moran

En la Figura 22 se observa el gráfico cuantil-cuantil, donde se aprecia la carencia de normalidad en el caso de los índices locales de Moran en 2008 y 2009, encontrando ajuste en la sección central de las dos distribuciones; mientras que en las extremidades, los índices no se distribuyen normalmente; lo cual es importante en términos de la significancia. Mediante una evaluación más rigurosa de la distribución, basada en la prueba asintótica Chi cuadrado se rechaza la hipótesis nula de normalidad en los casos planteados, debido a que el valor-p es menor a 0.05 (Tabla 8).

El mismo problema parece que también afecta a la distribución del estadístico Getis y Ord, ya que se derivan de una manera similar, quedando establecido que la inferencia para la prueba de agrupaciones espaciales locales puede resultar inválida. Según Anselin (1995), en la práctica, la inferencia sobre la base de los niveles de pseudo significancia indicado por un enfoque de aleatorización condicional parece ser la única alternativa viable.

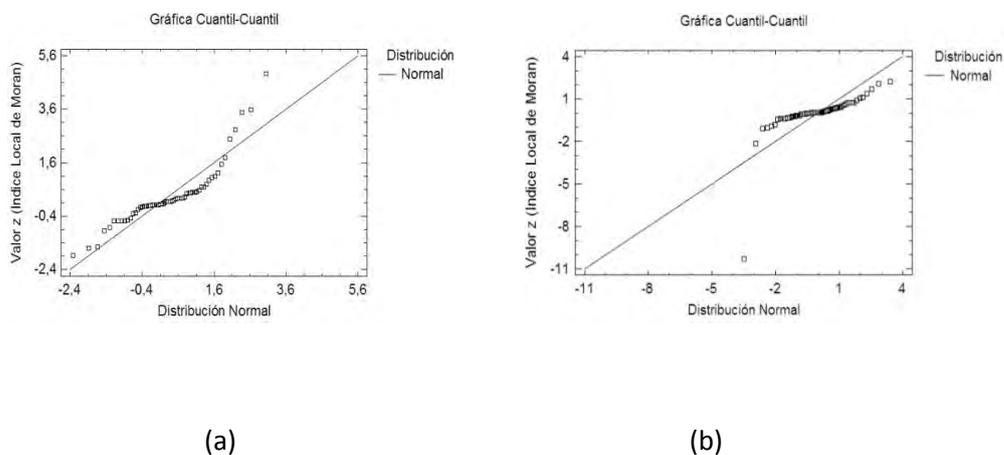


Figura 22. Gráfico cuantil-cuantil. Valor z del índice local de Moran vs la Distribución Normal (n=60 parcelas, 180 observaciones/año). (a) Tasa de infiltración para un t=2 min. 2008. (b) Tasa de infiltración para un t=2 min. 2009. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Prueba Normalidad Chi-Cuadrado para el Índice Local de Moran

Año	Tasa de infiltración (f)	χ^2	Valor-P
2008	f para t=2 min	54.6667	7.75E-06
2008	f para t=47 min	882.667	0.00E+00
2009	f para t=2 min	70.4754	1.79E-08
2009	f para t=47 min	40.9672	0.00094356

ANEXO XXX

En la Figura 32 se muestran los resultados de las pendientes de canales de drenaje en la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, a partir de la cual se puede afirmar que: (1) las pendientes variaron entre 0,002 y 0,037, (2) existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre las pendientes de las parcelas experimentales seleccionadas para la investigación.

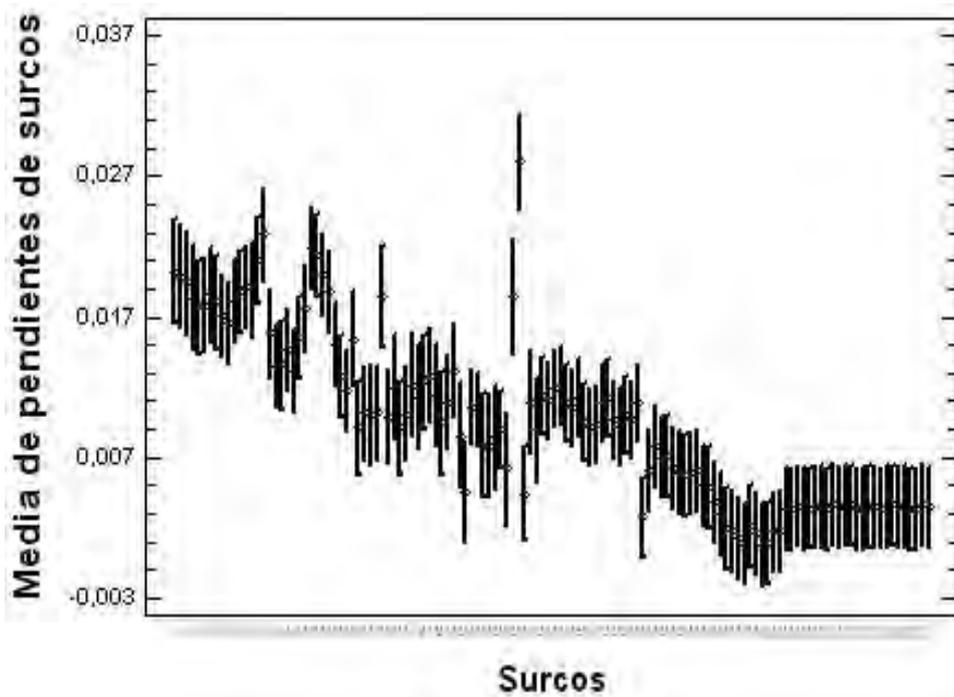


Figura 23. Pendientes de canales de drenaje en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXI

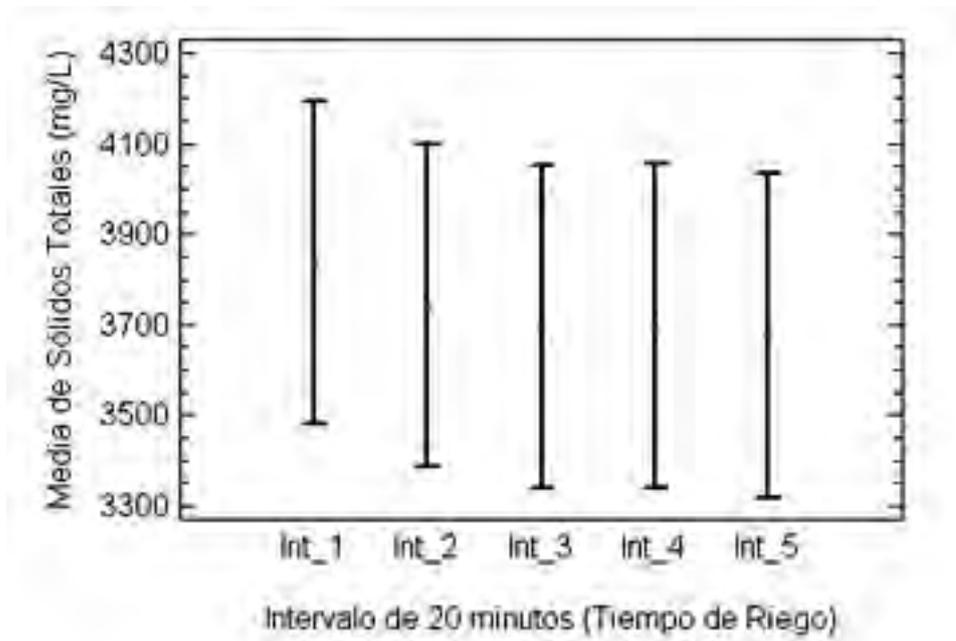


Figura 24. Sólidos Totales en caudales de drenaje durante eventos de riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXII

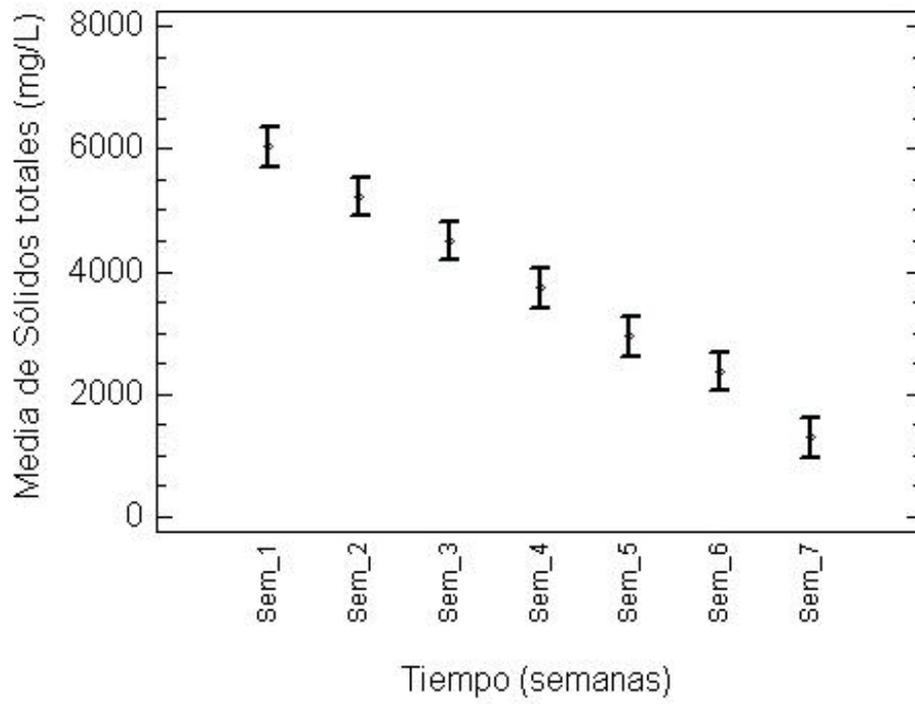


Figura 25. Sólidos Totales en caudales de drenaje durante ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXIII

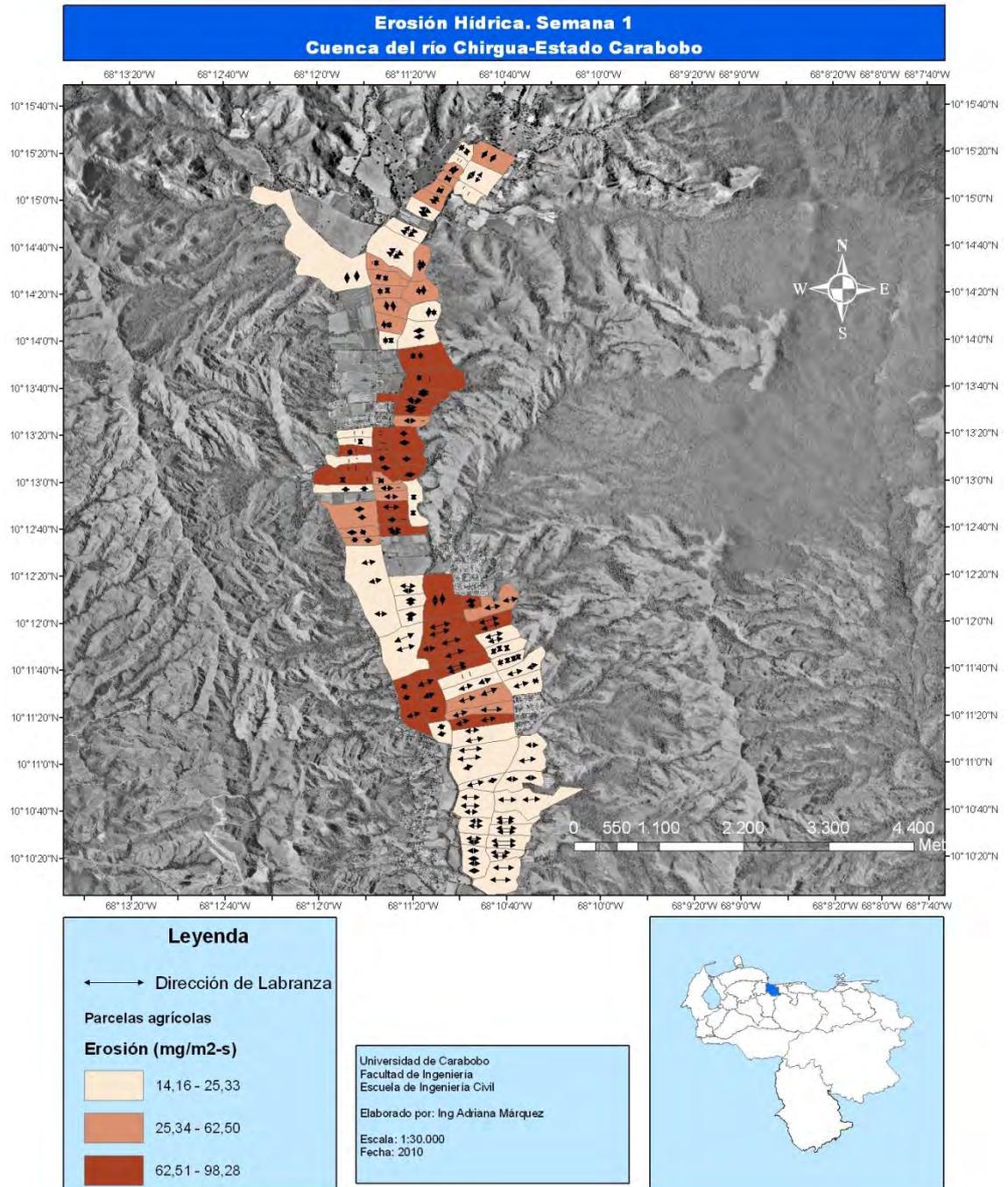


Figura 26. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXIV

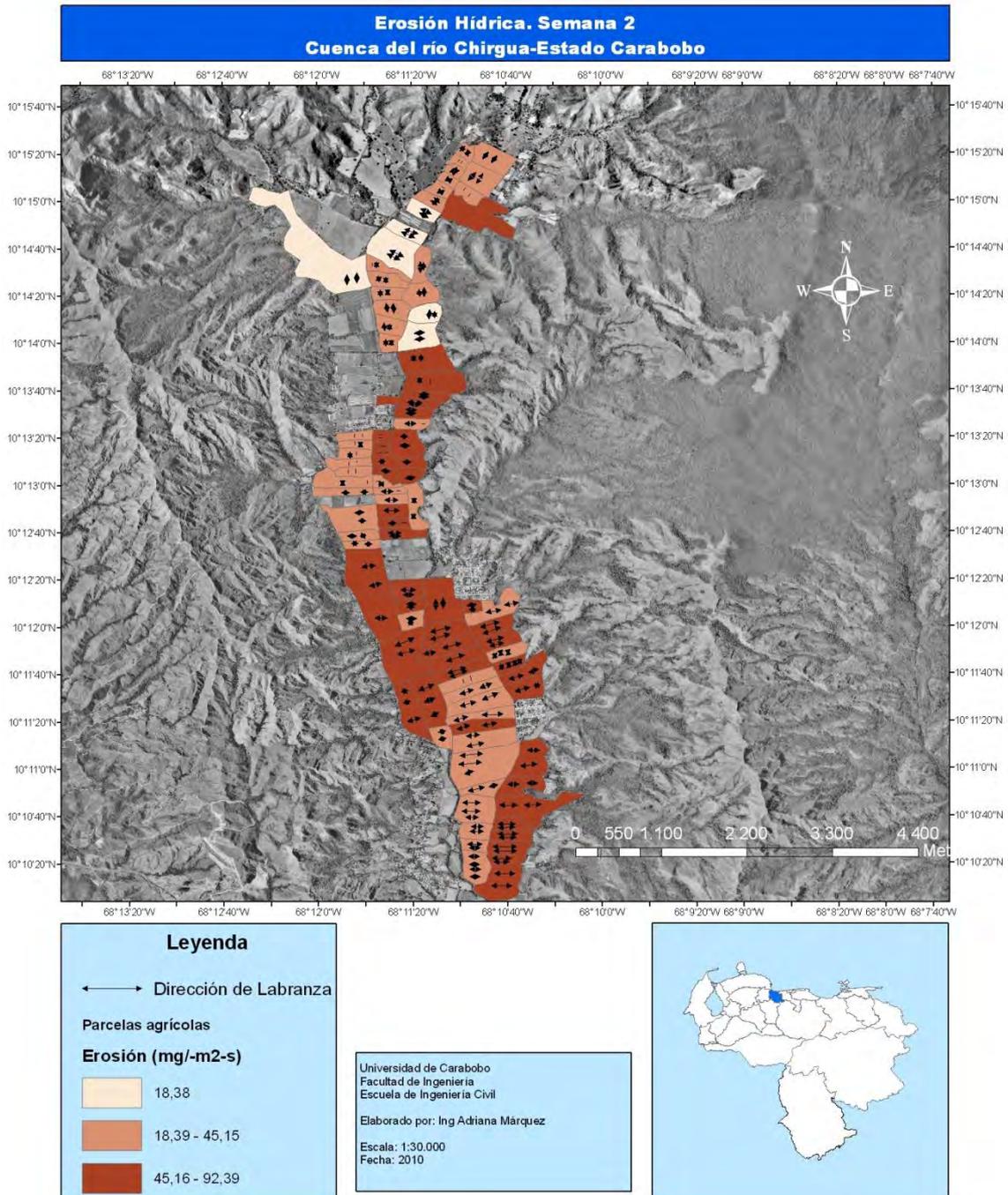


Figura 27. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXV

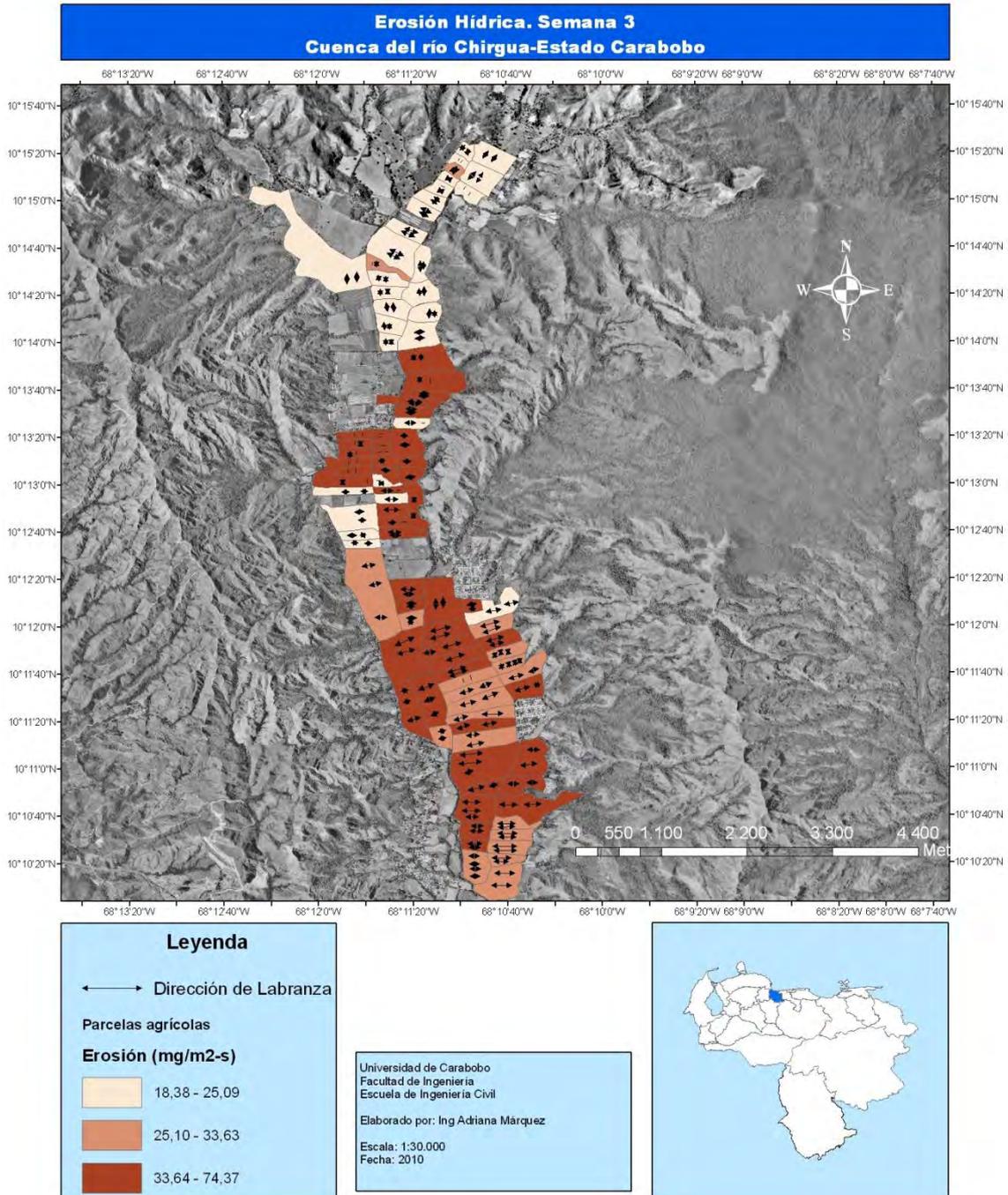


Figura 28. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXVI

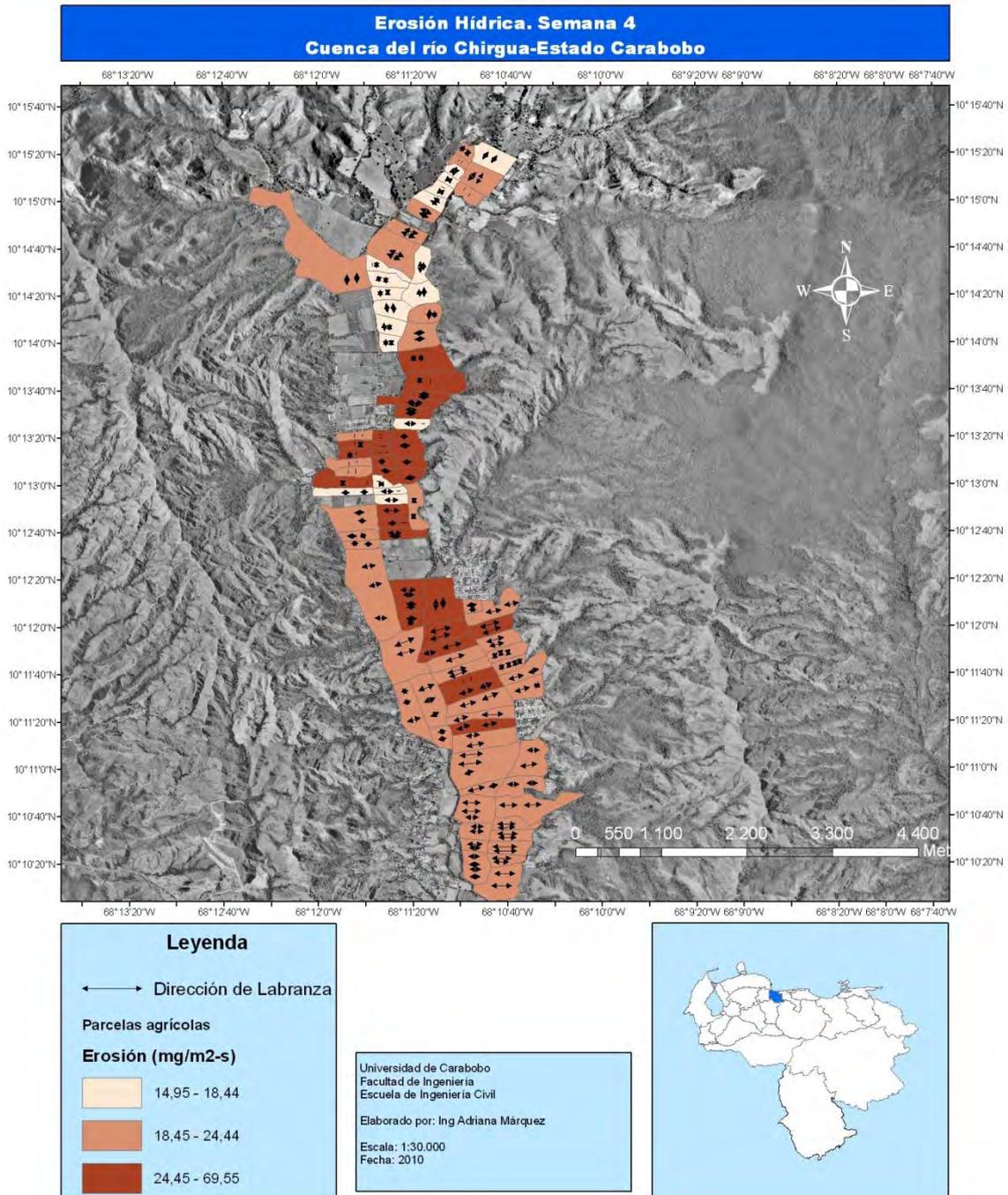


Figura 29. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXVII

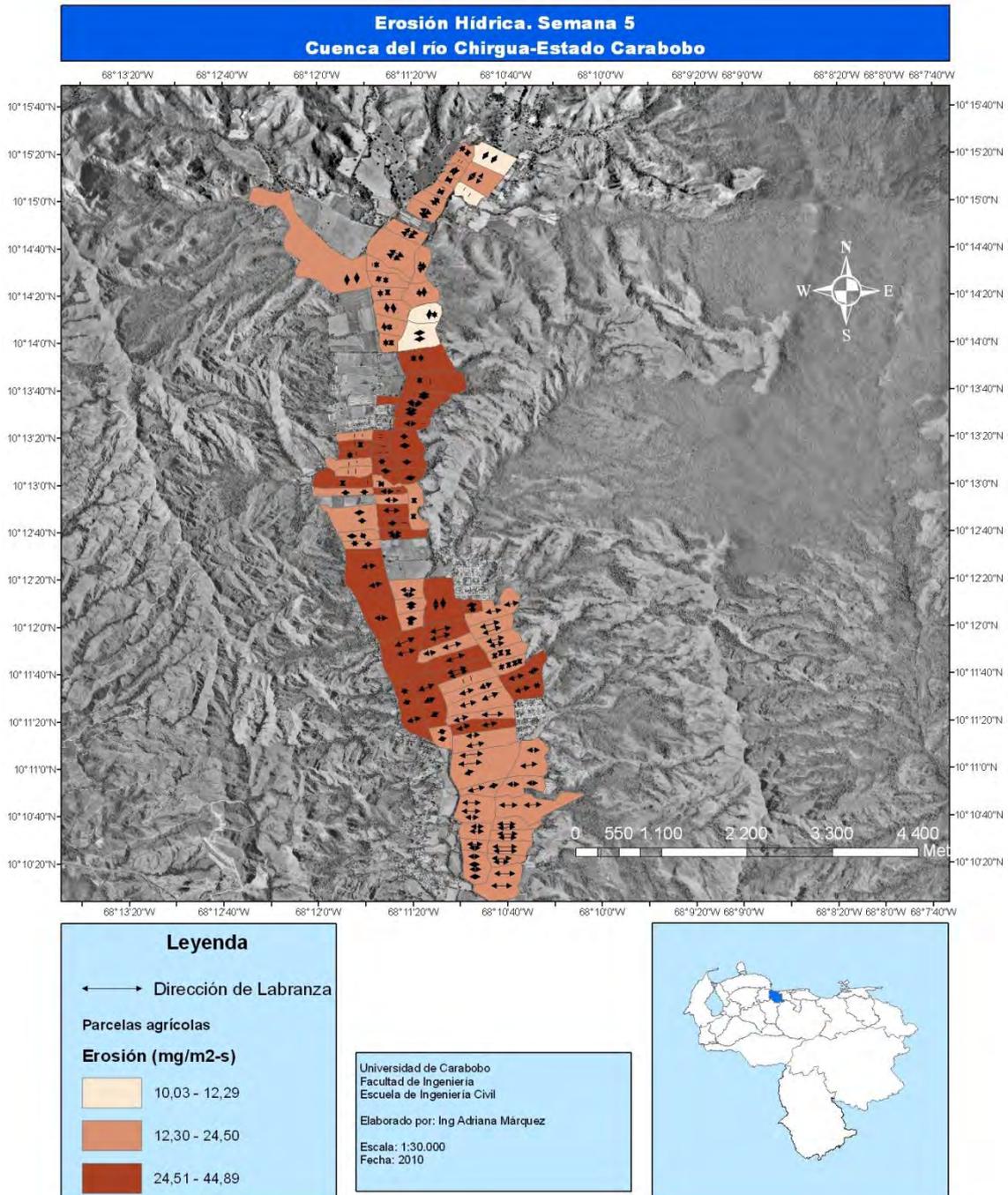


Figura 30. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXVIII

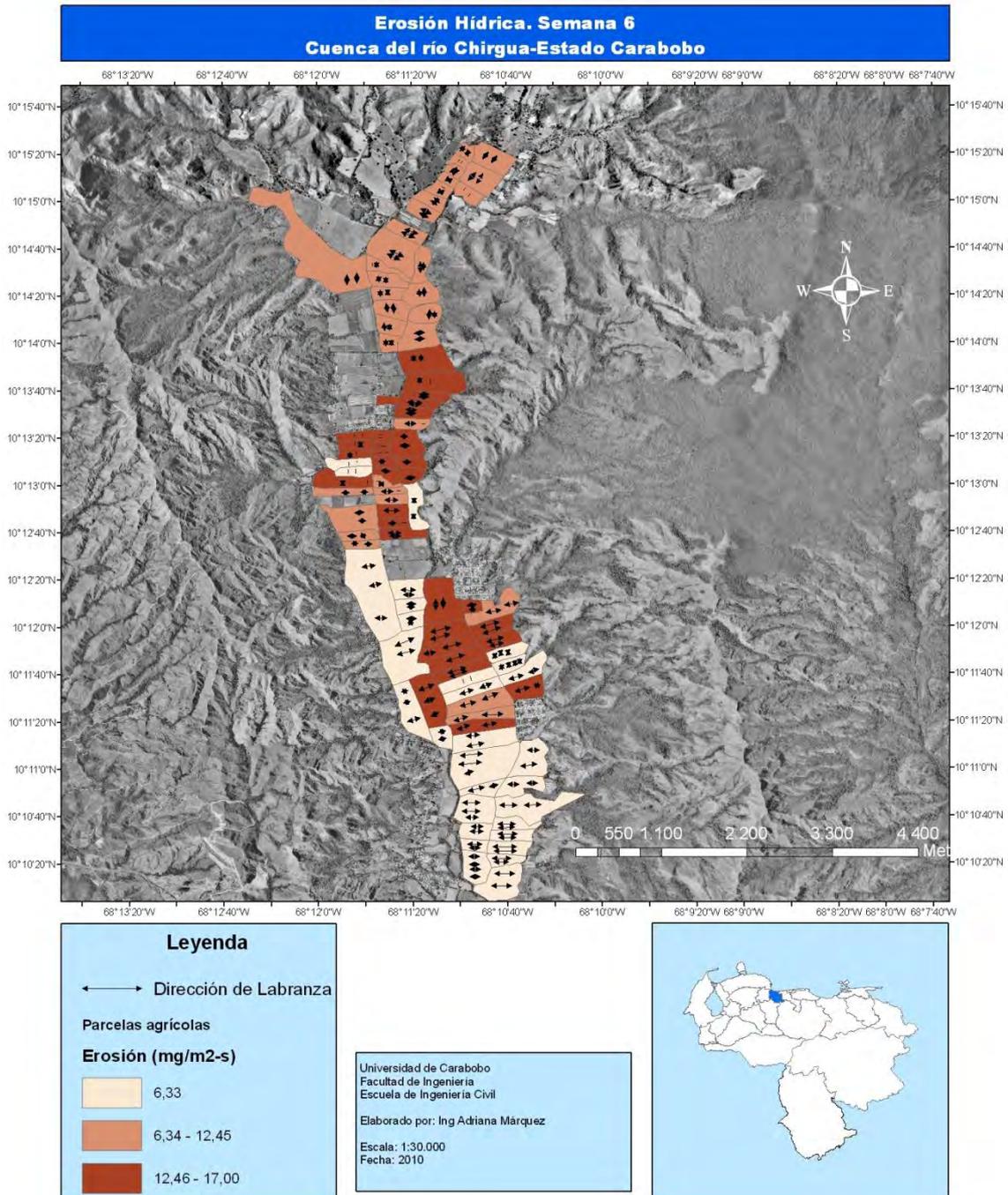


Figura 31. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XXXIX

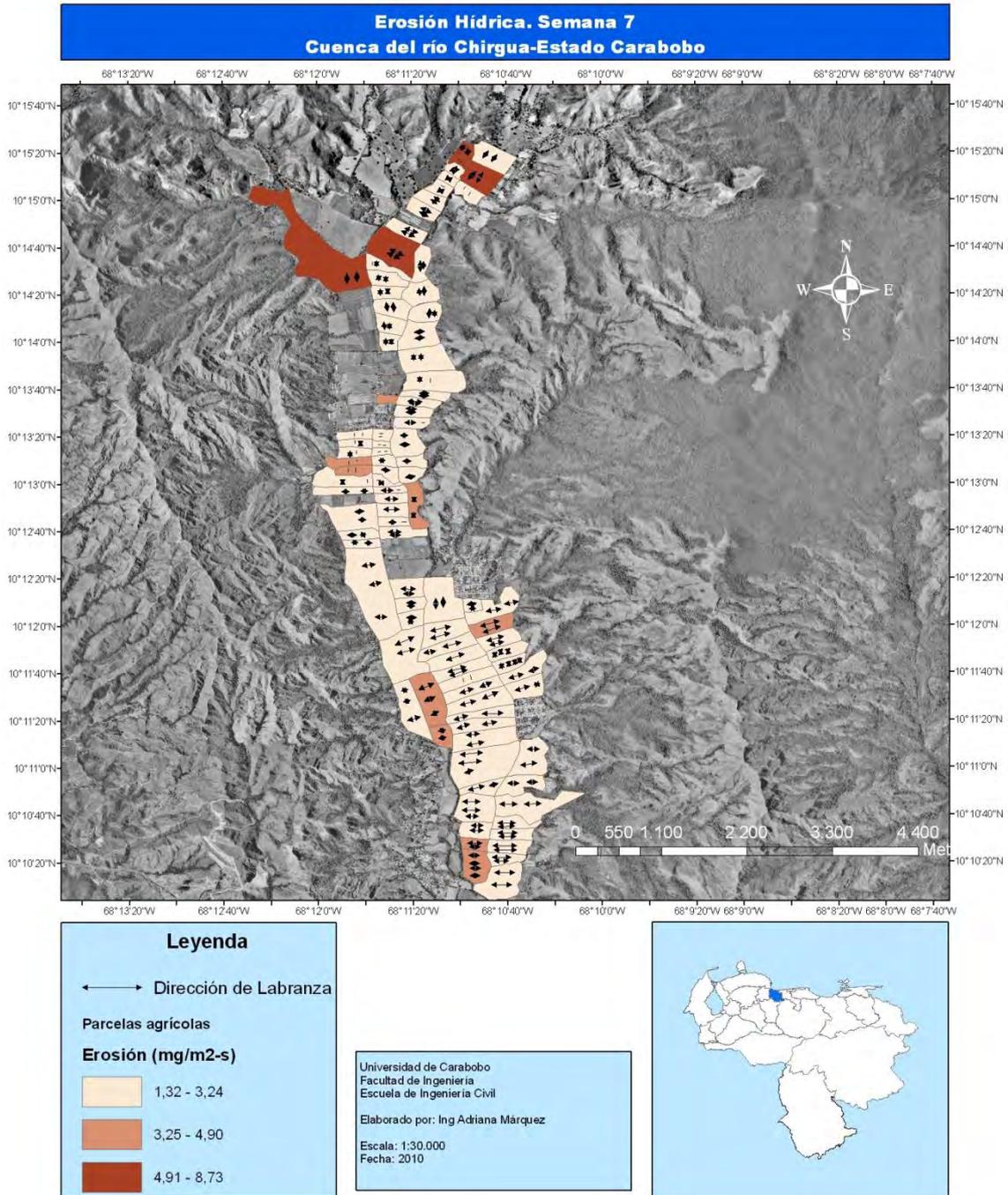


Figura 32. Erosión hídrica durante el ciclo bajo riego en parcelas agrícolas de la cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO XL

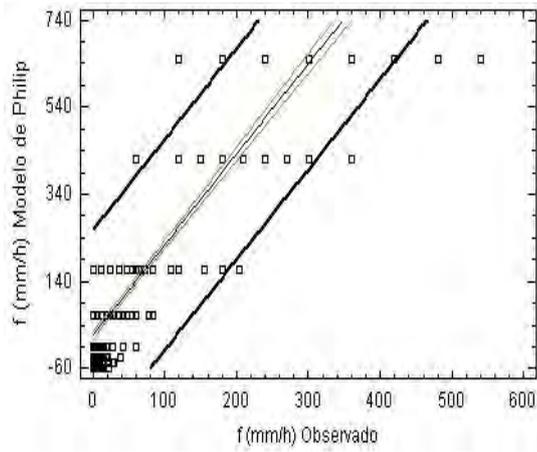


Figura 33. Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Philip. Fuente: Elaboración propia

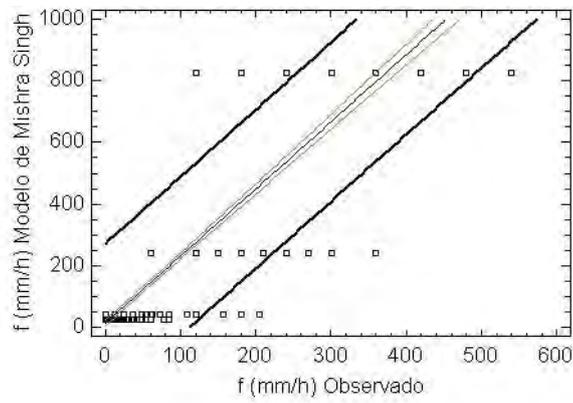


Figura 34. Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Mishra Singh. Fuente: Elaboración propia

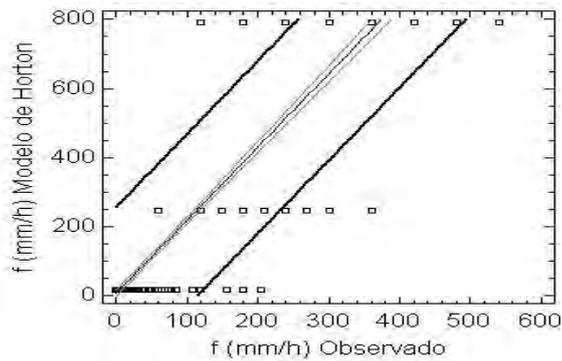


Figura 35. Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Horton. Fuente: Elaboración propia

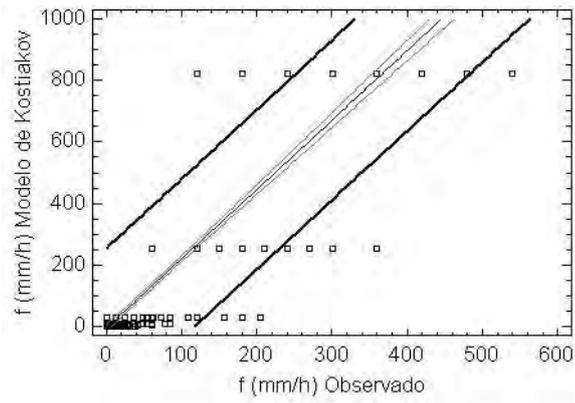


Figura 36. Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Kostiakov. Fuente: Elaboración propia

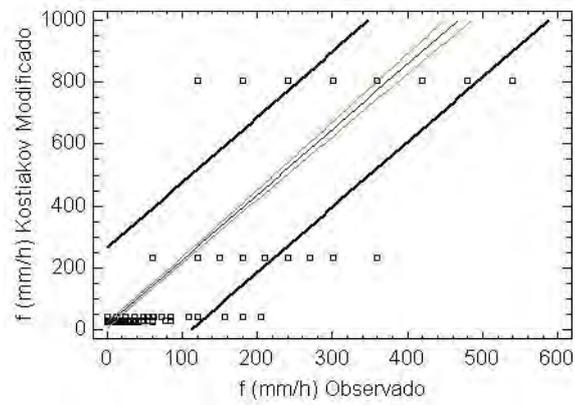


Figura 37. Observado vs Estimado. Validación del Modelo de Kostiakov Modificado. Fuente: Elaboración propia

ANEXO XLI

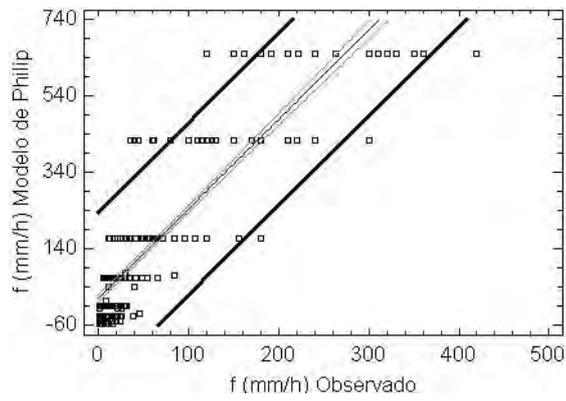


Figura 38. Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Philip. Fuente: Elaboración propia

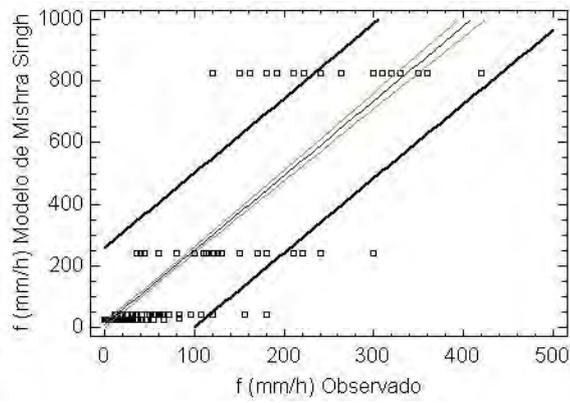


Figura 39. Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Mishra Singh. Fuente: Elaboración propia

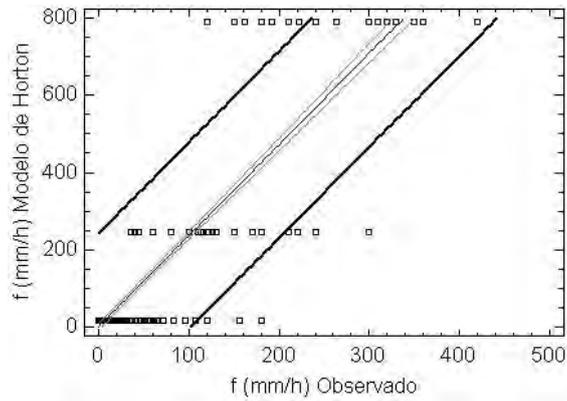


Figura 40. Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Horton. Fuente: Elaboración propia

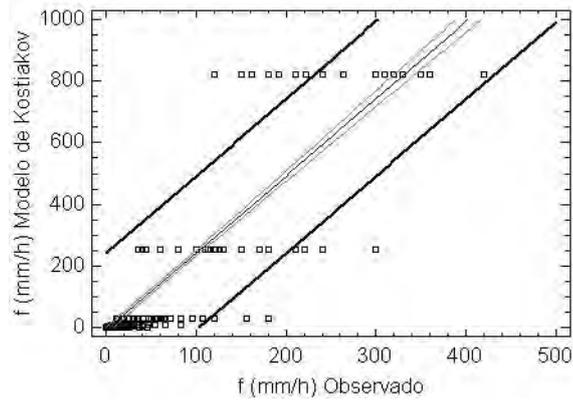


Figura 41. Observado vs Estimado. Prueba del Modelo de Kostiakov. Fuente: Elaboración propia

ANEXO XLII

Inventario de Pozos, Municipio Bejuma - Estado Carabobo. Datum, Wgs84.

Nº	Sector	Ref. GPS	Equipado	S/Equipar	Funcionando	Dañado	Observ.
1	Guadalupe, Particular	N.1134560 E. 589664 H. 734 m	Si		Si		
2	Guadalupe, Particular	N.1134561 E. 589665 H. 735 m	Si		Si		
3	La Emilia, de consumo Humano (Inos)	N.1133129 E. 589378 H. 716 m	Si		Si		
4	Cariaprima, Coop. los Chamanes, P.Nº 7F, Unid. Regantes Nº 2	N.1134402 E. 589945 H. 712 m		X			
5	Cariaprima, Sr. Jorge Bustillo, Particular.	N.1133917 E. 589461 H. 733 m	Si		Si		
6	Cariaprima- Montesacro Pedro Añez	N.1133563 E. 588961 H. 719 m		X			
7	Montesacro, Granja Santoria, Particular.	H.1133004 E. 588609 H. 703 m	Si				
8	Montesacro, Consumo Humano(Inos)	N.1132866 E. 588477 H. 706 m	Si				
9	Montesacro, Bigen Barroeta, Particular	N.1132243 E. 588204 H. 703 m	Si		Si		
10	Montesacro, Luis Ochoa, Particular	N.1132145 E. 588711 H. 700 m	Si		Si		
11	Montesacro, Familia Viso.	N.1131442 E. 588159 H. 711 m	Si		Si		
12	Potrerito, Invernadero Frutmar, Cesar Zambrano.	N.1130999 E. 585335 H. 699 m	Si		Si		
13	Potrerito, pozo, Cesar Zambrano Azul, Unid. Regante Nº 3	N.1134402 E. 588537 H. 710 m		X			Se propuso la Rehabilitación
14	Potrerito, Emma Ulloa, Unid. Regante Nº 4	N.1131002 E. 588413 H. 710 m		X			Esta recién perforado.
15	Potrerito, Calimar	N.1130605 E. 588463 H. 692 m	Si		Si		
16	Potrerito, El Chino	N.1130300 E. 588401 H. 691 m	Si		Si		
17	Potrerito, pichachera, Jose Agustín Borges, Parc. Nº 26	N.1130455 E. 587899 H. 708 m	Si		Si		
18	Potrerito, Simón Gómez, Parc. Nº 27	N.1130506 E. 587982 H. 704 m	Si		Si		
24	Potrerito Parcela de Guarino	N.1130631 E. 588795 H. 695 m		X			
25	La colonia Parcela de Gustavo Lorenzo	N.1127976 E. 589186 H. 672 m	Si		Si		
26	Carretera Parcela de Carlos	N.1125013 E. 588186 H. 673 m	Si		Si		
27	La colonia La Virgen	N.1128265 E. 588790 H. 663 m	Si		Si		
28	La Colonia Cerca del puente, Para Consumo Humano(Inos)	N.1128255 E. 588782 H. 677 m	Si		Si		
29	La Colonia (Inos)	N.1128261 E. 588921 H. 679 m	Si			X	
30	La Colonia, parcela de garcía	N.1127227 E. 589174 H. 670 m	Si		Si		
31	La Colonia, parcela de Simón Tovar	N.1127593 E. 589373 H. 622 m		X			
32	La Colonia, Parcela Nº 50 Luis Pérez	N.1127024 E. 589585 H. 652 m	Si		Si		
33	La Colonia, Parcela Nº 51 de Luis Serquera	N.1126839 E. 589479 H. 651 m	Si		Si		
34	Alcabala Nueva, parcela de Luis Esteban	N.1126865 E. 589622 H. 659 m		X			
35	La Colonia, parcela de Freddy Peñaloza	N.1127281 E. 589598 H. 671 m	Si		Si		
36	La Colonia, parcela Nº 48 de Susamira Martín	N.1128344 E. 589393 H. 680 m	Si		Si		Solo le falta la Bomba Sumergible.
37	La Colonia, parcela de Carmelo Pérez	N.1128580 E. 588738 H. 698 m	Si		Si		
38	La Paredaña, parcela Nº 18, de Hilda pinto	N.1130089 E. 589490 H. 693 m	Si		Si		
39	La Paredaña, parcela Nº 22	N.1130500 E. 588102 H. 706 m	Si		Si		
40	La Paredaña, parcela Nº 47, de Leonel Flores	N.1128476 E. 590084 H. 674 m		X		X	Se propuso la rehabilitación
41	Alcabala Nueva, cerca del abasto	N.1124869 E. 589289 H. 653 m		X		X	
42	La Paredaña, pozo, para consumo humano	N.1126311 E. 589839 H. 670 m	Si		Si		
43	La Paredaña, parcela de Héctor Pinto	N.1124876 E. 589657 H. 656 m		X		X	Se propuso la rehabilitación
44	Alcabala Nueva, parcela de Angulo, para consumo humano. Alcaldía de Bejuma	N.1124344 E. 589432 H. 656 m	Si		Si		
45	Casupito, parcela de Sandra César	N.1123413 E. 588409 H. 637 m					Se encuentra aprobado en proceso de perforación

ANEXO XLIII

Costos de Producción de papa bajo riego por aspersión. Ciclo verano 2005 - 2006

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Preparación de Tierras				
Big Rome	Pases	2	60.000	120.000
Rastra	Pases	6	40.000	240.000
Arado	Pases	1	60.000	60.000
Manejo de Semilla				
Semilla	Sacos	50	70.000	3.500.000
Descarga	Sacos	50	100	5.000
Limpieza	Sacos	50	500	25.000
Picado	Sacos	50	2.000	100.000
Siembra	Sacos	50	2.000	100.000
Fertilización y Siembra				
Abono 12-12-17 sp	Sacos	50	51.000	2.550.000
Descargar	Sacos	50	100	5.000
Incorporar	Sacos	50	500	25.000
Surcado	Pases	1	50.000	50.000
Tapado	Pases	1	50.000	50.000
Tapizado	Pases	1	50.000	50.000
Aplicación de Herbicidas				
Lexone	kg	1	94.500	94.500
Pirinex	lts	2	14.000	28.000
Gramoxone	lts	2	18.200	36.400
Dual	lts	2	58.730	117.460
Aplicación (Asperjadora)	Pases	1	40.000	40.000
Aplicación de Riegos				
Riego	Pases	12	100.000	1.200.000
Fumigaciones				
1) Daconil				
Karate	Kg	2	41.000	82.000
Surfactron	lts	0,5	61.494	30.747
BB5	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
2) Amistard				
Surfactron	Sobre	2	60.150	120.300
BB5	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
Solub foliar	kg	3	9.736	29.208
3) Bravo 500				
Surfactron	lts	2	31.267	62.534
BB5	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
Aica foliar	kg	2	9.470	18.940
4) Amistar				
Surfactron	Sobre	2	60.150	120.300
BB5	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
Solub foliar	kg	3	9.736	29.208
Omite	lts	0,5	68.634	34.317
5) Dithane				
Daconil	kg	2	10.000	20.000
Trigard	kg	1	41.000	41.000
Trigard	Sobre	2	35.000	70.000
Karate	lts	0,5	61.494	30.747
Surfactron	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
6) Manzate				
Primor	kg	3	10.000	30.000
Surfactron	kg	1	40.000	40.000
BB5	lts	0,5	14.400	7.200
BB5	lts	0,5	15.000	7.500
Aplicación (Asperjadora)	Pases	6	40.000	240.000
Cosecha				
Rotativa	Pases	1	50.000	50.000
Romper Tapizas	Pases	1	50.000	50.000
Arrancadora	Pases	1	50.000	50.000
Recolección	Jornal	25	15.000	375.000
Sacos	Sacos	300	800	240.000
Mecatillo	Rollo	0,5	40.000	20.000
Caleta	Sacos	300	300	90.000
Flete	Kg	15000	30	450.000
SubTotal=				10.808.861
Imprevistos 10%				1080886.1
Total =				11.889.747

ANEXO XLIV

Costos de Producción (Bs/ha) de Maíz Blanco para Semilla

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Preparación de tierras				
Arado	Pase	1	60.000	60.000,00
Rastra	Pase	3	40.000	120.000,00
Surcado	Pase	1	40.000	40.000,00
Siembra				
Semilla	Kg	18	11070	199.260,00
Siembra Mecánica	Pases	1	70.000	70.000,00
Fertilización				
Formula Completa (10-20-20/4 CP)	Sacos	8	30200	241.600,00
Urea (46%)	Sacos	3	20200	60.600,00
Aplicación	Pases	2	70.000	140.000,00
Control de plagas				
Macth	Lts	0,5	92.000	46.000,00
Karate	Lts	0,5	61.000	30.500,00
Aplicación	Pases	2	70.000	140.000,00
Control de malezas				
Prowl	Lts	4	23.830	95.320,00
Atrazina	Kg	1	28.780	28.780,00
Aplicación	Pases	2	70.000	140.000,00
Riego				
Aplicación de riego por Aspersión	Jornal	10	15.000	150.000,00
Arranque de espigas				
Arranques de espigas	Pases	4	100000	400000
Cosecha				
Arranque	Sacos	180	1.400	252.000,00
Acarreo al Galpón	Jornales	4	15.000	60.000,00
Preclasificación	Sacos	180	1.000	180.000,00
Transporte	Kg	2500	60	150.000,00
Sub-Total				2.604.060,00
Seguro 5%				130.203,00
12% Imprevistos				312.487,20
Total				3.046.750,20

Fuente: MPPA,(2006)