AAT5292001000000

UNIVERSIDAD CATÓLICA
ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
ESTUDIOS DE POSTGRADOÁREA DE INGENIERÍA

Postgrado en Ingeniería Ambiental

Trabajo de Grado de Maestría

GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LAS CUENCAS DE MONTAÑA Y PIEDEMONTE DEL ESTADO COJEDES

Presentado por Vivas de Mora Iraida Rafaela

para optar al titulo de Magíster en Ingeniería Ambiental

Tutor

Msc. Ruiz Domingo

Caracas, Noviembre de 2005

DEDICATORIA

A DIOS, PAZ QUE SUPERA TODA INTELIGENCIA Y CUSTODIARÁ MI CORAZÓN Y MI MENTE EN CRISTO JESÚS (Flp 4, 7)

A la memoria de Luis Andrés Vivas Vivas, ejemplo de trabajo, sencillez y humildad en toda su vida

A Julio, Juan José, María José y Julia María, estrellas brillantes y fortalezas en mi existencia terrenal

A mi madre, Rosa de Las Nieves, estímulo de amor y fuerza espiritual

A mis hermanos y sobrinos, fuentes constantes de solidaridad, hermandad, alegría y comprensión

A mis hermanos de la comunidad neocatecumenal por sus oraciones

AGRADECIMIENTOS

Todo trabajo no es obra exclusiva del autor, muchas son las personas e instituciones que hacen posible generar la idea, plasmar su realización y ejecutarla. Por ello manifiesto mi eterno agradecimiento a:

Prof. José D. Ruíz, de la UNELLEZ, guía eficiente.

Prof. Oscar Silva, de la UCV, luz y conocimientos siempre dispuestos.

Prof(s). César Abreu, Franklin Paredes y Mauricio Cortéz, de la UNELLEZ, apoyos constantes en el manejo estadístico y la hoja de cálculo.

La UNELLEZ, en las personas del Prof. Hildemaro Echenagucia y de la TSU Joaquina Castillo, colaboradores en los procesos administrativos de planificación y ejecución.

Al MARN, en la persona del Analista Eduardo Arteaga, por la asistencia continua con los registros de precipitación.

Al Tec. Agrop. Franklin Colmenares y al Br. Julián Torrado por la ayuda en la lectura de las bandas pluviográficas.

Alba Rocío, colaboradora consecuente en mis labores cotidianas.

ÍNDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación de la investigación	5
1.3 Objetivos de la investigación	6

1.3.1 Objetivo general..... 6

1.3.2 Objetivos específicos..... 6

CAPITULO II..... 8

MARCO TEÓRICO..... 8

2.1 Antecedentes de la investigación..... 8

2.2 Fundamentos teóricos..... 12

CAPÍTULO III..... 15

MARCO METODOLÓGICO..... 15

3.1 Unidad de estudio..... 15

3.2 Fases de la investigación..... 15

3.2.1 Obtención de los valores observados de erosividad de la lluvia.... 15

3.2.2 Generación de modelos empíricos..... 20

3.2.2.1 Evaluación de la Aproximación de Arnoldus..... 21

3.2.2.2 Generación de modelos para estimar valores mensuales promedios de erosividad de la lluvia 21

3.2.3 Estimación de los valores promedios mensuales y anuales de

erosividad de la lluvia utilizando el modelo de simulación EPIC..... 22

3.2.4 Evaluación de los modelos de regresión generados y de los valores estimados de erosividad de la lluvia por el modelo EPIC..... 23

CAPÍTULO IV..... 24

RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 24

4.1 Valores observados de erosividad de la lluvia..... 24

4.2 Relación entre los valores anuales promedio de erosividad de la lluvia y el índice modificado de Fournier..... 34

4.3 Relación entre los valores promedios mensuales observados de erosividad de la lluvia y la precipitación promedio mensual..... 34

4.4 Valores simulados de erosividad de la lluvia por el modelo EPIC y su comparación con los valores observados..... 57

CONCLUSIONES..... 68

RECOMENDACIONES..... 71

REFERENCIAS..... 72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1	Estaciones climáticas involucradas en la obtención de los valores medidos y estimados de erosividad de la lluvia.....	18
2	Años de registros en precipitación horaria disponible (bandas pluviográficas).....	20
3	Número de eventos erosivos por estaciones analizadas.....	20
4	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Tinaco.....	25
5	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación SanCarlos-UNELLEZ.....	26
6	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Pao-Planta.....	27
7	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación La Sierra.....	27
8	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Morita Caserío.....	28
9	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Hato Las Babas.....	29
10	Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación San José de Chirgua.....	30

11 Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación El Retazo..... 31

12 Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Vallecito..... 32

13 Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Pao-Oficina..... 33

14 Valores del índice modificado de Fournier para las estaciones analizada..... 37

15 Modelos generados para cada una de las estaciones analizadas.. 38

16 Modelos de tipo rectilíneo con su coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales..... 44

17 Estadísticas básicas entre los valores observados y estimados de las ecuaciones conjuntas..... 46

18 Estadísticas de regresión para las ecuaciones conjuntas definidas 53

19 Valores promedios mensuales y anuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC..... 58

20 Estadísticas básicas de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC..... 59

21 Estadísticas de regresión de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC..... 60

22 Cuantificación de los índices utilizados para el análisis de las diferencias entre los valores observados y simulados por EPIC. 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Ubicación geográfica de la unidad de estudio.....	16
2	Ubicación de las estaciones climáticas.....	19
3a	Distribución de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia.....	35
3b	Distribución de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia.....	36
4	Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajustes obtenidos para las estaciones Tinaco y San Carlos-UNELLEZ.....	39
5	Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajustes obtenidos para las estaciones Pao-Planta y La Sierra.....	40
6	Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajustes obtenidos para las estaciones Morita Caserío y Hato Las Babas.....	41

7 Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajustes obtenidos para las estaciones San José de Chirgua y El Retazo..... 42

8 Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajustes obtenidos para las estaciones Vallecito y Pao-Oficina..... 43

9 Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las estaciones de Tinaco y San Carlos-UNELLEZ..... 48

10 Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las estaciones de Pao-Planta y La Sierra..... 49

11 Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las estaciones de Morita Caserío y Hato Las Babas..... 50

12 Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las estaciones de San José de Chirgua y El Retazo..... 51

13 Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las estaciones de Vallecito y Pao-Oficina..... 52

14 Diferencias de estimación según los valores de erosividad de la lluvia estimados por ecuación (8)..... 55

15 Diferencias de estimación según los valores de erosividad de la lluvia estimados por ecuación (9)..... 55

16 Valores promedios de los residuales para la estimación de la ecuación (8)..... 56

17 Valores promedios de los residuales para la estimación de la ecuación (9)..... 56

18 Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones de Tinaco y San Carlos-UNELLEZ..... 61

19 Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones de Pao-Planta y La Sierra..... 62

20 Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones de Morita Caserío y Hato Las Babas..... 63

21 Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones de San José de Chirgua y El Retazo..... 64

22 Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones de Vallecito y Pao-Oficina..... 65

23 Diferencias de simulación según la erosividad de la lluvia para el modelo EPIC..... 67

RESUMEN

Vivas I. y Ruiz, D.

Universidad Católica Andrés Bello

e-mail: yayavivas@cantv.net

El índice de erosividad refleja el potencial erosivo de las lluvias. Este estudio tuvo como objetivo la obtención del índice de erosividad en diez estaciones localizadas en las cuencas de montaña y piedemonte del estado Cojedes. Se empleó la ecuación de Wischmeier y Smith (1978) para el análisis de las bandas. Se evaluó la relación entre la precipitación media mensual expresada como lámina de lluvia y la erosividad de la misma a nivel local en cada estación y en conjunto. Los resultados más relevantes fueron: Los modelos matemáticos locales presentaron R^2 superiores a 0,80, no así los modelos conjuntos; la erosividad de la lluvia promedio mensual y anual en la mayoría de las estaciones fue adecuadamente modelada a través del modelo EPIC. Se concluye que la erosividad de la lluvia no es homogénea en la zona de estudio infiriéndose la existencia de factores climáticos o de otra índole que modulan este fenómeno. El modelo EPIC es la herramienta más adecuada para estimar el índice de erosividad en la zona estudiada. Se recomienda ampliar esta investigación considerando nuevas regiones y ampliando la serie estadística de las estaciones pluviométricas.

Palabras clave: Erosividad de la lluvia, precipitación mensual, cuencas de montaña y piedemonte, generación y evaluación de modelos.

ABSTRACT

Vivas, I. and Ruiz, D.

Universidad Católica Andrés Bello

e-mail: yayavivas@cantv.net

Erosivity index shows the erosive potencial of rains. The objective of this study was obtaining erosivity index in ten pluviometric stations placed in mountains and sidehills basins fron Cojedes State. For analyzing bands it was employed Wischmeier and Smith's equation. It was evaluated the relation between mean monthly precipitation expressed as depth water and erosivity of this precipitation at local level in each station and as a whole. The most remarkable results were: Local mathematical models showed R^2 higher than 0.80, but whole models were not so good; the average monthly and yearly erosivity rain in most of the stations was adequately modeled by using EPIC model. It is concludes that rain erosivity is not homogeneous in the zone of the study by inferring the existence of climatic factors of another kind which modeled this phenomenon. EPIC model is the most adequate tool for estimating the erosivity index in the zone which was studied. It is recommended to wide this research by considering new regions and also by increasing the statistical series of pluviometric stations.

Keys words: erosivity rain, precipitation monthly, mountains and sidehills basins, generation and evaluation models

INTRODUCCIÓN

Las civilizaciones actuales se enfrentan a la problemática del desequilibrio en los procesos naturales y al crecimiento exponencial de las tasas de erosión. La degradación del suelo es una de las manifestaciones físicas de esta problemática, cuyo proceso más importante de generación es la erosión hídrica. La precipitación es el factor suministrador de la energía para el trabajo erosivo y de allí se habla de erosividad de la lluvia, definiendo esta expresión, el potencial que tiene la lluvia para producir erosión.

La estimación de la erosividad de la lluvia se realiza con una ecuación empírica, siendo los datos de entrada obtenidos a partir del análisis de bandas pluviográficas, proceso lento que requiere principalmente de una red de estaciones con registro eficiente de información, lo que hace a veces inviable su aplicación.

En este trabajo se generaron y evaluaron modelos matemáticos para estimar valores mensuales de erosividad de la lluvia para las cuencas de montaña y piedemonte del estado Cojedes, en base a la lámina de precipitación promedio mensual, así como se evaluó la aproximación de Arnoldus y la estimación de la erosividad de la lluvia por el modelo EPIC (Environmental Policies Integrated Climated). Ello con el fin de buscar alternativas para la obtención de la erosividad de la lluvia, que requieran información de fácil obtención y ahorro de tiempo. Sin embargo, los resultados obtenidos están limitados por la cantidad de años analizados en las bandas pluviográficas, debido a problemas de funcionamiento de las estaciones.

Desde el punto de vista geográfico, la obtención de la erosividad de la lluvia permite diferenciar áreas de acuerdo a su potencial erosivo, mediante su representación cartográfica. En virtud de ello, considerando la calidad de los datos generados, se evaluó la posibilidad de hacer estimaciones en otras localidades del área de estudio, con el propósito de definir su patrón de distribución espacial.

Las fases de realización de la investigación comprendieron la obtención de los valores observados de erosividad de la lluvia, generación de modelos empíricos, estimación de los valores promedios anuales y mensuales de erosividad de la lluvia utilizando el modelo EPIC y la evaluación de los modelos empíricos generados y de los valores simulados de erosividad de la lluvia por el modelo EPIC.

El presente trabajo se estructuró de la siguiente manera. El capítulo I contiene el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación; el capítulo II comprende el marco teórico relacionado con la estimación de la erosividad de la lluvia; el capítulo III corresponde al marco metodológico; el capítulo IV refiere los resultados y discusiones, enumerando al final las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis e interpretación de los resultados.

Finalmente los resultados obtenidos en este trabajo constituyen avances importantes y complementarios de gran cantidad de estudios realizados en otras localidades de Venezuela sobre la estimación del valor de erosividad de la lluvia, y de interés práctico en la planificación conservacionista de unidades hidrológicas para la prevención y control del proceso erosivo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En la tarea de planificar el manejo racional de una cuenca hidrográfica el insumo básico necesario lo constituye un diagnóstico de sus características, incluyendo específicamente como información relevante las pérdidas de suelo generadas por erosión hídrica. Existen muchos modelos para estimar estas pérdidas, siendo el de mayor difusión y utilización la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), desarrollada por Wischmeier y Smith (1978).

Este modelo es de tipo paramétrico, basado en relaciones estadísticas entre pérdidas de suelo y la acción de unas determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo, sobre una parcela o superficie de terreno. Estas condiciones conforman los parámetros físicos y de manejo que en forma interrelacionada determinan el proceso erosivo, agrupándose en seis factores principales que se expresan numéricamente (Páez, 1989; González, 1991). Hasta el momento no existen indicios de que pueda ser reemplazada, sobre todo en Latinoamérica, ya que ello equivaldría a contar con un registro sistemático y eficiente de información requerida para predecir con precisión estos parámetros físicos (Páez,

1995).

El factor erosividad de la lluvia ("R") es uno de los que agrupa la USLE, obtenido como un valor medio anual para los años que se consideren, de los valores mensuales y anuales del índice EI_{30}, definido por Wischmeier (1959: citado por Wischmeier y Smith, 1978), para una localidad en particular. La ecuación para estimar el EI_{30} requiere información extraída de las bandas pluviográficas, lo que representa una limitante por la dificultad en ubicar las mismas y de las fallas de funcionamiento de los relojes en los pluviógrafos. El procedimiento de generar la información es complejo y lento, ya que el análisis se hace por cada evento erosivo que se registre, una cantidad de años que permita una eficiente estimación.

Ante esta situación se ha recurrido a las ecuaciones de regresión, relacionando el valor de EI_{30} obtenido del análisis de las bandas pluviográficas, con la lámina de lluvia diaria y mensual, dicho método ha sido empleado por muchos investigadores en diferentes localidades del país (Acosta y Cordero, 1982; Fernández, 1986; Páez y Rodríguez, 1989; Páez, 1992; Ojeda, 1994), citado por Silva (2005). Asimismo para la obtención de valores anuales del EI_{30} ha sido utilizada la aproximación de Arnoldus (1977) y recientemente se ha empleado el modelo de simulación EPIC (USDA-ARS-BRC. 1977: citado por Silva, 2002) para la estimación de los valores del índice a diferentes agregaciones temporales.

Para el estado Cojedes no existen ecuaciones definidas que expliquen estas relaciones, ante lo cual surgió la necesidad de desarrollar esta investigación en algunas localidades ubicadas en las cuencas de montaña y piedemonte de los ríos

Tucuragua, San Carlos, Tinaco y Pao, al norte del estado Cojedes, con la finalidad de responder a las siguientes interrogantes:

¿Es posible emplear modelos matemáticos para estimar la erosividad de la lluvia como una función de la precipitación mensual y la altitud?

¿Es factible estimar la erosividad media mensual de otras localidades en base a la relación erosividad de la lluvia promedio mensual y precipitación media mensual en ciertas estaciones?

¿Se puede estimar la erosividad de la lluvia promedio anual como una función de la aproximación de Arnoldus?

¿Es aceptable la bondad de estimación de la erosividad de la lluvia utilizando el modelo de simulación EPIC?

1.2 Justificación de la investigación

La evaluación cuantitativa de las pérdidas de suelo por erosión hídrica es de importancia fundamental para la formulación de planes conservacionistas de cuencas hidrográficas, especialmente delimitadas en tierras altas, con miras a establecer las medidas que se requieren para controlar el proceso erosivo.

Por otra parte es necesario diagnosticar el riesgo de erosión hídrica, que existe en estas unidades hidrográficas, para soportar técnicamente las acciones preventivas que permitan orientar positivamente el uso de la tierra. Por ello las razones que justifican esta investigación se centran en la necesidad de información básica para resolver un problema práctico de manejo de cuencas, como es seleccionar los usos y

manejos de la tierra más adecuados, que minimicen el proceso erosivo, en función de su cuantificación actual y riesgo potencial. Más aún, este estudio constituye referencia e insumo de información para otros estudios dirigidos a minimizar la alteración del régimen hídrico en cuencas productoras de agua, cuya importancia estratégica en seguridad y defensa del país estriba en que las mismas son fuentes de abastecimiento agrícola-industrial-humano, tal es el caso de las unidades hidrológicas del área de estudio, donde existen dos sitios de almacenamiento y una derivación en los ríos Pao y San Carlos, así como proyectados tres embalses, en el río San Carlos, el río Tinaco y el río Cojedes, al cual desemboca el río Tucuragua.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Generar y evaluar modelos empíricos para estimar la erosividad de la lluvia a partir de la lámina promedio mensual de precipitación en las cuencas de montaña y piedemonte del estado Cojedes.

1.3.2 Objetivos Específicos

1.-Evaluar la influencia de la precipitación media mensual y de la altitud sobre la erosividad de la lluvia.

2.-Generar modelos matemáticos para estimar la erosividad de la lluvia como una función de la precipitación promedio mensual y de altitud.

3.-Evaluar la calidad predictora de los modelos generados.

4.-Evaluar la estimación de la erosividad anual de la lluvia como función de la

aproximación de Arnoldus.

5.- Comparar los datos observados de erosividad de la lluvia con los obtenidos a través del modelo de simulación hidrológica EPIC.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Para estimar el potencial erosivo de la lluvia se han desarrollado índices de erosividad, como información básica relevante en la planificación agrícola de las tierras. El de mayor aceptación a nivel mundial es el EI_{30}. En este sentido, Wischmeier (1959: citado por Wischmeier y Smith, 1978) sectorizando el este y centro de los Estados Unidos, y con un registro horario de las lluvias para 22 años, representaron la distribución espacial de este índice utilizando para su cálculo la siguiente expresión:

$$EI_{30} = E * I_{30} \qquad (1)$$

Donde:

E= Energía cinética total de la tormenta (ton-pie pulgada/acre h)

I_{30}= Intensidad máxima de la tormenta en 30 minutos (pulgada/h)

El valor de E representa una sumatoria de las energías individuales para cada tramo de la lluvia registrada que tengan intensidad constante, siendo estas calculadas por la siguiente ecuación:

$$E = 916 + 331 \log_{10} I \qquad (2)$$

Donde:

I = Intensidad de cada tramo en que se divide la tormenta (pulgada/h)

El propósito del trabajo era calcular las pérdidas de suelo por la USLE, resultando la información obtenida de amplia utilidad para estimar y predecir los riesgos de erosión hídrica y conocer el requerimiento de conservación para unidades de tierra con usos específicos de manera de reducir el proceso erosivo y orientar las medidas necesarias para prevenirlo.

Arnoldus (1977) propuso un modelo de tipo potencial para estimar la erosividad promedio anual de la lluvia (R) en unidades métricas no especificadas, a partir del índice modificado de Fournier (F), cuya expresión es:

$$R = a\ F^{b} \qquad (3)$$

Donde F es obtenido por:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p^2}{P}, \text{ y} \qquad (4)$$

a y b son los coeficientes de la regresión, representando p la precipitación promedio mensual de cada mes en mm y P la precipitación medial anual en mm. Este modelo fue aplicado en 168 localidades de los Estados Unidos y 14 de África, reportando que la relación entre F y los valores de R, calculado por el método de Wischmeier, es altamente significativa.

Años más tarde, Renard y Freimund (1994) correlacionaron en forma separada

los valores de R (MJ mm ha^{-1} h^{-1} y^{-1}) con la precipitación anual (mm) y el índice modificado de Fournier, obteniendo cuatro ecuaciones para las dos relaciones, dos de tipo potencial para umbrales de precipitación media anual menores de 850 mm y dos de tipo cuadrática para aquellos sitios donde la precipitación media anual es mayor de 850 mm. Todas las relaciones resultaron significativas.

En el ámbito nacional existen muchas experiencias en el cálculo de la erosividad de la lluvia, destacando Páez et al (1982) que realizaron un análisis para determinar el potencial erosivo de tierras agrícolas en varias localidades de Venezuela ubicadas en la zona de vida bosque seco tropical; definiendo un modelo lineal para el cálculo de EI_{30} en base a la lámina mensual y otro en base a la lámina de la tormenta, no especificando unidades, a manera de simplificar el método de Wischmeier. Los resultados obtenidos concluyen que el EI_{30} está altamente correlacionado con la cantidad de precipitación, sin embargo destacan diferencias marcadas en el patrón de las tormentas excepcionales en localidades con erosividad anual similar.

Páez et al (1989) en la continuidad de determinar el potencial erosivo de tierras agrícolas y usando la relación para calcular EI_{30} en base a la lámina de la tormenta, calculan el valor de este índice mensual (Tm cm ha^{-1} h^{-1}), el cual correlacionan con la lámina mensual para obtener modelos de regresión que permitiesen estimarlo adecuadamente. Los resultados muestran que es posible definir una única ecuación para la zona en la cual se circunscribe el estudio y generar la distribución espacial de la erosividad de la lluvia, pero la información debe ser usada solo con fines de diagnóstico para la zonificación agrícola y planificación del uso de la tierra.

Rodríguez et al (1994) evaluaron índices de erosividad en una cuenca alta de la Cordillera Central de Venezuela, calcula el EI_{30} (MJ mm ha^{-1} h^{-1}) correlacionando los valores obtenidos a nivel de tormentas individuales con las pérdidas de suelo generadas después de las mismas, encontrando que el comportamiento del mismo es apropiado, existiendo un alto grado de asociación entre las pérdidas de suelo y el poder erosivo de las tormentas.

Paredes y Silva (2004) destacan que la estimación de la erosividad de la lluvia por el método de Wischmeier implica una alta inversión en tiempo y recursos, ante lo cual plantean como alternativa los modelos de simulación. Se evalúa así la relación entre valores del EI_{30} (MJ mm $ha^{-1}h^{-1}$) obtenido por este método, con los valores de EI (energía erosiva de la lluvia en las mismas unidades) del modelo EPIC, acumulados en valores mensuales y anuales. Los resultados permiten aseverar que el modelo EPIC puede ser un sustituto adecuado para la obtención de valores anuales de erosividad de la lluvia y su distribución mensual en tierras agrícolas de montaña y patrón bimodal de lluvias en Venezuela.

Silva (2005) alegando las mismas razones para el uso del modelo EPIC y agregando que aunque las ecuaciones de regresión son de rápida aplicación, las generadas para el país no cubren con una representatividad adecuada el mismo, y muchas de ellas reflejan comportamientos característicos de ciertas áreas, lo cual invalida su aplicación en otras áreas con patrones distintos.. Se compararon las estimaciones diarias de erosividad del modelo EPIC con los valores obtenidos de EI_{30}, para una localidad con régimen pluviométrico unimodal y ubicada en baja

montaña, concluyendo de acuerdo a los análisis realizados que el modelo EPIC es útil para establecer tendencias de la erosividad, no así para simular cantidad y distribución diaria en términos absolutos.

2.2 Fundamentos teóricos

La ecuación 1 para el cálculo de la erosividad de la lluvia se puede expresar además de la siguiente manera: (Silva, 2005)

$$EI_{30} = \sum_{i=1}^{n} E_s * I_{30} \qquad (5)$$

Donde:

EI_{30} = Indice de erosividad de la lluvia para cada evento erosivo (MJ mm/ha h)

E_s = Energía cinética de cada tramo de la lluvia registrada (MJ/ha)

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos (mm/h)

La energía cinética de cada tramo se obtiene por:

$E_s = 0{,}119 + 0{,}0873 \log_{10} I_s$ (Representa la misma ecuación 2 pero modificada para obtener unidades del sistema internacional)

La ecuación para calcular el EI_{30} es obtenida por ajustes estadísticos y refleja como la energía cinética total y su máxima intensidad se combinan en cada tormenta particular para ejercer un poder erosivo capaz de disgregar las partículas del suelo, compactar su superficie y dar origen a la escorrentía superficial (Wischmeier y Smith, 1978; Guevara, 2000). Debe tenerse presente como lo plantea González (1991) y Silva (2005) que esta ecuación es de formulación empírica y en los resultados

obtenidos por ella siguen existiendo incertidumbres cuando se generalizan hacia otras zonas diferentes de las que se deducen las relaciones empíricas.

En cuanto a la magnitud o lámina considerada, solo son computados en la ecuación las mayores a 12,5 mm y separadas de otras por períodos mayores de 6 horas, que son las que se consideran eventos erosivos. En Venezuela Páez y Rodríguez (1989) han determinado que láminas menores a 12,7 mm contribuyen en poca cuantía al aumento de la erosividad de la lluvia. En este trabajo el límite considerado corresponde a eventos de lluvia mayores de 10 mm, a manera de tener mayor cantidad.

El promedio anual de EI_{30} para un período determinado de años corresponde al factor "R" de la USLE, el cual se ha comprobado que para una región dada se mantiene relativamente constante (Lal, 1990: citado por Guevara, 2000). Su expresión matemática citada por Renard y Freimund (1994) es la siguiente:

$$R = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{k=1}^{m}(E)_k(I_{30})_k\right] \qquad (6)$$

El término entre corchetes representa la agregación de los valores de EI_{30} para un año y n el número de años usados para obtener el promedio. Esta agregación también se hace mensual y ambas son manejadas en este trabajo, por lo tanto se puede hablar indistintamente de EI_{30} como de valores de R.

El cálculo de la erosividad de la lluvia es parte de los llamados modelos de simulación agroambiental (Silva, 2002), que permiten evaluar los procesos de productividad y degradación según las relaciones entre el ambiente, el uso y el

manejo de las tierras. Uno de los más usados es el EPIC, y entre sus utilidades resalta la evaluación del efecto de erosión sobre el rendimiento de los cultivos. Entre las opciones para simular erosión hídrica contempla la USLE, por lo que incluye una ecuación básica para calcular erosividad de la lluvia, que simboliza como EI, a diferentes agregaciones temporales y requiere el empleo de valores diarios de lluvia, a partir de los cuales utilizando una distribución exponencial obtiene la duración e intensidad máxima (Silva, 2005). La ecuación es la siguiente:

$$EI = \frac{R[12{,}1 + 8{,}9(\log r_p - 0{,}434)]r_{.5}}{1000} \qquad (7)$$

Donde:

EI = Energía erosiva de la lluvia (10 MJ mm/ha h)

R = Lluvia diaria (mm)

r_p = Intensidad pico de la lluvia (mm/h)

$r_{.5}$ = Intensidad máxima para media hora (mm/30 min)

Las expresiones para calcular r_p y $r_{.5}$ son las siguientes:

$r_p = -2R\ln(1-\alpha_{.5})$

$\alpha_{.5} = R_{.5}/R_{24}$, donde:

$R_{.5}$= Lámina mensual máxima para media hora (mm)

R_{24} = Precipitación mensual promedio por día de lluvia (mm)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

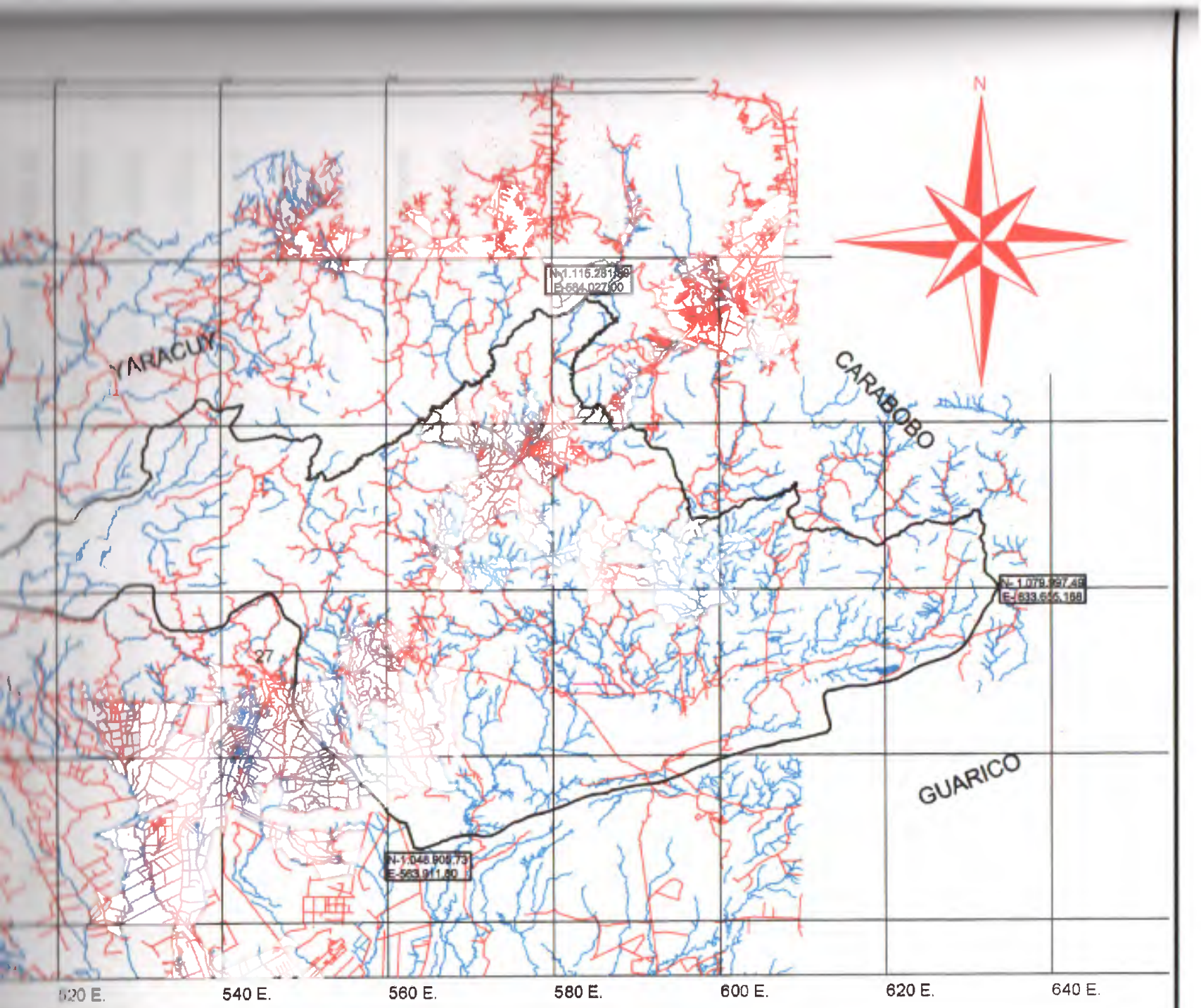
3.1 Unidad de estudio

Se ubica en el área que ocupan las cuencas de montaña y piedemonte de los ríos Tucuragua, San Carlos, Tinaco y Pao, en jurisdicción del estado Cojedes, al norte del mismo, abarcando aproximadamente una superficie de 400000 ha. Se encuentra delimitada por las coordenadas geográficas 09° 29' 18''- 10° 05' 18'' de LN y los 67° 46' 53''- 68° 58' 13'' de LO (Figura 1). La altitud varía entre 120 y 1000 msnm. Se diferencian tres zonas de vida, el bosque seco tropical, el bosque húmedo premontano y el bosque muy húmedo premontano (Ewel y Madriz, 1968). Las precipitaciones oscilan entre 1250 mm y 1500 mm, a excepción de un pequeño sector en la localidad de La Sierra con precipitación promedio de 1850 mm. El régimen pluviométrico del área es mayormente unimodal, con ocurrencia variable entre junio, julio y agosto del pico máximo (MARNR, 1988).

3.2 Fases de la investigación

Con el propósito de facilitar la comprensión de la metodología, se presentará estructurada en fases.

3.2.1 Obtención de los valores observados de erosividad de la lluvia



Ubicación geográfica del área de estudio

Se requiere como paso inicial en esta fase contar con los registros de lluvia horaria para un determinado número de años (bandas pluviográficas) que proveen los pluviógrafos instalados en las estaciones climáticas. De un universo de 24 estaciones (Cuadro 1) localizadas tanto dentro como fuera del perímetro de la unidad de estudio (Figura 2), se seleccionaron 10 estaciones contentivas de bandas, estando limitado el número de años conseguidos a problemas de funcionamiento de los relojes en los pluviógrafos. Se analizaron 93 años de registros, indicando el Cuadro 2 los años correspondientes a cada una de las 10 estaciones.

Se recabaron los registros de precipitación diaria y mensual de las 10 estaciones con bandas pluviográficas, y los registros de precipitación mensual del resto de estaciones (base de datos del MARNR- Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología). La precipitación diaria fue utilizada como entrada para el modelo de simulación EPIC y la precipitación mensual en la generación y validación de los modelos matemáticos.

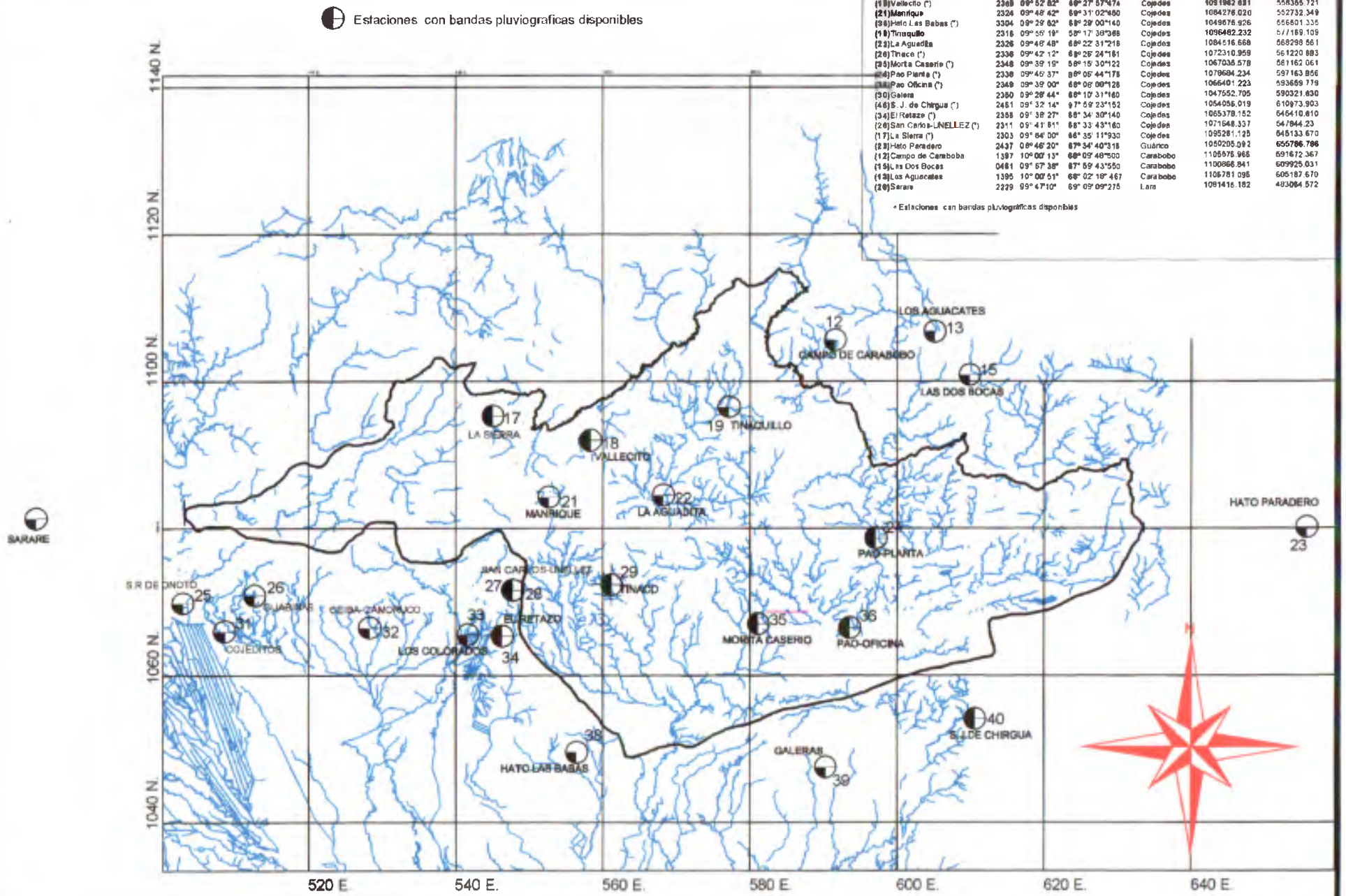
Para la obtención del valor de erosividad de la lluvia utilizando la ecuación (5), cada evento erosivo mayor de 10 mm fue dividido en tramos de intensidad constante, a los cuales se les calculó la energía cinética . El producto de la sumatoria de estas energías individuales por la máxima intensidad en 30 minutos caída durante el evento erosivo definió el valor de erosividad de la lluvia. Este valor por evento fue agregado mensual y anualmente, calculando los promedios respectivos en función del número de años analizados. Se analizaron un total de 3226 eventos erosivos, el Cuadro 3 muestra su distribución mensual por estación.

Cuadro 1. Estaciones climáticas involucradas en la obtención de los valores medidos y estimados de la erosividad de la lluvia.

Estación	Serial	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	Estado
S.R. de Onoto	2331	09° 41' 24"	68° 48' 25"	175	Portuguesa
Guabinas	2357	09° 41' 27"	68° 52' 55"	188	Cojedes
Cojeditos	2340	09° 38' 47"	68° 55' 10"	160	Cojedes
Ceiba – Camoruco	2333	09° 39' 03"	68° 44' 23"	150	Cojedes
Los Colorados	2354	09° 38' 33"	68° 37' 04"	157	Cojedes
Vallecito (*)	2308	09° 52' 52"	68° 27' 57"	474	Cojedes
Manrique	2324	09° 48' 42"	68° 31' 02"	450	Cojedes
Hato Las Babas (*)	3304	09° 29' 52"	68° 29' 00"	140	Cojedes
Tinaquillo	2316	09° 55' 18"	68° 17' 38"	386	Cojedes
La Aguadita	2326	09° 48' 49"	68° 22' 31"	219	Cojedes
Tinaco (*)	2336	09° 42' 12"	68° 26' 24"	151	Cojedes
Morita Caserío (*)	2348	09° 39' 19"	68° 15' 30"	122	Cojedes
Pao Planta (*)	2338	09° 45' 37"	68° 06' 44"	178	Cojedes
Pao Oficina (*)	2349	09° 39' 00"	68° 08' 00"	128	Cojedes
Galera	2350	09° 28' 44"	68° 10' 31"	180	Cojedes
S. J. de Chirgua (*)	2461	09° 32' 14''	67° 59' 23''	152	Cojedes
El Retazo (*)	2358	09° 38' 27''	68° 34' 30''	140	Cojedes
San Carlos-UNELLEZ (*)	2311	09° 41' 51''	68° 33' 43''	160	Cojedes
La Sierra (*)	2303	09° 54' 00''	68° 35' 11''	930	Cojedes
Hato Paradero	2427	09° 46' 20"	67° 34' 40"	318	Guárico
Campo de Carabobo	1397	10° 00' 13"	68° 09' 48"	500	Carabobo
Las Dos Bocas	0491	09° 57' 38''	67° 59' 43''	550	Carabobo
Los Aguacates	1395	10° 00' 51''	68° 02' 18''	467	Carabobo
Sarare	2229	09° 47'10''	69° 09' 09''	278	Lara

* Estaciones con bandas pluviográficas disponibles.

Fuente: MARN. Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología. Caracas



(31) Cojedites	2340	09° 46' 47"	68° 04' 18"100	Cojedes	1066866.411	[illegible]
(32) Ceiba - Camoruco	2333	09° 38' 03"	68° 44' 33"100	Cojedes	1066486.660	528348.708
(33) Los Colorados	2364	09° 38' 33"	68° 37' 04"107	Cojedes	1066667.063	541726.020
(15) Vallecito (*)	2368	09° 52' 02"	68° 27' 57"474	Cojedes	1091962.631	558365.721
(21) Manrique	2324	09° 48' 42"	68° 31' 02"460	Cojedes	1084276.020	552732.349
(36) Hato Las Babas (*)	3304	09° 29' 02"	68° 29' 00"140	Cojedes	1049676.926	556601.335
(18) Tinaquillo	2316	09° 55' 19"	68° 17' 38"368	Cojedes	1096462.232	577189.109
(22) La Aguadita	2326	09° 46' 48"	68° 22' 31"218	Cojedes	1084516.668	568298.561
(26) Tinaco (*)	2336	09° 42' 12"	68° 25' 24"161	Cojedes	1072310.959	561220.883
(35) Monta Caserio (*)	2348	09° 39' 19"	68° 15' 30"122	Cojedes	1067035.578	581162.061
(24) Pao Planta (*)	2338	09° 45' 37"	68° 05' 44"178	Cojedes	1079684.234	597163.856
(36) Pao Oficina (*)	2349	09° 39' 00"	68° 08' 00"128	Cojedes	1066401.223	593669.779
(30) Galera	2350	09° 28' 44"	68° 10' 31"160	Cojedes	1047552.705	590321.630
(40) S. J. de Chirgua (*)	2451	09° 32' 14"	67° 59' 23"152	Cojedes	1054056.019	610973.903
(34) El Retaze (*)	2358	09° 38' 27"	68° 34' 30"140	Cojedes	1065378.152	545410.610
(28) San Carlos-UNELLEZ (*)	2311	09° 41' 61"	68° 33' 43"160	Cojedes	1071648.337	547844.23
(17) La Sierra (*)	2303	09° 64' 00"	68° 35' 11"930	Cojedes	1092281.125	545133.670
(23) Hato Paradero	2437	08° 46' 20"	67° 34' 40"318	Guárico	1050205.092	655786.786
(12) Campo de Carabobo	1397	10° 00' 13"	68° 09' 48"500	Carabobo	1105575.965	591672.367
(15) Las Dos Bocas	0481	09° 57' 38"	67° 59' 43"550	Carabobo	1100866.841	609925.031
(13) Los Aguacates	1395	10° 00' 51"	68° 02' 18" 467	Carabobo	1105781.095	605187.670
(20) Sarare	2229	09° 47'10"	69° 09' 09"275	Lara	1081416.182	483084.572

* Estaciones con bandas pluviográficas disponibles

Figura 2. Ubicación de estaciones climatológicas

Cuadro 2. Años de registro en precipitación horaria disponible (bandas pluviográficas)

Estación	Años																
	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Vallecito	x		x	x	x	x	x	x									
Hato Las Babas							x	x	x	x	x	x	x	x			
Tinaco				x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x
Morita Caserío							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Pao-Planta									x	x	x	x	x	x		x	
Pao-Oficina								x	x	x	x	x	x	x	x		
S.J. de Chirgua							x	x	x	x	x	x	x	x	x		
El Retazo					x	x			x	x	x	x	x	x			
San Carlos-UNELLEZ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
La Sierra					x	x	x	x	x	x							

Cuadro 3. Número de eventos erosivos por estaciones analizadas

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
Vallecito	0	1	5	24	37	51	53	38	32	29	22	8	300
Hato Las Babas	0	1	3	11	41	54	47	46	31	24	13	2	273
Tinaco	0	2	7	15	32	54	59	75	47	29	18	8	346
Morita Caserío	0	0	1	17	47	50	63	51	44	24	15	6	318
Pao-Planta	0	2	5	18	26	38	57	45	42	27	17	10	287
Pao-Oficina	0	0	0	9	28	36	49	38	32	14	20	1	227
S. J. de Chirgua	0	1	3	6	30	38	57	44	34	26	17	1	257
El Retazo	0	2	1	13	45	53	53	47	32	29	24	11	310
SC-UNELLEZ	4	2	5	42	83	106	113	117	75	66	40	19	672
La Sierra	2	2	4	14	21	30	45	32	39	22	19	6	236
TOTAL	6	13	34	169	390	510	596	533	408	290	205	72	3226

3.2.2 Generación de modelos empíricos

Esta fase comprendió la evaluación de la aproximación de Arnoldus para estimar directamente valores anuales de erosividad de la lluvia, y la generación de modelos para estimar valores mensuales.

3.2.2.1 Evaluación de la aproximación de Arnoldus

Usando la ecuación (4) se calculó para las estaciones con bandas el Índice de Fournier Modificado (Arnoldus, 1977) para un período de años homogenizado de precipitación mensual (1968-1999). Este valor del índice y el de R promedio anual para cada una de las diez estaciones se procesaron con el Software estadístico STATISTICA (versión 6.0, 2000), haciendo uso del módulo Nonlinear Regresión, en su función User-Specified Regresion Function. Con ello se evaluó si los datos se ajustaban al modelo indicado (ecuación 3), mostrando los valores del coeficiente de determinación y el porcentaje de varianza explicada.

3.2.2.2 Generación de modelos para estimar valores mensuales promedios de erosividad de la lluvia

Los valores promedios mensuales de R medidos y la precipitación promedio mensual correspondiente para cada una de las estaciones con bandas se procesaron con el Software STATGRAPHICS PLUS (versión 2.1,1996), usando el módulo Relate encontrándose el tipo de relación que mejor explica la variabilidad de los datos. En función de estos resultados y con miras de generar una ecuación única para todas las estaciones (Páez, 1982; Páez, 1989) se procesaron los mismos valores en

conjunto tanto en la función Simple Regression del software, como en la función Multiple Regression considerando además como variables independientes el promedio de precipitación mensual y la interacción altitud-promedio de precipitación mensual, presentando para todos los casos el coeficiente de determinación y la desviación estándar de los residuales. Aunque la altitud no sea factor determinante del régimen pluviométrico y de las intensidades de lluvia para esta parte de nuestro país, se busca definir si la relación altitud-precipitación contribuye a definir las diferencias en los valores de erosividad de la lluvia observados.

3.2.3 Estimación de los valores promedios mensuales y anuales de erosividad de la lluvia utilizando el modelo de simulación EPIC

Con los registros de precipitación diaria como entrada, el modelo EPIC estimó usando la ecuación (7) los valores diarios, mensuales y anuales de R. El período de años utilizado en la simulación correspondió al mismo leído por las bandas para cada estación. Además del archivo de precipitación diaria para simular que puede contener información faltante, ya que el modelo es capaz de generarla, se construyó un archivo del mismo parámetro con un período mayor de años que no presente datos faltantes ni englobados, de forma tal que el modelo determine los parámetros estadísticos de las variables climáticas (promedio de lluvia mensual, desviación estándar, coeficiente de sesgo, probabilidad húmedo-seco, probabilidad húmedo-húmedo y promedio de días de lluvia).

De esta manera se obtuvo para cada una de las estaciones con un período variable entre 14 y 23 años los archivos de precipitación diaria, usando como método de

desenglobe el de proporción con estaciones adyacentes y para los datos faltantes proporción normal con la misma estación. Las salidas del modelo fueron programadas, utilizando para los fines de este trabajo las salidas mensuales y anuales. Los valores de salida de EI (10 MJ mm/ha h) para ser llevados a las mismas unidades del EI_{30} (MJ mm/ha h) fueron multiplicados por diez.

3.2.4 Evaluación de los modelos de regresión generados y de los valores estimados de erosividad de la lluvia por el modelo EPIC

Correspondió en esta fase metodológica la comparación de los valores medidos con los valores estimados, estableciendo además argumentos importantes sobre calidad predictora de los modelos de regresión generados. Para ello se usó el programa IRENE (Integrated Resources for evaluating Numerical Estimates) propuesto por Fila et al (2001: citado por Silva, 2002) el cual establece parámetros estadísticos que miden las diferencias entre los valores y analizan las relaciones de regresión establecidas. Entre los que evalúan las diferencias se considerará la eficiencia de la simulación (Greenwood et al, 1985: citado por Silva, 2002), el coeficiente de concordancia (Willmott y Wicks, 1982: citado por Silva, 2002) y el error medio absoluto. Entre los que analizan las relaciones de regresión están el coeficiente de correlación de Pearson y la probabilidad de que el intercepto y la pendiente valgan 0 y 1 respectivamente, tanto independientemente (prueba t) como simultáneamente (prueba F). Para las ecuaciones de regresión no se consideraron los índices para análisis de diferencias, ya que los valores obtenidos por ecuaciones no son necesariamente eventos simulados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Valores observados de erosividad de la lluvia

En los Cuadros del 4 al 13 se muestran los totales mensuales y anuales de erosividad de la lluvia obtenidos para cada una de las estaciones con análisis de bandas. Además se indica el porcentaje mensual con respecto al total anual y los valores promedios mensuales y promedio anual. El promedio anual de R oscila entre 4584 y 9264 MJ mm/ha h año; según la calificación establecida por Páez (1994), con agrupación de rangos, estos valores se consideran para las estaciones Tinaco, San Carlos-UNELLEZ y Pao-Planta como moderados-altos; para las estaciones La Sierra, Morita-Caserío, Hato Las Babas, San José de Chirgua y El Retazo moderados y moderados-bajos para Vallecito y Pao-Oficina. No se observa ninguna asociación espacial de las estaciones con respecto al valor de R, considerando su ubicación (Figura 2).

En todas las estaciones más del 50% del valor de R ocurre en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, siendo el de mayor porcentaje el mes de Agosto. Guevara (1998: citado en Guevara, 2000) determinó el valor de erosividad de la lluvia con una ligera modificación del método de Wischmeier para las estaciones Pao-Oficina,

Cuadro 4. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Tinaco (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
99	0	0	75	0	118	253	1435	2491	2235	1941	0	0	8549
98	0	0	0	1099	3736	668	69	4311	462	2544	0	60	12948
97	0	150	121	336	0	150	2204	259	518	2276	355	0	6368
96	0	0	0	370	109	454	2318	383	1427	96	236	0	5392
95	0	0	0	616	645	2956	3714	5514	4098	4654	0	353	22550
94	0	0	0	672	68	3063	2135	1608	208	2190	531	0	10475
93	0	0	113	0	519	0	0	1978	380	74	1243	68	4375
91	0	0	0	0	0	385	4022	5457	3170	2615	1182	2737	19568
90	0	0	0	0	575	236	490	2614	647	1870	95	0	6527
88	0	0	0	0	124	472	116	2810	358	0	0	0	3879
87	0	0	638	287	58	1327	216	67	0	0	42	0	2634
86	0	0	0	0	1805	1073	1753	1474	1348	193	262	0	7908
Total	0	150	947	3379	7757	11038	18471	28966	14850	18452	3945	3217	111173
%	0	0	1	3	7	10	17	26	13	17	4	3	100
PROM.	0	12	79	282	646	920	1539	2414	1238	1538	329	268	**9264**

Cuadro 5. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación San Carlos-UNELLEZ (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
83	0	0	0	2367	1400	3178	320	1681	505	658	77	17	10201
84	85	0	0	208	0	625	1349	1994	818	247	94	55	5475
85	0	0	0	66	7536	1069	1361	978	349	1880	1709	175	15122
86	0	0	0	154	484	361	510	1228	959	289	2373	211	6569
87	0	0	0	307	2144	1589	500	1239	1533	618	3601	0	11533
88	0	80	0	71	1017	1394	2117	1338	1794	920	421	23	9175
89	0	72	0	0	357	739	1854	1006	233	724	110	290	5385
90	187	0	0	987	603	415	779	1914	267	1043	607	72	6874
91	0	0	934	1031	34	445	1460	552	2438	816	1562	369	9643
92	0	0	0	365	417	800	3858	1566	670	204	184	150	8214
93	0	0	0	62	1759	617	991	685	2516	205	252	0	7087
94	0	0	0	281	438	712	624	1367	555	1308	825	0	6111
95	0	0	536	282	630	2168	703	1250	498	502	1702	358	8630
96	0	0	66	360	1735	1142	2219	698	1622	323	739	196	9102
97	248	0	209	224	858	965	1426	1134	676	681	0	0	6421
98	0	0	0	293	1334	1110	288	1612	2215	5566	260	429	13108
99	0	0	197	495	733	702	712	426	1598	648	0	80	5591
Total	520	152	1942	7552	21479	18033	21072	20669	19247	16634	14516	2425	144241
%	0	0	1	5	15	13	15	14	13	12	10	2	100
PROM.	31	9	114	444	1263	1061	1240	1216	1132	978	854	143	**8485**

Cuadro 6. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Pao-Planta (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
91	0	56	111	1139	484	533	1114	1902	1060	466	381	227	7472
92	0	0	0	443	971	634	1408	1555	498	1285	260	131	7184
93	0	0	0	243	2439	107	730	683	578	246	846	41	5915
94	0	0	0	308	272	217	227	7709	534	1192	304	94	10857
95	0	0	37	505	71	1040	2601	490	1071	1513	437	308	8074
96	0	31	0	169	1222	1461	2018	1550	1938	948	54	0	9391
98	0	0	139	411	2311	1693	1342	1055	1442	1302	0	285	9982
Total	0	86	287	3220	7770	5684	9440	14944	7123	6951	2283	1087	58875
%	0	0	0	5	13	10	16	25	12	12	4	2	100
PROM.	0	12	41	460	1110	812	1349	2135	1018	993	326	155	**8411**

Cuadro7. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación La Sierra (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
87	0	0	133	293	1800	1037	966	378	2484	957	161	0	8211
88	0	0	64	1907	545	485	502	410	721	142	129	73	4978
89	0	107		19	483	279	904	1214	2121	3991	1240	0	10356
90	544	0	0	0	0	44	2698	1542	696	1042	118	313	6997
91	0	0	317	1482	0	1497	1906	737	1769	312	103	846	8968
92	0	0	0	912	1137	684	1809	1063	370	0	640	46	6659
Total	544	107	317	4613	3964	4025	8785	5344	8161	6444	2391	1278	46169
%	1	0	1	10	9	9	19	12	18	14	5	3	100
PROM.	91	18	86	769	661	671	1464	891	1360	1074	399	213	**7695**

Cuadro 8. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Morita-Caserío (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
89	0	0	0	0	467	1330	1010	147	111	47	135	0	3246
90	0	0	0	259	1846	946	1638	209	876	1468	0	0	7241
91	0	0	0	636	266	989	2306	10474	1926	3334	613	1928	22472
92	0	0	0	258	1465	479	442	2333	1083	202	398	101	6760
93	0	0	0	180	1817	0	99	396	475	111	0	0	3078
94	0	0	0	477	492	1015	541	899	331	445	826	0	5026
95	0	0	0	0	0	0	1273	1649	281	980	0	0	4183
96	0	0	0	0	420	0	981	788	750	0	0	0	2939
97	0	0	1480	767	1452	2311	947	343	1350	1665	0	0	10316
98	0	0	0	0	3436	1206	1569	897	1944	2273	30	278	11632
Total	0	0	1480	2577	11660	8276	10804	18136	9126	10525	2002	2306	76893
%	0	0	2	3	15	11	14	23	12	14	3	3	100
PROM.	0	0	148	258	1166	828	1080	1814	913	1052	200	231	**7689**

Cuadro 9. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Hato Las Babas (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
89	0	0	0	0	976	436	911	77	344	3432	0	0	6177
90	0	0	0	219	401	653	96	665	0	351	202	132	2720
91	0	0	0	0	0	900	1479	600	2936	1468	1253	0	8636
92	0	0	0	0	2347	1305	1887	2076	326	0	216	94	8252
93	0	0	47	239	2594	765	571	1275	3575	92	331	0	9491
94	0	0	212	116	2842	3296	968	3021	96	665	0	0	11216
95	0	0	784	197	398	1610	1763	1381	331	1835	323	0	8622
96	0	36	0	334	773	1145	1433	397	361	991	0	0	5471
Total	0	36	1043	1106	10332	10112	9109	9493	7969	8834	2325	227	60586
%	0	0	2	2	17	17	15	16	13	15	4	0	100
PROM.	0	5	130	138	1292	1264	1139	1187	996	1104	291	28	**7573**

Cuadro 10. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación San José de Chirgua (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
89	0	0	0	0	61	730	1022	145	350	55	36	0	2399
90	0	0	0	0	2176	2123	990	1319	247	0	144	0	7001
91	0	0	44	0	657	1408	546	2256	1072	2094	130	0	8206
92	0	0	0	0	0	0	1674	683	1917	1663	763	0	6700
93	0	0	0	1771	2766	1640	1740	1031	314	887	1392	0	11541
94	0	0	43	67	907	819	387	1786	553	712	0	0	5274
95	0	0	0	133	563	932	1625	346	609	567	31	0	4806
96	0	97	0	0	1212	3020	1476	2382	2103	594	48	100	11033
97	0	0	77	0	210	261	1662	1057	732	1506	1269	0	6773
Total	0	97	164	1970	8552	10932	11123	11005	7897	8079	3813	100	63733
%	0	0	0	3	13	17	17	17	12	13	6	0	100
PROM.	0	11	18	219	950	1215	1236	1223	877	898	424	11	**7081**

Cuadro 11. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación El Retazo (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
87	0	0	93	0	75	304	219	844	487	350	599	0	2972
88	0	0	0	0	330	649	331	1643	86	866	676	0	4581
91	0	0	0	1191	169	1474	5988	245	1571	379	1818	111	12947
92	0	0	0	262	1366	852	1522	864	344	712	718	91	6731
93	0	0	0	0	1193	1578	0	769	0	487	117	372	4517
94	0	0	0	241	1283	1898	701	1184	605	890	2044	485	9329
95	0	0	0	532	802	1703	2191	258	1289	811	304	0	7891
96	0	217	0	0	1071	774	1202	669	1515	627	0	42	6118
Total	0	217	93	2227	6288	9232	12154	6476	5897	5122	6277	1102	55085
%	0	0	0	4	11	17	22	12	6	9	11	2	100
PROM.	0	27	12	278	786	1154	1519	809	737	640	785	138	**6886**

Cuadro 12. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Vallecito (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
83	0	0	1103	1215	1070	868	1424	656	384	1820	382	309	9232
85	0	0	0	261	1014	424	1054	1484	373	86	773	23	5493
86	0	0	0	0	907	234	29	950	0	1782	5	0	3906
87	0	0	0	466	1195	437	379	775	536	474	509	0	4773
88	0	0	0	0	651	1832	784	103	400	303	161	0	4234
89	0	0	0	0	476	820	613	0	2777	37	51	186	4961
90	0	53	69	203	409	1158	254	3650	376	618	86	72	6948
91	0	0	389	793	105	720	514	364	233	487	865	31	4500
92	0	0	0	235	255	917	2012	736	2007	713	499	0	7375
Total	0	53	1561	3173	6081	7410	7063	8719	7087	6321	3332	621	51421
%	0	0	3	6	12	14	14	17	14	12	6	1	100
PROM.	0	6	173	353	676	823	785	969	787	702	370	69	**5713**

Cuadro 13. Totales anuales y mensuales y valores promedio de erosividad de la lluvia para la estación Pao-Oficina (MJ mm/ha h año)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
90	0	0	0	0	136	512	332	177	67	397	197	0	1818
91	0	0	0	0	149	243	1487	2416	2512	472	1190	0	8467
92	0	0	0	211	1358	489	472	811	841	0	1340	430	5951
93	0	0	0	85	630	387	304	585	413	154	687	0	3245
94	0	0	0	0	63	408	208	428	76	0	394	0	1576
95	0	0	0	951	198	215	564	1677	475	572	421	0	5073
96	0	0	0	142	1266	1010	1024	1186	1186	0	0	0	5814
97	0	0	0	297	72	728	1290	947	536	715	144	0	4728
Total	0	0	0	1686	3872	3993	5680	8226	6106	2310	4372	430	36673
%	0	0	0	5	11	11	15	22	17	6	12	1	100
PROM.	0	0	0	211	484	499	710	1028	763	289	546	54	**4584**

Morita-Caserío y Pao-Planta, siendo los valores obtenidos para las dos ultimas muy inferiores con respecto a los observados en este trabajo.

En las Figuras 3a y 3b se muestra el patrón de distribución de los valores observados de R durante el año. Las estaciones El Retazo, Vallecito, Hato Las Babas, San José de Chirgua y San Carlos-UNELLEZ tienen un patrón similar, donde no se observan incrementos bruscos del valor de erosividad, a diferencia de las estaciones Morita-Caserío, Pao-Oficina, Pao-Planta, Tinaco y La Sierra, donde la curva definida es más irregular.

4.2 Relación entre los valores anuales promedio de erosividad de la lluvia y el índice modificado de Fournier

El Cuadro 14 muestra los valores obtenidos por la ecuación (4) para cada estación del índice modificado de Fournier (F). Se evidencia que no existen diferencias significativas en el mismo, y se califica la agresividad climática según este índice para las estaciones como moderado. La relación potencial entre el valor de R y F (aproximación de Arnoldus) no fue significativa, resultando un $R^2 = 0,125$, indicando que solo el 12,5 % de la variabilidad de los valores de R es explicada por F. Los coeficientes a y b obtenidos son 305,94 y 0,61 respectivamente, muy diferentes a los reportados por Mc Broom et al, (2002: citado por Silva, 2005) como coeficientes genéricos para aplicar la relación potencial.

4.3 Relación entre valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia con la precipitación promedio mensual

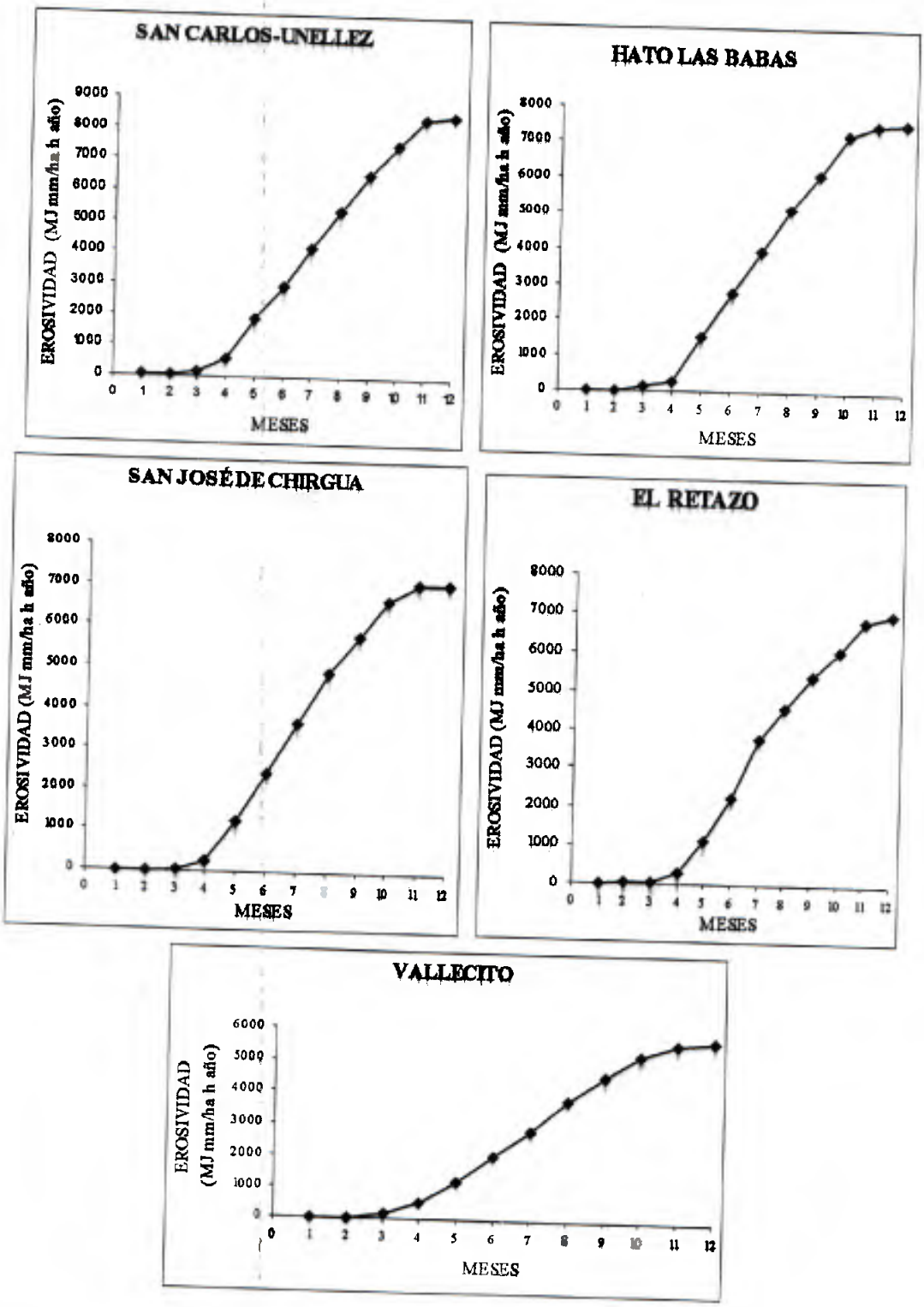


Figura 3a. Distribución de los valores promedios mensuales de R

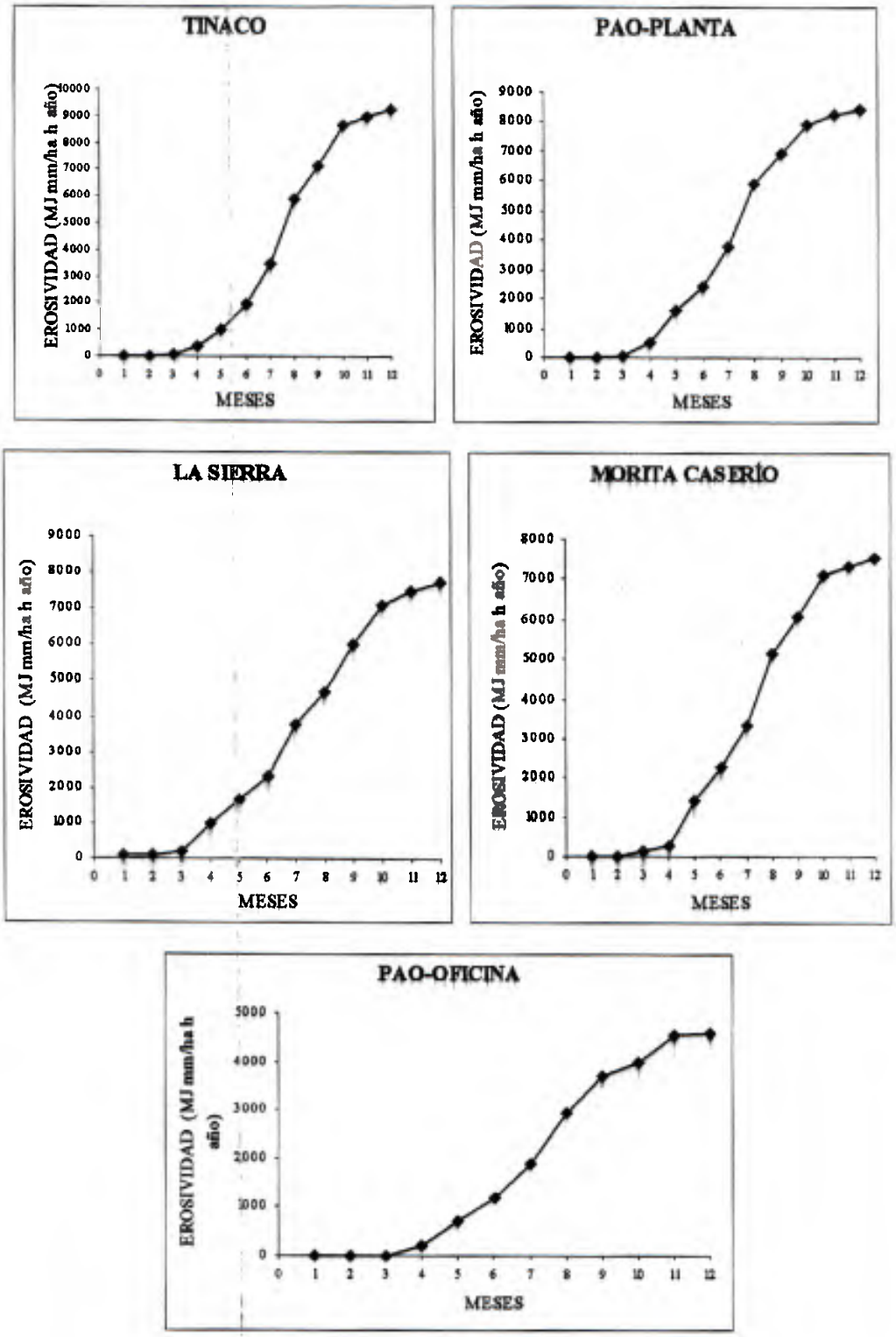


Figura 3b. Distribución de los valores promedios mensuales de R

Los modelos matemáticos para estimar la erosividad promedio mensual de la lluvia en base a la lámina promedio mensual de precipitación se muestran por estación en el Cuadro 15. Estos modelos expresan el mejor ajuste obtenido, diferenciándose para las estaciones San Carlos-UNELLEZ, Hato Las Babas, San José de Chirgua, El Retazo y Vallecito una relación significativa rectilínea y para las estaciones Tinaco, Pao-Planta, La Sierra, Morita-Caserío y Pao-Oficina una relación cuadrática en Y. Para cada modelo se indica el coeficiente de determinación (R^2) y la desviación estándar de los residuales (S_e).

Cuadro 14. Valores del índice modificado de Fournier para las estaciones analizadas

Estación	Índice Modificado de Fournier (F)
Tinaco	176,86
San Carlos-UNELLEZ	188,27
Pao-Planta	172,37
La Sierra	221,05
Morita-Caserío	169,50
Hato Las Babas	161,05
San José de Chirgua	162,91
El Retazo	180,71
Vallecito	177,80
Pao-Oficina	154,72

Los valores de R^2 reflejan que los modelos pueden estimar en un rango significativo la variabilidad de la erosividad de la lluvia de acuerdo al análisis realizado. Para el ajuste rectilíneo los valores son semejantes a los obtenidos para

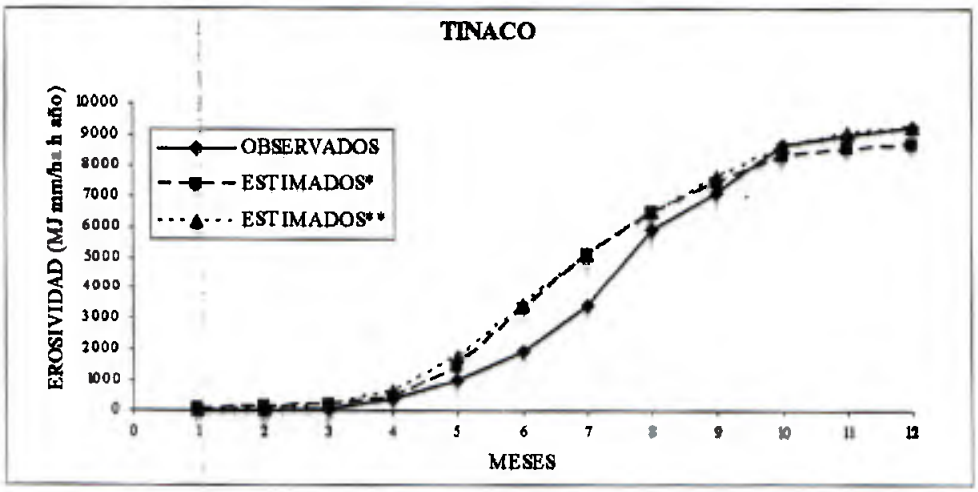
otras estaciones ubicadas en áreas con características climáticas similares (Páez et al, 1982; Páez et al, 1982). La dispersión de los residuales es menor en los modelos de tipo cuadrático en Y con respecto a los rectilíneos, lo cual se puede observar en las Figuras 4 al 8. Es de hacer notar que el ajuste rectilíneo agrupa las estaciones que tienen un patrón de distribución del valor de R similar (Figura 3a), y el ajuste cuadrático en Y para aquellas estaciones que tienen una irregularidad más acentuada en el comportamiento estacional (Figura 3b), que puede evidenciar que las lluvias de mucha intensidad no son tan frecuentes.

Cuadro 15. Modelos generados para cada una de las estaciones

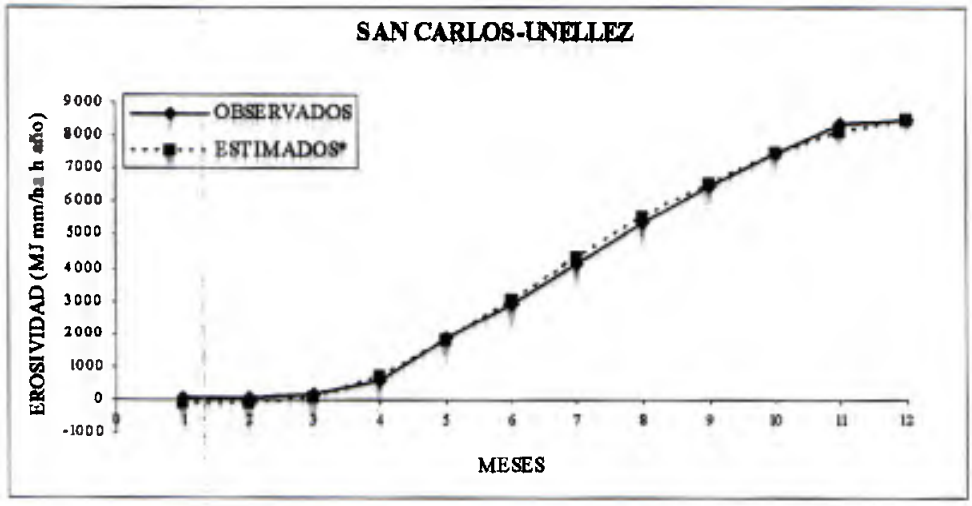
Estación	Modelo (ecuación)	R^2	S_e
Tinaco	$Y = (6,434 + 0,145 * X)^2$	0,78	7,61
San Carlos-UNELLEZ	$Y = 44,863 + 5,099 * X$	0,90	167,73
Pao-Planta	$Y = (4,307 + 0,155 * X)^2$	0,90	4,78
La Sierra	$Y = (8,868 + 0,090 * X)^2$	0,86	4,33
Morita Caserío	$Y = (5,466 + 0,146 * X)^2$	0,78	6,73
Hato Las Babas	$Y = -41,237 + 6,270 * X$	0,92	171,74
San José de Chirgua	$Y = -30,558 + 5,837 * X$	0,95	118,36
El Retazo	$Y = -63,325 + 4,967 * X$	0,93	134,08
Vallecito	$Y = -9,491 + 3,952 * X$	0,96	73,58
Pao-Oficina	$Y = (1,765 + 0,147 * X)^2$	0,83	4,99

Nota: El valor de X representa la lámina promedio mensual de precipitación (mm). El valor de Y la estimación de la erosividad promedio mensual de la lluvia (MJ mm/ha h año).

Espacialmente las estaciones con ajuste cuadrático en Y se encuentran cercanas, a excepción de La Sierra (Figura 2) que quizás pueda entrever la influencia de factores

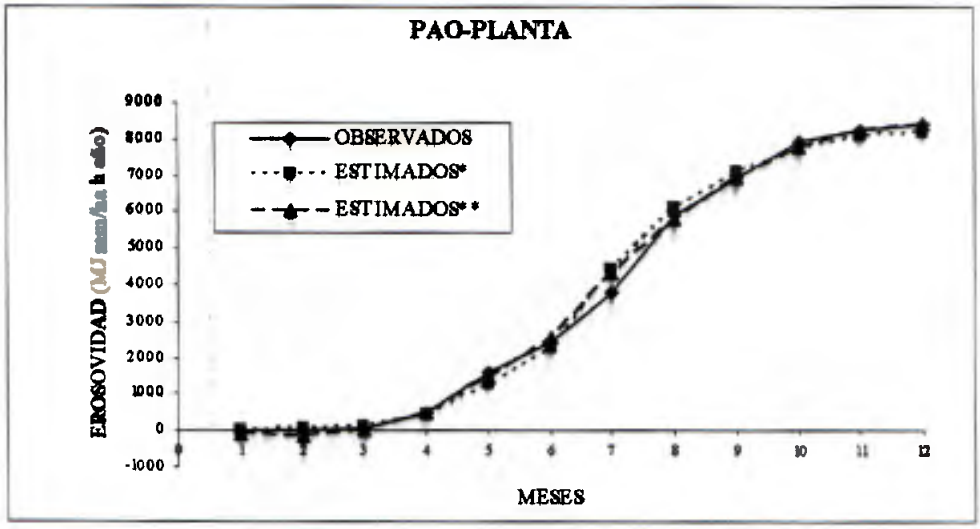


*Ajuste rectilíneo **Ajuste cuadrático en Y



*Ajuste rectilíneo

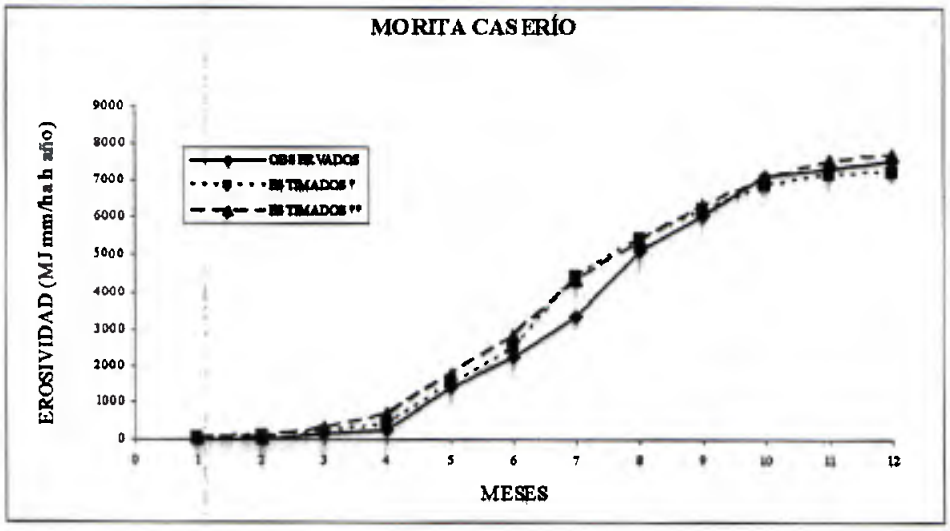
Figura 4. Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajuste obtenido para las estaciones Tinaco y San Carlos-UNELLEZ



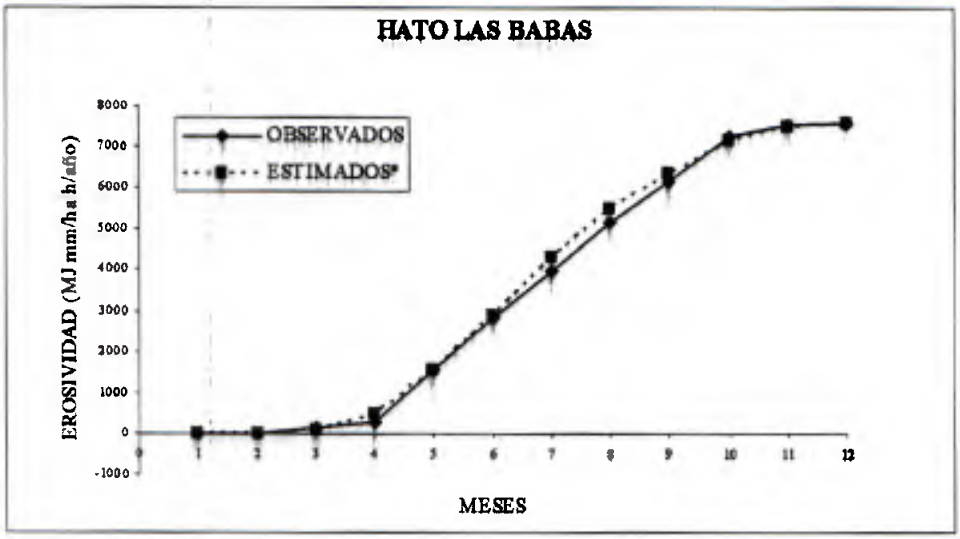
*Ajuste rectilíneo **Ajuste cuadrático en Y

*Ajuste rectilíneo **Ajuste cuadrático en Y

Figura 5. Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajuste obtenido para las estaciones Pao-Planta y La Sierra



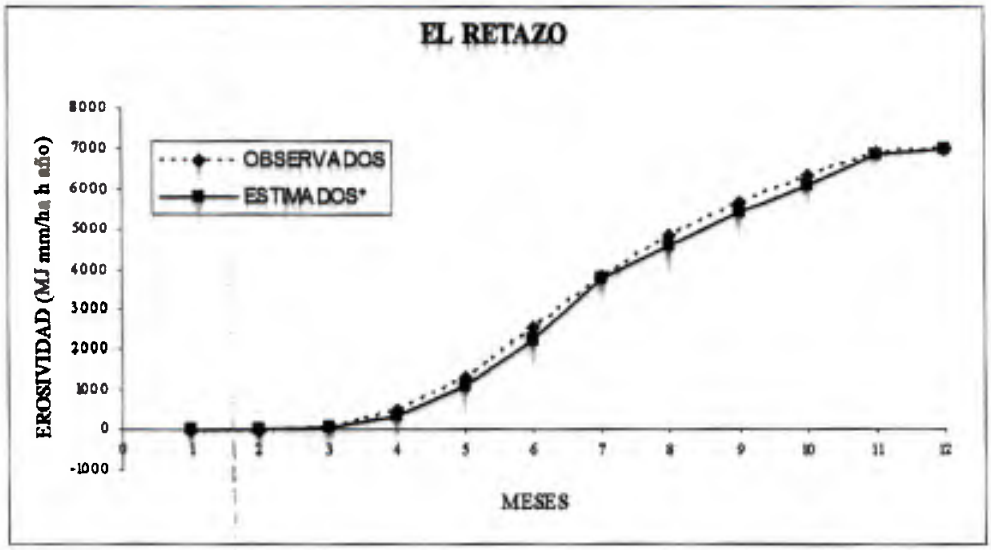
*Ajuste rectilíneo **Ajuste cuadrático en Y



*Ajuste rectilíneo

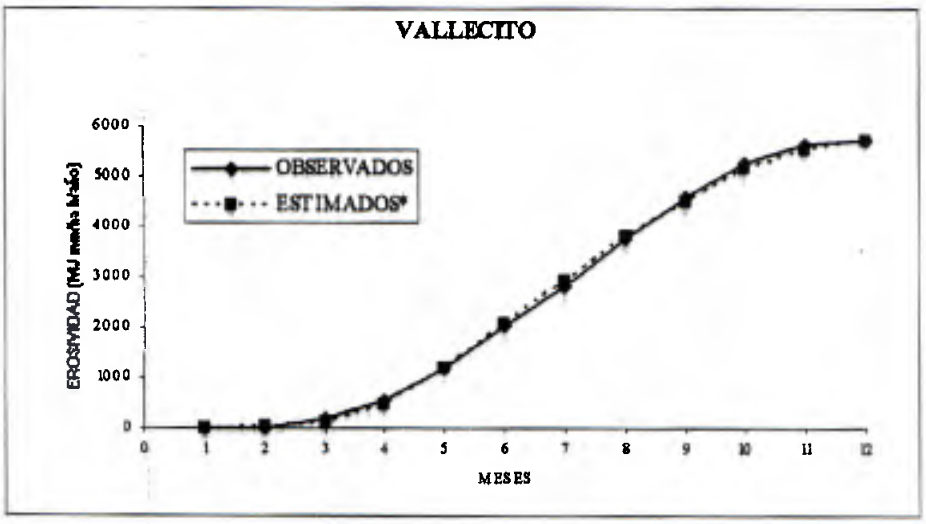
Figura 6. Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajuste obtenido para las estaciones Morita Caserío y Hato Las Babas

*Ajuste rectilíneo. **Ajuste cuadrático en Y

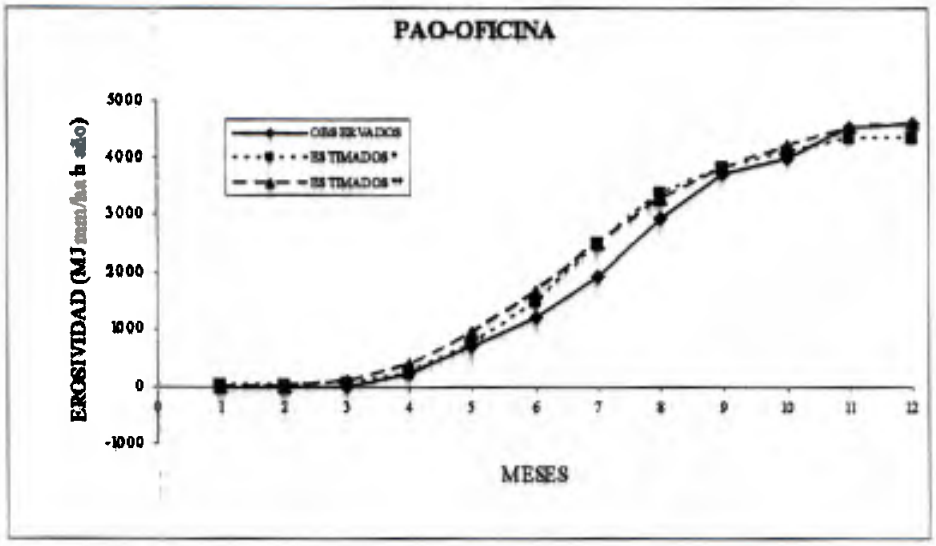


*Ajuste rectilíneo. **Ajuste cuadrático en Y

Figura 7. Distribución de lo valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajuste obtenido para las estaciones San José de Chirgua y El Retazo



*Ajuste rectilíneo



*Ajuste rectilíneo. **Ajuste cuadrático en Y

Figura 8. Distribución de los valores observados y estimados de erosividad de la lluvia según ajuste obtenido para las estaciones Vallecito y Pao-Oficina

locales en dicho comportamiento. Sin embargo para estas estaciones la segunda mejor opción de ajuste realizado correspondió al tipo rectilíneo (Cuadro 16), con coeficientes de determinación estadísticamente significativos.

Cuadro 16. Modelos de tipo rectilíneo con su coeficiente de determinación y desviación estándar de los residuales

Estación	Modelo (ecuación)	R^2	S_e
Tinaco	Y = -8,813 + 6,618 * X	0,66	468,04
Pao-Planta	Y = -95,907 + 6,793 * X	0,85	264,62
La Sierra	Y = 23,934 + 3,974 * X	0,86	193,81
Morita Caserío	Y = -0,889 + 5,840 * X	0,72	323,59
Pao-Oficina	Y = -34,863 + 4,293 * X	0,80	160,46

Nota: El valor de X representa la lámina promedio mensual de precipitación (mm). El valor de Y la estimación de la erosividad promedio mensual de la lluvia (MJ mm/ha h año).

El valor de la pendiente en las ecuaciones de Tinaco y Pao-Planta puede evidenciar que existe un patrón de lluvias de mayor intensidad, con respecto a La Sierra, Morita Caserío y Pao-Oficina, lo que no puede ser explicado significativamente por el modelo, de ahí sus valores menores en el coeficiente de determinación, mayor dispersión en los residuales y mayor diferencias entre los valores observados y estimados (Figuras 4 al 8). La altitud a la que se encuentran estas estaciones (Cuadro 1), permiten definir un comportamiento diferente para la estación La Sierra, aunque no influye en la ocurrencia de niveles menores de erosividad de la lluvia.

A fin de estudiar la posibilidad de una ecuación única que permitiese predecir adecuadamente los valores de erosividad de la lluvia, y considerando los resultados obtenidos del análisis individual donde no existen diferencias marcadas entre los valores estimados por los modelos rectilíneo y cuadrático en Y, se evaluó la relación existente entre los promedios mensuales de R y la precipitación promedio mensual respectiva para todas las estaciones en conjunto , así como estas variables con la altitud y el producto (interacción) promedio mensual de precipitación por altitud, a manera de evidenciar influencia importante de estas variables. La consideración de la zona de vida no aplicó, ya que de las 10 estaciones analizadas, nueve se ubican en el área de bosque seco tropical y una en el área de bosque húmedo premontano, no contando con más estaciones que permitieran un análisis más eficiente, en esta última zona de vida. Sin embargo se correlacionaron las estaciones ubicadas en el bosque seco tropical en relación a sus valores de R y precipitación mensual, siendo sus resultados altamente similares a los obtenidos en la relación conjunta de las 10 estaciones ($R^2 = 0,84$ y $S_e = 5,33$).

Las ecuaciones así obtenidas, que llamaremos ecuaciones conjuntas, obtenidas por las relaciones planteadas en el párrafo anterior se expresan matemáticamente:

$$Y = (11,957 + 0,097 * X)^2 \quad (8)$$

$$Y = 5,786 * X - 0,00205 * X_1 \quad (9)$$

Donde:

Y = Erosividad de la lluvia promedio mensual (MJ mm/ha h año)

X = Precipitación promedio mensual (mm)

X_1 = Producto del promedio de la precipitación mensual por la altitud de la estación

El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,84 para la relación establecida en la ecuación (8) y de 0,91 para la de la ecuación (9), siendo la desviación estándar de los residuales (S_e) de 5,49 y de 243,96 respectivamente, lo que evidencia que estadísticamente hay una relación significativa entre el valor promedio de R y la precipitación promedio mensual, teniendo los estimados de la ecuación (9) un mayor rango de dispersión de los valores. Las estadísticas básicas obtenidas con el sistema IRENE se muestran en el Cuadro 17 mediante comparación de valores observados y valores estimados por las ecuaciones.

Cuadro 17. Estadísticas básicas entre los valores observados de R y estimados por las ecuaciones conjuntas

Parámetro	Observados	Estimados (1)*	Estimados(2)**
N° de datos	120	120	120
Suma	73381,96	75108,18	74718,95
Promedio	611,52	631,16	622,66
Desviación típica	533,10	427,59	461,24
Sesgo	0,65	0,67	0,17
Curtosis	-0,01	-0,31	-1,26

$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$

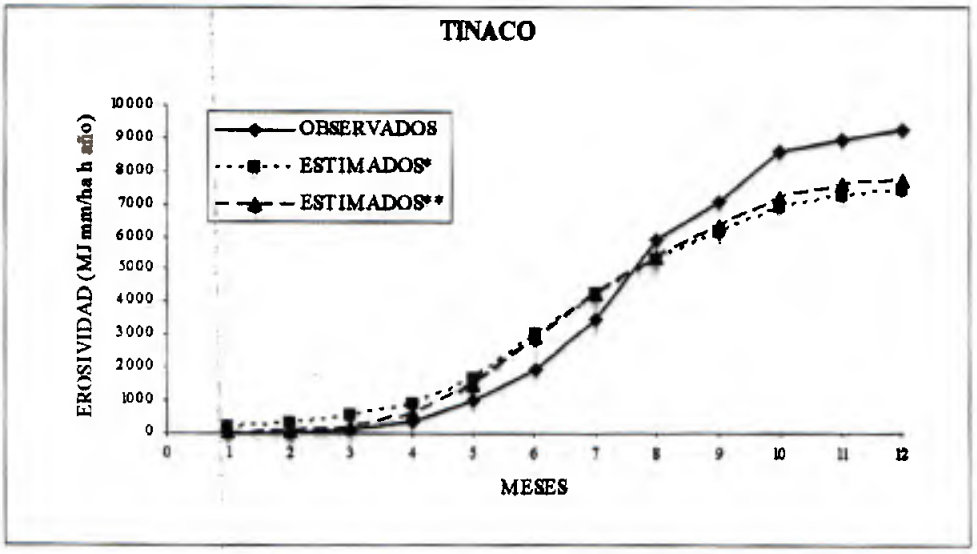
$**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Tanto los valores acumulados como los promedios fueron estimados adecuadamente por las ecuaciones. Los errores para los valores acumulados se

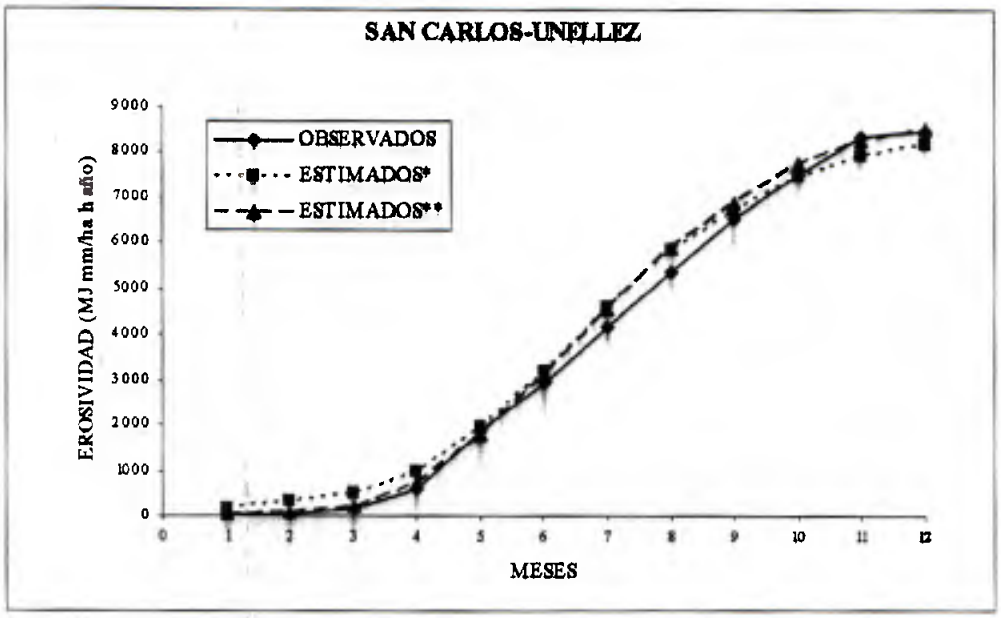
consideran bajos, siendo de 2,35% y 1,82% para los estimados (1) y estimados (2) respectivamente, en ambos casos por sobrestimación. Esto conlleva a la diferencia en el promedio observado para las ecuaciones, evidenciando una menor dispersión en la distribución de los valores estimados (1) hacia valores más grandes y diferencias más uniformes con respecto a los estimados (2).

Los patrones de distribución de los valores observados y estimados por las ecuaciones (8) y (9) para cada una de las estaciones se muestran en las figuras 9 al 13. La estación San Carlos-UNELLEZ es la que tiene mejor comportamiento en ambas ecuaciones, lo cual se puede explicar por el mayor número de años analizados en las relaciones. Para las estaciones San José de Chirgua, Hato Las Babas y Morita Caserío hay tanto subestimación como sobrestimación de los valores mensuales lo cual hace que el valor anual se aproxime bastante al observado, contrario a las estaciones El Retazo, Vallecito, Pao-Oficina y Pao-Planta, que la mayor proporción de sobrestimación en las tres primeras aumenta su valor anual estimado, y para la última la subestimación hace disminuirlo. En la estación La Sierra el comportamiento de la ecuación (9) es adecuado, no así de la ecuación (8) (relación tipo cuadrática en Y), que refuerza la diferencias que se pueden presentar con ecuaciones conjuntas aún teniendo el mismo tipo de relación. Esto evidencia que para predecir valores mensuales estas ecuaciones deben ser usadas con incertidumbre, por las diferencias presentadas en las estaciones, aunque puede aproximarse el valor anual de R.

En el Cuadro 18 se visualizan las estadísticas de regresión obtenidas por el sistema IRENE para comparar los valores observados con los estimados por ambas

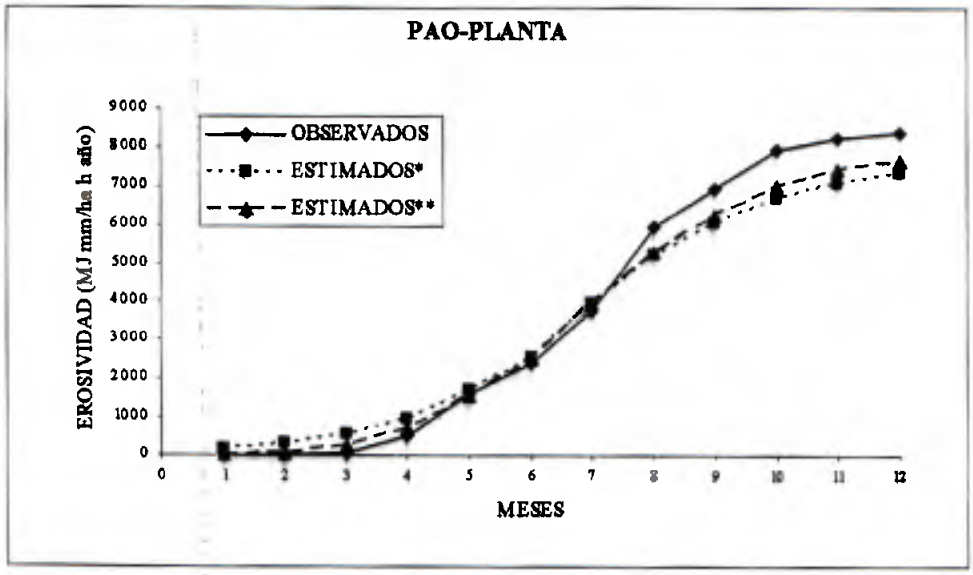


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

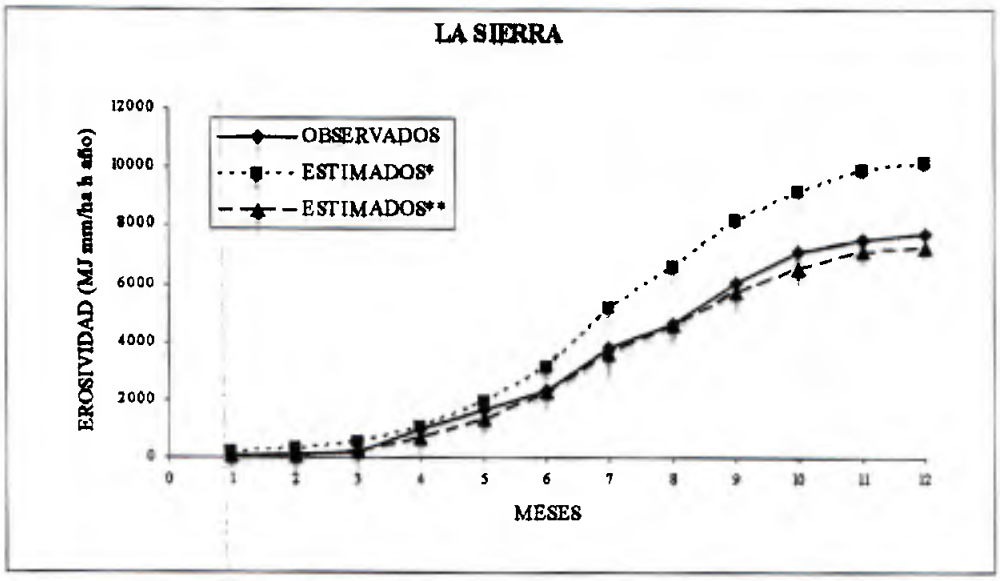


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Figura 9. Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las ecuaciones de Tinaco y San Carlos-UNELLEZ

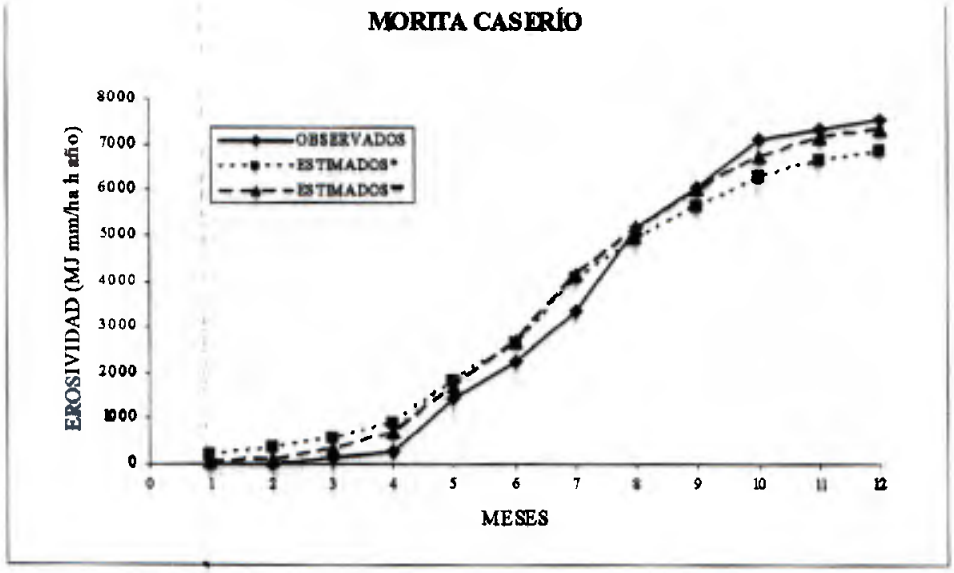


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

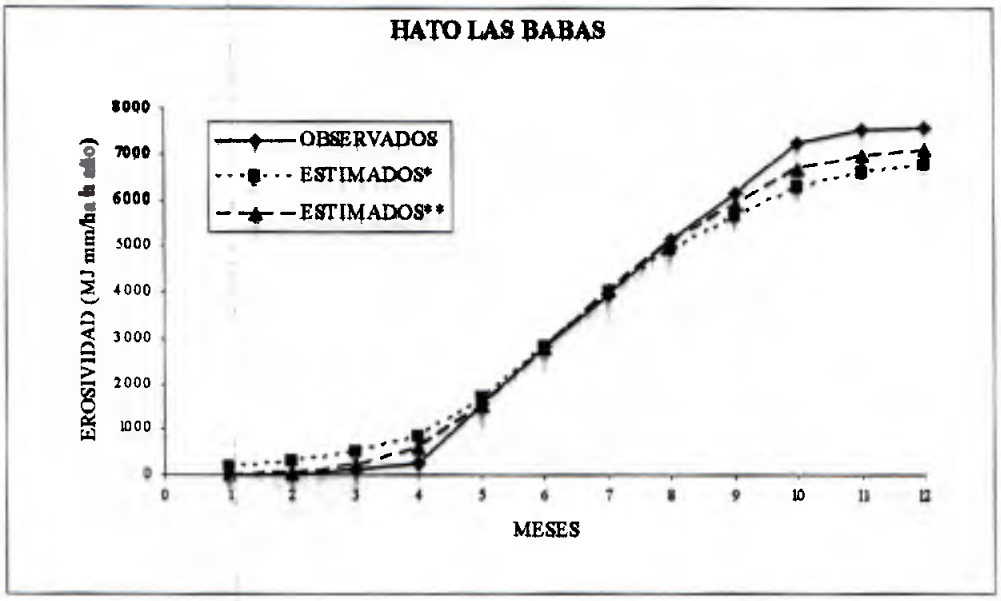


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Figura 10. Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las ecuaciones de Pao-Planta y La Sierra

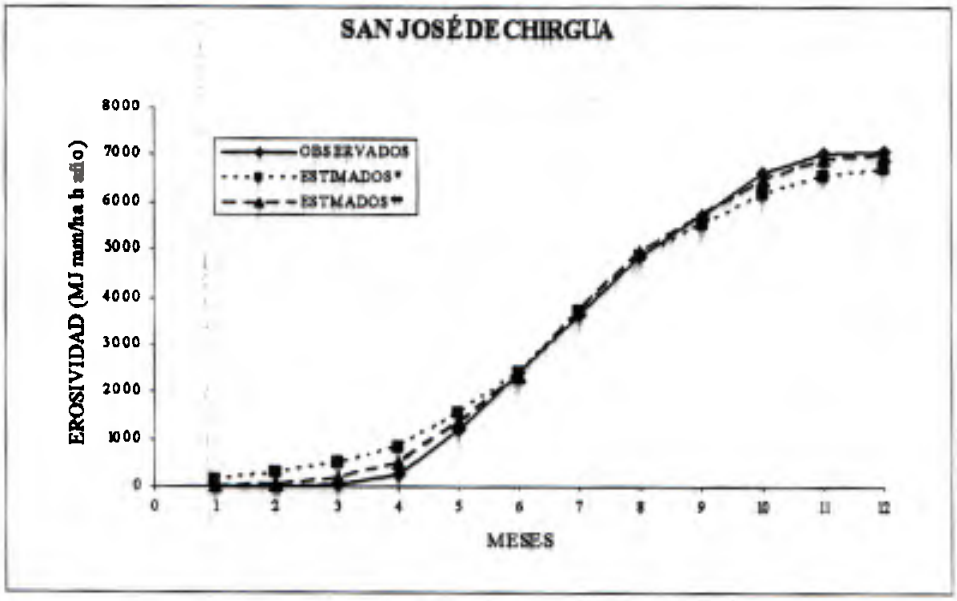


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

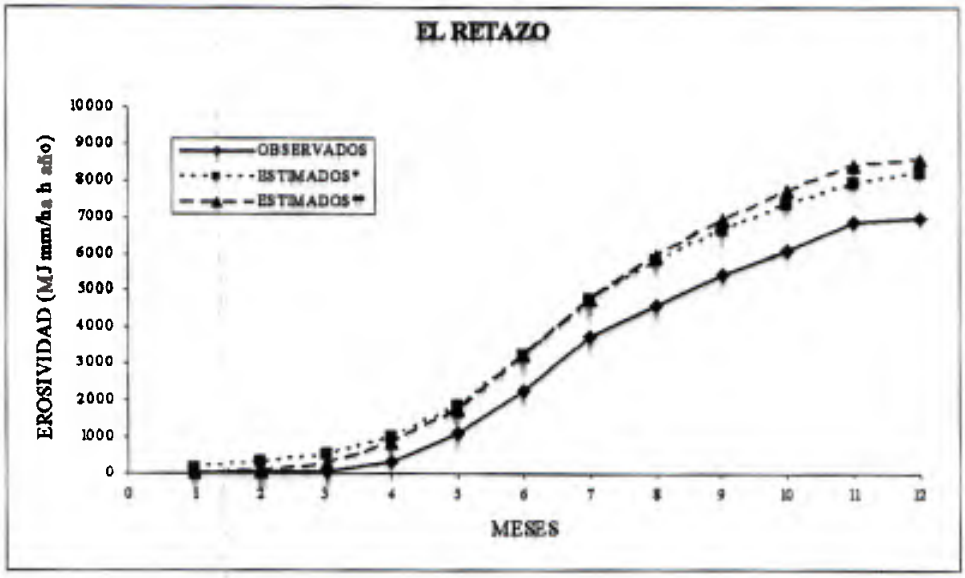


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Figura 11. Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las ecuaciones de Morita Caserío y Hato Las Babas

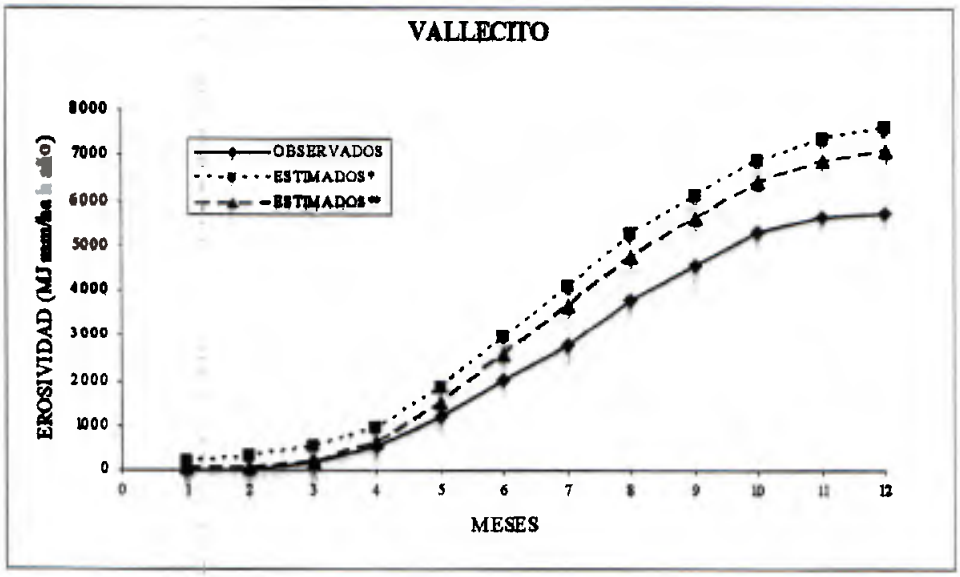


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $\quad$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

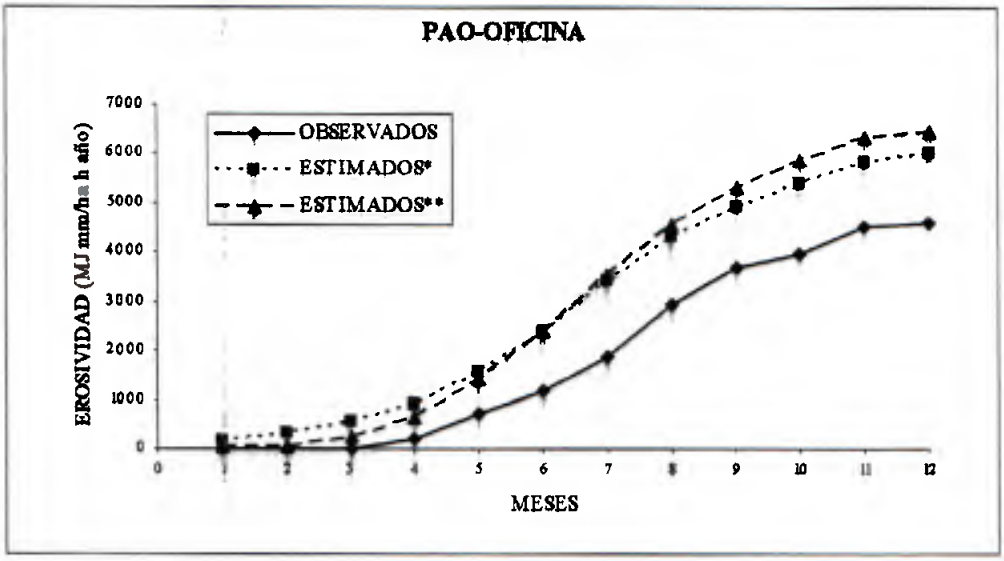


$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$ $\quad$ $**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Figura 12. Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las ecuaciones de San José de Chirgua y El Retazo



*Y = (11,957 + 0,097 * X)^2 **Y = 5,786 * X – 0,00205 * X_1



*Y = (11,957 + 0,097 * X)^2 **Y = 5,786 * X – 0,00205 * X_1

Figura 13. Distribución de los valores estimados por las ecuaciones conjuntas y su comparación con los valores observados para las ecuaciones de Vallecito y Pao-Oficina

ecuaciones conjuntas a un nivel de significación del 5%. Estas estadísticas están basadas en los fundamentos de los análisis de regresión que establece que los valores observados deben ser iguales a los estimados, utilizando por ello para el análisis las probabilidades, tanto conjunta como independiente, de que el intercepto de la línea de regresión sea igual a cero y la pendiente igual a uno, así como la probabilidad de que el coeficiente de correlación sea cero. La probabilidad independiente la da una prueba t y la probabilidad conjunta una prueba F.

Cuadro 18. Estadísticas de regresión para las ecuaciones conjuntas definidas

Parámetro	Estimados (1)*	Probabilidad Independiente	Estimados(2)**	Probabilidad Independiente
Coeficiente de regresión	0,84	0,0000	0,89	0,0000
Intercepto $P_{a=0}$	-46,98	0,32	-29,02	0,4410
Pendiente $P_{b=1}$	1,05	0,40	1,03	0,5551
Probabilidad Conjunta	0,50	-----	0,70	-----

$*Y = (11{,}957 + 0{,}097 * X)^2$

$**Y = 5{,}786 * X - 0{,}00205 * X_1$

Los valores estimados tanto por la ecuación (8) como (9) no tienen una adecuada relación con lo valores observados, aunque para ambos es altamente significativa la probabilidad de que el coeficiente de correlación no sea igual a cero. La correspondencia en menor para los estimados(2), obtenidos por la ecuación (9), donde la probabilidad conjunta de que el intercepto sea igual a cero y la pendiente igual a

uno no es significativa, es decir que existe una alta probabilidad de que esto no sea así, lo que también afecta la estimación de los valores anuales de erosividad de la lluvia por las ecuaciones obtenidas, y disminuye la calidad predictora de las ecuaciones. Por tal razón no fueron usadas para generar el valor de erosividad del resto de las ecuaciones indicadas en el Cuadro 1, no pudiendo con ello generar el mapa de erosividad de la lluvia para la unidad de estudio.

Relacionando el comportamiento entre las diferencias en las estimaciones, dadas por los residuales, y los valores observados de R, para ambas ecuaciones (Figuras 14 y 15), no se observan diferencias significativas. Aproximadamente para valores de erosividad de la lluvia menores a 400 MJ mm/ha h año las diferencias en las estimaciones son bajas y hay mayor proporción de valores subestimados. En el rango entre 400-800 MJ mm/ha h año se presentan diferencias mayores entre los valores observados y los estimados, con tendencia igualmente hacia la subestimación, y para valores mayores a 800 MJ mm/ha h año aunque las diferencias se mantienen en valor hay prácticamente igual proporción de valores subestimados y sobrestimados. Esto indica que los valores de erosividad de la lluvia dada por eventos extremos (Lluvias de mucha magnitud e intensidad alta) serían sobrestimados en su predicción por estas ecuaciones.

Esto se observa mejor en las Figuras 16 y 17 donde se muestra para cada una de las ecuaciones las diferencias presentadas en el promedio de sus valores residuales. Hay mayores valores en los residuales de la ecuación (8), observándose que las mismas estaciones presentan problemas en sus valores estimados con las dos

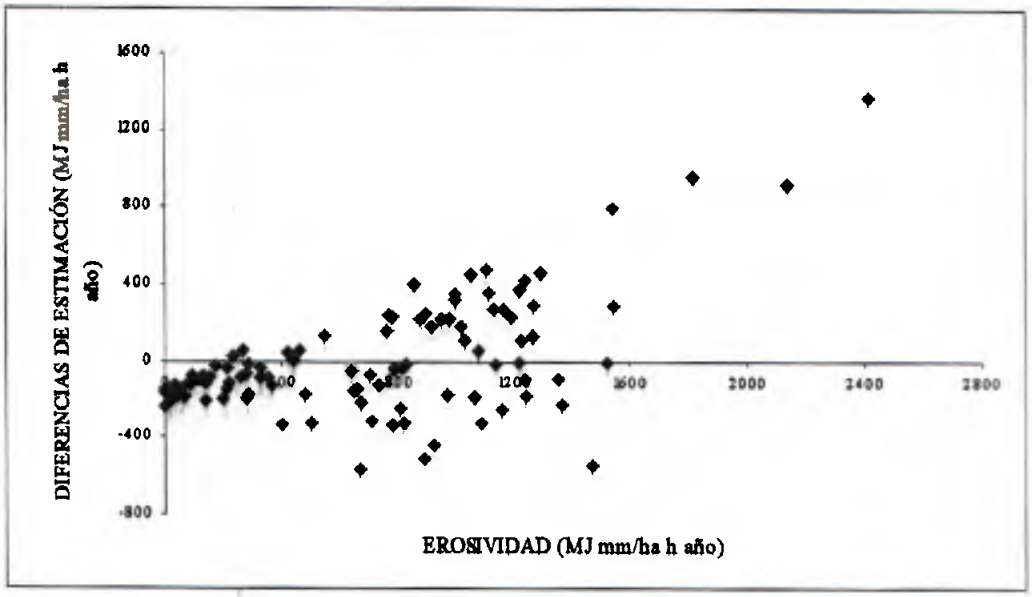


Figura 14. Diferencias de estimación según los valores de erosividad de la lluvia para estimados por ecuación (8)

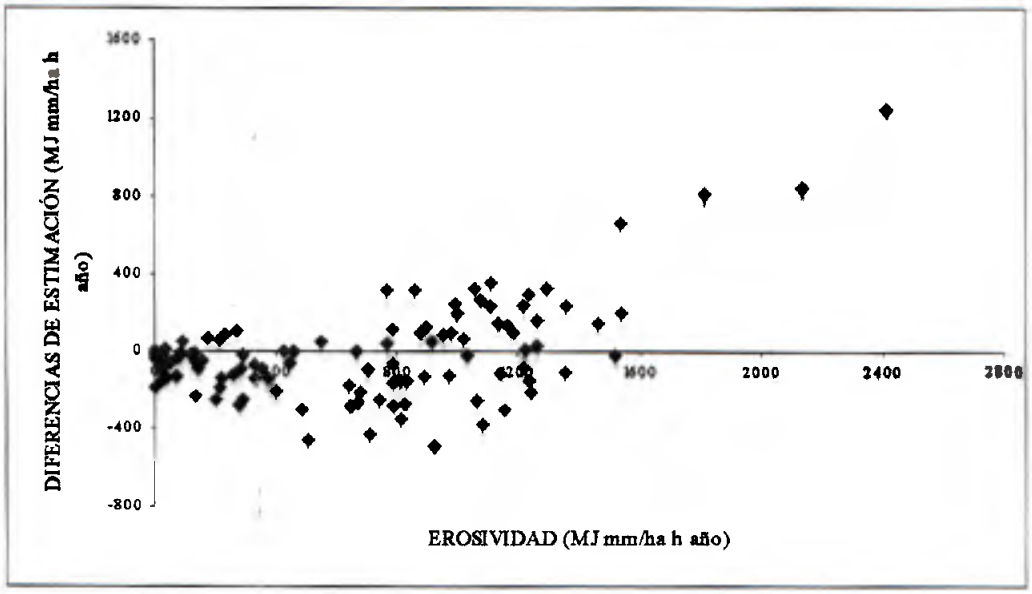


Figura 15. Diferencias de estimación según los valores de erosividad de la lluvia para los estimados por ecuación (9)

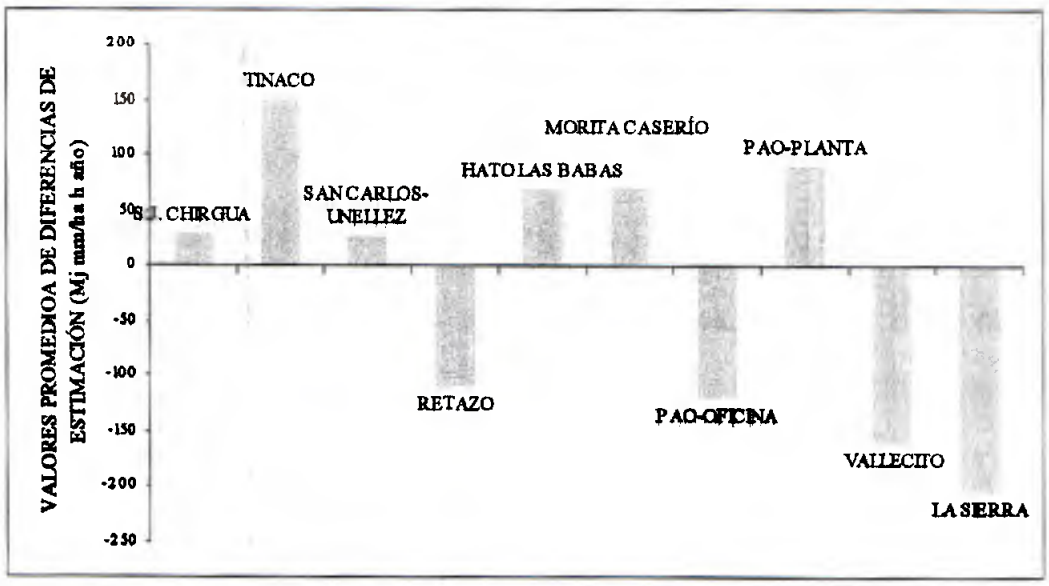


Figura 16. Valores promedios de los residuales para la estimación de la ecuación (8)

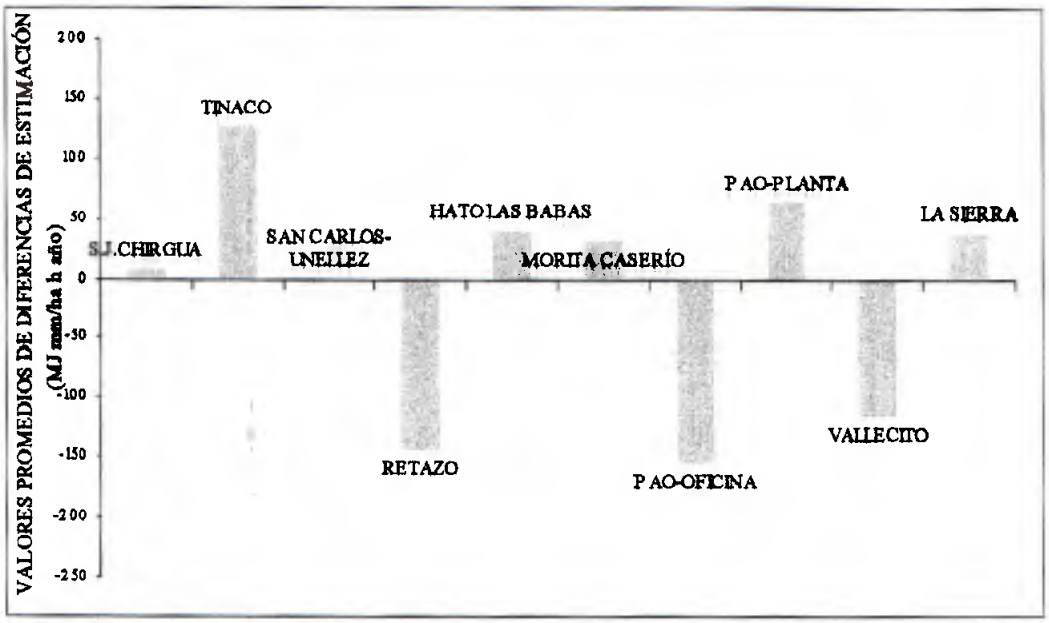


Figura 17. Valores promedios de los residuales para la estimación de la ecuación (9)

ecuaciones, sin embargo la estación La Sierra ve sobrestimado su valor de erosividad anual con respecto a su valor observado por la ecuación (8), lo cual indica que la relación establecida en la misma no explica suficientemente dicha relación para su comportamiento individual.

4.4 Valores estimados de erosividad de la lluvia por el modelo EPIC y su comparación con los valores observados

El Cuadro 19 resume los valores promedios de erosividad de la lluvia para cada estación a nivel mensual y anual. La calificación en función de su valor anual varía para Morita Caserío a moderadamente-alto, para San Carlos-UNELLEZ y Tinaco como moderados, incluyendo a Vallecito, con respecto a la calificación de los valores observados. Esto implica que sobrestimó el valor para Morita Caserío y Vallecito y subestimó para San Carlos-UNELLEZ y Tinaco. Pero estos cambios no evidencian alteraciones significativas en la calificación, que pueden estar explicadas en la relación de la magnitud de la precipitación con la energía erosiva de la misma. Para la estación Morita Caserío hay un evento de lluvia ocurrido el 15-07-1997 de 303,0 mm que no fue posible computar en las bandas por daño en el reloj, pero se presume que es un error existente en los registros de precipitación diaria por la magnitud del evento, que hace sobrestimar el valor de erosividad simulado.

Las estadísticas básicas dadas por el sistema IRENE (Cuadro 20) comparando los valores observados de erosividad de la lluvia, a nivel mensual, con los estimados por EPIC para el mismo período de análisis de las bandas pluviográficas reflejan un

Cuadro 19. Valores promedios mensuales y anuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC (MJ mm/ha h año)

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
Tinaco	0	12,4	38,3	597,5	1339,2	1075,6	1007,6	1172,7	849,8	1244,6	428,1	221,6	**7987,38**
SC-U	16,32	19,97	167,6	428,1	1075,6	927,5	738,0	1144,6	1321,0	876,2	837,6	185,5	**7738,09**
Pao-Planta	0	0	30,9	729,9	945,5	856,0	683,0	2361,5	679,5	663,2	314,4	176,9	**7440,87**
La Sierra	62,2	21,5	74,2	580,5	585,8	970,9	1104,8	1082,6	1088,9	1144,9	773,4	263,5	**7753,53**
Morita C,	26,3	12,0	223,3	385,5	1113,8	634,7	2531,1	928,7	1715,7	1023,8	169,6	376,9	**9141,5**
Hato L,B,	0	0	92,3	112,1	944,7	955,1	679,2	1742,8	820,2	982,1	346,2	29,8	**6686,40**
S,J, Chirgua	0	6,9	45,9	133,9	716,1	1252,1	704,4	1896,9	819,4	999,8	381,1	29,9	**6986,62**
El Retazo	17,8	69,9	36,8	866,3	626,1	980,4	857,2	966,8	835,9	700,4	702,2	249,7	**6909,56**
Vallecito	36,2	42,6	103,3	483,4	1039,2	927,7	580,4	1084,9	1320,8	582,1	237,5	145,4	**6583,56**
Pao-Oficina	0	0,6	154,4	389,2	554,3	556,8	566,7	924,2	775,4	298,7	437,0	61,2	**4718,7**

comportamiento adecuado de los datos simulados. Los valores acumulados y el valor promedio simulados por EPIC difieren en un 1.96% con respecto a los observados, lo cual puede considerarse satisfactorio. Existe menor dispersión de los valores simulados con una distribución de valores más aguda que la de los observados, los cuales se distribuyen en función de su magnitud más uniforme.

Cuadro 20. Estadísticas básicas de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC

Parámetro	Observados	Simulados
N° de datos	120	120
Suma	73381,96	71946,22
Promedio	611,52	599,55
Desviación típica	533,10	513,46
Sesgo	0,65	0,95
Curtosis	-0,01	1,42

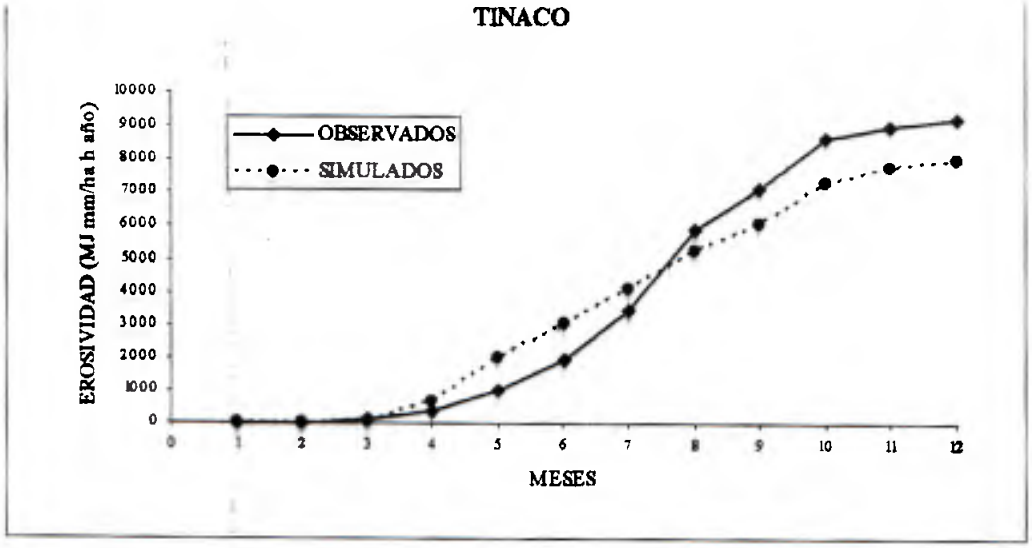
La relación de regresión entre los valores observados y simulados es bastante adecuada, observando en el Cuadro 21 que significativamente hay una alta probabilidad de que los valores tengan pocas diferencias. Tanto el intercepto como la pendiente de la línea de tendencia tuvieron probabilidades independientes altas de ser igual a cero y uno respectivamente, ocurriendo lo mismo con su evaluación conjunta. Así mismo el coeficiente de correlación es alto y con elevada probabilidad de que no sea cero, lo cual se puede evidenciar comparando los valores acumulados tanto observados como simulados a lo largo del año para cada una de las estaciones

(Figuras 18 al 22). En líneas generales se sigue un patrón similar entre los valores observados y simulados a excepción de la estación Tinaco que presenta un comportamiento contrario, con valores mayores en los primeros meses con respecto a los observados y luego disminuyen para el resto de los meses del período considerado. Para futuros análisis esta estación debe ser considerada con cautela, ya que es la que presenta mayor valor en sus residuales, siendo el mismo comportamiento reflejado en las estimaciones hechas por las ecuaciones generadas.

Cuadro 21. Estadísticas de regresión de los valores promedios mensuales de erosividad de la lluvia simulados por EPIC

Parámetro	Simulados	Probabilidad Independiente
Coeficiente de regresión	0,83	0,0000
Intercepto y $P_{a=0}$	94,82	0,02
Pendiente y $P_{b=1}$	0,86	0,01
Probabilidad Conjunta	0,03	--------

Según los índices obtenidos por el sistema IRENE basados en las diferencias entre los valores observados y simulados (Cuadro 22) se deduce que hay una buena correspondencia, ya que la eficiencia de la simulación y el índice de concordancia están cercanos a uno, aunque el error medio absoluto, que define la diferencia promedio entre los valores observados y simulados, es grande. Esto se corresponde



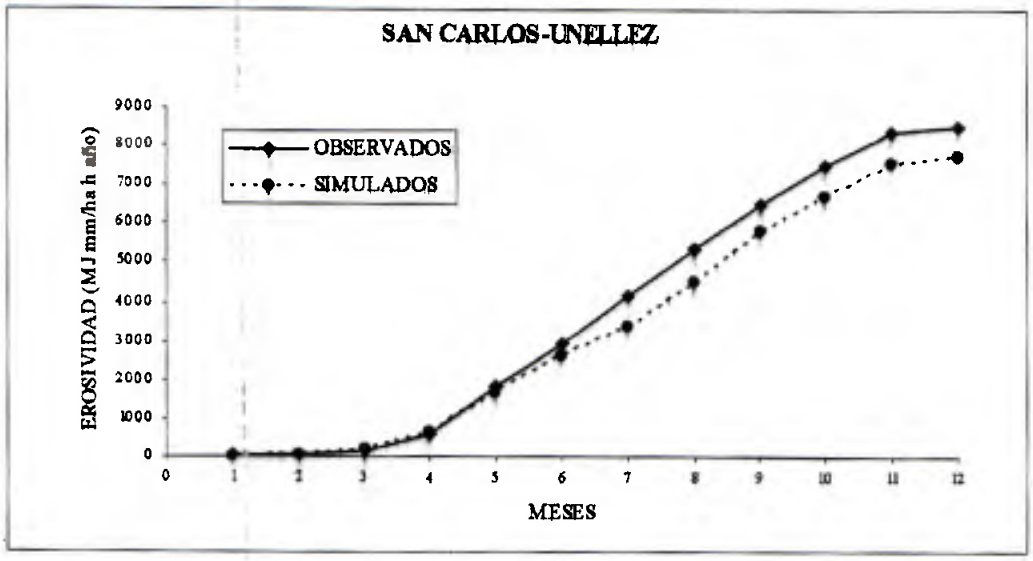
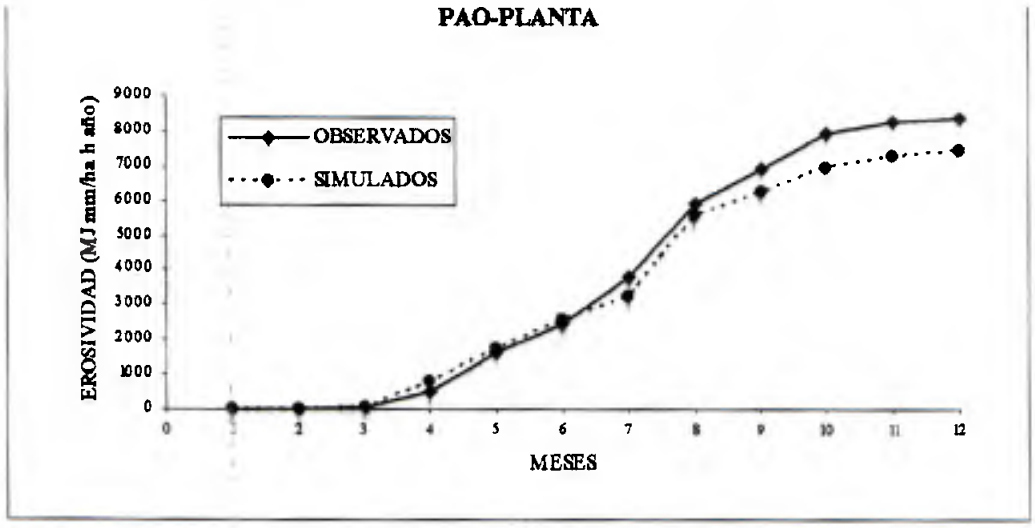


Figura 18. Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones Tinaco y San Carlos-UNELLEZ



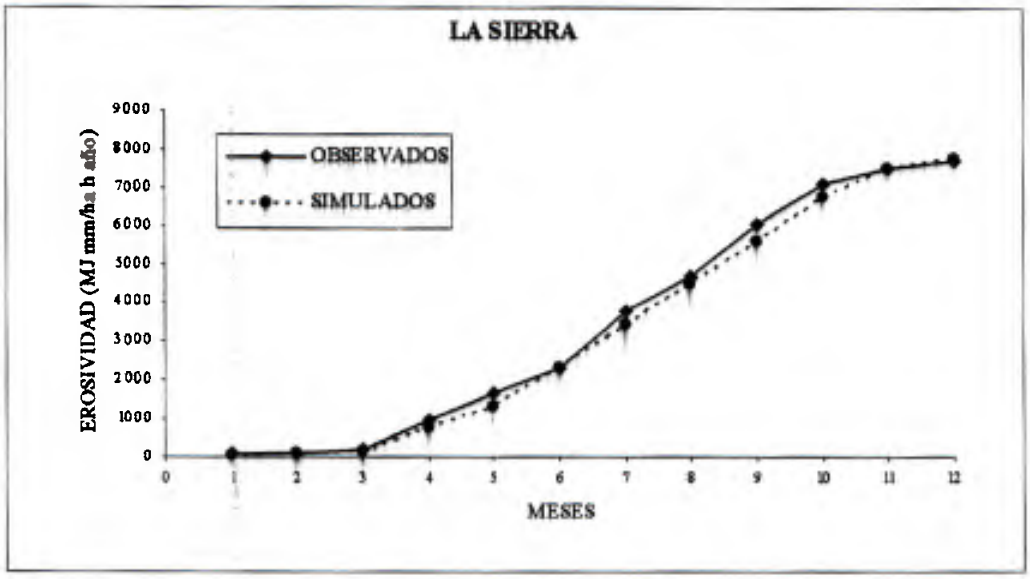
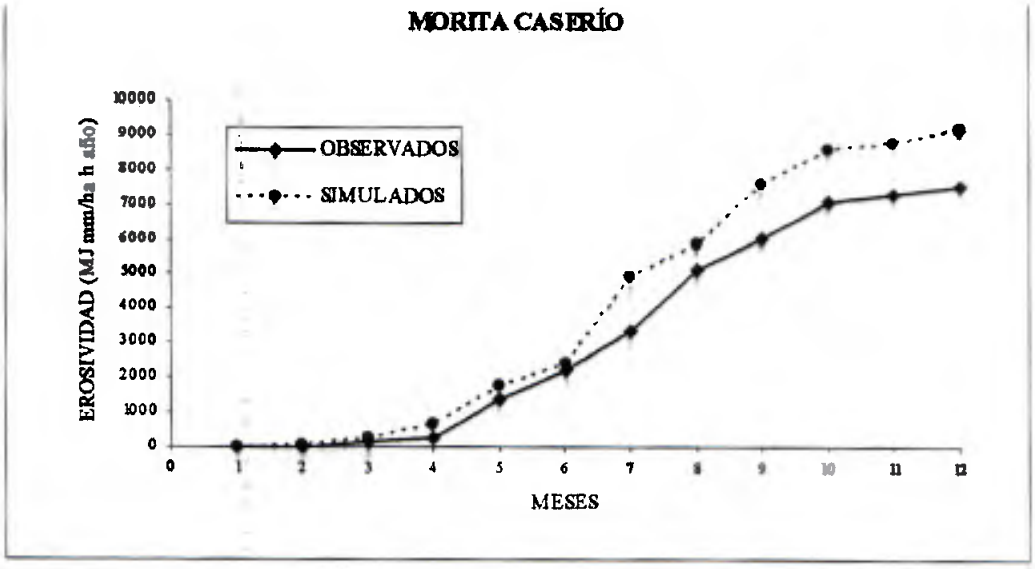


Figura 19. Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones Pao-Planta y La Sierra



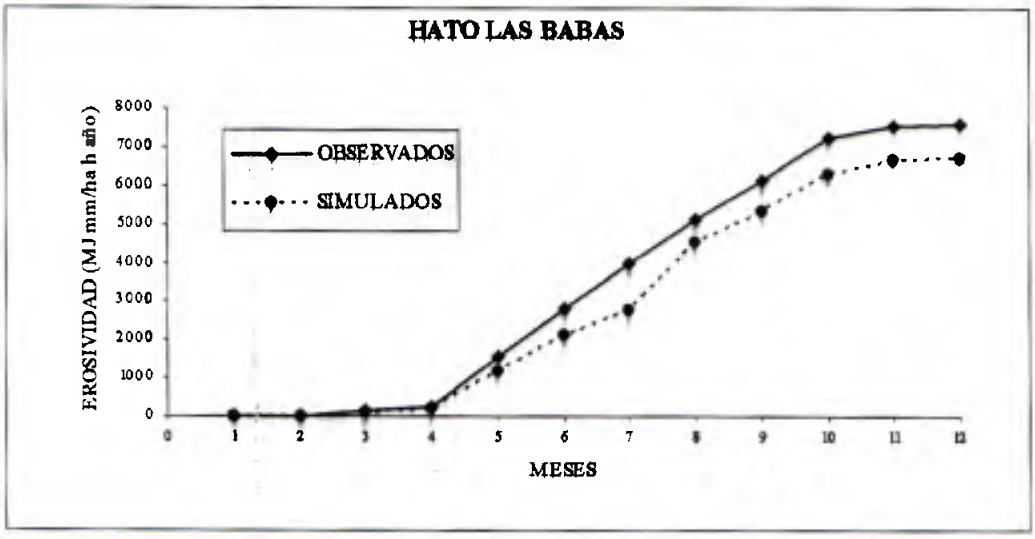
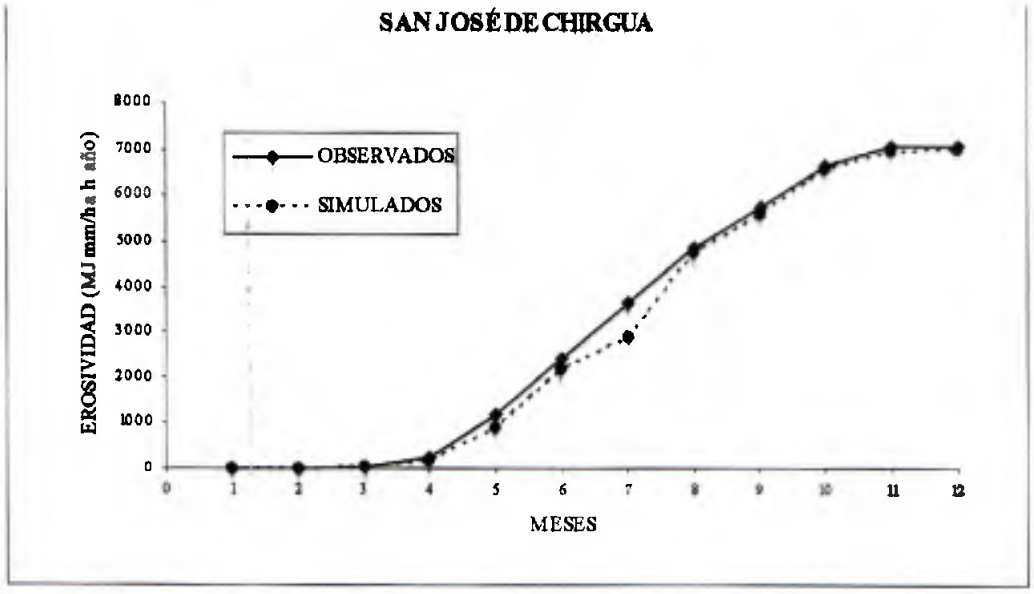


Figura 20. Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones Morita Caserío y Hato Las Babas



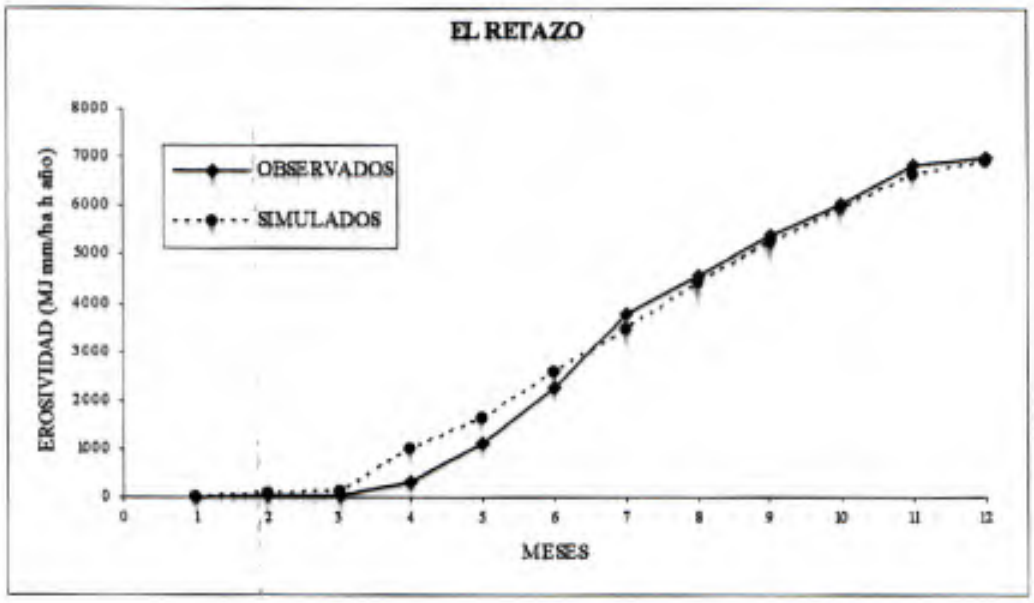
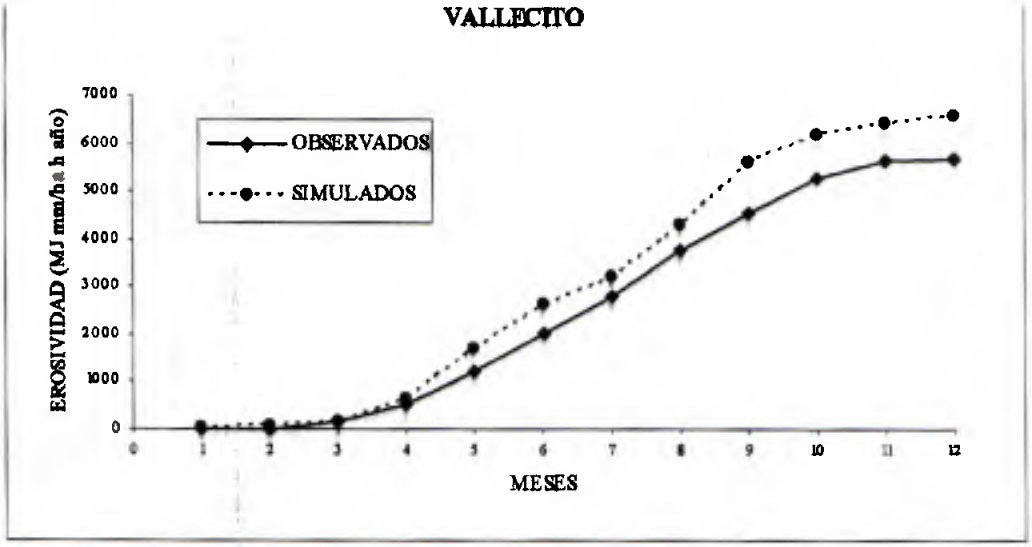


Figura 21. Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones San José de Chirgua y El Retazo



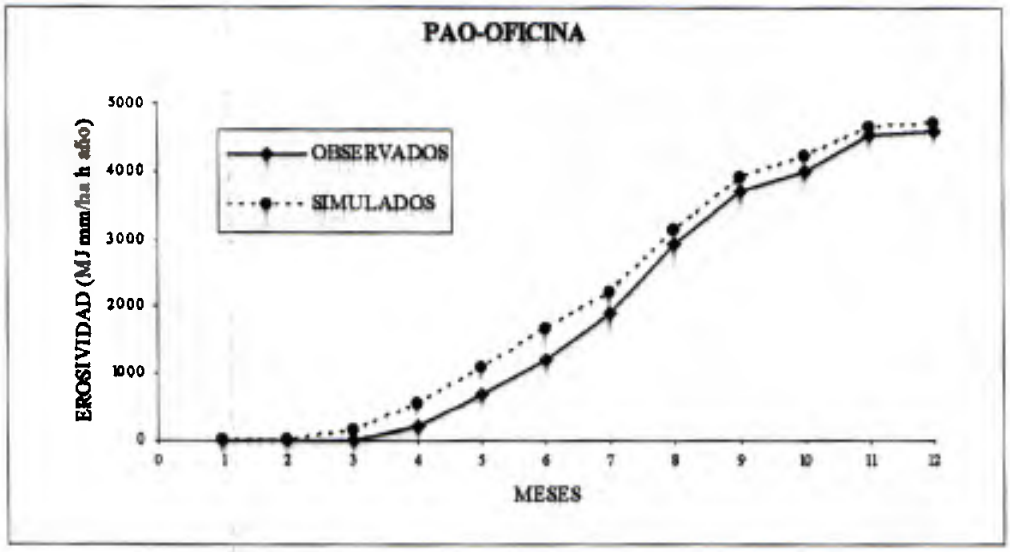


Figura 22. Distribución de los valores promedios mensuales observados y simulados por EPIC para las estaciones Vallecito y Pao-Oficina

con las evaluaciones hechas por Paredes y Silva (2004) donde se establece la adecuada capacidad de EPIC de simular valores mensuales promedios de erosividad de la lluvia, aunque la eficiencia de la simulación fue mayor que la del presente trabajo. Ello posible de explicarse por el análisis individual de cada estación con un registro de 14 años, al contrario del análisis con registros diferentes en magnitud de años para las estaciones consideradas, y procesados los valores en forma conjunta por el sistema IRENE, ya que lo que se perseguía era su comparación a este nivel de agregación.

Cuadro 22. Cuantificación de los índices utilizados para el análisis de diferencias entre los valores observados y simulados de erososividad de la lluvia

Índice	Valor
Eficiencia de la simulación (EF)	0,67
Coeficiente de concordancia (d)	0,91
Error medio absoluto (Mj mm/ha h año)	181,99

Las diferencias entre los valores observados y simulados (diferencias de simulación) expresadas en magnitud por el error medio absoluto, al ser comparadas con los valores de erosividad observados (Figura 23) reflejan que valores de erosividad menores a 200 Mj mm/ha h año tienen una diferencia muy baja con respecto a sus valores simulados, aumentado estas diferencias en la misma medida

que aumenta la erosividad, pero con proporciones parecidas en subestimaciones y sobrestimaciones que hace que para valores promedios la simulación tenga un buen índice de concordancia. Se observa además que existen menores diferencias con respecto a los estimados de erosividad de la lluvia de las ecuaciones.

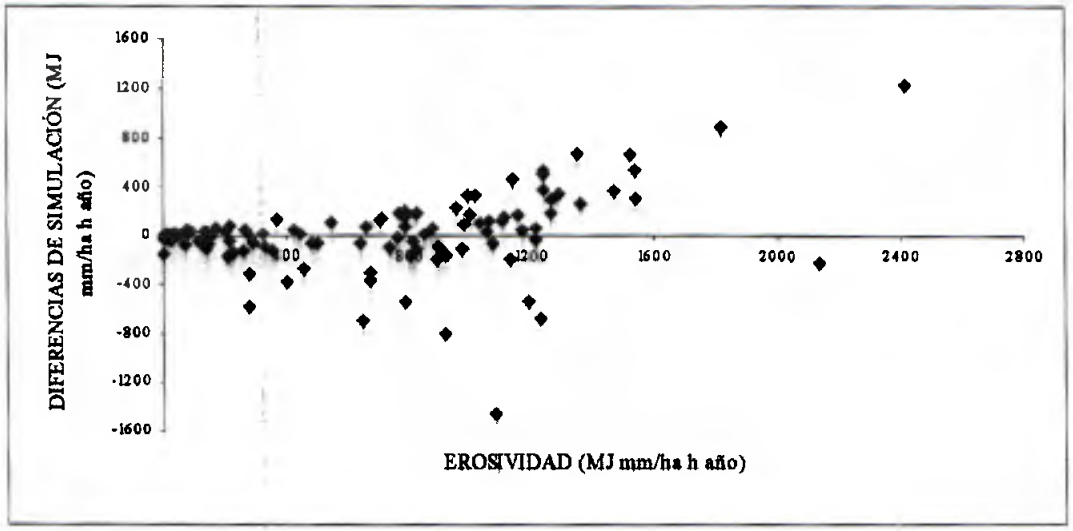


Figura 23. Diferencias de simulación según la erosividad de la lluvia para el modelo EPIC

Hay que establecer que la simulación realizada por EPIC resulta más aproximada a los valores mensuales observados de erosividad de la lluvia, que los estimados por las ecuaciones. Para las diferencias de simulación existente hay que considerar que EPIC toma todas las láminas de lluvia, en cambio para este trabajo en el análisis de las bandas sólo se tomó láminas mayores a 10 mm. A nivel de agregación anual también resultó más eficiente que las ecuaciones, sin sobrestimaciones ni subestimaciones considerables.

CONCLUSIONES

En base a los resultados de este trabajo se puede establecer que:

1. La erosividad de la lluvia obtenida por el análisis de las bandas pluviográficas en las estaciones analizadas, ubicadas en áreas con régimen unimodal de precipitación y altitudes variables entre 120 y 1000 msnm, alcanzan valores de moderados-bajos a moderados-altos, oscilando entre 4500 y 9000 Mj mm/ha h año. En promedio estos valores se concentran en más del 50% en los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

2. La relación potencial establecida por Arnoldus (1977) entre los valores anuales promedios y el índice modificado de Fournier resultó no significativa para el análisis realizado, sin poder establecer mayores consideraciones por no existir referencias de su aplicación en Venezuela.

3. La relación entre valores promedios mensuales obtenidos por el análisis de las bandas pluviográficas con la lámina de precipitación promedio mensual resultó significativa para las estaciones consideradas individualmente, diferenciándose dos tipos de ajuste. Uno rectilíneo para las estaciones San Carlos-UNELLEZ, San José de Chirgua, Hato Las Babas, Vallecito y El Retazo, que evidencia una mayor uniformidad en el comportamiento de la erosividad de la lluvia, y el otro de tipo cuadrático en Y para las estaciones Tinaco, Pao-Planta, Morita Caserío, Pao-Oficina y La Sierra, de patrón más irregular en este comportamiento. Las ecuaciones obtenidas se ajustaron adecuadamente a los valores observados.

4. El análisis conjunto de los valores promedio mensuales observados con la lámina de precipitación mensual promedio de todas las estaciones generó dos modelos o ecuaciones de regresión que en función del coeficiente de determinación resultaron estadísticamente significativas. Los estimados de estas ecuaciones se comportaron de manera similar, existiendo unas diferencias de estimación entre los valores mensuales grandes, tanto por sobrestimación como por subestimación, que implicó acercamiento al valor anual promedio de erosividad de la lluvia de algunas estaciones con bastante efectividad, no así o para las estaciones Tinaco, El Retazo, Vallecito, Pao-Oficina y La Sierra. Para esta última el ajuste cuadrático en Y por regresión simple sobrestimó considerablemente el valor observado, en cambio el ajuste por regresión múltiple con variables independientes asociadas, como fueron la lámina promedio mensual y la interacción lámina por altitud, dio resultados más satisfactorios.

5. Las relaciones entre las diferencias de estimación y los valores de erosividad mensual promedios observados tuvieron comportamiento iguales para las ecuaciones conjuntas generadas, siendo mayor la diferencia de estimación en la medida que aumenta el valor de erosividad.

6. El análisis de regresión realizado a los valores promedios mensuales observados con los estimados al mismo nivel de agregación evidenció en ambas ecuaciones una calidad predictiva baja, que marca mucha incertidumbre para generar valores de erosividad de la lluvia para otras áreas. Esto podría tener resultados más satisfactorios para series de tiempo más larga que las consideradas en este trabajo.

7. Los valores promedios mensuales y anuales de erosividad de la lluvia obtenidos por el modelo de simulación EPIC tuvieron una mayor concordancia con los valores observados relacionados de manera conjunta para todas las estaciones, lo cual hace del modelo una alternativa de sustitución al análisis de las bandas cuando se requieren de valores acumulados. Aunque se mantiene con respecto a las ecuaciones el comportamiento de las diferencias de estimación, es decir valores grandes de erosividad generan mayores diferencias de estimación, estas son mucho menores en magnitud.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados y conclusiones que se desprenden de este estudio se recomiendan las siguientes acciones:

1. Ampliar esta investigación en la unidad de estudio para abarcar estaciones representativas de áreas climáticamente diferentes y de años de análisis, que permitan adecuadamente generar el mapa de erosividad de la lluvia, como herramienta fundamental en la regionalización de áreas por riesgo de erosión hídrica.

2. Realizar un estudio de análisis y distribución espacial de tormentas agresivas a manera de visualizar las diferencias en los patrones de erosividad de las estaciones.

3. Evaluar la comparación de los valores diarios de erosividad de la lluvia generados por el modelo de simulación EPIC con los valores da cada evento erosivo en las bandas pluviográficas a manera de reforzar lo establecido en otras investigaciones, con respecto al uso de EPIC para estimar erosividad de la lluvia para eventos particulares.

4. Se requieren seguir haciendo evaluaciones del modelo de simulación EPIC para áreas con diferentes patrones de lluvia, de manera de hacer calibraciones del modelo y observar su influencia en la erosividad, contando para ello con los respectivos análisis de bandas pluviográficas.

REFERENCIAS

Arnoldus, H. 1977. Methodology used to determine the maximum potencial average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Fao Soils Bulletin. 34: 39-51

Ewel J. y A. Madriz. 1968. Zonas de Vida de Venezuela. Fondo Nacional de Investigaciones Agrpecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas, Venezuela

Fila, G; Bellochi, G; Acutis, M; Donatelli, M. 2001. IRENE : Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates. ISCI, Bologna, Italy. http:/www.isci.it/tools

Guevara, E. 2000. Sistemas de Conservación y Rehabilitación de Cuencas. Consejo de Desarrollo Cientifico y Humanístico. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

González, M. 1991. La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo. Pasado, Presente y Futuro. Ecologia N° 5, pp. 13-50

MARNR. 1988. Zonificación Agroclimática del Estado Cojedes y Occidente de Guárico. Direccion general Sectorial de Investigación y Conservación de Agua, Suelo y Vegetación. Caracas, Venezuela.

Páez M; O. Rodriguez y J. Lizaso. 1982. Potencial Erosivo de la Precipitación en Tierras Agricolas de Venezuela. Alcance de la revista de la Facultad de Agronomia. 37:22-31

Páez M y O. Rodriguez. 1989. Factores de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo en Venezuela. Alcance de la Revista de la Facultad de Agronomía. 37:22-31

Páez M. 1994. Clasificacion de Suelos por Riesgos de Erosión Hídrica con Fines de Planificación Agricola. Alcance de la revista de la Facultad de Agronomía. 20:83-100

Páez M. 1995. Consideraciones Metodológicas sobre la USLE para Mejorar su Poder Predictivo y la Calidad de la Información Básica Generada para su Utilización.

In: Metodologías de Evaluación e Investigación de la Erosión del Suelo y su Impacto en la Productividad y el Ambiente. CIDIAT, pp. 103-116

Paredes, J y y O. Silva. 2004. Evaluación del Componente de Erosividad de las Lluvias del Modelo EPIC en algunas localidades de Venezuela. XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Cartagena de Indias, Colombia

Renard K y J. Freimund. 1993. Using Monthy Precipitation Data to Estimate the R-Factos in the Revised USLE. Journal de Hidrology, N° 157, pp. 287-306

Rodriguez O, N. Fernández y A. Fernández. 1994. Evaluación de Índices de Erosividad de una Cuenca Alta de la Cordillera Central de Venezuela. Alcance de la revista de la Facultad de Agronomía 20:177-187

Silva O. 2002. Evaluación de los Componentes de Erosión de los Modelos EPIC y WEPP y de Producción de agua del modelo SWAT en condiciones de sabana y altas pendientes. Trabajo de ascenso. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. 132 p.

Silva, O. 2005. Evaluación de la Erosividad de la Lluvia Diaria Simulada con EPIC en una localidad de Lluvia Estacional de Montañas Bajas en Venezuela. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay.

Wischmeier W y D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. U S. Departament of Agriculture. Agriculture Handbook N° 537. 58p