

Modelos de erosividad anual utilizando registros pluviómetros para la vertiente del pacífico de Guatemala

Annual erosivity models using rain gauge records for the Pacific slope of Guatemala

Felix Rocael Martínez Gómez^{1,2} 

Walter Arnoldo Bardales Espinoza² 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,

Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

²Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: fr19.martinez@gmail.com

Recibido: 19/05/2022 Aceptado: 02/12/2022

Resumen

La erosividad es uno de los seis factores de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Para implementar las técnicas correctas de conservación de suelos es necesario conocer la variación espacial y temporal de la erosividad. El objetivo de este estudio fue generar modelos para estimar la erosividad anual en el pacífico de Guatemala a través de información pluviométrica de 28 estaciones del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático de Guatemala (ICC). Se desarrollaron dos modelos para cada estación utilizando como variable independiente los datos de precipitación diaria y mensual, y tres modelos regionales utilizando como variable independiente la precipitación diaria, mensual y anual de todas las estaciones. La erosividad de cada tormenta fue calculada según la metodología propuesta por Wischmeier & Smith (1978). Los registros de lluvia y erosividad de las estaciones se ajustaron a un modelo de tipo $R=(\alpha P)^\beta$. La calidad de los resultados de las erosividades observadas y estimadas se evaluaron por medio de los estadísticos porcentaje de bias (PBIAS), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), la razón de la desviación estándar (RSR) y análisis de varianza. Los mejores resultados de la estimación de la erosividad anual se obtuvo cuando se utilizaron los modelos regionales con datos de precipitación mensual y anual. El mejor modelo para la estimación de erosividad podrá utilizarse para generar información en lugares donde solamente existen pluviómetros o bien para extender series de erosividad a escala mensual y anual en el pacífico de Guatemala.

Palabras claves: USLE, tormenta, precipitación, días erosivos, energía cinética de la lluvia, pluviómetros.

Abstract

Erosivity is one of the six factors of the Universal Soil Loss Equation (USLE). To implement the correct soil conservation techniques, it is necessary to know the spatial and temporal variation of erosivity. The objective of this study was to generate models to estimate annual erosivity in the Guatemalan Pacific using rainfall information from 28 stations of the Guatemalan Private Institute for Climate Change Research. Two models were developed for each station using the daily and monthly precipitation data as an independent variable, and three regional models using the daily, monthly, and annual precipitation of all the stations as the independent variable. The erosivity of each storm was calculated according to the methodology proposed by Wischmeier & Smith (1978). The rainfall and erosivity records of the stations were fitted to a model of type $R=(\alpha P)^\beta$. The quality of the results of the observed and estimated erosivities were evaluated by means of the percentage of bias statistics (PBIAS), the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE), the standard deviation ratio (RSR) and analysis of variance. The best results for the estimation of annual erosivity were obtained when regional models were used with monthly and annual precipitation data. The best model for estimating erosivity will be used to generate information in places where there are only rain gauges or to extend erosivity series on a monthly and annual scale in the Pacific of Guatemala.

Key words: USLE, storm, precipitation, erosive days, kinetic energy of rain, rain gauges.



Introducción

La erosión hídrica es el principal proceso de degradación de tierras a nivel mundial (Ongley, 1997) debido a que la lluvia actúa como agente activo provocando un desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas por acción de la energía cinética de la gota de lluvia, la escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros et al., 2012). Los efectos de la erosión comprometen la capacidad productiva de las tierras al desgastar la capa más fértil del suelo y disminuyen la calidad de los cuerpos de agua por la recepción de sedimentos y sustancias transportadas por la escorrentía (Chagas & Kraemer, 2018).

Wischmeier & Smith (1958) midieron la erosión generada por el impacto de las gotas de la lluvia y la escorrentía en una parcela y propusieron la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) que se muestra a continuación:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde A es la pérdida de suelo (ton ha⁻¹ año⁻¹), R es la erosividad de la lluvia (Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), K es la erodabilidad del suelo (ton ha h ha⁻¹ Mj⁻¹ mm⁻¹), L es la longitud de la pendiente, S es la inclinación de la pendiente, C es la cobertura y P es el factor de prácticas de conservación (Renard & Freimund 1994). Los factores L, S, C, y P son adimensional.

Dentro de los factores de USLE, la erosividad indica el grado de agresividad climática y expresa el potencial erosivo de las lluvias (Wischmeier, 1959). El factor erosividad ha sido ampliamente utilizado en diversos países en donde la cantidad de información ha sido considerada de moderada a alta (Lee & Lin, 2015).

El cálculo de R proviene del análisis de las intensidades máximas de lluvia para períodos de 30 minutos a partir de registros pluviográficos, información que es difícil de adquirir a nivel mundial (Salako et al., 1995). Su estimación está dada por la ecuación siguiente:

$$R_j = E_j * I_{j30} \quad (2)$$

Donde E_j es la energía cinética (Mj mm⁻¹), I_{j30} es la intensidad máxima de lluvia durante un período de 30 min (mm h⁻¹).

Sumando la erosividad de todos los eventos de lluvia durante el año se obtiene el factor de erosividad anual representado en la ecuación siguiente:

$$R_A = \sum_{j=1}^A R_j \quad (3)$$

Donde A es el número de eventos erosivos durante el año. La energía cinética unitaria e_i se deriva de la relación entre el diámetro de la gota y la intensidad de la lluvia de la siguiente manera:

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.0833 \log I_i & \text{para } I_i < 76 \text{ mm h}^{-1} \\ 0.283 & \text{para } I_i \geq 76 \text{ mm h}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

En términos generales, se requieren registros de pluviógrafos de por lo menos 20 años en estudios para estimar la erosividad anual y emplear este valor en la ecuación de USLE (Renard & Freimund 1994). Lo anterior ha motivado a muchos investigadores a relacionar el factor R con otras variables más fáciles de obtener y calcular (Jordán & Bellinfante 2000).

En 1986 en Guatemala se analizaron los registros pluviográficos de 10 estaciones meteorológicas, en los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Sololá y Totonicapán (Del Cid Asturias, 1986), con el objetivo de estimar la erosividad anual según la metodología propuesta por Wischmeier & Smith (1978). En este análisis la erosividad osciló entre 1,034.50 a 2,095.14 Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, en tanto que el número promedio anual de lluvias con intensidad erosiva fluctuaron entre 16 y 46.

El año 1988, se determinó el factor de erosividad en la región central de Guatemala, por medio seis estaciones. La erosividad osciló de 2,548.01 a 4,568.72 Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹; presentándose el menor valor en la estación Santa Cruz Balanyá y el mayor en Morazán. Solo en tres de las seis estaciones analizadas, la correlación entre la erosividad y la lluvia promedio anual fue superior a

0.8, en las restantes, la correlación fue inferior a 0.5 (Roldán Cordón, 1988).

En el mismo año, se analizaron los registros pluviográficos de 45 estaciones, ubicadas en seis regiones de Guatemala con el objetivo de elaborar un mapa de erosividad a nivel nacional. Según los resultados, se obtuvo que el mejor modelo de ajuste entre la erosividad y la lluvia promedio anual fue el lineal, respecto a los modelos geométrico y exponencial. El factor erosividad osciló de 2,000 a 34,000 $\text{Mj mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La planicie costera del pacífico presentó el mayor potencial erosivo, mientras que, la menor fue, el oeste del país (Bravo de León, 1988).

En el 2016, por medio del análisis de 19 estaciones del ICC y aplicando un modelo exponencial entre la lluvia diaria y la erosividad, se estableció que la energía erosiva de las precipitaciones se clasifica de moderada a extremadamente severa. Los valores de erosividad variaron de 6,332.65 a 44,499.98 $\text{Mj mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Santos Pérez & León Orrego, 2016).

Actualmente, en la mayoría de los estudios en donde se ha empleado la ecuación de USLE y sus modificaciones, se han limitado a calcular el factor R con registros relativamente cortos debido a la escasez de información de alta resolución (pluviógrafos). Un problema que se ha tenido en Guatemala es no analizar de forma continua los pluviogramas de banda diaria de las estaciones convencionales, por lo que la información se limita a registros de precipitación diaria, mensual y anual, además, se tiene una baja densidad de estaciones y algunas poseen registros relativamente cortos (Fuentes Montepeque, 2021), que limitan la estimación del factor R de forma confiable por medio de pluviógrafos.

A nivel mundial, se han desarrollado diferentes modelos para estimar el factor erosividad utilizando registros de precipitación diaria, mensual y anual (Lee & Lin 2015); los resultados encontrados han sido variables, presentándose en algunos casos buena correlación con la precipitación anual (Bonilla & Vidal, 2011).

El presente estudio tuvo como objetivos desarrollar modelos puntuales (a nivel de estación) para la estimación de la erosividad anual con datos de

precipitación diaria y mensual, y modelos regionales (vertiente del Pacífico) a partir de lluvia diaria, mensual y anual, utilizando los registros de 28 estaciones del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático de Guatemala (ICC).

Con los modelos propuestos en este estudio se pretende estimar el factor erosividad en lugares en donde no existen pluviógrafos, y únicamente se tiene información pluviométrica.

En la actualidad, en Guatemala existen diferentes redes de monitoreo de lluvia por medio de pluviómetros, por ejemplo, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), que registran información desde 1970. Además, otra alternativa para la estimación de la erosividad es mediante el uso de precipitación mensual estimada por sensores de microondas denominada lluvia satelital, este tipo de medición ha tomado mucha relevancia en la última década, constituyéndose como una fuente de datos.

Descripción del área de estudio

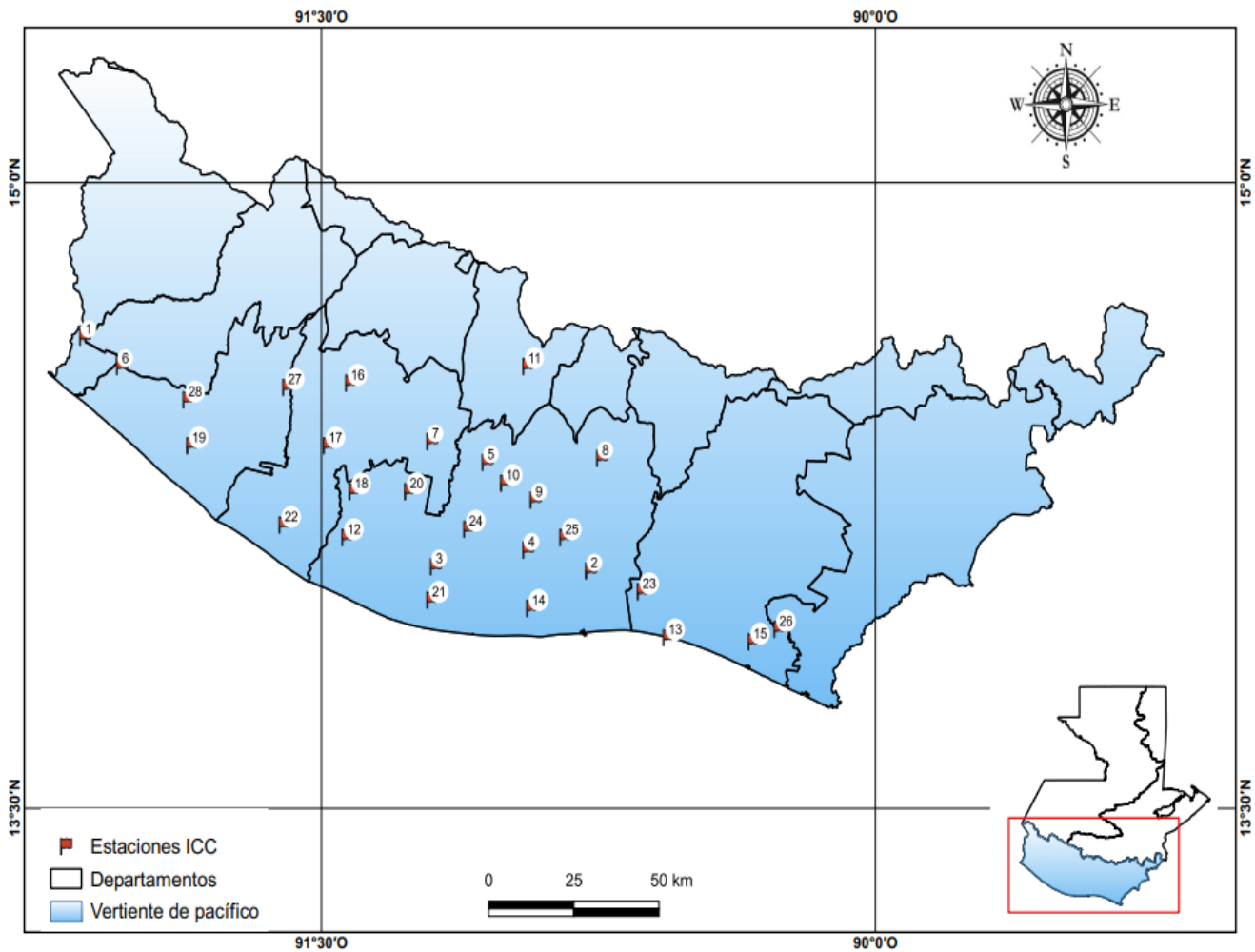
El estudio se realizó para la vertiente del pacífico de Guatemala (figura 1), la cual comprende las regiones climáticas de boca costa, costa sur, altiplano central y valles del oriente. La extensión territorial estimada de la vertiente es de 24,116.1 Km^2 , representando el 25 % del área nacional y distribuida en 13 departamentos. Esta posee un total de 18 ríos principales, los que en su mayoría desembocan en el Océano Pacífico, siendo estos de corta longitud y que se originan desde pendientes escarpadas a planas, razones por las cuales, tienen rápida capacidad de respuesta hidrológica.

Materiales y método

Enfoque metodológico

El enfoque del presente estudio es cuantitativo de tipo correlacional. Las variables continuas analizadas fueron la precipitación (x) y erosividad (y) para escalas de tiempo diario, mensual y anual. Además, se determinó la cantidad de días erosivos por estación.

Figura 1. Ubicación geográfica de la vertiente del pacífico de Guatemala y estaciones meteorológicas del ICC



Muestra

Del total de las estaciones automáticas de la red del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC, 2021), solo se utilizaron 28, las cuales no presentaron datos faltantes de precipitación y por los menos contaron con dos años de registro continuo; se descartaron del estudio las estaciones que no cumplieron con las dos condiciones.

Se tomó para el análisis, la mayor cantidad de estaciones del ICC con el fin de observar si el comportamiento a nivel local es el mismo entre la precipitación y la erosividad. Es importante indicar que solo una estación de las utilizadas se ubica sobre

los 1,000 msnm, las restantes se encuentran en altitudes iguales o menores a los 350 msnm. Además de lo anterior, la mayor cantidad de las estaciones se concentra en la parte central del área de estudio.

Datos de precipitación

En la tabla 1 se detallan las estaciones del ICC, de las cuales, se obtuvo los registros de precipitación. Se recopiló la información de 28 pluviógrafos desde el año 2008 al 2020. Los registros de precipitación fueron descargados a cada 15 min, estos valores, se acumularon para un día, mes y año, según la escala de tiempo analizada

Tabla 1: Ubicación geográfica y precipitación media de las 28 estaciones utilizadas en el estudio

No.	Estación	Latitud (N°)	Longitud (O°)	Elevación (msnm)	Precipitación ¹ (mm)	días erosivos ²	Erosividad (R) ³ MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹	período de análisis
1	Álamo	14.63	-92.14	30	1048.1	28	7771.2	2018-2020
2	Amazonas	14.07	-90.77	28	1650.9	38	11,293.6	2009-2020
3	Bonanza	14.08	-91.19	29	1401.6	33	9343.0	2008-2020
4	Bouganvilia	14.12	-90.94	60	1744.4	43	12,732.6	2008-2020
5	Cengicana	14.33	-91.05	300	3719.6	86	36,224.7	2008-2020
6	Chiquirines	14.56	-92.04	13	1064.6	31	5910.8	2016-2020
7	Cocales	14.38	-91.20	215	3280.4	79	34,980.4	2018-2020
8	Concepción	14.34	-90.74	350	3097.3	74	26,635.3	2018-2020
9	Costa Brava	14.24	-90.92	144	2716.3	66	24,018.2	2009-2020
10	El Bálsamo	14.28	-91.00	280	3454.2	81	34,503.3	2008-2020
11	El Platanar	14.56	-90.94	1578	1044.4	26	3263.3	2014-2020
12	Irlanda	14.15	-91.43	20	1290.9	32	7683.9	2008-2020
13	La Candelaria	13.91	-90.56	5	1347.4	31	10,583.4	2016-2020
14	La Giralda	13.98	-90.93	20	1263.6	32	7943.7	2015-2020
15	La Máquina	13.90	-90.33	17	805.2	22	5309.8	2019-2020
16	Lorena	14.52	-91.42	340	4097.9	95	42,166.4	2011-2020
17	Naranjales	14.37	-91.48	91	2137.4	54	15093.0	2011-2020
18	Peten Oficina	14.26	-91.41	51	1594.9	38	11,342.2	2009-2020
19	Providencia	14.37	-91.85	40	1106.2	27	5864.3	2017-2020
20	Puyumate	14.26	-91.26	86	1994.5	49	15,181.6	2008-2020
21	San Antonio EV	14.00	-91.20	10	1359.1	32	7814.3	2008-2020
22	San Nicolás	14.18	-91.60	20	992.6	24	5507.4	2013-2020
23	San Rafael	14.02	-90.63	10	1582.1	38	10,270.0	2010-2020
24	Tehuantepec	14.17	-91.10	60	1847.8	45	13,353.4	2008-2020
25	Trinidad	14.15	-90.84	68	1852.6	46	13,433.5	2008-2020
26	T. Magdalena	13.93	-90.26	19	1415.3	35	9643.4	2013-2020
27	Tulula	14.51	-91.59	253	3007.6	72	26,416.2	2011-2020
28	Xolula	14.48	-91.86	52	1277.1	32	7370.8	2014-2020

¹ Precipitación promedio anual

² Días erosivos promedio anual

³ Erosividad promedio anual

Cálculo del factor R

A partir de la información pluviográfica recolectada, se aplicó la metodología propuesta por Wischmeier & Smith (1978) para estimar el valor del factor de erosividad “R”, el cual depende de la intensidad máxima de lluvia durante 30 minutos consecutivos y la energía cinética de cada evento.

1. No se analizaron todas las lluvias debido a que no todas tienen características erosivas. Para el análisis se tomaron solo las lluvias mayores a 12.7 mm (eventos erosivos). El análisis se realizó para cada evento, considerando eventos diferentes a los separados por al menos 6 horas consecutivas sin precipitación (Wischmeier & Smith, 1978).
2. Se calculó la energía cinética unitaria (e) para pulsos de 15 minutos tomando en cuenta la intensidad (I) registrada en ese periodo de tiempo (ecuación 5). Para intensidades mayores a 76 mm h⁻¹, se asignó un valor de energía igual a 0.283 Mj mm ha⁻¹.

$$e = 0.1191 + 0.0873 * \log_{10} I \quad (5)$$

donde e en Mj ha⁻¹ mm⁻¹

La energía cinética total (E) de cada evento se obtuvo por sumatoria de la multiplicación de la energía parcial (e) y precipitación observada durante 15 min (ecuación 6).

$$E \text{ (Mj ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^n (e * pp) \quad (6)$$

3. La intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) de cada evento de lluvia se estableció seleccionando el registro máximo. Como los valores de lluvia analizados fueron observados a cada 15 minutos se sumaron periodos consecutivos de lluvia y tiempo para completar la media hora y posteriormente se hizo la transformación para obtener este valor en mm h⁻¹.
4. Se efectuó el producto de la energía total del evento y la intensidad máxima en 30 minutos (ecuación 7); lo cual constituye la erosividad total de la tormenta (R_j).

$$R_j = E * I_{30} \quad (7)$$

5. La erosividad diaria (R_d) se estimó por medio de la metodología propuesta por Xie et al. (2016). Para los días en los cuales solo se presentó un evento erosivo (el cual inicio y concluyó en el mismo día) se utilizó la ecuación 3. Cuando se presentó más de un evento erosivo completo en el día, se empleó la ecuación 8; donde n es el número de eventos erosivos durante el día, E_{evento_i} y $(I_{30})_{evento_i}$, es la energía total de la lluvia y la intensidad máxima continua en 30 min, respectivamente, para cada evento i .

$$R_d = \sum_{i=1}^n E_{evento_i} * (I_{30})_{evento_i} \quad (8)$$

6. Finalmente, cuando ocurrió solo una parte de un evento erosivo durante el día, la erosividad se calculó con la ecuación 9; donde E_{dia_d} es la energía generada por la parte de la precipitación durante un día y el $(I_{30})_{evento}$, es la intensidad máxima continua en 30 min para todo el evento.

$$R_d = E_{dia_d} * (I_{30})_{evento} \quad (9)$$

7. El cálculo de la erosividad mensual y anual se efectuó por medio de la sumatoria de la erosividad de los eventos ocurridos durante el periodo correspondiente.

Desarrollo de los modelos de erosividad con datos de precipitación diaria, mensual y anual

Para el desarrollo de los modelos se utilizó la regresión no lineal cuyo modelo fue propuesto originalmente por Richardson et al. (1983) para evaluar las relaciones siguientes: a) precipitación diaria por estación - erosividad diaria por estación; b) precipitación mensual por estación - erosividad mensual por estación; c) precipitación diaria - erosividad diaria del conjunto de estaciones; d) precipitación mensual - erosividad mensual del conjunto de estaciones; e) precipitación anual - erosividad anual del conjunto de estaciones. El

modelo matemático (ecuación 10) se basa en la ley de potencias.

$$R = \alpha P^\beta \quad (10)$$

Donde R es la erosividad, P la precipitación, α es la constante proporcional y β el exponente de la potencia. Los parámetros α y β de los modelos de erosividad fueron determinados por medio del mínimo error cuadrático.

Análisis de información

La concordancia entre la erosividad anual observada (R^{obs}) y estimada (R^{calc}) a través de lluvia diaria, mensual y anual se evaluó en función de cuatro estadísticos: 1) coeficiente de determinación (r^2); 2) porcentaje de sesgo (PBIAS); 3) relación entre la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la razón de la desviación estándar (RSR) utilizados por Lee & Heo (2011); 4) Vantas et al. (2020) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) empleado por Moriasi et al. (1983). Las ecuaciones de los estadísticos empleados fueron las siguientes:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R^{calc} - R^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (R^{calc} - R^{media})^2} \quad (11)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R^{obs} - R^{calc}) * 100}{\sum_{i=1}^n (R^{obs})} \right] \quad (12)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R^{obs} - R^{calc})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R^{obs} - R^{media})^2}} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R^{obs} - R^{calc})^2}{\sum_{i=1}^n (R^{obs} - R^{media})^2} \right] \quad (14)$$

Donde: R^{obs} fueron los datos observados, R^{calc} valores estimados por los modelos, R^{media} la media y n es el número total de datos utilizados.

La calidad de los modelos para estimar la erosividad aumenta a medida que los valores se acercan más a 1 (r^2 , NSE) y 0 (RMSE, RSR, PBIAS). Con los valores de los estadísticos de cada modelo se evaluaron las calificaciones generales de desempeño según se muestra en la tabla 2. El proceso metodológico para la construcción y evaluación de los modelos de erosividad desarrollados a partir de datos de precipitación diaria y mensual de cada estación se esquematiza en la figura 2. Para la construcción de los modelos regionales diario, mensual y anual, se tomaron todos los registros de precipitación y erosividad de las 28 estaciones del período del 2008 al 2020.

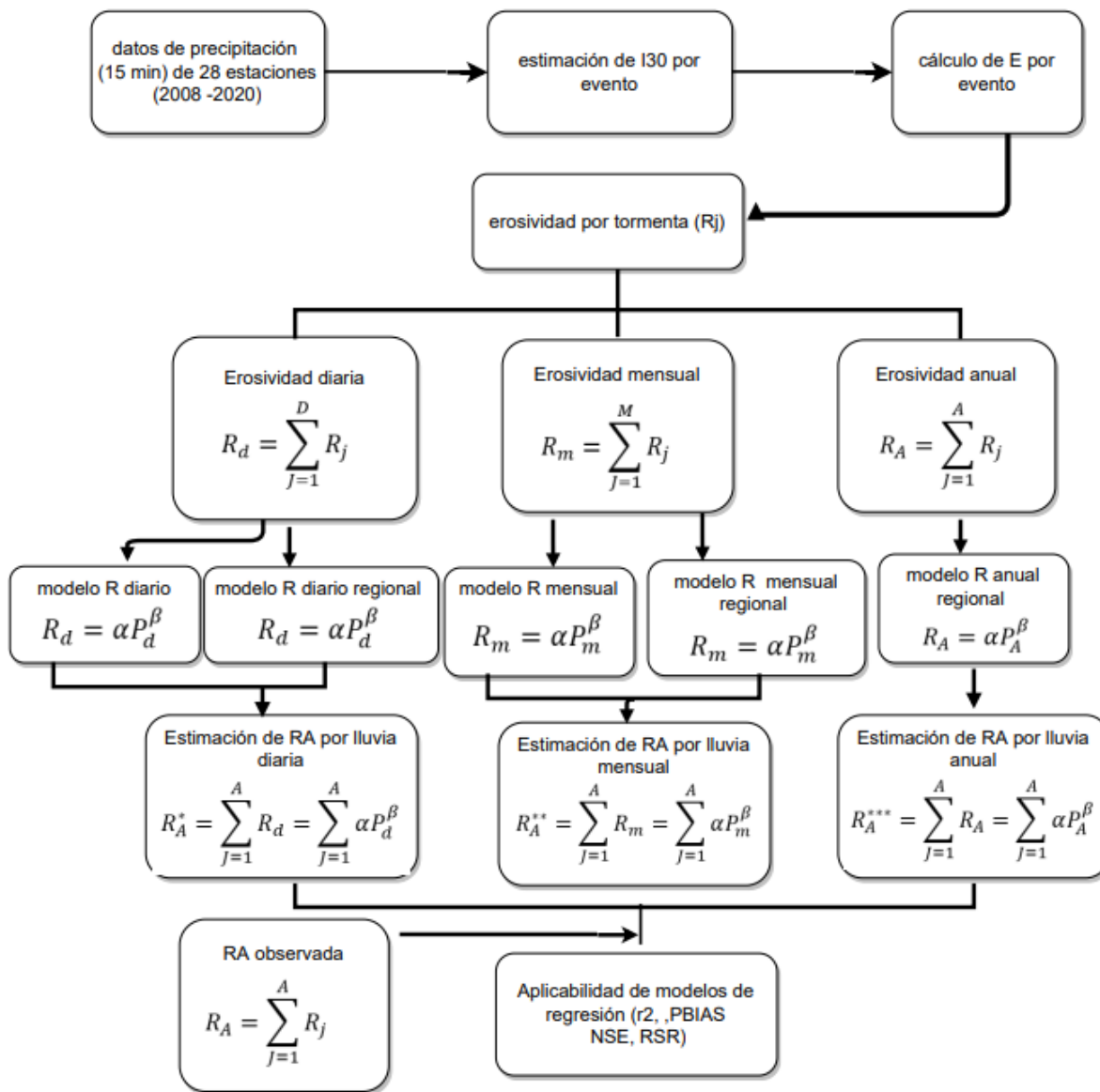
La selección del mejor modelo se realizó mediante un análisis de varianza de la erosividad anual observada y estimada. Los datos de erosividad anual se transformaron mediante la aplicación de logaritmo natural. Se evaluó la normalidad mediante el test de Lilliefors y la homocedasticidad con el test de Fligner-Killeen con un nivel de confianza del 95 % y el análisis post-Hoc por medio de la prueba de Tukey para determinar los modelos que no presentan diferencia significativa respecto a los valores de erosividad anual observada.

Tabla 2. Calificaciones de rendimiento general según valores de estadísticos RSR, NSE y PBIAS

Clasificación de rendimiento	RSR	NSE	PBIAS
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 15$
Bueno	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 30$
Satisfactorio	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$\pm 30 \leq PBIAS \leq \pm 55$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 55$

Fuente: Moriasi et al. (1983).

Figura 2. Proceso metodológico para la determinación de modelos de erosividad a escala



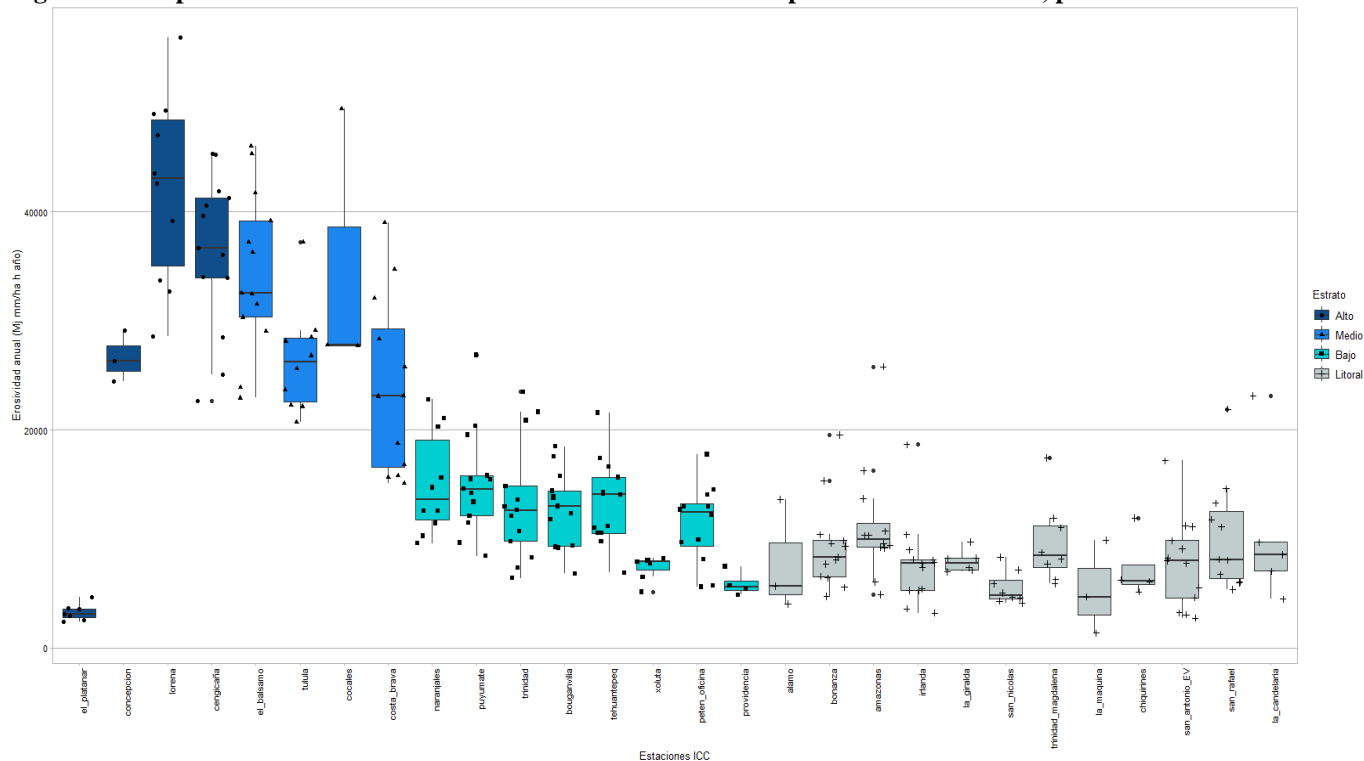
Fuente: Adaptado de Lee & Lin (2015).

Resultados

En la figura 3 se esquematiza el comportamiento de la erosividad anual observada ($Mj \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para el período del 2008 al 2020 de las 28 estaciones

evaluadas en este estudio. Las estaciones fueron agrupadas según los estratos altitudinales (alto, medio, bajo litoral) del pacífico de Guatemala.

Figura 3. Comportamiento de la erosividad anual en la vertiente del pacífico de Guatemala, período del 2008 al 2020



En la figura 4 se presentan los análisis de dispersión entre la precipitación y la erosividad diaria para la estación Lorena y para el conjunto de estaciones. En la figura 5 se esquematizan los análisis de dispersión entre la precipitación y erosividad mensual para la estación Cengicaña y para el conjunto de estaciones, y en la figura 6 se representa la relación entre la

precipitación y erosividad anual del conjunto de estaciones.

Los modelos de erosividad y los resultados de los estadísticos r^2 , PBIAS, RSR y NSE producto de la comparación de la erosividad anual observada y estimada se presentan en las tablas 3, 4 y 5

Figura 4: Análisis de dispersión entre la lluvia y la erosividad. Lluvia y erosividad diaria de la estación Lorena (izquierda), lluvia y erosividad diaria del conjunto de estaciones (derecha).

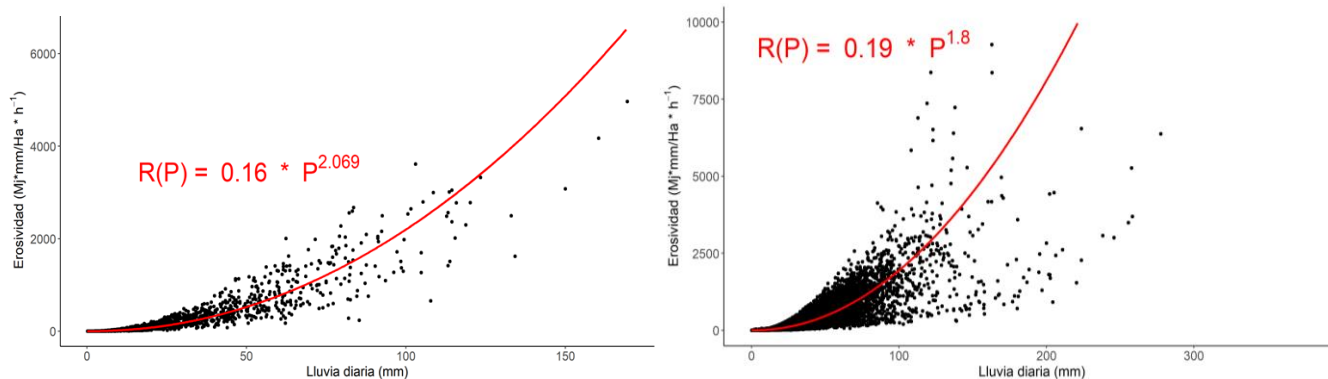


Figura 5. Análisis de dispersión entre la lluvia y la erosividad. Lluvia y erosividad mensual para la estación Cengicaña (izquierda), lluvia y erosividad mensual del conjunto de estaciones (derecha).

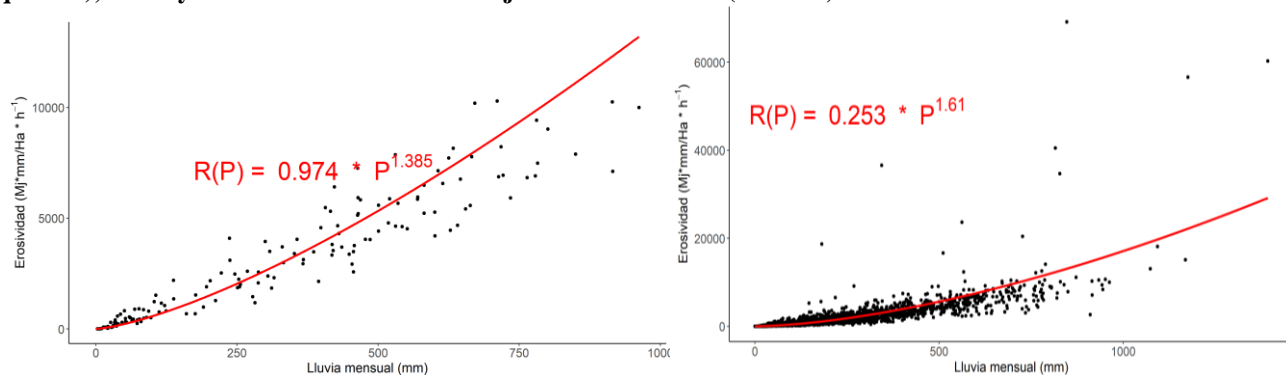


Figura 6. Análisis de dispersión entre la lluvia y la erosividad anual del conjunto de estaciones.

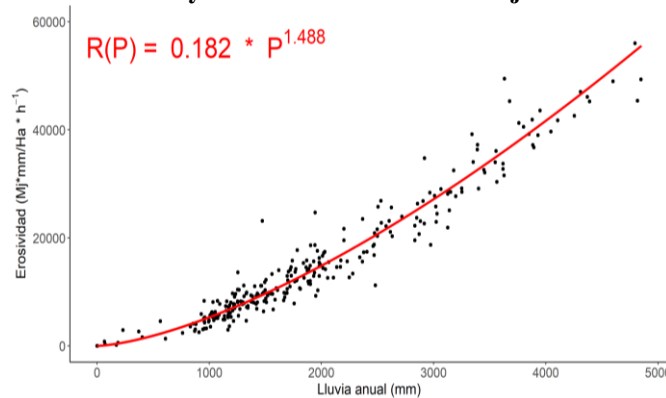


Tabla 3. Modelos y resultados de los estadísticos R², PBIAS, RSR y NSE generados de la comparación de la erosividad anual observada y estimada mediante datos de precipitación por estación

No.	Estación	R ²	PBIAS	RSR	NSE	modelo
1	Alamo	0.99	-36.70	0.64	0.39	R(P) = 0.14P ²
2	Amazonas	0.89	-4.00	0.67	0.51	R(P) = 0.15P ²
3	Bonanza	0.86	-2.00	1.07	-0.24	R(P) = 0.15P ²
4	Bouganvilia	0.51	-13.30	1.13	-0.38	R(P) = 0.15P ²
5	Cengicana	0.74	-22.10	1.25	-0.69	R(P) = 0.16 P ²
6	Chiquirines	0.98	-14.00	0.41	0.77	R(P) = 0.14P ²
7	Cocales	0.98	-6.50	0.26	0.90	R(P) = 0.15P ^{2.1}
8	Concepción	0.71	-10.30	1.36	-1.76	R(P) = 0.17P ²
9	Costa Brava	0.75	-18.40	0.81	0.29	R(P) = 0.16P ²
10	El Bálsamo	0.61	-22.20	1.26	-0.72	R(P) = 0.16P ²
11	El platanar	0.63	-13.00	0.84	0.18	R(P) = 0.13P ²

Tabla 3. (Continuación)

No.	Estación	R ²	PBIAS	RSR	NSE	modelo
12	Irlanda	0.89	-8.80	0.61	0.60	R(P) = 0.14P ²
13	La Candelaria	0.93	-6.00	0.34	0.85	R(P) = 0.18P ²
14	La Giralda	0.01	-14.00	2.55	-6.81	R(P) = 0.14P ²
15	La Máquina	0.99	-13.00	0.25	0.90	R(P) = 0.14P ²
16	Lorena	0.89	-24.90	1.26	-0.76	R(P) = 0.16P ²
17	Naranjales	0.72	-25.60	0.96	-0.03	R(P) = 0.15P ²
18	Peten Oficina	0.34	-23.30	1.21	-0.59	R(P) = 0.15P ²
19	Providencia	0.31	-26.30	1.55	-2.19	R(P) = 0.13P ²
20	Puyumate	0.60	-24.60	0.98	-0.03	R(P) = 0.15P ²
21	San Antonio EV	0.58	20.40	1.36	-1.00	R(P) = 0.14P ²
22	San Nicolás	0.24	-32.50	1.44	-1.37	R(P) = 0.13P ²
23	San Rafael	0.82	6.50	1.00	-0.11	R(P) = 0.16 P ²
24	Tehuantepeq	0.70	-18.00	0.86	0.20	R(P) = 0.15P ²
25	Trinidad	0.58	-17.90	0.77	0.37	R(P) = 0.15P ²
26	Trinidad Magdalena	0.89	-19.00	0.58	0.62	R(P) = 0.16P ²
27	Tulula	0.88	-29.60	1.66	-2.07	R(P) = 0.15P ²
28	Xolula	0.69	-29.20	1.98	-3.58	R(P) = 0.14P ²

Tabla 4. Modelos y resultados de los estadísticos R², PBIAS, RSR y NSE generados de la comparación de la erosividad anual observada y estimada mediante datos de precipitación mensual por estación

No.	Estación	R ²	PBIAS	RSR	NSE	modelo
1	Alamo	1.00	-18.9	0.61	0.43	R(P) = 0.2P ^{1.7}
2	Amazonas	0.96	13.00	0.50	0.73	R(P) = 0.23P ^{1.6}
3	Bonanza	0.84	13.40	1.03	-0.15	R(P) = 0.19P ^{1.7}
4	Bouganvilia	0.55	14.70	1.20	-0.56	R(P) = 0.22P ^{1.6}
5	Cengicana	0.80	8.00	0.61	0.59	R(P) = 0.97P ^{1.4}
6	Chiquirines	0.96	-7.30	0.29	0.89	R(P) = 0.28P ^{1.5}
7	Cocales	0.98	54.80	1.57	-2.68	R(P) = 0.36P ^{1.6}
8	Concepción	0.90	57.60	6.82	-68.83	R(P) = 0.24P ^{1.6}
9	Costa Brava	0.82	11.20	0.55	0.67	R(P) = 0.34P ^{1.6}
10	El Bálsamo	0.63	9.80	0.79	0.32	R(P) = 0.64P ^{1.5}
11	El platanar	0.77	13.70	0.99	-0.15	R(P) = 0.16P ^{1.6}
12	Irlanda	0.73	11.60	0.65	0.54	R(P) = 0.2P ^{1.6}
13	La Candelaria	0.75	-11.10	0.63	0.50	R(P) = 0.22P ^{1.6}

Tabla 4. (Continuación)

No.	Estación	R ²	PBIAS	RSR	NSE	modelo
14	La Giralda	0.55	9.40	1.10	-0.44	R(P) = 0.19P ^{1.7}
15	La Máquina	0.98	-14.90	0.39	0.78	R(P) = 0.25P ^{1.6}
16	Lorena	0.93	10.10	0.57	0.64	R(P) = 0.63P ^{1.5}
17	Naranjales	0.83	10.40	0.51	0.71	R(P) = 0.37P ^{1.5}
18	Peten Oficina	0.40	4.40	0.91	0.10	R(P) = 0.31P ^{1.6}
19	Providencia	0.67	10.50	0.76	0.23	R(P) = 0.19P ^{1.6}
20	Puyumate	0.62	13.30	0.73	0.42	R(P) = 0.29P ^{1.6}
21	San Antonio EV	0.57	9.90	0.84	0.24	R(P) = 0.20 P ^{1.6}
22	San Nicolás	0.24	8.30	0.92	0.02	R(P) = 0.16P ^{1.7}
23	San Rafael	0.87	16.20	0.82	0.25	R(P) = 0.30P ^{1.6}
24	Tehuantepec	0.72	17.00	0.88	0.16	R(P) = 0.24P ^{1.6}
25	Trinidad	0.61	12.20	0.67	0.51	R(P) = 0.24P ^{1.6}
26	Trinidad Magdalena	0.94	7.50	0.30	0.90	R(P) = 0.30P ^{1.6}
27	Tulula	0.82	13.50	0.93	0.05	R(P) = 0.32P ^{1.6}
28	Xoluta	0.42	9.00	1.14	-0.50	R(P) = 0.24 P ^{1.6}

Tabla 5. Modelos y resultados de los estadísticos R², PBIAS, RSR y NSE generados de la comparación de la erosividad anual observada y estimada mediante datos de lluvia anual del conjunto de estaciones del ICC

No.	Estación	R ²	PBIAS	NSE	RSR	Modelo
1	Modelo regional con datos de precipitación diaria	0.87	-53.10	0.09	0.95	R(P) = 0.19*P ^{1.8}
2	Modelo regional con datos de precipitación mensual	0.93	12.90	0.87	0.36	R(P) = 0.25*P ^{1.6}
3	Modelo regional con datos de precipitación anual	0.94	-0.20	0.94	0.24	R(P) = 0.18*P ^{1.5}

En la figura 7 se presenta la comparación de la erosividad anual observada y estimada por medio de los diferentes modelos desarrollados a través de un gráfico de boxplot.

En la tabla 6 se muestran los resultados de la aplicación de la prueba Lilliefors con un nivel de confianza del 95 % para evaluar la normalidad de los registros y en la figura 8 se presentan los gráficos de normalidad.

Figura 7. Comparación de la erosividad anual observada y estimada por los modelos

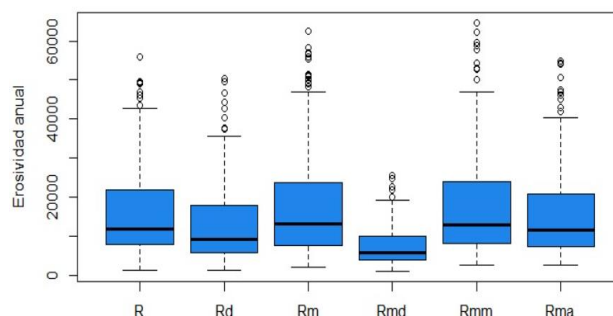
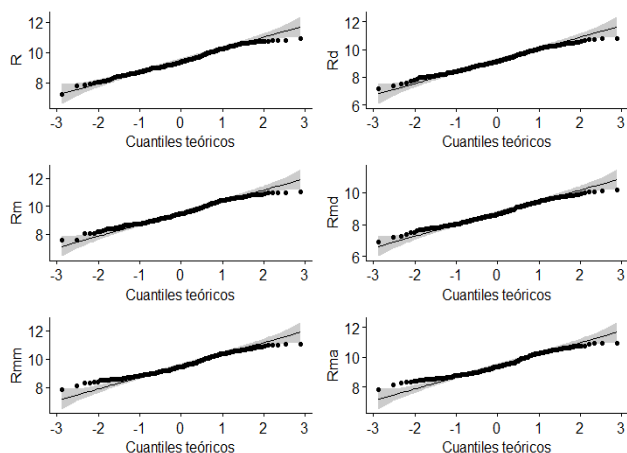


Tabla 6. Normalidad de datos transformados de erosividad anual

Modelo	p-valor
Erosividad observada (R)	0.11
Erosividad diaria por estación (Rd)	0.22
Erosividad mensual por estación (Rm)	0.05
Erosividad diaria regional (Rmd)	0.12
Erosividad mensual regional (Rmm)	0.05
Erosividad anual regional (Rma)	0.05

Figura 8. Gráficos de Normalidad de los registros de erosividad anual transformados



En la tabla 7 se presentan los resultados del análisis de homogeneidad de varianza por medio de la prueba Fligner.

En la tabla 8 se detallan los resultados del análisis de varianza para la erosividad anual con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 7. Resultados del análisis de homogeneidad de varianza

Chi ²	Gl	p-valor
8.6504	5	0.1238

Tabla 8: Análisis de varianza de erosividad anual

Parámetro	gl	S.C	CM	F	p-valor
Modelo	5	128	25.592	52.01	<2*10 ⁻¹⁶
Residuos	1524	749.8	0.492		

La tabla 9 resume los resultados de la aplicación de la prueba de Tukey para determinar el modelo que estadísticamente genera valores iguales a la erosividad anual observada.

Tabla 9. Comparación de media de Erosividad anual de Tukey

Comparación	Diferencia	Li	Ls	p-valor
Rd-R	-0.22	-0.39	-0.04	0.01
Rm-R	0.10	-0.08	0.28	0.59
Rma-R	0.02	-0.16	0.19	1.00
Rmd-R	-0.71	-0.89	-0.53	0.00
Rmm-R	0.13	-0.05	0.31	0.29
Rm-Rd	0.32	0.14	0.49	0.00
Rma-Rd	0.23	0.05	0.41	0.00
Rmd-Rd	-0.50	-0.67	-0.32	0.00
Rmm-Rd	0.35	0.17	0.52	0.00
Rma-Rm	-0.08	-0.26	0.09	0.76
Rmd-Rm	-0.81	-0.99	-0.63	0.00
Rmm-Rm	0.03	-0.15	0.21	1.00
Rmd-Rma	-0.73	-0.90	-0.55	0.00
Rmm-Rma	0.11	-0.06	0.29	0.45
Rmm-Rmd	0.84	0.66	1.02	0.00

Discusión de resultados

Comparación entre la lluvia y erosividad

Para el período de tiempo considerado en la investigación, la precipitación media anual en el pacífico de Guatemala osciló dentro de 805.2 a 4,097.9 mm, los días erosivos entre 22 a 95 y la erosividad media anual de 3,263.30 a 42,166.4 Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (ver tabla 1).

La precipitación mínima registrada fue de 610.8 mm y la máxima de 4,848.8 mm, para el caso de la erosividad, el mínimo y máximo, es de 1,347.90 y 55,991.10 Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, dichos valores fueron observados en los años 2019 y 2020 en las estaciones La Máquina y Lorena, ubicadas en los departamentos de Retalhuleu y Suchitepéquez, respectivamente.

Conforme a los valores promedios anuales de erosividad de las 28 estaciones analizadas, el 3.6 % se clasifica como baja, 17.9 % moderada, 21.4 % alta, 25 % muy alta, 7.1 % severa y el restante 25 %

como muy severa, ello utilizando la clasificación propuesta por Rivera & Gómez (1991). El 78.5 % de las estaciones se clasifica de alta a muy severa erosividad anual.

Los porcentajes de lluvias erosivas respecto al total de las lluvias oscilaron dentro de 21.5 al 62 %, siendo un 33 % lo más frecuente en el pacífico, es decir, aproximadamente un tercio de los días con lluvias tienen potencial erosivo. Valores equivalentes se han encontrado en la Pampa ondulada de Argentina, en donde el 24 % de las lluvias tienen características erosivas (Behrends Kraemer et al., 2018).

La erosividad y los días erosivos presentaron el mismo comportamiento en función de la altitud, pero no se da una relación lineal con esta variable. De 0 a 350 msnm, la erosividad y los días erosivos incrementan a medida que aumenta la elevación, posteriormente, de 350 msnm en adelante, los valores disminuyen (figura 3). Similar comportamiento se ha observado entre la precipitación y la elevación, en donde, por efectos de la orografía de las zonas montañosas, la precipitación es muy variable (Barros & Lettenmaier, 1994).

Además de afectar directamente a través del ascenso forzado del viento cargado de humedad por las laderas de barlovento, también la orografía lo hace indirectamente, al cambiar el flujo del aire provocando ondas de gravedad atmosféricas internas (Robichaud & Austin, 1988), o mediante bloqueos y variaciones en la estabilidad atmosférica (Rotunno & Ferreti, 2001). Todo lo anterior genera que tanto la precipitación, erosividad y los días erosivos tengan una variación por estratos según la altitud del pacífico de Guatemala.

En las figuras 4, 5 y 6 se puede observar que, para las diferentes escalas de tiempo analizadas, existe una relación no lineal entre la lluvia y la erosividad, la cual, es estadísticamente significativa según el p-valor de los modelos con un nivel de confianza del 95%. La varianza explicada (r^2) de los modelos de erosividad diaria de las estaciones oscilaron entre 0.94 a 0.98, para los modelos de erosividad mensual de 0.92 a 0.98 y para los modelos regionales diario, mensual y anual fueron 0.92, 0.96 y 0.95, respectivamente.

Resultados similares se han encontrado en la investigación de Xie et al. (2016), en donde se logró determinar que existe un mayor ajuste por medio de un modelo de regresión potencial respecto a un lineal. Los valores de r^2 oscilaron dentro de 0.78 a 0.91 para los modelos potenciales y entre 0.69 a 0.79 para los modelos lineales.

Aplicabilidad de los modelos de erosividad

Se puede observar en la tabla 3, cuando se estima la erosividad anual por medio de datos de precipitación diaria por estación, los valores de r^2 varían de 0.01 a 1, PBIAS de -36.7 a 20.4 %, RSR de 0.25 a 2.55 y NSE de -6.81 a 0.9. Para el caso de la erosividad anual estimada por medio de precipitación mensual por cada estación (tabla 4), los valores de r^2 varían de 0.24 a 1, PBIAS de -18.9 a 57.6 %, el RSR de 0.29 a 6.82 y NSE de -68.83 a 0.9.

Del mismo modo, para los modelos regionales utilizando lluvia diaria el r^2 fue de 0.87, PBIAS de -53.1, RSR de 0.95 y NSE de 0.09. Cuando se emplearon los datos de lluvia mensual se obtuvo un r^2 de 0.93, PBIAS de 12.9, RSR de 0.36, NSE de 0.87 y al aplicar lluvia anual el r^2 fue de 0.94, PBIAS de 0.2, RSR de 0.24 y NSE de 0.94 (ver tabla 5).

Al realizar el análisis comparativo de la erosividad observada versus la erosividad estimada por cada una de las estaciones para las métricas RSR y NSE, el 71.4 % y 75 % se consideran “insatisfactorias”, y el 42.9 % como “muy buenas” por medio del PBIAS. Mientras que, el 57.1 % y 60.7 % de los modelos mensuales por estación, se calificaron como “insatisfactorias” según las métricas de RSR y NSE, y el 78.6 % como “muy buenas” según el PBIAS. Al comparar el rendimiento de las métricas de evaluación, se incrementa en un 35.7 % las estaciones con los que se obtienen mejores resultados, cuando se estima la erosividad anual por estación con registros mensuales de lluvia.

En cuanto a los modelos regionales, los estadísticos RSR y NSE reflejan ser “insatisfactorios” y “satisfactorias” según PBIAS, cuando se manejaron datos de precipitación diaria de todas las estaciones y para los construidos con precipitación mensual y anual, todos los estadísticos demuestran ser “muy buenos”. De acuerdo con lo anterior, se da una mejora al emplear modelos regionales construidos por medio de precipitación mensual y anual; al

comparar los valores de sus estadísticos de estos últimos dos, existe una mejora en la calidad del modelo regional construido por medio de precipitación anual.

Al observar los parámetros α y β de los modelos por estación (tabla 3) se determinó que estos tienen una gran similitud en cuanto a su magnitud, por tal razón, se construyó el modelo regional de erosividad con registros de lluvia diaria. También, se compararon las métricas de la tabla 3 y 4, y se determinó que al acumular la lluvia se reduce la variabilidad y sesgo de los modelos (RSR y PBIAS), se obtienen varianzas explicadas más altas (cercanos a 1) y los valores de NSE incrementaron, clasificando a los modelos con un alto grado de satisfacción. Lo anterior, motivo a construir los modelos regionales de erosividad con registros de lluvia mensual y anual.

Al evaluar las métricas de las ecuaciones de los modelos regionales (tabla 5) se determinó que las construidas con datos de precipitación mensual y anual brindan los mejores resultados con la mayor confiabilidad, con lo cual se confirma que la acumulación de la lluvia permite reducir la variabilidad y sesgo, aumenta la varianza explicada y se obtienen modelos con un mayor grado de satisfacción.

Los registros de erosividad anual observada y estimada para cada uno de los modelos se tuvieron que transformar mediante logaritmo natural para normalizarlos. En la tabla 6 y figura 8 se detallan los resultados de la transformación y normalización, al evaluar la homocedasticidad, se aceptó la hipótesis que la varianza de los grupos es igual (tabla 7), y el análisis de varianza determinó que al menos uno de los grupos tiene una media diferente al resto de los demás con un nivel de confianza del 95 % (tabla 8).

En la tabla 9 se muestran los resultados del análisis de medias de Tukey. Para esta investigación se buscó aceptar la hipótesis nula, la cual indica que no exista diferencia entre los valores de erosividad anual observada y estimada mediante el modelo. Los modelos que no presentaron diferencia significativa fueron: modelo de erosividad por estación con datos mensuales, modelo general de erosividad con datos mensuales y anuales; al compararse entre ellos, se obtienen resultados iguales con un nivel de confianza del 95 %. Sin embargo, desde la concepción de

Parsimonia, dada la simplicidad de los modelos, se recomiendan los modelos generales de erosividad a partir de lluvia mensual y anual.

Los modelos desarrollados son dinámicos, por lo que al ser actualizados y validar la información obtenida de ellos podrán ser de mucha utilidad en lugares con escasa o nula información pluviográfica. Mediante el uso prudente de los modelos, se podrán generar los registros de erosividad con datos de lluvia mensual y anual con las estaciones de INSIVUMEH desde 1970 y con información satelital desde 1981, esto permitirá construir tendencias a mediano y largo plazo de tan importante factor.

La importancia de estimar la erosividad radica en conocer el potencial erosivo de las lluvias sobre el suelo, como agente activo y desencadenante del proceso de erosión, el cual depende además de factores como la erodabilidad, pendiente, longitud del terreno, cobertura y prácticas de conservación según la ecuación de USLE. El estudio se limitó a dar alternativas para calcular el factor erosividad debido a la falta de información pluviográfica en Guatemala.

Conclusiones

Para el período analizado (2008-2020), la precipitación anual osciló de 610.80 a 4,848.80 mm, la erosividad de 1,347.90 a 55,991.10 Mj mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, los días erosivos entre 22 a 95.

Las lluvias erosivas en la región evaluada representan el 21.5 a 62 % del total. Según los valores medios anuales de erosividad, el 78.5 % de las estaciones se clasifican dentro de alta y severa. Se logró determinar que la erosividad varía en el tiempo y espacio según las características de la lluvia (intensidad, energía y duración).

En el pacífico de Guatemala, un tercio de los días con lluvia tienen características erosivas. La lluvia, la erosividad y los días erosivos varían según estratos altitudinales; efecto asociado fuertemente a la orografía de la vertiente.

Se concluye que el modelo potencial representa el comportamiento de la erosividad anual en la Vertiente del Pacífico de Guatemala en función de la lluvia, y al acumular la precipitación se reduce la variabilidad y sesgo de los modelos (RSR y PBIAS), las varianzas explicadas son más altas y los valores de NSE incrementan, clasificando con un mayor grado de satisfacción.

Los resultados demuestran que los modelos evaluados alcanzan un mayor rendimiento (según los estadísticos de BIAS, NSE, RSR y análisis de varianza con un nivel de confianza del 95 %) cuando se estima la erosividad anual a través de los modelos regionales con datos de lluvia anual ($R(P) = 0.18 * P^{1.5}$) y mensual ($R(P) = 0.25 * P^{1.6}$).

Los modelos generados podrán ser utilizados para cuantificar la erosividad mensual y anual en lugares en donde solo se cuenta con información pluviométrica con un alto grado de certidumbre, para diferenciar zonas de acuerdo con su potencial erosivo y planificar usos correctos según el riesgo de erosión. Al ser modelos dinámicos, es necesario actualizarlos y validar su información para mejorar continuamente la calidad de sus resultados.

El estudio se limitó a generar propuestas para estimar el factor de erosividad, para calcular la cantidad de suelo que se pierde en una parcela se deberá de contar con los restantes factores de la ecuación de USLE. Además, para construir los modelos, solo se manejaron estaciones concentradas en su gran mayoría en el centro del pacífico y ubicadas en altitudes de 0 a 350 msnm, por lo que este parámetro debe considerarse al utilizar estos modelos.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer al Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) por autorizar el uso de los registros de precipitación utilizados para la realización del presente estudio.

A la facultad de Agronomía, facultad de Ingeniería y a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala por sus aportes y observaciones.

Contribución de autores

Coordinación, elaboración y revisión del documento, todos los autores.

Diseño de investigación: F. Martínez.

Recolección, limpieza y análisis de datos: todos los autores.

Referencias

- Barros, A. P., & Lettenmaier, D. P. (1994). Dynamic modeling of orographically induced precipitation. *Reviews of Geophysics*, 32(3), 265–284. <https://doi.org/10.1029/94RG00625>
- Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., Ibañez, L., Carfagno, P., & Vangeli, S. (2018). Análisis de la erosividad de las lluvias para el partido de San Pedro (Bs. As.). *Ciencia Del Suelo*, 36(1), 124–137. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672018000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Bonilla, C. A., & Vidal, K. L. (2011). Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1–2), 126–133. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.09.022>
- Bravo de León, M. E. (1988). *Estudio preliminar de la erosividad de las lluvias en la república de Guatemala*. [Tesis Licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_1066.pdf
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo*. (1st ed.). UniRio. http://www.todoagro.com.ar/documentos/2013/Erosion_Hidrica.pdf
- Del Cid Asturias, R. G. (1986). *Determinación del índice de erosividad de las lluvias para las estaciones pluviográficas de la zona noroccidental de Guatemala*. [Tesis licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_0844.pdf
- Fuentes Montepeque, J. C. (2021). Régimen pluviométrico asociado a series de tiempo máximas en la subcuenca del río Villalobos. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(1), 11–16. <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/articloe/view/1092/751>

- Chagas, C. & Kraemer, F. (2018). *Escurrimiento, erosión del suelo y contaminación de los recursos hídricos superficiales por sedimentos asociados a la actividad agropecuaria extensiva: algunos elementos para su análisis* (1st ed.). Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires .
https://www.agro.uba.ar/sites/default/files/chagas_celso_ignacio.pdf
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2021, March 21). *Sistema de información meteorológica (SIHM) del ICC*.
<https://redmet.icc.org.gt/login>
- Jordán, A., & Bellinfante, N. (2000). *Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz)*. 83–92.
<https://www.secs.com.es/data/Revista%20edaf%20Volumen%207-3.%20Septiembre%202000.%20pa%2083-92.pdf>
- Lee, J. H., & Heo, J. H. (2011). Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409(1–2), 30–48.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.031>
- Lee, M. H., & Lin, H. H. (2015). Evaluation of annual rainfall erosivity index based on daily, monthly, and annual precipitation data of rainfall station network in Southern Taiwan. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6).
<https://doi.org/10.1155/2015/214708>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimod_elevel.pdf
- Ongley, E. D. (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] Riego y Drenaje-55)*.
<https://www.fao.org/3/W2598S/w2598s00.htm>
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4), 287–306.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Richardson, C. W., Foster, G. R., & Wright, D. A. (1983). Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 26(1), 153–160. <https://doi.org/10.13031/2013.33893>
- Rivera, P. H., & Gómez, A. A. (1991). Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana (Caldas., Quindío, Risaralda). *Cenicafe*, 42(2), 37–52.
https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/revista_cenicafe/revista_cenicafe_arc042_02_37-52
- Robichaud, A. J., & Austin, G. L. (1988). On the modelling of warm orographic rain by the seeder-feeder mechanism. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(482), 967–988.
<https://doi.org/10.1002/QJ.49711448207>
- Roldán Cordón, J. M. (1988). *Determinación del índice de erosividad de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en la región central de la república de Guatemala*. [Tesis licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala].
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_1039.pdf
- Rotunno, R. & Ferreti, R. (2001). Mechanisms of Intense Alpine Rainfall. *Journal of the Atmospheric Science*, 58(13), 1732-1749.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1732:MOIAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1732:MOIAR>2.0.CO;2)
- Salako, F. K., Ghuman, B. S., & Lal, R. (1995). Rainfall erosivity in south-central Nigeria. *Soil Technology*, 7(4), 279–290.
[https://doi.org/10.1016/0933-3630\(94\)00013-T](https://doi.org/10.1016/0933-3630(94)00013-T)
- Santos Pérez, A. L., & Orrego León, E. A. (2016). Riesgo potencial a erosión hídrica para la planificación del manejo y conservación de suelos de la agroindustria azucarera Guatemalteca. *Revista Tikalia*, 34(1), 29–45.
<https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2017/07/TIKALIA-1-2016-31-47.pdf>

- Vantas, K., Sidiropoulos, E., & Evangelides, C. (2020). Estimating Rainfall Erosivity from Daily Precipitation Using Generalized Additive Models. *Environmental Sciences Proceedings*, 2(1), 21.
<https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002021>
- Wischmeier, W. H. (1959). A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246–249.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1959.03615995002300030027X>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *TRAGU*, 39(2), 285–291.
<https://doi.org/10.1029/TR039I002P00285>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Science and Education Administration, U.S. Dept. of Agriculture.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/pdf>
- Xie, Y., Yin, S., Liu, B. yuan, Nearing, M. A., & Zhao, Y. (2016). Models for estimating daily rainfall erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 535, 547–558.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.020>