

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LA REGIÓN CAFETERA DE QUINDÍO, COLOMBIA

Luz Adriana Lince Salazar*; Andrés Felipe Castro Quintero*

LINCE S. L. A.; CASTRO Q.; A. F. Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Quindío, Colombia. *Revista Cenicafé* 66(1): 25-31. 2015

La erosividad, también conocida como agresividad climática, es la causa de las mayores pérdidas naturales de suelo cultivable en los Andes colombianos. Con el objetivo de determinar el nivel de agresividad climática y la distribución de las lluvias en la región cafetera del departamento del Quindío (Colombia), se realizó un estudio con los datos de precipitación diaria, de los registros climáticos de 19 estaciones de la Red Climática de la Federación de Cafeteros, en el periodo de 1997 a 2011. Se estimó el índice de erosividad ($R-EI_{30}$), mediante un modelo validado para la región cafetera central de Colombia, el cual emplea el índice modificado de Fournier (*IMF*), y se calculó la variabilidad temporal de la distribución de las lluvias mediante el índice de concentración de las precipitaciones (*ICP*). Los resultados indican que los valores promedio del *IMF* fueron muy altos (>160), los de *R* entre alto y muy alto (7.500-15.000 MJ.mm.ha⁻¹) y los *ICP* fueron mayores al 13%, que se clasifican como uniformes y moderadamente estacionales. Tanto los valores de intensidad como de distribución indican que los suelos de la zona se ven afectados por una fuerte agresividad climática, con la lluvia como agente erosivo en todos los meses del año.

Palabras clave: Índice de Fournier, Índice modificado de Fournier, índice de concentración de las precipitaciones, EI_{30} , precipitación.

RAINFALL EROSIVITY IN THE COFFEE REGION OF QUINDÍO, COLOMBIA

Rainfall erosivity – also known as climatic aggressiveness – is the main cause of the greatest natural losses of arable soil in the Colombian Andes. In order to determine the climatic aggressiveness level and the rainfall distribution in the coffee region of Quindío, Colombia, a study using data of daily precipitation of climate records in 19 stations at Cenicafé – FNC, from 1997 to 2011 was carried out. The rate of annual historical rainfall erosivity ($R - EI_{30}$) was estimated using a validated model for the Central Coffee Region of Colombia, which uses the modified Fournier index (*MFI*). The temporary variability of rainfall distribution was also calculated for every year through the index of precipitation concentration (IPC). The mean values of MFI for the region (> 160), the R values were between high to very high (7.500 – 15.000 MJ.mm.ha⁻¹), and the IPC values were lower than 13%, which are classified as moderately seasonal and uniform. Both erosivity and distribution values indicate that soils in the area are affected by strong climatic aggressivity with the rain as an erosive agent during all the months of the year.

Keywords: Fournier index, modified Fournier index, precipitation concentration index, EI_{30} , precipitation.

* Investigador Científico I y Asistente de Investigación, respectivamente, Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

La erosividad de la lluvia, también conocida como agresividad climática, es uno de los factores detonantes de la erosión de los suelos, la cual según Mabit y Bernard (13) es la forma más generalizada y seria de degradación.

Los factores importantes que se tienen en cuenta en la evaluación de la erosividad son la intensidad y la distribución (5). El primero está determinado por la energía cinética que alcanza la gota de lluvia en la caída; dicho fenómeno fue demostrado por Wischmeier (26) e incluido en el índice de erosividad I_{30} que se relaciona con el factor de erosividad de la lluvia (R), el cual hace referencia a la máxima intensidad que presenta un evento lluvioso en un periodo de 30 min. y su energía cinética.

Los índices más destacados para medir la erosividad de la lluvia y su distribución son el factor R propuesto por Wischmeier y Smith (26) implementado en Los Estados Unidos, el índice de Fournier (IF) propuesto por Fournier (8) desarrollado para la costa oeste de África, el índice modificado de Fournier (IMF) planteado por Arnoldus (3), y entre las correlaciones destacadas se tienen la de Renard y Freimund (18), que sugieren el uso entre el IFM y el factor R para regiones con datos deficientes. Otro índice importante es el de concentración de las precipitaciones (ICP) desarrollado por De Luis *et al.* (7) y Oliver (16), que tiene como finalidad cuantificar la heterogeneidad de la precipitación en términos de series de lluvias mensuales.

Los estudios de erosividad de la lluvia y su distribución se han desarrollado para África (13, 23), Estados Unidos (24), Colombia (10), Perú (21), Italia (6), España (1), China (27), Corea (11), Chile (4) y

Brasil (14, 15). Para la región cafetera central de Colombia, Rivera (19) presentó un modelo de correlación entre el IMF y el I_{30} , para los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, dicho modelo fue aplicado por Ramírez *et al.* (17) para la región cafetera de Caldas. (22) realizaron un análisis similar para la región centro – sur del mismo departamento, en el cual calcularon la erosividad y la variación temporal de las lluvias, mediante los Índices de Fournier Anual (IFA), Modificado de Fournier (IMF) y Concentración de las Precipitaciones (ICP). En la revisión de antecedentes no se encontraron estudios enfocados a determinar la erosividad de la lluvia en la zona cafetera del departamento del Quindío, motivo por el cual se realizó un estudio cuyo objetivo fuera determinar la erosividad de la lluvia en la zona cafetera del departamento del Quindío.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio correspondió a la región cafetera del departamento del Quindío, ubicada entre los $04^{\circ} 04' 41'' - 04^{\circ} 43' 18''$ N y entre los $75^{\circ} 23' 41'' - 75^{\circ} 53' 56''$ W, en el flanco occidental de la cordillera Central de Colombia. Políticamente está dividido en 12 municipios, con potencial cafetero, perteneciente a los ecotopos 208A, 210A y 211A. La precipitación anual histórica va desde 944 mm hasta 4.173 mm, en un régimen bimodal, con picos en los meses de abril y octubre.

Se reunieron los datos de precipitación diaria de los registros climáticos de 19 estaciones climáticas de la Red Climática de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC, en el período de 1997 a 2011. Se trabajó con espacios temporales entre 15 y 11 años (Tabla 1), debido a que algunas estaciones presentaron registros incompletos.

Tabla 1. Localización de las estaciones climáticas de la Red Climática Cafetera – FNC y períodos empleados.

Estación	Municipio	Lat. (N)	Long. (W)	Elevación (m)	Años	
					Total	período
El Agrado	Montenegro	04°31'	75°48'	1.275	15	1997 – 2011
El Porvenir	Pijao	04°19'	75°47'	1.470	15	1997 – 2011
La Bella	Calarcá	04°30'	75°40'	1.449	15	1997 – 2011
La Ilusión	Circasia	04°35'	75°43'	1.442	15	1997 – 2011
La Miranda	La Tebaida	04°26'	75°51'	1.193	15	1997 – 2011
Maracay	Quimbaya	04°36'	75°44'	1.402	15	1997 – 2011
Sorrento	Montenegro	04°33'	75°49'	1.203	15	1997 – 2011
Vivero	Quimbaya	04°37'	75°46'	1.330	15	1997 – 2011
Tucumán	Armenia	04°32'	75°44'	1.250	14	1998 – 2011
La Argentina	La Tebaida	04°27'	75°47'	1.200	14	1998 – 2011
La Esperanza	Filandia	04°38'	75°41'	1.671	14	1997 – 2003, 2005 – 2011
La Pradera	Armenia	04°28'	75°43'	1.350	13	1997 – 1998, 2000 – 2009, 2011
La Alejandría	Génova	04°11'	75°47'	1.600	12	1997 – 2000, 2003 – 2007, 2009 – 2011
La Esperanza	Buenavista	04°22'	75°45'	1.428	12	1997 – 1998, 2000 – 2006, 2008 – 2011
La Julia	Montenegro	04°33'	75°45'	1.250	12	1997 – 1999, 2002 – 2003, 2005 – 2011
Mónaco	Córdoba	04°25'	75°42'	1.250	12	1997 – 2002, 2004 – 2005, 2008 – 2011
Paraguaicito	Buenavista	04°24'	75°44'	1.203	11	1998, 2000 – 2002, 2005 – 2011
Quebradanegra	Calarcá	04°27'	75°40'	1.500	11	1997 – 1998, 2000 – 2004, 2006, 2009 – 2011
El Jardín	Calarcá	04°28'	75°42'	1.300	11	1998, 2000 – 2002, 2005 – 2011

Para la estimación del $R - EI_{30}$, anual histórico, se empleó el modelo validado por Rivera (20) para las condiciones pluviométricas de la región cafetera central (Caldas, Quindío y Risaralda) mediante la Ecuación <1>, la cual tiene como variable independiente el IMF , que se calculó para cada año mediante la Ecuación <2> (19), y posteriormente se obtuvo el promedio histórico anual de cada estación climática. El valor promedio de IFM fue el empleado en la Ecuación <1>. Las clasificaciones del R (IE_{30}) y el IMF se presentan en las Tablas 2 y 3.

$$IE_{30} = \sum_1^{12} 38,4 (IMF) + 28,3 \quad <1>$$

Donde:

IE_{30} = Índice de erosividad

IMF = Índice modificado de Fournier

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_j} \quad <2>$$

Donde

IMF_j = Índice modificado de Fournier en el año j

P_{ij} = Precipitación del mes i , en el año j

P_j = Precipitación total del año j

Los métodos de autocorrelación espacial tenidos en cuenta para la espacialización del factor R fueron el kriging ordinario y el peso inverso de la distancia (IDW), empleando los registros de erosividad. Se utilizó el software ArcGis extensión geostatistical analyst.

El cálculo del ICP interanual se realizó mediante la Ecuación <3>, propuesta por Oliver (16), y su clasificación se presenta en la Tabla 4.

Tabla 2. Clasificación de la erosividad de las lluvias (20).

Clase	Erosividad R (MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación
1	<1.000	Natural
2	1.000 – 5.000	Muy baja
3	2.500 – 5.000	Baja
4	5.000 – 7.500	Moderada
5	7.500 – 10.000	Alta
6	10.000 – 15.000	Muy alta
7	15.000 – 20.000	Severa
8	> 20.000	Extremadamente severa

Tabla 3. Clasificación para el Índice de concentración de las precipitaciones- *ICP* (17) y el Índice Modificado de Fournier-*IFM* (2).

Clase	<i>IFM</i>		<i>ICP</i>	
	Rango	Clasificación	Rango	Clasificación
1	<60	Muy baja	0,8 – 10	Uniforme
2	60 – 90	Baja	11 – 15	Moderadamente estacional
3	90 – 120	Moderada	16 – 20	Estacional
4	120 – 160	Alta	21 – 50	Altamente estacional
5	>160	Muy alta	51 – 100	Irregular

$$ICP = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_{ij})^2} <3>$$

Donde:

ICP = Índice de concentración de las precipitaciones

P_{ij} = Precipitación del mes *i*, en el año *j*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice Modificado de Fournier (*IMF*). Los valores promedio del *IMF* estuvieron entre 218 y 314, que según la clasificación de Apaydin *et al.* (2) es un valor muy alto (>160).

De la totalidad de los datos individuales anuales, solo la estación climática La Alejandría (Génova), en el año 2009, presentó un valor en la categoría alto (143); las demás localidades

presentaron valores correspondientes a la clasificación muy alto (Tabla 4). Estos valores indican que los suelos pueden verse afectados por una fuerte agresividad climática con la lluvia como agente erosivo, lo cual concuerda con lo reportado por Rivera (19), Hoyos *et al.* (10), Ramírez *et al.* (17) y (22), para los Andes colombianos.

Erosividad (*R*). Se encontraron valores entre 8.765 y 12.406 MJ.mm.ha⁻¹, que según la clasificación de Rivera y Gómez (20), corresponden a un nivel de erosividad entre alto y muy alto.

De las 19 estaciones evaluadas, 14 presentaron valores de *R* muy alto, lo que marcó una clasificación regional. En cinco estaciones climáticas se registraron valores de *R* altos, de las cuales cuatro se encuentran

Tabla 4. Valores promedio del Índice Modificado de Fournier, Erosividad (R), *ICP* y sus clasificaciones.

Estación	Municipio	<i>IFM</i>		Erosividad		<i>ICP</i>	
		Promedio	Clasificación	(MJ.mm.ha ⁻¹)	Clasificación	(%)	Clasificación
El Agrado	Montenegro	235,50	Muy alto	9.382,95	Alta	10	Uniforme
El Jardín	Calarcá	301,86	Muy alto	11.930,86	Muy alta	11	M. E.
El Porvenir	Pijao	265,14	Muy alto	10.521,13	Muy alta	12	M. E.
La Alejandría	Génova	218,07	Muy alto	8.765,32	Alta	12	M. E.
La Argentina	La Tebaida	259,66	Muy alto	10.310,41	Muy alta	11	M. E.
La Bella	Calarcá	261,27	Muy alto	10.372,36	Muy alta	12	M. E.
La Esperanza	Filandia	314,23	Muy alto	12.406,08	Muy alta	11	M. E.
La Esperanza	Buenavista	291,49	Muy alto	11.532,81	Muy alta	11	M. E.
La Ilusión	Circasia	284,82	Muy alto	11.276,87	Muy alta	11	M. E.
La Julia	Montenegro	271,35	Muy alto	10.804,96	Muy alta	11	M. E.
La Miranda	La Tebaida	234,97	Muy alto	9.362,34	Alta	11	M. E.
La Pradera	Armenia	251,62	Muy alto	10.107,63	Muy alta	11	M. E.
Maracay	Quimbaya	270,54	Muy alto	10.728,41	Muy alta	10	Uniforme
Mónaco	Córdoba	282,73	Muy alto	11.196,40	Muy alta	11	M. E.
Paraguaicito	Buenavista	261,71	Muy alto	10.389,32	Muy alta	11	M. E.
Quebradanegra	Calarcá	287,14	Muy alto	11.365,76	Muy alta	12	M. E.
Sorrento	Montenegro	236,30	Muy alto	9.453,81	Alta	11	M. E.
Tucumán	Armenia	250,63	Muy alto	9.963,63	Alta	10	Uniforme
Vivero	Quimbaya	253,39	Muy alto	10.069,77	Muy alta	11	M. E.

M.E.: Moderadamente estacional.

en el flanco occidental, con influencia parcial en los municipios de Montenegro, La Tebaida y Génova, y la quinta estación corresponde a Tucumán, la cual no marca diferencia en la zona por estar cerca a 10.000 MJ.mm.ha⁻¹, valor a partir del cual se considera erosividad muy alta (Tabla 4). Los resultados encontrados son similares a los reportados por Ramírez *et al.*, (17) y (22) para el departamento de Caldas, el cual al igual que la zona de estudio se encuentra en la región cafetera central de Colombia.

En cuanto a la espacialización se empleó el método del peso inverso de la distancia – *IDW* (Inverse Distance Weighting) (Figura 1), por presentar un error del cuadrado medio menor que el kriging ordinario, posiblemente

debido a que los puntos de referencia son pocos (menos de 32), para tener resultados confiables en kriging (9).

Índice de concentración de las precipitaciones (*ICP*). La variabilidad temporal de la distribución de las lluvias se registró entre 10 y 12, que según la clasificación de IPC propuesta por Oliver (16), es uniforme y moderadamente estacional (Tabla 4). Se encontraron algunos tiempos marcados donde la erosividad puede ser mayor, sin embargo, debido a que los valores están próximos a la concentración uniforme ($\approx 10\%$) puede presumirse que son poco relevantes y no son determinantes para producir la mayor agresividad en un tiempo determinado y, por ende, la erosión puede darse de igual manera

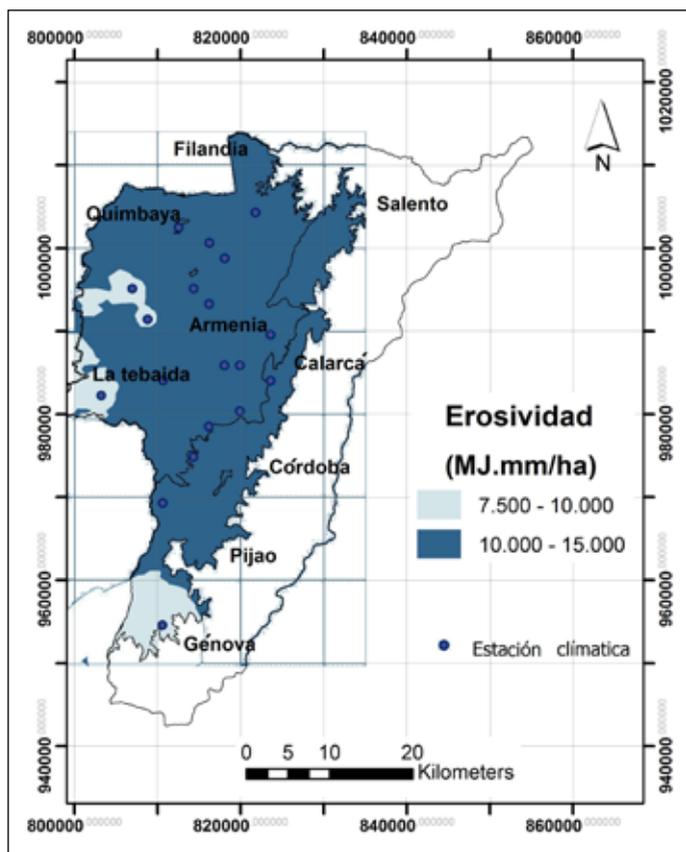


Figura 1. Mapa de distribución espacial de la erosividad (R) en la región cafetera del departamento del Quindío.

en todos los meses del año. El *ICP* calculado concuerda con los valores reportados por (22) para el departamento de Caldas.

Los anteriores resultados permiten concluir para la zona y el período evaluado, que la erosividad de la lluvia presenta una baja variabilidad espacial, con un 90% de áreas en un nivel muy alto (10.000 – 15.000 MJ.mm/ha) y el 10% restante de áreas en un nivel alto (75.000 – 10.000 MJ.mm/ha), el cual según el *ICP* es constante todo el año.

LITERATURA CITADA

1. ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. 2009. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1), 111–121.
2. APAYDIN, H.; ERPUL, G.; BAYRAMIN, I.; GABRIELS, D. 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328(3), 726–732.
3. ARNOLDUS, H.M.J. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*.
4. BONILLA, C.A.; VIDAL, K.L. 2011. Rainfall erosivity in central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1), 126–133.
5. BRADY, N.; WEIL, R. R. 1999. *The nature and properties of soil*. New Jersey: Prentice Hall. 881 p.

6. CAPOLONGO, D.; DIODATO, N.; MANNAERTS, C. M.; PICCARRETA, M.; STROBL, R. O. 2008. Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy). *Journal of Hydrology*, 356(1), 119–130.
7. DE LUIS M.; GONZÁLEZ–HIDALGO J.C.; RAVENTÓS, J.; SÁNCHEZ, J.R.; CORTINA, J. 1997. Distribución espacial de la concentración y agresividad de la lluvia en el territorio de la Comunidad Valenciana. *Cuaternario y Geomorfología*, 11:33–44
8. FOURNIER, F. 1960. Climat et érosion; la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. (First edition) Presses Universitaires de France, Paris.
9. GOOVAERTS, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1), 113–129.
10. HOYOS, N.; WAYLEN, P. R.; JARAMILLO, Á. 2005. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of hydrology*, 314(1), 177–191.
11. 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), 30–48.
12. MABIT, L.; BERNARD, C. 2007. Assessment of spatial distribution of fallout radionuclides through geostatistics concept. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2), 206–219.
13. MANNAERTS, C. M.; GABRIELS, D. 2000. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil and Tillage Research*, 55(3), 207–212.
14. MELLO, C. D., VIOLA, M. R., BESKOW, S., Y NORTON, L. D. (2013). Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. *Geoderma*, 202, 88–102.
15. OLIVEIRA, P. T.; RODRIGUÉS, D. B.; SOBRINHO, T.A.; CARVALHO, D.F.D.; PANACHUKI, E. 2012. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Engenharia Agrícola*, 32(1), 69–79.
16. OLIVER, J. E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32(3), 300–309.
17. RAMÍREZ, F.; HINCAPIÉ, E.; SADEGHIAN, S.; Y PÉREZ, U. 2007. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé (Colombia)*, 58(1):40–52.
18. RENARD, K. G.; FREIMUD, J. R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287–306.
19. RIVERA, J. H. 1990. Determinación de los índices de erosividad, erodabilidad y erosión potencial en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). Palmira (Colombia), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 310 p. (Tesis maestría)
20. RIVERA, J. H.; GÓMEZ, A. A. 1991. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37–52.
21. ROMERO, C. C.; BAIGORRIA, G. A.; STROOSNIJDER, L. 2007. Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru. *Climatic Change*, 85(3–4), 343–356.
22. OBANDO, M. F.; ECHEVERRI, T. L. 2010. Erosividad de las lluvias en la Región Centro–Sur del Departamento de Caldas, Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, 63(1), 5307–5318.
23. VRIELING, A., STERK, G., DE JONG, S. M. 2010. Satellite–based estimation of rainfall erosivity for Africa. *Journal of hydrology*, 395(3), 235–241.
24. WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. 2002. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall–runoff erosivity “R” factor. *Ecological Modelling*, 153(1), 143–155.
25. WISCHMEIER, W. H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil–loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246–249.
26. WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. *Agric. Hbk 537. U.S.D.A.–Sci. and Educ. Admin.*, Washington, DC.
27. ZHANG, Y. G.; NEARING, M. A.; ZHANG, X. C.; XIE, Y.; WEI, H. 2010. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. *Journal of hydrology*, 384(1), 97–106.