

DETERMINACION DE LA ENERGIA CINETICA DE LA LLUVIA CON DATOS HORARIOS

Eva Colotti Bizzarri*

RESUMEN

La energía cinética constituye una de las variables para la obtención de la erosividad de la lluvia. Para su determinación existen diversas formulaciones y, entre las más utilizadas está la ecuación de Wischmeier (1958), la cual requiere de los pluviogramas, documentos que muchas veces se extravían o se dañan, o bien es fácil de cometer errores visuales, de transcripción o de subjetividad por parte de los analistas, además de lo largo de los cálculos. Esto nos indujo a probar otro tipo de dato como el horario. En Venezuela, esta información es procesada por la Dirección de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (DHM-MARNR) y recopilada en planillas llamadas M-7. Entre los años 1985-1989 se recopilaron 207 bandas de lluvia en las que fueron reconocidos 136 eventos erosivos; igualmente, fueron elaboradas sus respectivas planillas M-7 para obtener la información de lluvia a escala horaria. En conclusión, se puede establecer el uso de los datos horarios en sustitución del análisis de los pluviogramas, ya que fue encontrado un coeficiente de determinación del 94% en la siguiente regresión lineal para eventos individuales: $E_c = 0,304 + 1,076 E_h$.

Palabras clave: erosividad, energía cinética, índice.

SUMMARY

Kinetic energy constitutes one of the variables for obtaining rain erosivity. For its determination, diverse formulations exist, but the Wischmeier's (1958) equation is among one of the most used. It requires pluviograms, which are

*Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

documents that under many circumstances go astray or are damaged, or easily include visual errors of transcription or subjectivity on the part of the analysts. Besides, it also requires long calculations. This induced us to use a different kind of data: hourly data. In Venezuela, this information is processed by the Direction of Hydrology and Meteorology of the Ministry of Environmental Matters and Renewable Natural Resources (DHM-MARNR) and they are gathered in forms called M-7 schedule forms. Between the years 1985-1989, 207 rain bands were gathered and 136 erosive events were recognized in them,. Also, their respective M-7 schedules were elaborated to obtain rain information according to hourly scale. In conclusion, the use of hourly data is proposed as a substitute for analysis of pluviograms, since a coefficient of determination of 95% was found in the following lineal regression for individual events: $E_c = 0,304 + 1,076 E_{ch}$.

Key Words: rainfall erosivity, kinetic energy, index.

INTRODUCCION

La energía cinética de la lluvia es la suma de la cantidad de movimiento de las diferentes gotas y se considera una característica compuesta, dado que es el resultado del tamaño de las gotas (masa) y su velocidad de caída, que aumenta con la intensidad de la lluvia. Neal y Baver (1937) citados por Barnett (1958) hallaron que el impacto de las gotas por unidad de área era determinado por el número y tamaño de las gotas más el aumento de su velocidad por la fuerza del viento, el cual ha sido comúnmente atribuido a la energía cinética o al momento o a la combinación de ambos (Free, 1960; Rose, 1960; Hudson, 1971). Sin embargo, Ellison (1944), Ekern (1953) y Ghadiri y Payne (1977) consideraron que el estrés que ejerce el impacto de las gotas de lluvia depende de su velocidad de caída y de su tamaño y, que tal dependencia está relacionada con la conexión entre la energía cinética de la lluvia y su erosividad.

Ekern (1953) menciona que la energía cinética de la lluvia está en un rango de 1.000 a 100.000 veces la capacidad de trabajo del

flujo de escorrentía superficial. Igualmente, Hudson (1982) considera que la lluvia tiene 256 veces más energía cinética que la escorrentía. Hudson (1971) explica que su valor umbral crítico de intensidad erosiva 25 mm/h, está relacionado con la energía cinética, la cual por debajo de este valor es baja y las gotas no tienen la misma capacidad para erosionar; de allí, que considera a las lluvias tropicales 90% erosivas en comparación con las templadas 25% erosivas.

La energía cinética es medida por la fuerza que ejerce la lluvia sobre platillos de una balanza sensible y por registradores acústicos, pero los valores mejor relacionados con las pérdidas de suelo, son los determinados a partir de ecuaciones que relacionan el tamaño de las gotas y su velocidad de caída.

Wischmeier y Smith (1958) determinaron en EE.UU. que el peso del agua que precipita durante una tormenta en 30 minutos puede exceder a 100 t-f/acre o 224 t/ha, debido a que los billones de gotas que abarcan este volumen de agua pueden golpear el suelo a una velocidad promedio de 20 mi/h. El valor de energía obtenido a partir de estos datos es de 2 millones foot-pounds/acre aproximadamente, sin incluir el efecto del viento. Basados en los datos publicados por Laws y Parsons (1943) y Gunn y Kinzer (1949), Wischmeier y Smith (1958) desarrollaron una ecuación de regresión logarítmica para obtener valores de energía cinética en función de la intensidad de la lluvia.

Hudson (1957) en Rhodesia encontró que 1 a 2 tormentas causan más del 50% de la erosión anual. Kowal y Kassam (1977) en Samarú reportaron valores altos de energía cinética e intensidad de la lluvia, atribuyendo su origen a nubes cúmulos de gran desarrollo vertical con mayor concentración de las gotas en el espacio y mayor ocurrencia de colisiones y fusiones. Ghadiri y Payne (1988) al estudiar el mecanismo de salpique de la lluvia en el suelo, mostraron que en el balance de momento y energía, ambas variables se relacionaron altamente con las

gotitas producto del salpique, tanto que la energía de impacto aumentó. Sin embargo, mantenida constante no produce una erosividad constante, por ello la validez de la energía cinética como un indicador de la erosividad es cuestionable. Igualmente, determinaron que del 10 al 25% de la energía cinética se convierte en energía de salpique, producida principalmente por gotas grandes.

Osuji (1989), compara la energía cinética de las lluvias naturales y simuladas con la calculada por la ecuación de Wischmeier y Smith (1958), e indica que ésta última subestima la energía cinética en el trópico, lo cual se explica por las diferencias en el tamaño de gotas, mayor en lluvias tropicales que en las templadas. McIsaac (1990) encontró que tales diferencias en el tamaño de las gotas se deben a influencias geográficas y atmosféricas que inducen a una sobreestimación de la energía cinética en latitudes medias en un rango entre el 5 y 28% y, la subestimó en latitudes tropicales en un rango entre el 15 y 30%. También, determinó que la estimación de la energía de la lluvia debería ser incrementada en 7% por cada 1000 metros de elevación sobre el nivel del mar para incluir en su cantidad el efecto de la disminución de la densidad del aire sobre la velocidad de las gotas a altas elevaciones.

El objeto de la presente investigación es determinar la aplicabilidad de los datos de lluvia horaria para el cálculo de la energía cinética utilizando las ecuaciones de Wischmeier y Smith (1958) para latitudes medias y de Páez (1980) para latitudes tropicales, tal que pueda sustituirse el uso de la banda pluviográfica.

CARACTERIZACION CLIMATICA DEL AREA DE ESTUDIO

A los fines de esta investigación, no daremos una caracterización climática extensa como aparece en Zambrano (1971) o Guevara et al (1995), sólo ofreceremos una visión general que servirá de apoyo al

análisis posterior de la energía cinética. Los datos de lluvia provienen de una parcela experimental de erosión, instalada en la Granja Mauro a 5 km al ENE de Santa Teresa del Tuy, en el Estado Miranda, Venezuela. La parcela estuvo emplazada en la sección media de los Valles del Tuy, área fisiográfica y pluviométricamente homogénea

CUADRO Nº 1. LLUVIA MENSUAL EN LA ESTACION MAURO. PERIODO 1985-1989

Años	MESES												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	77,6	92,2	70,2	34,6	274,6
1986	45,3	9,6	6,2	55,7	244,3	213,5	110,1	237,7	112,9	199,7	84,7	170,1	1.489,8
1987	24,1	3,1	0,4	0,0	59,7	238,1	261,4	211,2	74,2	58,5	144,8	54,1	1.129,6
1988	49,7	26,7	7,9	1,0	2,9	170,6	205,8	158,2	154,4	96,5	82,3	196,1	1.152,1
1989	7,4	9,8	0,8	1,2	78,5	116,6	107,3	75,3	63,9	0,0	0,0	0,0	460,8
Media	31,6	12,3	3,8	14,5	96,4	184,7	171,2	170,6	96,6	111,7	95,5	113,7	1.102,6
%	2,9	1,1	0,3	1,3	8,7	16,8	15,5	15,5	8,8	10,1	8,7	10,3	100,0
DE	19,6	10,1	3,8	27,5	103,7	53,3	75,6	71,6	37,2	61,1	33,5	81,2	201,8
CV	62,1	82,0	99,1	189,9	107,7	28,8	44,2	42,0	38,5	54,7	35,1	71,4	18,3

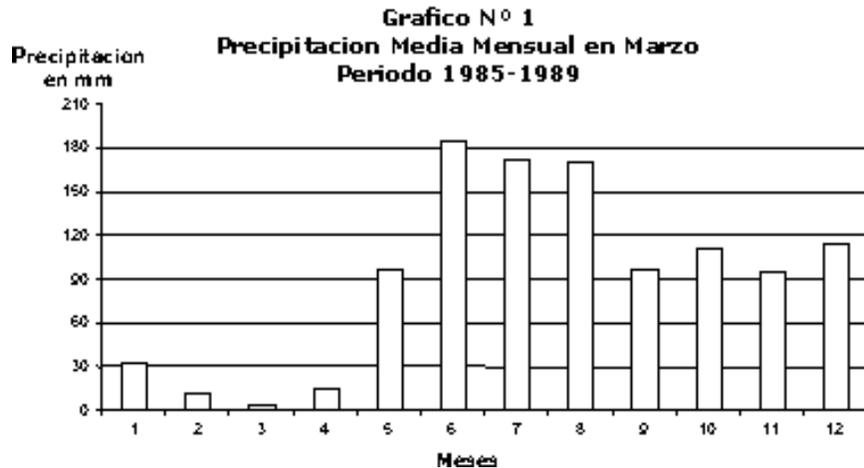
Elaboración Propia.

(Guevara, 1987 y Colotti, 1992). Su funcionamiento abarcó el período septiembre-1985 a septiembre-1989, durante el cual se recopiló la información pluviométrica resumida en el Cuadro Nº 1.

La génesis y comportamiento de las diferentes variables climáticas está determinada por su ubicación en la zona tropical, donde la radiación solar y la temperatura son altas durante todo el año. La lluvia de la estación Mauro posee un promedio de 1.102,6 mm, distribuidos de forma unimodal durante el año, condición que permite diferenciar dos temporadas bien definidas: una seca y de gran variabilidad, conformada por los meses de enero a abril y, otra lluviosa y de menor variabilidad, de mayo a diciembre. La proporción de lluvia aportada en los meses secos apenas alcanza el 5,6 % con 62,2 mm, mientras que en los meses lluviosos el 94,4 % con 1.040,4 mm, lo cual corresponde con la mayor erosividad (Gráfico Nº 1). El mes más seco del año es marzo, con 3,8

mm y, el más lluvioso, es junio con 184,7 mm, seguidos de julio y agosto con 171,2 y 170,6 mm, respectivamente. Este comportamiento se asocia a la influencia de la Convergencia Intertropical en la temporada lluviosa, fenómeno que afecta a la cuenca durante estos meses.

La distribución de las lluvias a lo largo del día, posee un máximo principal a las 4 a.m. con 7,2 mm y los valores cercanos, entre la 1 y las 8 a.m. mantienen altas cantidades con lluvia entre 5 y 3,7 mm, infiriendo que su génesis se relaciona con procesos de inestabilidad atmosférica nocturna. A partir de las 8 a.m. la lluvia disminuye hasta un



secundario a las 13 p.m. con 4,2mm; estas cifras cercanas se observan hasta el final de la tarde entre las 18 p.m. (4,2 mm) y 22 p.m. (3,9 mm), explicando este segundo máximo por el proceso de convección diurno.

Seleccionando los meses de marzo y junio, como representantes de las temporadas seca y lluviosa, respectivamente, para contrastar la distribución de la lluvia horaria, en ambos la mayor cantidad de lluvia ocurre durante la noche. En marzo, el máximo principal también ocurre a las 4 a.m. con 1 mm y valores cercanos a este ocurren a las 7 a.m. con 0,8 mm, asociados a la influencia de los frentes fríos modificados

provenientes del hemisferio norte, que afectan a nuestro país en los primeros meses del año. En junio, la lluvia de las 4 a.m. con 16,2 mm es ligeramente inferior a la observada en las 16 p.m. con 18,4 mm, la cual representa el máximo principal. Sin embargo, esta diferencia no modifica su similitud con los patrones seco y anual, atribuyendo la lluvia a finales de la tarde y durante la noche a la convección diurna junto a la inestabilidad causada por la Convergencia Intertropical (Colotti, 1996).

CALCULO DE LA ENERGIA CINETICA POR LAS ECUACIONES DE WISCHMEIER Y SMITH (1958) Y PAEZ (1980)

Entre el 19-09-1985 y el 25-09-1989, fue calculada la energía cinética con la información pluviométrica proveniente de 207 bandas pluviográficas, en las cuales fueron identificados 186 eventos erosivos, cuya precipitación fue mayor a 10 mm o con intensidad superior a 24 mm/h. Nuestro análisis se basó en 136 eventos para mantener las muestras totalmente concurrentes, utilizando los programas Statgraphics, Versión 4.2 y Erosi, éste último específicamente elaborado para la determinación de la erosividad y sus variables asociadas.

Los estadísticos muestrales de la lluvia, indican que el máximo valor fue 88,6 mm, seguido de 65,9mm y 59,8 mm y, el mínimo 5,2 mm, con un rango de 83,4 mm. La media 20,2 mm no se consideró representativa del conjunto de datos, por su diferencia con la mediana (15,1 mm) y el modo (13,6 mm) junto a la alta variabilidad expresada por el coeficiente de variación de 61,4 %. En este caso, la mediana se comporta como un valor más cierto, al no estar influida por los valores extremos. Las diferencias entre las medidas de tendencia central indican la existencia de asimetría en los datos, cuya magnitud fue de +2,2 mm. Utilizando este valor para determinar su normalidad, a un nivel de significación del 5% y con dos colas, se concluyó que la serie se aleja de una distribución normal (Cuadro N° 2).

En base a la agrupación de las lluvias erosivas en clases de frecuencias (Cuadro N° 3), observamos 88 eventos que representan el 64,7% con menos de 20 mm, indicativo de alta ocurrencia de lluvias poco abundantes, seguido por el 29,4% cuya cuantía alcanza entre 20 y 40 mm, agrupándose en estas 2 clases el 94,1%. El resto de los eventos pueden considerarse de extraordinaria magnitud y representan el 5,9%, con cantidades de lluvia que oscilan entre 40 y 100 mm, con

CUADRO N° 2. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS DATOS DE LA ESTACION MAURO. PERIODO 1985-1989

VARIABLE	N	MEDIA	MEDIANA	MODO	S	CV	MIN	MAX	ASIM
Lluvia	136	20,2	15,1	13,6	12	61,4	5,2	88,6	2,2
Ec	136	4,7	3,5	2,3	3,1	66,0	1,2	19,2	2

Elaboración Propia.

máximo absoluto de 88,6 mm. En cuanto a los percentiles asociados a los datos de lluvia, el 25% es menor a 12,5 mm, valor establecido por Wischmeier y Smith como mínimo para causar erosión, y el 50% es menor a 15,1 mm.

Con relación a su energía cinética, el 58,8% de los eventos desarrollan menos de 4 MJ/ha y el 27,9% alcanzan valores entre 4 y 8 MJ/ha, constituyendo el 86,8% del total de observaciones. Sin embargo, en el restante 13,2%, se registraron valores máximos de 19,2 MJ/ha.

Analizando la distribución probabilística que poseen las variables en discusión, a partir del software estadístico Statgraphics, encontramos que la lluvia y la energía cinética siguen una distribución Chi Cuadrada.

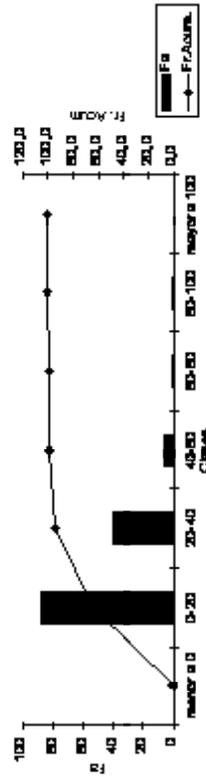
La Energía Cinética de la Lluvia Mediante Datos Horarios en la Parcela Experimental de Erosion

En concordancia con las limitaciones planteadas por diversos investigadores y la complejidad del análisis de los eventos de lluvia

CUADRO N° 3. CLASES DE DATOS EN MAURO. PERIODO 1985-1989

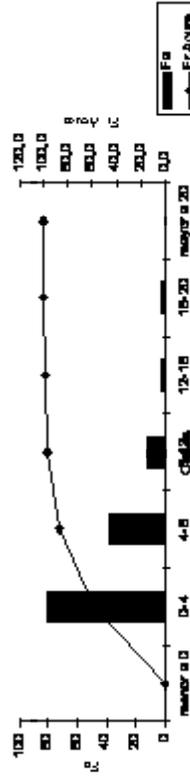
LLUVIA		
CLASES	Fa	Fr. Acum.
menor a 0	0	0,0
0-20	88	64,7
20-40	40	94,1
40-60	6	98,5
60-80	1	99,3
80-100	1	100,0
mayor a 100	0	100,0

Frecuencia de la lluvia en Mauro



Ez		
CLASES	Fa	Fr. Acum.
menor a 0	0	0,0
0-4	80	58,8
4-8	38	86,8
8-12	13	96,3
12-16	3	98,5
16-20	2	100,0
mayor a 20	0	100,0

Frecuencia de la Ez en Mauro



Elaboración Propia.

erosiva directamente sobre la banda pluviográfica, iniciamos la búsqueda de otra alternativa metodológica conociendo la resolución temporal de la información pluviométrica obtenida de los pluviogramas y recopilada en bases de datos, a escala nacional. El organismo encargado del análisis es la Dirección de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (DHM-MARNR), que además coordina el funcionamiento de las estaciones meteorológicas suscritas a su red y la preparación de los observadores meteorológicos. La mínima resolución temporal de la información pluviométrica es horaria y, a partir de esta, se generan los datos mensuales y anuales para todas las estaciones del país; bajo esta condición, decidimos basar la investigación en la aplicabilidad de los datos horarios.

Siguiendo la metodología de la DHM-MARNR para el análisis de las bandas y preparación de las planillas M-7, seleccionamos los eventos erosivos, con la diferencia que sus respectivos segmentos mantuvieron igual duración en todos los casos: 1 hora. Para calcular la energía cinética total se utilizó la ecuación de Wischmeier (1958). El procesamiento rápido y preciso de los 136 eventos erosivos se realizó por computadora mediante el programa EROSI elaborado por José Urdaneta en lenguaje QBASIC. Este nuevo índice representa una modificación del original creado por Wischmeier (1958):

$$Ec = 0,119 + 0,0876 \log I \quad (1)$$

donde: Ec = energía cinética total del evento en MJ/ha.mm

I = intensidad en mm/h

CUADRO N°4. ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS DATOS HORARIOS DE LA ESTACION MAURO. PERIODO 1985-1989

VARIABLE	N	MEDIA	MEDIANA	MODO	S	CV	MIN	MAX	ASIM
LluviaH	136	20,1	15,4	10,4	12	61,7	5,8	88,9	2,2
EcH	136	4	3	2,1	2,8	70,0	1,1	18,7	2

Elaboración Propia.

Mediante la comparación de las medias y varianzas de las variables originales y modificadas utilizando pruebas de contraste, podemos indicar que no existieron diferencias estadísticamente significativas en tales estadísticos para las lluvias y las energías cinéticas, por lo que concluimos que mantienen un comportamiento similar. En todas las variables, la asimetría es positiva, condición que sugiere a la mediana como la medida más representativa de la tendencia central.

Con la finalidad de comparar los resultados de EcH con los del índice Ec, se utilizó la misma agrupación en 5 clases para cada característica de la lluvia analizada (Cuadro N° 5). En cuanto a la lluvia horaria se observa que no existen diferencias significativas con la clasificación obtenida en el Cuadro N° 2, no así para la energía cinética. En la primera, aún cuando mantiene la misma distribución hay un aumento de valores menores a 4 MJ/ha del orden del 7.4%, lo cual viene dado por la generalización de los valores horarios y, por consiguiente, la disminución de la intensidad en cada segmento de lluvia horaria.

La Ecuación de María Luisa Páez para el Cálculo de la Energía Cinética de la Lluvia

Páez (1980) realizó en la localidad de Chaguaramas en el Estado Guárico, mediciones de la energía cinética de lluvias naturales con un Cinetógrafo, construido en la Facultad de Agronomía de la UCV siguiendo el diseño de Heuveldop y Kruse (1978). Se efectuaron 50 mediciones, a las cuales posteriormente aplicó el análisis de regresión llegando a la siguiente ecuación:

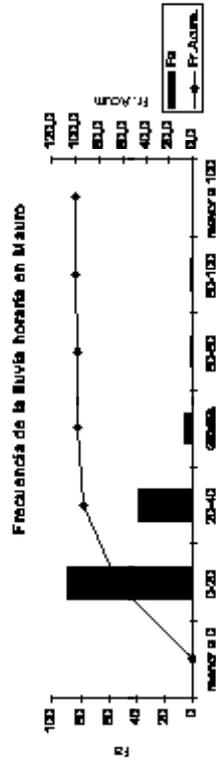
$$Ec = 0.029582 + 0.006418I - 0.000025I^2 \quad (2)$$

donde: Ec = energía cinética de la lluvia en MJ/ha.mm

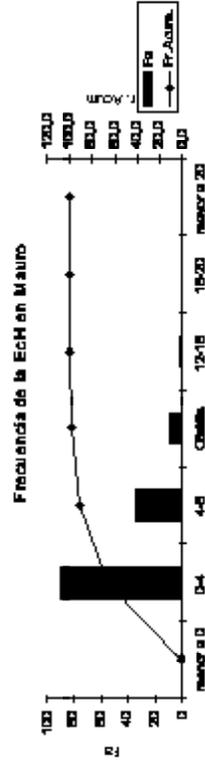
I = intensidad de la lluvia en mm/h

CUADRO N.º4. CLASES DE DATOS HORARIOS EN MAURO PERIODO 1985-1989

LLUVIA		
CLASES	Pa	Fr. Acum.
menores 0	0	0,0
0-20	89	65,4
20-40	39	94,1
40-60	6	98,5
60-80	1	99,3
80-100	1	100,0
mayor a 100	0	100,0



Ech		
CLASES	Pa	Fr. Acum.
menores 0	0	0,0
0-4	90	66,2
4-8	34	91,2
8-12	9	97,8
12-16	2	99,3
16-20	1	100,0
mayor a 20	0	100,0



Elaboración Propia.

CUADRO Nº 6. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS DATOS ESTIMADOS POR LA ECUACION DE M.L. PAEZ EN LA ESTACION MAURO. PERIODO 1985-1989.

VARIABLE	N	MEDIA	MEDIANA	MODOS	S	CV	MIN	MAX	ASIM
ECPI	136	1,9	1,2	0,7	1,9	97,4	0,3	9,8	2,1

Elaboración Propia.

Esta ecuación fue incluida en el programa EROSI, para calcular la energía cinética mediante una relación encontrada en nuestro país y para condiciones de bosque seco tropical análogas al área de estudio. Nótese que las medias son considerablemente inferiores, y las varianzas, son superiores a las obtenidas para los datos originales, indicativo de una baja relación de esta ecuación con la realidad subestimando, en mayor proporción que Wischmeier, la energía cinética de las lluvias en Mauro. En este sentido, consideramos que el bajo coeficiente de determinación obtenido por la autora (0,41%) se relaciona con la pequeña muestra de datos observados en Chaguaramas, la cual es representativa de las lluvias convectivas de esa área, junto con la pequeña superficie del sensor del cinetógrafo, 1 cm², la cual es irrelevante en comparación con la superficie del área colectora de un pluviógrafo de sifón, 200 cm². Además, la ecuación es funcional a intensidades entre 20 mm/h y 80 mm/h, valor donde esta alcanza la máxima energía para comenzar a disminuir. En la estación Mauro, existe una alta proporción de valores fuera del rango mencionado, por lo que no recomendamos la aplicación de esta ecuación en localidades con características pluviométricas similares a las existentes en la parcela experimental de erosión. En conclusión, la experiencia de Páez (1980) no es representativa del trópico ni de la zona de bosque seco tropical en nuestro país.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PROVENIENTES DE LA APLICACION DE LOS INDICES EC, EC60 Y DE LA ECUACION DE PAEZ

Las características de la lluvia utilizadas en la determinación de la energía cinética por Wischmeier fueron relacionadas con sus

homólogas para datos horarios y por la ecuación de Páez, con la finalidad de identificar el modelo de mejor ajuste. En los datos, regresiones y comparaciones que se realizaron, las variables dependientes estuvieron representadas por lluvia y energía cinética de Wischmeier, mientras que las independientes, fueron las estimaciones logradas por los índices y ecuaciones aplicadas. La selección del mejor modelo se realizó mediante la comparación de los coeficientes de determinación (r^2) cuyos valores nos permitieron conocer la proporción explicada por la variable independiente para cada método y, el error cuadrático medio o RMSE (Root Mean Square Error), que determina la dispersión promedio de los valores observados con la línea de mejor ajuste, expresado en las mismas unidades de la característica analizada.

Antes de obtener los diferentes modelos, fue aplicado el coeficiente de correlación serial no circular de orden 1 con la finalidad de conocer la aleatoriedad de cada una de las series a utilizar, requisito fundamental del análisis de regresión. Sus resultados nos permitieron concluir que no existe autocorrelación o dependencia entre los valores sucesivos de las series y pueden considerarse aleatorias.

En el análisis de las características de la lluvia utilizadas para obtener el índice Ec de los 136 eventos erosivos, y comparadas con aquellas obtenidas mediante el uso de los datos horarios, observamos que el modelo lineal ofrece el mejor ajuste con los datos observados, motivo por el que se recomiendan los datos horarios para la estimación de Ec. Las ecuaciones lineales de mejor ajuste son:

$$LLE = 0,567 + 0,977LLH \quad r^2 = 94,49\% \quad RMSE = 2,91 \text{ mm} \quad (3)$$

$$EC = 0,304 + 1,076ECH \quad r^2 = 93,96\% \quad RMSE = 0,76 \text{ MJ/ha} \quad (4)$$

donde: LLE = lluvia erosiva en mm

LLH = lluvia erosiva horaria en mm

EC = energía cinética en MJ/ha, calculada por Wischmeier

ECH = energía cinética horaria en MJ/ha, calculada por Wischmeier

Aplicando la prueba de significación F recomendada por Gujarati (1990) concluimos que los r^2 son estadísticamente significativos a niveles inferiores al 1%.

En cuanto a la aplicación de la ecuación de M.L. Páez (1980) para el cálculo de la energía cinética de la lluvia en áreas de bosque seco tropical, sus resultados no reflejan la subestimación de la ecuación de Wischmeier para lluvias tropicales, más bien subestima la energía cinética en eventos erosivos de baja intensidad en nuestra localidad. A pesar de sus resultados, presenta relación significativa con la energía cinética calculada por Wischmeier con los datos originales y horarios en el modelo lineal:

$$EC = 1,493ECP \quad r^2 = 77,84\% \quad RMSE = 1,46 \text{ MJ/ha} \quad (5)$$

$$ECH = 1,399 + 1,402ECP \quad r^2 = 84,44\% \quad RMSE = 1,13 \text{ MJ/ha} \quad (6)$$

donde: ECP = energía cinética estimada por la ecuación de M.L. Páez en MJ/ha.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las limitaciones operacionales encontradas en la determinación de la energía cinética de Wischmeier, junto a su estrecha relación con las pérdidas de suelo y su extensa aplicación a nivel mundial, fueron las principales razones que motivaron la presente investigación, encaminando la búsqueda hacia una metodología que permitiera utilizar la información básica existente a nivel nacional, para obtener buenas estimaciones. En este sentido, los datos horarios contenidos en la base de datos computarizada de la Dirección de Hidrología y Meteorología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, accesibles fácilmente al usuario fueron considerados como una alternativa viable para tal estimación, que además, mejoraría las encontradas por modelos diseñados en diversos estudios en el país.

En efecto, la evaluación estadística de los resultados obtenidos

permitió concluir que:

1. Los datos de lluvia horaria para la estimación de la energía cinética, son perfectamente aplicables con la ventaja de subsanar algunas limitaciones de cálculo.
2. La energía cinética de las lluvias tropicales es producto de pocos eventos con muy altas intensidades y corta duración durante el año, hecho corroborado en los datos de la estación Mauro y que además confirma los planteamientos realizados por Hudson.
3. La ecuación de M.L. Páez subestimó la energía cinética en la localidad estudiada, manteniéndose más alta aquella calculada por la ecuación de Wischmeier y Smith.

La aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en la estimación de la energía cinética nos permitió llegar a la recomendación de realizar mediciones de energía cinética durante un lapso suficientemente largo para establecer una relación consistente energía-intensidad para nuestro país y la cual abarque un amplio rango de tipos de lluvias tropicales.

BIBLIOGRAFIA

- BARNETT, A. (1958). How intense rainfall affects runoff and soil erosion. *Agric. Eng. Nov.* 703-707, 711.
- COLOTTI B., E. (1992). Agrupación de 14 estaciones pluviométricas escogidas en la cuenca media del río Tuy por medio del análisis cluster. En III Jornadas de Investigación Geográfica. Caracas. 78-87
- COLOTTI B., E. (1996). Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosividad. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela. 200 p.
- EKERN, P.C. (1953). Problems of raindrop impact erosion. *Agric. Eng.* 34, 23-25, 28

- ELLISON, W.D. (1944). Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* 25, 131-136, 181-182
- FREE, G.R. (1960). Erosion characteristics of rainfall. *Agric. Eng.* 41(7), 447-449, 455
- GHADIRI, H. y D. PAYNE. (1977). Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs. *J. Soil Sci.* 28, 247-258
- GHADIRI, H. y D. PAYNE. (1988). The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil. *J. Soil Sci.* 39, 563-575
- GUEVARA D., J.M., C. CONGOSTO, E. COLOTTI, y J. RODRIGUEZ. (1987). Informe final de la primera etapa del proyecto de investigación N° H-07.11/86. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. 150 p
- GUEVARA D., J.M., C. CONGOSTO, E. COLOTTI, y L. FERNANDEZ. (1995). La erosión hídrica en la cuenca media del río Tuy. Informe final presentado ante el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela.
- GUNN, R. y G.D. KINZER. (1949). The terminal velocity of fall for water droplets. *J. of Meteorology.* 6, 243-248
- HUDSON, N.W. (1957). Erosion control research. *Rhodesia Agric. J.* 54, 297-323
- HUDSON, N.W. (1971). *Soil Conservation*. Cornell University Press, Ithaca. New York.
- HUDSON, N. W. (1982). *Conservación del Suelo*. Editorial Reverté S.A. España. 335 p.
- LAWS, O. y D.A PARSONS. (1943). The relation of raindrop-size to intensity. *Trans. Am. Geophys. Union.* 24, 452-460
- McISAAC, G.F. (1990). Apparent geographic and atmospheric influences on raindrop sizes and rainfall kinetic energy. *J. Soil and Water Cons.* 663-666
- OSUJI, G.E. (1989). Drop size, drop size distribution and kinetic energy of rainfall simulator in comparison with natural rainfall. *Discovery and Innovation.* 1(4), 53-62
- PAEZ, M.L. (1980). Contribución al estudio de la precipitación como factor de erosión en condiciones tropicales. Tesis de Ms Sci. Postgrado en Ciencias del Suelo. Fac. Agronomía. UCV. Maracay. Venezuela.

HUMANITAS. Portal temático en Humanidades

WISCHMEIER, W.H. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Am. Geo. Un. 39(2):285-291

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.W. y UHLAND. (1958). Evaluation of factors in the soil loss equation. Agric. Eng. 39, 458-462, 474

ZAMBRANO, A. (1971). Estudio fisiográfico regional de la cuenca del Tuy. Separata del Boletín de Geología. Editorial Sucre. 206 p