



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental**

Análisis de la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en la ciudad de Cuenca

Trabajo de titulación previa a la obtención del
título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Diana Valeria Pesántez Vallejo

C.I. 0104894860

María Augusta Romero Añezco

C.I. 0704881259

Director:

Ing. Rolando Enrique Célleri Alvear, PhD

C.I. 0602794406

Tutora:

Ing. Johanna Marlene Orellana Alvear, MSc

C.I. 0104162268

Cuenca –Ecuador

14/05/2019



RESUMEN

La erosividad de la lluvia es uno de los factores principales para predecir la erosión de los suelos. La agresividad que la lluvia tenga va a depender de las propiedades microfísicas de la lluvia, es decir, los diámetros y velocidades de caída de las gotas de lluvia. Actualmente, la ciudad de Cuenca posee escasa información acerca de los parámetros que determinan los procesos de degradación de los suelos y el tipo de precipitación que causa una mayor erosión hídrica. Es por esto que el objetivo de este estudio es analizar la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad. Para esto se utilizaron datos de lluvia del periodo Febrero 2017- Febrero 2018, medidos con un disdrómetro láser Thies y un Micro Rain Radar, ubicados en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Dentro de este periodo se encontraron cinco eventos erosivos, para los cuales se determinó el índice de erosividad (EI). Los resultados mostraron que las propiedades microfísicas de la lluvia tienen una influencia directa en el EI. Además, los diámetros y las velocidades de caída de las gotas con valores altos fueron los más influyentes en el mismo. Finalmente, en el análisis del perfil vertical se encontró que el comportamiento que tienen las características de la lluvia es diferente en cada evento erosivo.

Palabras clave: Índice de erosividad. Erosividad de la lluvia. Micro Rain Radar. Disdrómetro. Propiedades microfísicas de la lluvia.



ABSTRACT

Rainfall erosivity is one of the main factors used to predict soil erosion. This factor depends on the microphysical properties of the rainfall, i.e. the diameter and the velocity of the raindrops. Nowadays, in our study site (city of Cuenca) there is a lack of information about the parameters that affect soil degradation processes and the type of rainfall that causes the greatest hydric erosion in its soils. Hence, our aim is to analyze the influence of the rainfall microphysical properties in the erosivity index. Our data corresponds to the period February 2017 - February 2018, measured with a Thies laser disdrometer and a Micro Rain Radar, both located at University of Cuenca's Balzay campus. Within this time period, five erosive events were found, for which the erosivity index (EI) was determined. The results showed that the microphysical properties of the rainfall have a direct influence in the EI index. Furthermore, raindrops with larger diameter and faster velocity had the greatest impact in the EI index. Finally, the analysis of the vertical profile showed that the behavior of the microphysical properties of the rainfall is different in each erosion event.

Keywords: Erosivity index. Rainfall erosivity. Micro Rain Radar. Disdrometer. Microphysical properties of the rainfall.



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	14
2	MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1	Descripción del área de estudio.....	18
2.2	Monitoreo	19
2.3	Relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia en el índice de erosividad, a partir de datos de radar vertical.	20
2.3.1	Determinación de la intensidad en 30 minutos, i_{30}	20
2.3.2	Selección de los eventos erosivos	21
2.3.3	Determinación del potencial erosivo	21
2.3.4	Relaciones entre la velocidad de caída y el tamaño de partículas con los eventos de lluvia de acuerdo a su potencial erosivo.....	22
2.4	Identificación de las características de formación de la lluvia para los eventos considerados como erosivos.....	22
2.4.1	Relaciones entre la altura de origen de la lluvia, distribución del diámetro de gotas y velocidad de caída en su nacimiento con el potencial erosivo.	23
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1	Relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia en el índice de erosividad, a partir de datos de radar vertical.	24
3.1.1	Determinación del i_{30}	24
3.1.2	Selección de los eventos erosivos.	24
3.1.3	Determinación del potencial erosivo de los eventos identificados	27
3.1.4	Relaciones entre la velocidad de caída y el tamaño de partículas con los eventos de lluvia clasificados de acuerdo a su potencial erosivo.	27
3.2	Identificación de las características de formación de la lluvia para los eventos considerados como erosivos.....	32
3.2.1	Relaciones entre la cantidad de precipitación en el perfil vertical con el potencial erosivo.....	32



3.2.2	Relaciones entre la velocidad de caída de la lluvia en el perfil vertical con el potencial erosivo.....	35
3.2.3	Relaciones entre la distribución del diámetro de gotas con el potencial erosivo.....	38
4	CONCLUSIONES	41
5	BIBLIOGRAFÍA	43



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de los i30 mediante percentiles	24
Figura 2: Evolución de los eventos de precipitación en la serie temporal	26
Figura 3: Correlación entre la velocidad de caída de gotas y el índice de erosividad... ..	28
Figura 4: Correlación entre el tamaño de partículas y el índice de erosividad.....	28
Figura 5: Relaciones entre el diámetro, la velocidad, la energía cinética y la intensidad de los eventos seleccionados; con los valores del índice de erosividad	31
Figura 6: Distribución vertical y temporal de la cantidad de precipitación (mm/min) para los 5 eventos estudiados.....	34
Figura 7: Distribución vertical y temporal de las velocidades (m/s) de caída de las gotas, para los 5 eventos estudiados.	37
Figura 8: Distribución del tamaño de gotas para los 800 primeros metros del perfil vertical, por cada evento	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Eventos de 30 minutos seleccionados para el estudio	25
Tabla 2: Índices de Erosividad (EI), calculados a partir de la ecuación 1	27



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Diana Valeria Pesántez Vallejo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en la ciudad de Cuenca”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de Mayo del 2019

Diana Valeria Pesántez Vallejo

C.I: 0104894860



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

María Augusta Romero Añazco en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de Mayo del 2019

María Augusta Romero Añazco

C.I: 0704881259



Cláusula de Propiedad Intelectual

Diana Valeria Pesántez Vallejo, autora del trabajo de titulación “Análisis de la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en la ciudad de Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 14 de Mayo del 2019

Diana Valeria Pesántez Vallejo

C.I: 0104894860



Cláusula de Propiedad Intelectual

María Augusta Romero Añazco, autora del trabajo de titulación “Análisis de la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en la ciudad de Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 14 de Mayo del 2019

María Augusta Romero Añazco

C.I: 0704881259



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial al Ing. Rolando Célleri Alvear, PhD por su guía y enseñanza, quien con su gran conocimiento nos motivó para el desarrollo de este trabajo de titulación.

De la misma manera a la Ing. Johanna Orellana Alvear, Msc. por su apoyo, paciencia y aporte de conocimientos para la realización de esta investigación.

Al Ing. Juan Pesántez, Msc. por su apoyo incondicional y sus conocimientos impartidos para la mejora de esta investigación.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, quienes nos han facilitado la información y ayuda necesaria para el desarrollo de esta investigación. De manera especial al Ing. Pablo Contreras y al Ing. Paul Muñoz por su paciencia y por estar siempre prestos para brindarnos su ayuda.

Valeria y Ma. Augusta



AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar mi vida y darme la sabiduría necesaria para cumplir mis metas y objetivos.

A mis padres por ser un pilar fundamental en mi vida, por brindarme su amor y apoyo constante. Gracias a su ejemplo he logrado ser la persona que soy. Me siento completamente orgullosa y afortunada de ser su hija.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado y por motivarme a cumplir todos mis propósitos. Gracias por ser los mejores hermanos del mundo.

A mi sobrina por ser mi inspiración y por llenar de alegría cada momento de mi vida.

A mis abuelitos por sus sabios consejos y por su dulzura al enseñarme.

Gracias a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, de manera especial a Magus ya que sin ella nada de esto sería posible, gracias por tu amistad y por impulsarme a ser mejor cada día de mi vida.

Valeria



AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por ser mi guía y permitirme alcanzar todas las metas que me he propuesto.

A mis padres, por todo su amor, sacrificio, motivación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias por todas las enseñanzas, lecciones de vida y valores inculcados, sin ustedes nada de esto sería posible.

A mis hermanos, por su amor y soporte, gracias por motivarme a ser una mejor persona cada día.

A familia, amigas y amigos, gracias por su apoyo incondicional durante todo este tiempo y por darme aliento para seguir adelante siempre. En especial a mi amiga Vale, gracias por cumplir este sueño conmigo, por creer y confiar en mí.

María Augusta

1 INTRODUCCIÓN

La erosión constituye uno de los problemas medioambientales y socioeconómicos más importantes a nivel global del siglo XXI (Alvarado Cardona, Colmenero Robles, & Valderrábano Almegua, 2007). Aproximadamente el 80 % de la superficie del planeta presenta este fenómeno, el cual es originado tanto por causas naturales como antropogénicas (Sánchez-Hernández, Mendoza-Palacios, De la Cruz Reyes, Mendoza Martínez, & Ramos-Reyes, 2013). De los tipos de erosión, la erosión hídrica representa un 10% de la superficie mencionada anteriormente (Walling & Fang, 2003). La degradación de los suelos debido a la erosión hídrica es uno de los procesos más importantes afectando significativamente la capacidad productiva del suelo (Granados-Sánchez, Hernández-García, Vázquez-Alarcón, & Ruíz-Puga, 2013). La erosión hídrica resulta de dos factores importantes: la erosividad de la lluvia y la erodabilidad de los suelos (FAO, 1994). La erosividad de la lluvia es un factor importante para predecir la erosión hídrica de los suelos (Hudson, 1982), representando la capacidad potencial de la lluvia para causar erosión (Torres, 1994), y va a depender de las propiedades de la gotas de lluvia; como el diámetro, velocidad y energía cinética, y a su vez de la intensidad y duración de los eventos de lluvia (Cruz, Chela, Monar, & Valverde, 2010). El índice de erosividad (EI30) se ha venido usando en diferentes estudios para identificar la erosividad de la lluvia (Besteiro & Delgado, 2011). Si bien este índice puede ser utilizado para definir la erosividad de las lluvias, el propósito no es utilizarlo como un indicador de las pérdidas de suelo, ya que esto va a depender también de otros factores como: la erodabilidad del suelo, longitud y pendiente de la ladera, etc (Ramírez, Hincapié, Sadeghian, & Pérez, 2007).

En los últimos años, numerosos investigadores de todo el mundo han informado sobre la variabilidad espacial y temporal de la erosividad de la lluvia en las distintas regiones de estudio, utilizando la metodología de USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, por sus siglas en inglés) propuesta por Wischmeier & Smith (1958); por ejemplo: en China por Xie, Yin, Liu, Nearing, & Zhao, (2016); en Estados Unidos por Nearing, Yin, Borrelli, & Polyakov, (2017), en España por Beguería, Serrano-Notivoli, & Tomas-Burguera, (2018), en Corea del Sur por Risal et al., (2018) y Shin, Kim, Heo, & Lee, (2019), en Eslovenia por Petek, Mikoš, & Bezak, (2018), en Georgia por Tsitsagi, Berdzenishvili, & Gugeshashvili, (2018), entre otros. A pesar de que este modelo baso



sus datos y sus calibraciones en distintos suelos, ha sido considerado por diversos investigadores a nivel mundial, aplicándolo a sus situaciones locales (Ibañez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2012). Este modelo toma en cuenta diferentes factores; siendo uno de estos el Factor R o Factor de erosividad de la lluvia; el cual resulta de la sumatoria anual de los índices de erosividad (EI) calculados para cada evento de lluvia en ese periodo. Para la determinación del EI, en el cual se relaciona la energía cinética con la intensidad, diferentes autores como: Foster (1950), Wischmeier & Smith (1958), (Yin, Xie, Liu, & Nearing, 2015), etc., experimentaron con intensidades de 5, 15, 30 y 60 minutos con el fin de obtener una mejor correlación con el índice de erosividad; concluyendo que la intensidad en 30 minutos (i_{30}) obtuvo una mejor correlación con el factor de pérdidas de suelo.

En particular, la erosión del suelo en el Ecuador progresa de manera alarmante, observándose a lo largo del Callejón Interandino extensas áreas improductivas a causa de este fenómeno. Aunque intervienen diferentes factores en este proceso, el agua es uno de los principales agentes erosivos (Tayupanta, 1993). Es por esto que comprender acerca de la erosión hídrica en los Andes ecuatorianos con climas tropicales, es fundamental para el desarrollo de agricultura sostenible, gestión ambiental y para un suministro de agua estable y de calidad para las poblaciones (Ochoa et al., 2016).

Hoy en día existen numerosos estudios que han tenido como finalidad el cálculo de la erosión del suelo en los Andes. Como por ejemplo, en 1986, el Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica realizó varios análisis sobre la erosión en el Ecuador, en el cual determinaron que la precipitación es el factor erosivo más agresivo y preponderante ya que actúa en el país con fuertes intensidades e importantes alturas pluviométricas según las regiones. Además, estos estudios toman en cuenta la magnitud de la acción de las gotas de lluvia, diciendo que ésta es proporcional a cantidad de las mismas y a su fuerza de impacto, dependiendo a su vez del diámetro y velocidad de caída. Por otra parte, Ochoa, et al (2015) estimaron la erosión en la zona sur de los Andes; ellos identificaron a la cobertura del suelo como el principal factor de riesgo de erosión. A pesar de lo anterior, no descartaron que al tener condiciones climáticas y topográficas extremas en la cordillera, la erosión podría incrementar significativamente y por lo tanto también la degradación del suelo. Más adelante, (Ochoa et al., 2016) realizaron un estudio en la ciudad de Loja, teniendo como fin conocer la influencia de las condiciones



climáticas, cubierta terrestre y la topografía en el índice de erosividad. Para su cálculo se utilizó el Índice Modificado de Fournier, con datos proporcionados por pluviómetros. Ellos concluyeron que en el momento en donde se registra una tasa de lluvia elevada, la vulnerabilidad a la erosión del suelo incrementa. Es decir, existe una relación proporcional al factor de erosividad de las lluvias, considerando a este parámetro indispensable para el análisis. Por el contrario, otros autores como Sorensen & Yanites (2019) se basan en simulaciones de lluvia para su estudio, en el cual utilizan la herramienta Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Ellos señalan que a medida que la intensidad de una tormenta incrementa el índice de erosividad es mucho mayor. Además, indican que el principal desafío para el cálculo de la erosión es identificar cuáles son los factores que tienen mayor influencia en el mismo, los cuales varían de región a región.

De acuerdo con la mayoría de los estudios antes mencionados, el principal objetivo ha sido calcular la erosión del suelo, mas no la erosividad de la lluvia en sí. No obstante, como ya es de conocimiento, para este análisis es necesario determinar el valor de la erosividad de la lluvia, ya que este es un factor obligatorio al utilizar la herramienta de cálculo USLE. Por lo que es importante mencionar que la precipitación al ser el proceso desencadenante de la erosión hídrica, debería ser estudiada con una mayor profundidad, tomando en cuenta la energía cinética de las gotas de lluvia como un parámetro esencial al momento de calcular el índice de erosividad.

En la actualidad ya existen una variedad de estudios sobre el tema mencionado, en los que se utilizan instrumentos avanzados, como el disdrómetro y el Micro Rain Radar (MRR). Por ejemplo, Angulo-Martínez & Barros (2015), desarrollaron su estudio en las montañas del sur de los Apalaches (Canadá), utilizando dos tipos de disdrómetro (Parsivel1 y Parsivel2); en el cual determinan los valores de energía cinética e intensidad para diferentes eventos de lluvia, utilizando los datos de cada equipo, para de esta manera poder analizar la incertidumbre en la medición de estas variables en los estudios de erosión del suelo. Por otro lado, en la India, Jash et al. (2019) enfocaron su investigación en la comparación de la distribución del tamaño de gotas (DSD) con ambos instrumentos (Micro Rain Radar y Disdrómetro); con el mismo fin de estudiar la DSD y las intensidades de precipitación; Petan, Rusjan, Vidmar, & Mikoš (2010) instalaron un pluviómetro y un disdrómetro en cada zona de estudio (Koseze y Kozjane,



Eslovenia). Ambos estudios resaltan la importancia de tener medidas exactas del DSD para el cálculo de la erosión hídrica. Desde otra perspectiva, Fischer et al. (2016) analizaron la variabilidad espacio-temporal de la erosividad estimada al sur de Alemania, a partir de datos de lluvia de radar proporcionados por el Servicio Meteorológico Alemán, RADOLAN (RADAR OnLine-ANeichung). RADOLAN posee una red de 17 radares meteorológicos, suministrando datos de alta resolución espacio-temporal ($1 \times 1 \text{ km}^2$, 5 min). Ellos destacan que al contar con una cobertura completa y mediciones de radar con alta resolución espacio-temporal, se vuelve innecesario la extrapolación de la erosividad a partir de datos de intensidad de los pluviómetros. En resumen, los autores concluyen que la influencia del tipo de sensor y la precisión del mismo, debería tomarse en cuenta en los estudios de erosión del suelo; ya que las medidas exactas de la DSD y de las velocidades de caída de las gotas de lluvia son esenciales para determinar la erosión causada por las lluvias.

Por lo expuesto anteriormente, es evidente que contando con una serie de datos más precisos y abarcando un mayor número de áreas de estudio, se podrían realizar diversas investigaciones que contribuyan de gran manera en el análisis de la erosividad de la lluvia en el Ecuador. Entre las posibles investigaciones que se pueden realizar, se deberían considerar diferentes perspectivas ya aplicadas en algunas partes del mundo, como por ejemplo: Panagos et al. (2015) calculan la erosividad de las precipitaciones en 1541 estaciones de precipitación en Europa, para de esta manera poder proponer una base de datos para todos los países de la Unión Europea. Otro estudio a señalar corresponde al realizado por Ballabio et al., (2017) en el cual desarrollan una representación cartográfica estacional de la erosividad de la lluvia en diferentes países de Europa. Y por último, el estudio realizado por Panagos et al. (2017), el cual tuvo la finalidad de estimar la erosividad futura de la lluvia, en Europa para el año 2050.

En conclusión, las estimaciones cuantitativas de la erosividad de la lluvia y más importante aún de la erosión hídrica, en la zona andina, rara vez han sido reportados en la literatura. Además, los pocos estudios se realizan con datos provenientes de pluviógrafos, los cuales no pueden medir el diámetro de las gotas ni su velocidad de caída, por lo cual no es posible calcular con precisión la energía cinética de la lluvia y consecuentemente su erosividad. Es decir, dos eventos de lluvia con la misma intensidad en media hora pueden obtenerse por diversos motivos: (a) una lluvia con



gotas de gran diámetro y una alta velocidad de caída, o (b) una lluvia con gotas de pequeño diámetro y baja velocidad. Evidentemente la lluvia (a) será más erosiva que la (b), pero con datos de pluviómetros no es posible encontrar diferencias.

Por esta razón, es de vital importancia que se profundicen los estudios acerca de la erosividad de la lluvia con datos de sensores que permitan registrar el DSD. En caso de contar con estos datos, se podrían planificar procesos de manejo y conservación del uso de suelo dependiendo de su riesgo a la erosión.

Para contribuir a la generación de conocimiento en el tema, el objetivo de esta tesis es analizar la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación. En este caso se puede lograr el objetivo, al contar con datos de sensores avanzados como el MRR y disdrómetros en el sitio de estudio del campus Balzay de la Universidad de Cuenca.

Para ello se tienen 2 objetivos específicos:

- Determinar la relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia con respecto al índice de erosividad a partir de datos de radar vertical.
- Identificar las características de formación de la lluvia para los eventos considerados como erosivos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la ciudad de Cuenca, en el sur del Ecuador, a 2600 m s.n.m. Dentro de la ciudad, el sitio de estudio está ubicado en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca al noroeste de la ciudad en las coordenadas UTM WGS84 7718269.41 m E; 9680152.77 m S,. El sitio cuenta con mediciones de datos meteorológicos mostrando la siguiente caracterización: temperatura media anual de 14 °C, humedad relativa de 77,17% y una precipitación media anual aproximada de 969 mm.

2.2 Monitoreo

El período de monitoreo fue de 1 año, febrero 2017 - febrero 2018. Los sensores utilizados fueron: un Micro Rain Radar (MRR-2) (Meteorologische Messtechnik GmbH, Germany) y un Láser Precipitation Monitor o disdrómetro (Thies Clima, Germany).

El MRR-2 funciona mediante radiación electromagnética, la cual es transmitida verticalmente a la atmósfera proporcionando datos de contenido de agua, altura, velocidad, intensidad de la lluvia y distribución del tamaño de gotas (DSD).

La DSD es la distribución del número de gotas de lluvia según su diámetro, esta va a depender de (D) y $N(D) dD$; donde D es el diámetro de caída en mm y $N(D) dD$ es el número de partículas por unidad de volumen en el rango de diámetros (Uijlenhoet & Stricker, 1999). El MRR tiene un rango de 64 diámetros.

Este radar está programado para proporcionar datos en intervalos de un minuto, hasta alturas de 3100 m por encima del mismo, medidos en franjas de 100 m.



Ilustración 1: Micro Rain Radar MRR-2

Fuente: GEONICA, S.A., 2017

El disdrómetro laser tiene como función cuantificar la precipitación en el momento en que la gota cruza el haz de laser que emana la cabeza emisora. Este tipo de disdrómetro tiene la capacidad de diferenciar si una partícula medida es o no un hidrometeoro. Este equipo está configurado para proporcionar información cada 5 minutos, determinando, el tipo de precipitación, la intensidad y el espectro de gotas.

El espectro de gotas, está representado por una matriz en la cual se encuentra el número de gotas obtenidas sobre un diámetro y una velocidad específicos. La matriz es de 22 x

20 clases (22 clases de diámetros y 20 clases de velocidades), es decir 440 clases (Adolf Thies, 2010). Sin embargo, es necesario aplicar una máscara de validación de datos para descartar valores erróneos; debido a que las partículas de lluvia con menor diámetro no alcanzan grandes velocidades al caer y por el contrario las partículas con mayor diámetro no pueden caer a bajas velocidades. Obteniendo como resultado final 76 clases.



Ilustración 2: Disdrómetro Laser Thies

Fuente: Adolf Thies, 2010



Ilustración 3: Principio de medición del Disdrómetro Laser Thies

Fuente: Adolf Thies, 2010

2.3 Relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia en el índice de erosividad, a partir de datos de radar vertical.

Para determinar la relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia en el índice de erosividad, primero se identificaron los eventos erosivos a partir de los valores de intensidad en 30 minutos dentro del periodo de estudio. Posteriormente, se calcularon la energía cinética y los índices de erosividad para cada evento. A continuación se detalla lo mencionado:

2.3.1 Determinación de la intensidad en 30 minutos, i_{30}

Para la determinación del i_{30} se aplicó una ventana móvil, la misma que crea una lista de valores, en la cual cada uno es resultado de la suma de un subconjunto de los datos de lluvia originales, en este caso de cada 30 minutos. Es decir, esta herramienta permite construir una serie de datos de intensidades registradas en 30 minutos, a partir de las observaciones realizadas por el disdrómetro láser cada 5 minutos, suma los volúmenes



registrados y divide para el tiempo (30 min), en la que se va añadiendo sucesivamente un dato nuevo y quitando, al mismo tiempo, el más antiguo de los datos incluidos en la suma anterior.

2.3.2 Selección de los eventos erosivos

Para determinar el índice de erosividad (EI) en los eventos de lluvias individuales existentes en la serie temporal i30 obtenida en el paso anterior, es necesario seleccionar lo que diferentes autores denominan “eventos erosivos” (Bizzarri & Eva Colotti, 1999). La forma de definir un evento erosivo ha cambiado de acuerdo al criterio de diferentes autores, como Wischmeier & Smith (1958, 1978), Lal (1979), Páez (1980), etc. Estos toman en cuenta el contenido de agua de cada evento; los valores pueden variar de 7.5 mm a 25 mm, pero dependen mucho de la climatología de cada zona. Sin embargo, no existe un criterio estandarizado que permita identificar un evento como erosivo.

En este estudio se realizó un análisis mediante percentiles para identificar los eventos más fuertes. Para lo cual se realizó el siguiente procedimiento: a) se ordenaron los datos obtenidos de los i30 de menor a mayor, b) se determinaron los percentiles, c) se graficaron los i30 de acuerdo a los percentiles y d) se tomó en cuenta la tendencia de la curva y sus puntos de inflexión para la selección de eventos.

2.3.3 Determinación del potencial erosivo

Wischmeier & Smith, (1958) establecieron la siguiente ecuación para determinar el EI eventos individuales; en la cual se relaciona la energía cinética (Ec) y la intensidad máxima en 30 minutos (i30) como se muestra en la ecuación 1.

$$EI = EC * I30 \quad (1)$$

Donde:

EI = Índice de Erosividad

EC= Energía Cinética

I30 = Intensidad máxima en 30 minutos

Shin, Park, & Choi (2016) establecen que la energía cinética de la lluvia es el resultado de la suma de las energías cinéticas de cada una de las gotas que individualmente llegan al suelo. Para esto, se requiere conocer las mediciones exactas de tamaño y velocidad de caída de las gotas. Por esta razón, para determinar la energía cinética se consideró la ecuación establecida por José A. Fernández Yuste & Margarita Roldán Soriano (2006) que se muestra a continuación:

$$EC = \frac{\Pi * \rho}{12 * 10^3} \sum_1^n D_i^3 V_i^2 \quad (2)$$

Donde:

ρ = Densidad del agua

D= Diámetro

V= Velocidad

2.3.4 Relaciones entre la velocidad de caída y el tamaño de partículas con los eventos de lluvia de acuerdo a su potencial erosivo.

Para establecer las relaciones existentes entre estas variables y el índice de erosividad se realizaron correlaciones simples. Además, para determinar la relación que tienen estas dos variables combinadas con el índice de erosividad se realizó una correlación múltiple.

Conjuntamente, se realizó una representación temporal de estas variables en cada uno de los eventos, teniendo en cuenta los periodos de 5 minutos.

2.4 Identificación de las características de formación de la lluvia para los eventos considerados como erosivos.

A continuación se especifica el proceso llevado a cabo para determinar las características que tiene la lluvia a lo largo de su distribución vertical y posteriormente analizar las relaciones existentes entre las características (altura de origen de la lluvia, distribución del diámetro de gotas y velocidad de caída) y el índice de erosividad, correspondientes para cada evento. Para esto se utilizó la información del Micro Rain Radar, MRR.

2.4.1 Relaciones entre la altura de origen de la lluvia, distribución del diámetro de gotas y velocidad de caída en su nacimiento con el potencial erosivo.

- **Altura de origen**

Para relacionar la altura de origen de la lluvia con el potencial erosivo, se crearon gráficos de contorno, utilizando los paquetes `matplotlib.pyplot` y `matplotlib.colors` del programa Python 3.7. En estos gráficos se representa en el eje x el tiempo y en el eje y la cantidad de precipitación registrada en cada uno de los 31 rangos de altura que abarca el MRR.

- **Velocidad de caída**

En cuanto a la velocidad de caída de las gotas, se realizó el mismo procedimiento que para la altura. Sin embargo, en este caso se utilizó la velocidad de caída de las gotas, ya que el Radar proporciona un promedio de las velocidades para cada minuto en cada uno de los 31 rangos altitudinales.

- **Distribución del diámetro de gotas**

Finalmente, para relacionar la distribución del diámetro de gotas con el potencial erosivo, se hizo un promedio de $N(D) dD$ (número de partículas por unidad de volumen y por unidad de diámetro) durante todo el periodo evaluado en cada evento. Obteniendo así, al graficar, curvas en las que se representa la distribución del tamaño de gotas para cada uno de los rangos.

Es importante tener en cuenta la variabilidad de la distribución del tamaño de gotas (DSD), ya que pueden existir diferentes DSD a semejantes tasas de lluvia (Orellana Alvear, Célleri, Rollenbeck, & Bendix, 2017). Dicho en otras palabras, aunque los valores de intensidad de los diferentes eventos sean similares, la distribución del tamaño de gotas no será la misma: en unos casos podemos tener pocas gotas gruesas y en otros casos muchas gotas finas que en total dan un mismo volumen.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Relación entre el tamaño y la velocidad de caída de las partículas de lluvia en el índice de erosividad, a partir de datos de radar vertical.

A continuación se detallan los resultados obtenidos para encontrar el índice de erosividad y posteriormente las relaciones entre este índice y el tamaño y velocidad de caída de las partículas.

3.1.1 Determinación del i_{30}

A partir de la metodología de la ventana móvil se obtuvo una serie de datos con 17020 valores de i_{30} , que oscilan entre 0.01 mm/30 min y 27.42 mm/30 min.

3.1.2 Selección de los eventos erosivos.

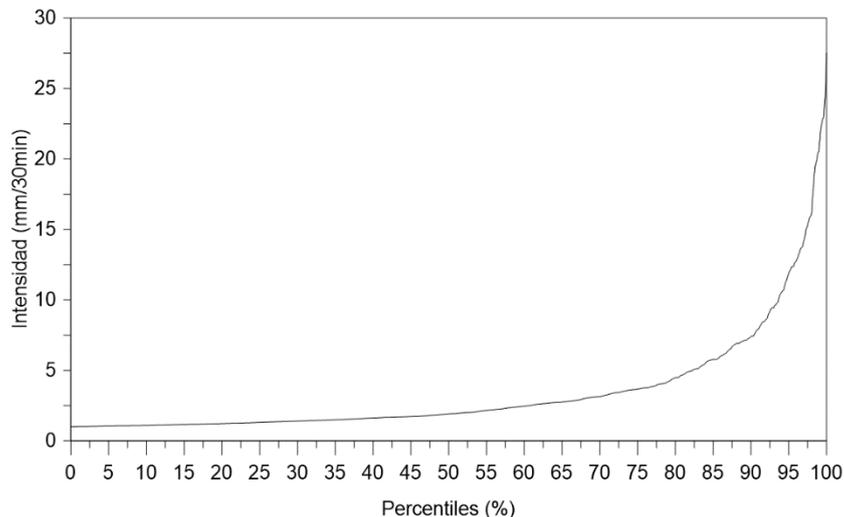


Figura 1: Representación de los i_{30} mediante percentiles

Fuente: Autores, 2019

En la Figura 1 se puede observar que la tendencia de incremento de la curva se mantiene relativamente constante hasta un 50 % con valores inferiores a los 2 mm/30 min. Después del 50% se observa una diferente tendencia siendo el incremento ligeramente mayor (2 mm/30 min a los 10 mm/30min). Al llegar al 95 % la tendencia de incremento

se vuelve significativamente mayor a las anteriores sobrepasando los 10 mm y alcanzando los 27.42 mm en 30 minutos.

Por este motivo, se decidió tomar en cuenta los eventos que se encuentran en el último 5 %, siendo estos los eventos más fuertes registrados en nuestro periodo de estudio; obteniendo valores de intensidad desde los 10.06 mm/30min. Además, este valor se encuentra dentro de los parámetros que consideran otros autores como: Wischmeier & Smith (1958, 1978), Lal (1979), Páez (1980), etc., para sus estudios. A partir de lo anterior se seleccionaron los 5 eventos de lluvia a lo largo del periodo de estudio (Ver Tabla 1) para realizar los estudios detallados.

Tabla 1: Eventos de 30 minutos seleccionados para el estudio

Eventos	Fecha	Inicio del evento	Fin del evento	i30 (mm / 30min)
Evento 1	28/02/2017	14:45	15:15	11.81
Evento 2	10/03/2017	15:05	15:35	27.42
Evento 3	04/10/2017	14:45	15:15	10.06
Evento 4	27/12/2017	16:25	16:55	12.38
Evento 5	28/12/2017	16:25	16:55	13.84

Fuente: Autores, 2019

En la Figura 2 se puede observar la evolución que tiene cada uno de los eventos de precipitación seleccionados en la serie temporal. Como se puede apreciar, cada evento tiene su propia secuencia; por ejemplo: en los eventos 1 y 4 la mayor cantidad de precipitación se concentra en la mitad del evento, existiendo menor cantidad de lluvia al inicio y al final del mismo. Por otro lado, el evento 2 se mantiene relativamente constante durante todo el periodo de tiempo, con una precipitación mínima de 3.3 mm/5min y máxima de 5.94 mm/5min. En el evento 3, las mayores tasas de lluvia se encuentran en los 10 primeros minutos del evento, reduciéndose considerablemente en los siguientes 20 minutos. Por el contrario, el evento 5 está caracterizado por tener una mayor concentración de lluvia los primeros 20 minutos, con tasas de lluvia entre 2.12 mm/5min y 4.07 mm/5min, presentando una menor concentración en los últimos 10 minutos.

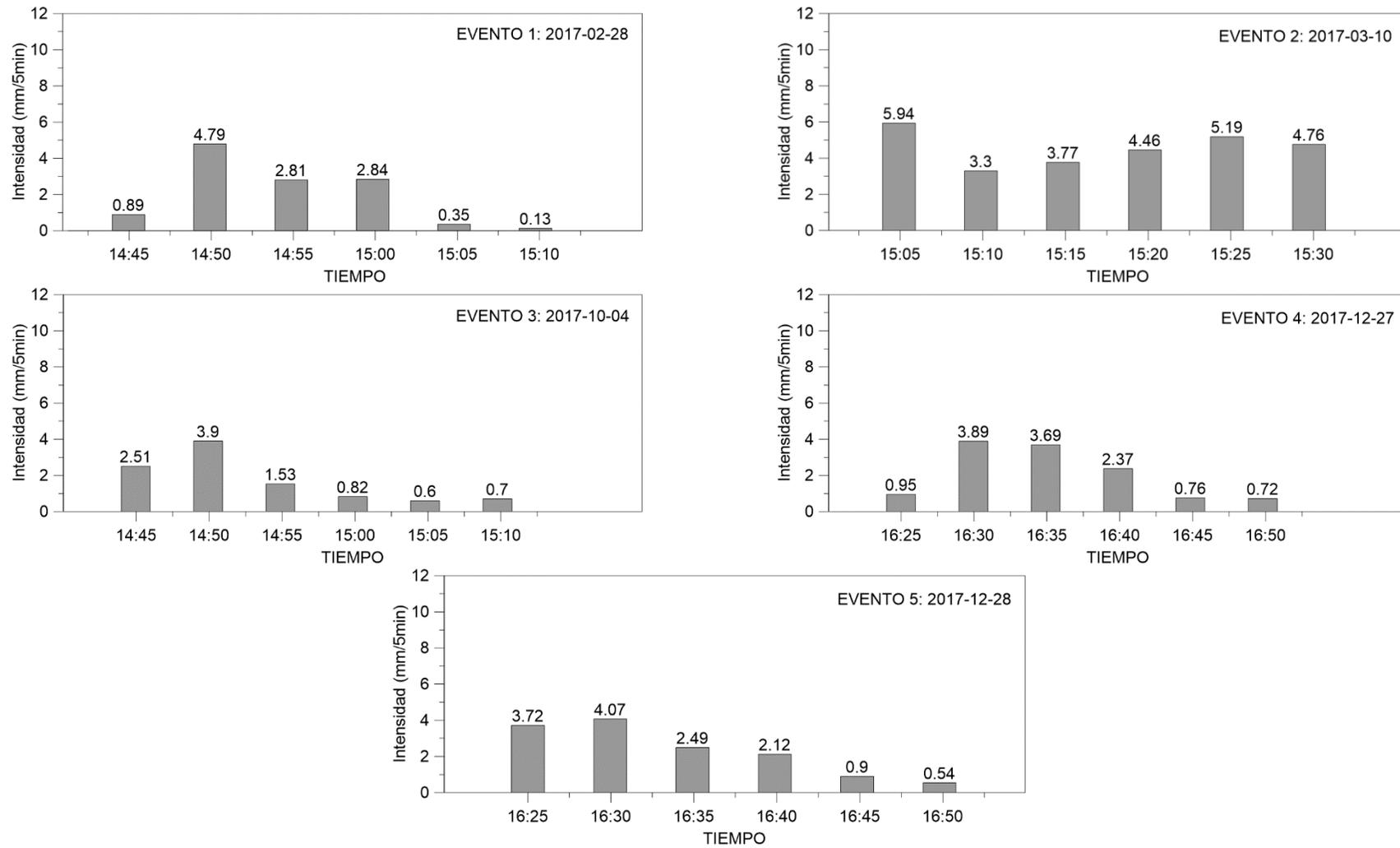


Figura 2: Evolución de los eventos de precipitación en la serie temporal
Fuente: Autores, 2019

3.1.3 Determinación del potencial erosivo de los eventos identificados

Aplicando los procedimientos establecidos anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2: Índices de Erosividad (EI), calculados a partir de la ecuación 1

Eventos	Fecha	EI (MJ mm/30min ha)
Evento 1	28/02/2017	75.33
Evento 2	10/03/2017	379.81
Evento 3	04/10/2017	48.65
Evento 4	27/12/2017	83.61
Evento 5	28/12/2017	101.38

Fuente: Autores, 2019

En la Tabla 2 están representados los índices de erosividad de cada evento, teniendo en cuenta el procedimiento antes explicado. Los resultados obtenidos en el EI obtuvieron un valor mínimo de 48.65 MJ mm/30min ha y un valor máximo de 379.81 MJ mm/30min ha.

3.1.4 Relaciones entre la velocidad de caída y el tamaño de partículas con los eventos de lluvia clasificados de acuerdo a su potencial erosivo.

En este estudio, el análisis de la correlación entre la velocidad de caída de gotas y el índice de erosividad arrojó como resultado que no existe correlación entre dichas variables, obteniendo un resultado de R^2 de 0.4277, como se observa en la Figura 3. En cambio, para la correlación entre el tamaño de partículas y el índice de erosividad se determinó que existe una mayor correlación con un resultado de R^2 de 0.7347, como se observa en la Figura 4.

Por otro lado, al realizar la correlación múltiple entre estas tres variables, es decir entre la velocidad de caída de gotas, el tamaño de partículas y el índice de erosividad, se

obtuvo un R^2 de 0.7561. Comprobando que al combinar estas dos variables existe una mayor correlación con el índice de erosividad.

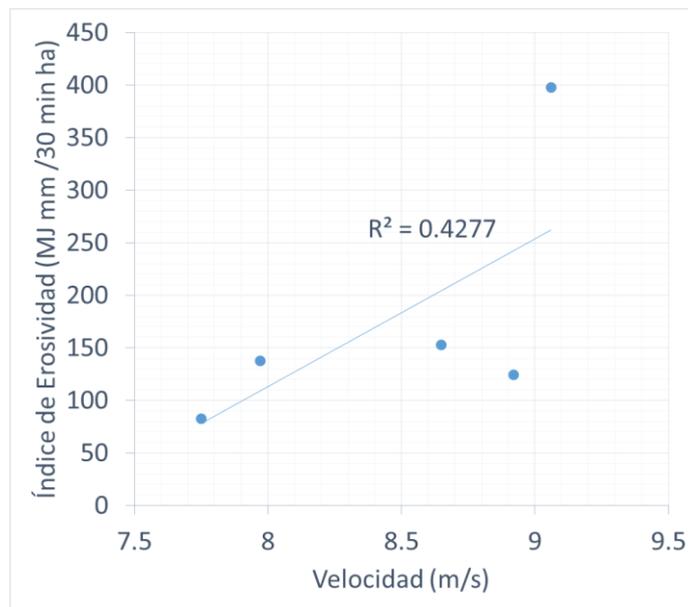


Figura 3: Correlación entre la velocidad de caída de gotas y el índice de erosividad
Fuente: Autores, 2019

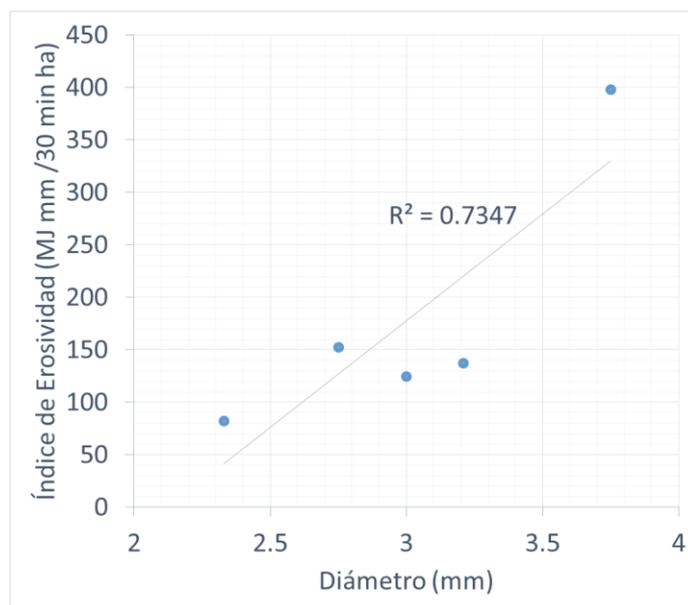


Figura 4: Correlación entre el tamaño de partículas y el índice de erosividad
Fuente: Autores, 2019

Para poder comprender de mejor manera la influencia que tienen la velocidad y el diámetro de gotas en el índice de erosividad, es necesario representar de forma gráfica la energía cinética, ya que la misma está relacionada directamente con estas dos

variables. Además, se graficó la intensidad ya que el número de gotas va a depender de la cantidad de lluvia en ese tiempo. Es decir que para tasas de lluvia pequeñas existió menor cantidad de gotas, y por el contrario para tasas de lluvias mayores el número de gotas era mayor. El comportamiento temporal de los 5 eventos que se describe a continuación, puede observarse en la Figura 5.

En el evento 1 se puede observar que las intensidades varían considerablemente en cada paso del tiempo, existiendo intensidades mínimas de 0.13 mm/5min y máximas de 4.79 mm/5min. Los diámetros oscilan entre 1 mm y 5.5 mm aproximadamente y las velocidades se encuentran entre un rango de 5.40 m/s y 9.6 m/s. El índice de erosividad es de 75.33 MJ mm/30min ha, este se ve principalmente influenciado por el valor de la intensidad (4.79 m/5min), y por el alto valor obtenido en la energía cinética debido a las características de las gotas (tamaño y velocidad) entre las 14:50 PM y 14:55 PM; el valor de la energía cinética en este paso de tiempo es relativamente alto en comparación a los valores existentes en el resto del tiempo de este evento.

En el evento 2 se obtuvo el mayor índice de erosividad, alcanzando un valor de 379.81 MJ mm/30min ha. Esto se debe principalmente a que la tasa de lluvia de cada paso de tiempo se mantiene superior a los 3.30 mm/5min, alcanzando los 5.94 mm/5min como máximo valor. Además, se debe considerar que los diámetros de gota también son altos y oscilan entre 3 mm y 5 mm aproximadamente. Las velocidades de caída también son altas y se mantienen constantes en el periodo de 30 minutos, con un valor de 9.06 m/s.

En el evento 3, en cambio se obtiene el índice de erosividad más bajo (48.65 MJ mm/30min ha), esto puede atribuirse a que a pesar de que los primeros 10 minutos los valores de intensidad, diámetro y velocidad sean considerables, los 20 minutos siguientes bajan notablemente, obteniendo valores mínimos de 0.60 mm/5min, 1.25 mm y 6.20 m/s, respectivamente, reduciendo el valor de la energía cinética y a su vez del índice de erosividad.

El evento 4 tiene un comportamiento similar al evento 1; sin embargo, el valor del índice de erosividad se reduce a 83.61 MJ mm/30min ha. Esto se debe principalmente a que la intensidad máxima es de 3.89 mm/5min, y que aunque las velocidades sean altas



y se mantengan constantes entre un rango de 8.65 m/s y 9.06 m/s, los valores del diámetro más influyentes no sobrepasan los 4 mm.

Finalmente al analizar el evento 5, se observa que los primeros 20 minutos son de gran influencia para el índice de erosividad, ya que la tasa de lluvia se mantiene en un rango de 2.12 mm/5min y 4.07 mm/5min, con diámetros de gotas entre 3 mm y 3.5 mm; y una velocidad de caída constante de 9.06 m/s. Debido a estas características el índice de erosividad alcanza los 101.38 MJ mm/30min ha, siendo el segundo más alto.

En resumen, las velocidades de caída y la distribución del tamaño de gotas que se presenten en cada evento, van a tener una gran influencia en el resultado del índice de erosividad, dependiendo no solo del valor de cada una, sino de su combinación en cada paso de tiempo y también del comportamiento que tengan a lo largo del evento. Es decir, si se mantienen constantes o son muy variables. Los eventos 2 y 5, con mayores índices de erosividad están combinados por gotas con diámetros relativamente grandes entre los 3 mm y 5 mm, y además mantienen altas velocidades de caída de gotas, constantes, de aproximadamente 9 m/s. Por otro lado, los eventos 1 y 4, están caracterizados por una variedad de diámetros de gotas entre 1 - 5.5 mm, y 2 - 4 mm respectivamente, y cabe recalcar que las velocidades en estos eventos no se mantienen constantes, por lo que sus índices de erosividad son cercanos entre ellos, pero inferiores a los eventos 2 y 5. En último lugar, el evento 3 está conformado en su gran mayoría por gotas con diámetros y velocidades bajas, lo que se ve reflejado en el índice de erosividad obtenido, siendo el menor de todos.

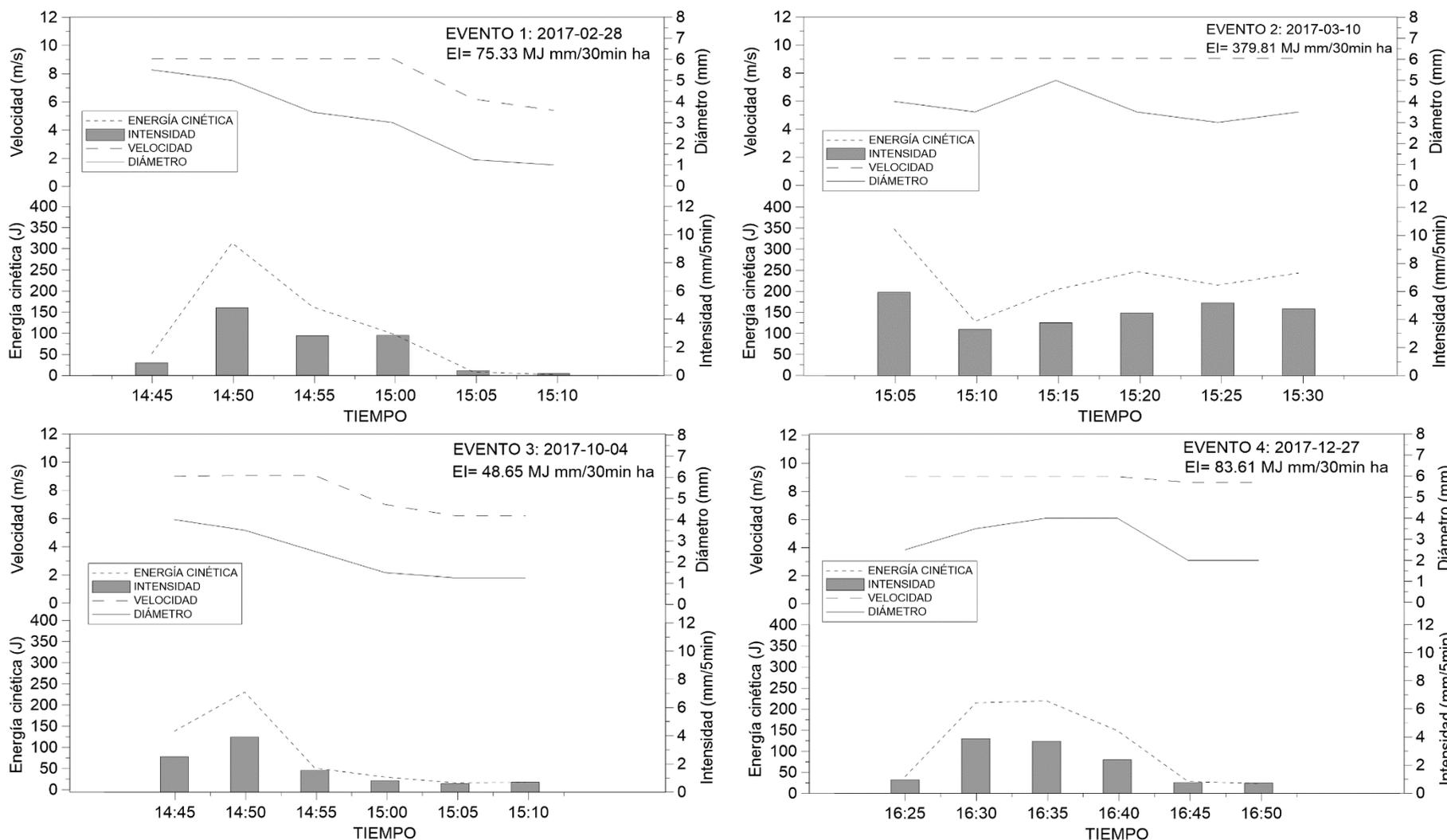


Figura 5: Relaciones entre el diámetro, la velocidad, la energía cinética y la intensidad de los eventos seleccionados; con los valores del índice de erosividad

Fuente: Autores, 2019

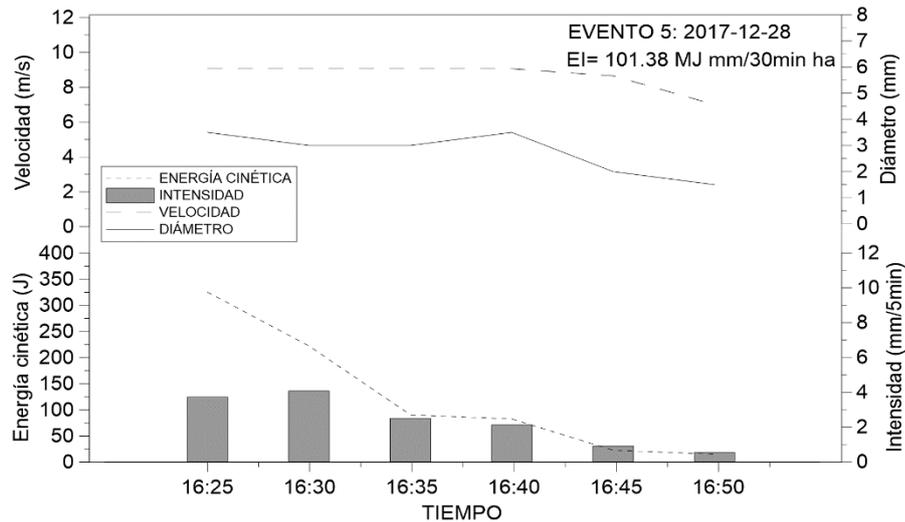


Figura 5: Relaciones entre el diámetro, la velocidad, la energía cinética y la intensidad de los eventos seleccionados; con los valores del índice de erosividad (continuación)

Fuente: Autores, 2019.

3.2 Identificación de las características de formación de la lluvia para los eventos considerados como erosivos.

3.2.1 Relaciones entre la cantidad de precipitación en el perfil vertical con el potencial erosivo

La cantidad de precipitación registrada en las alturas sobre los 500 metros, es muy variada en algunos eventos, por lo que no existe un patrón único, como se puede apreciar en la Figura 6. Sin embargo, si observamos el comportamiento que tiene la precipitación por debajo de los 500 metros, se puede apreciar que tiene cierta concordancia con los valores obtenidos del índice de erosividad, como se explica a continuación:

En los eventos en los que la lluvia presenta una cantidad de precipitación constante, el índice de erosividad tiende a ser mayor. Por ejemplo, el evento 2 es el evento con un mayor índice de erosividad (379.81 MJ mm/30min ha), y se puede observar que la precipitación se mantiene con valores constantes entre los 0.65 mm/min y 1.60 mm/min, en la mayoría de los rangos de la columna vertical, con una pequeña presencia de valores alrededor de los 0 mm/min.



Algo similar ocurre con el comportamiento de la lluvia en el evento 5, que es el que tiene el segundo índice de erosividad más alto (101.38 MJ mm/30min ha). En los primeros rangos de la columna vertical (100 – 1500 metros) su comportamiento es bastante parecido al evento 2, con valores de precipitación un poco más bajas. Sin embargo, sobre los 1500 metros su comportamiento es totalmente diferente, en este evento, los primeros 15 minutos existe una gran parte con valores precipitaciones cercanos o iguales a 0 mm/min.

Por otro lado, en los eventos 1 y 4 con índices de erosividad cercanos (75.33 MJ mm/30min ha y 83.61 MJ mm/30min ha respectivamente), el comportamiento de la lluvia bajo los 1200 metros es similar, presentando valores muy bajos de precipitación en los 5 primeros minutos y en los 15 últimos minutos de cada evento, teniendo una mayor concentración de la precipitación en la mitad del evento. Sobre los 1200 metros, se puede observar que la precipitación es variable, los primeros minutos podemos observar la presencia de lluvia y seguidamente espacios en los que ya no existe precipitación.

Finalmente, el evento 3, presenta un comportamiento totalmente diferente a los 4 eventos antes mencionados. Aquí se puede observar que solo existe ausencia de lluvia en algunos pasos de tiempo sobre los 1800 metros y que bajo los 1800 metros la lluvia se mantiene bajo 1 mm/min. Los 10 primeros minutos se mantiene en valores aproximados a 1 mm/min y en los últimos 20 minutos baja 0.5 mm/min. Debido a este comportamiento, el valor del índice de erosividad es el más bajo, con un valor de 48.65 MJ mm/30min ha.

Cabe indicar que se puede observar una banda de datos erróneos entre los 900 y 1200 m debido a un problema electrónico en el pre-procesamiento de datos del radar, por lo que esta banda no fue tomada en cuenta en los análisis.

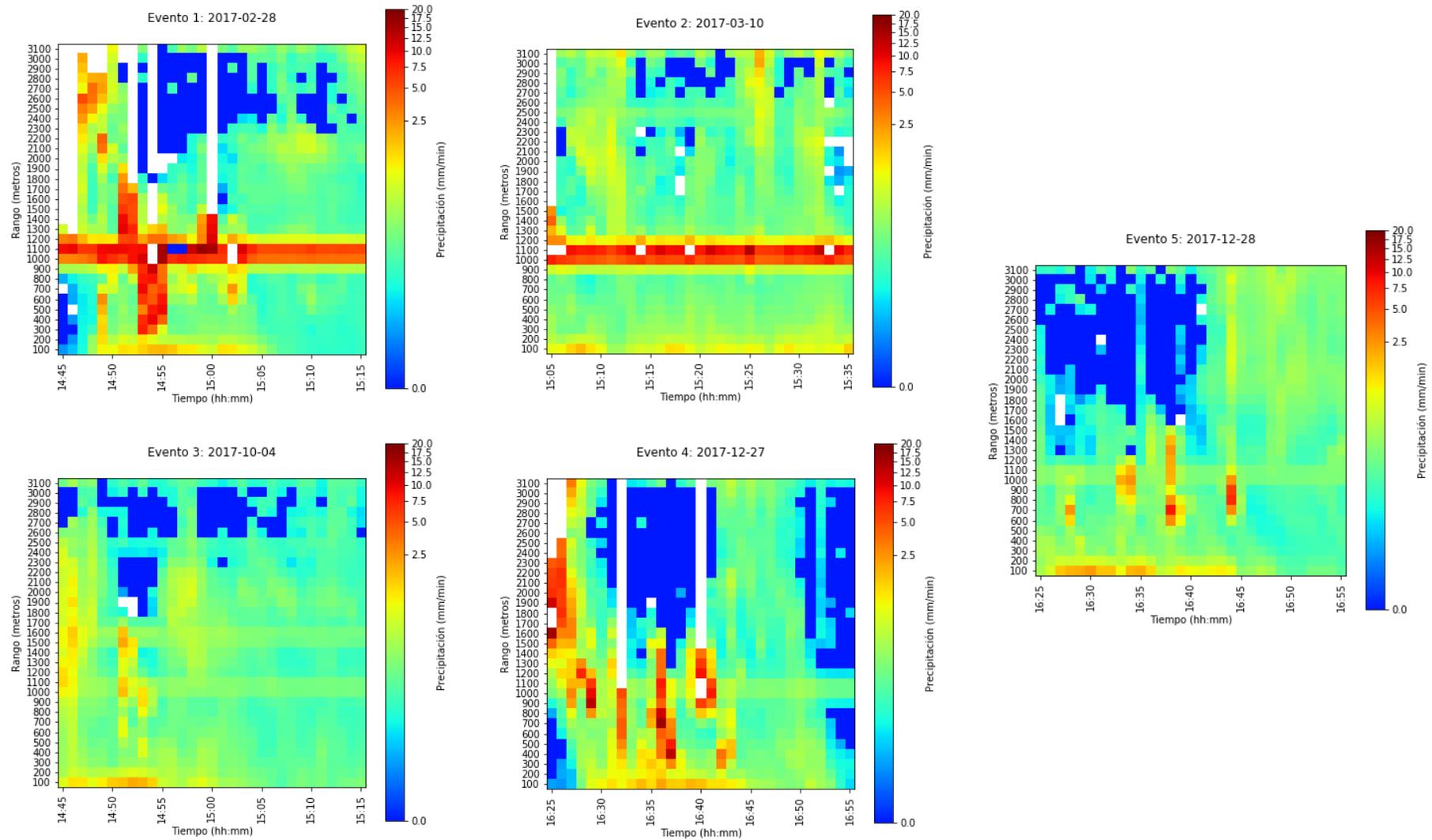


Figura 6: Distribución vertical y temporal de la cantidad de precipitación (mm/min) para los 5 eventos estudiados.

Fuente: Autores, 2019

3.2.2 Relaciones entre la velocidad de caída de la lluvia en el perfil vertical con el potencial erosivo.

El comportamiento que tiene la velocidad a lo largo de la columna vertical para cada uno de los eventos estudiados se puede observar en la Figura 7. Apreciando que prácticamente tiene un comportamiento similar al de la precipitación, explicado anteriormente. Entre los 900 y 1200 m existe una banda de valores atípicos causados en el pre-procesamiento interno del radar que no fueron considerados para el estudio.

En general, se puede apreciar que en todos los eventos existe una clara distribución vertical de la velocidad. En las zonas altas las velocidades alcanzan valores muy bajos, y alrededor de los 1800 metros ya se comienza a notar la presencia de velocidades altas las cuales se mantienen hasta llegar a tierra.

Para el evento 2, se puede observar que la velocidad de la lluvia se mantiene con valores bajos en los rangos más altos de medición y que desde los 1900 metros las velocidades aumentan y se mantienen constantes hasta los rangos más cercanos a tierra. Esto se puede evidenciar durante los 30 minutos analizados, con lluvias alrededor de los 8 m/s y 10 m/s.

El evento 5, muestra un patrón similar al del evento 2, es decir, la velocidad va incrementando a medida que las gotas de lluvia llegan a tierra. Sin embargo, en este evento, como se puede observar en la Figura 8, sobre los 1800 metros de altura las velocidades son significativamente menores, existiendo minutos en los que la velocidad alcanza valores cercanos a 0 m/s. Entre los rangos 800 y 600 metros aún se puede notar la pequeña presencia de velocidades bajas. Sin embargo, desde los 600 metros hacia abajo es donde se empieza a notar velocidades constantes (entre 8m/s y 10 m/s) para los primeros 20 minutos. También se puede apreciar que para los últimos diez minutos analizados, la lluvia aunque también presenta velocidades constantes, se reduce y se encuentra entre velocidades de 6 m/s y a 8m/s.

En resumen, se puede notar claramente que estos dos eventos tienen velocidades altas al llegar a tierra, considerándose ésta, una característica influyente en el valor del índice de erosividad. Ya que estos eventos son considerados los más erosivos con valores de



379.81 MJ mm/30min ha y 101.38 MJ mm/30min ha respectivamente, a comparación de los otros eventos estudiados.

Por otro, en los eventos 1 y 4, el valor del índice de erosividad disminuye, una de las razones para que esto suceda es porque la velocidad no se mantiene constante en todo el periodo. En el caso del evento 1, el periodo con mayores velocidades se encuentra entre las 14:50 PM y 15:05 PM, con velocidades entre los 8.5 m/s y 10 m/s. Sin embargo, aunque en el evento 4 las velocidades se mantengan constantes entre las 16:27 PM y 16:53 PM, las velocidades son menores encontrándose entre los 6 m/s y de 8 m/s. Además, en estos dos casos se puede observar que los primeros y últimos minutos están dominados por velocidades relativamente muy bajas, en el caso del evento 1, con velocidades entre los 4.5 m/s y los 6.5 m/s, y en el caso del evento 4 las velocidades se encuentran entre 2 m/s y 4 m/s.

Finalmente, para el evento 3, la mayor parte de la columna vertical está conformada con velocidades entre 2 m/s y 6 m/s. En los primeros 10 minutos desde el rango 1800 se alcanzan grandes velocidades entre los 8 m/s y 10 m/s y los últimos 20 minutos son dominados por velocidades mínimas de 6 m/s. Debido a que como se mencionó antes la mayor parte del evento este compuesto por velocidades bajas, el índice de erosividad se ve afectado disminuyendo a 48.65 MJ mm/30min ha.

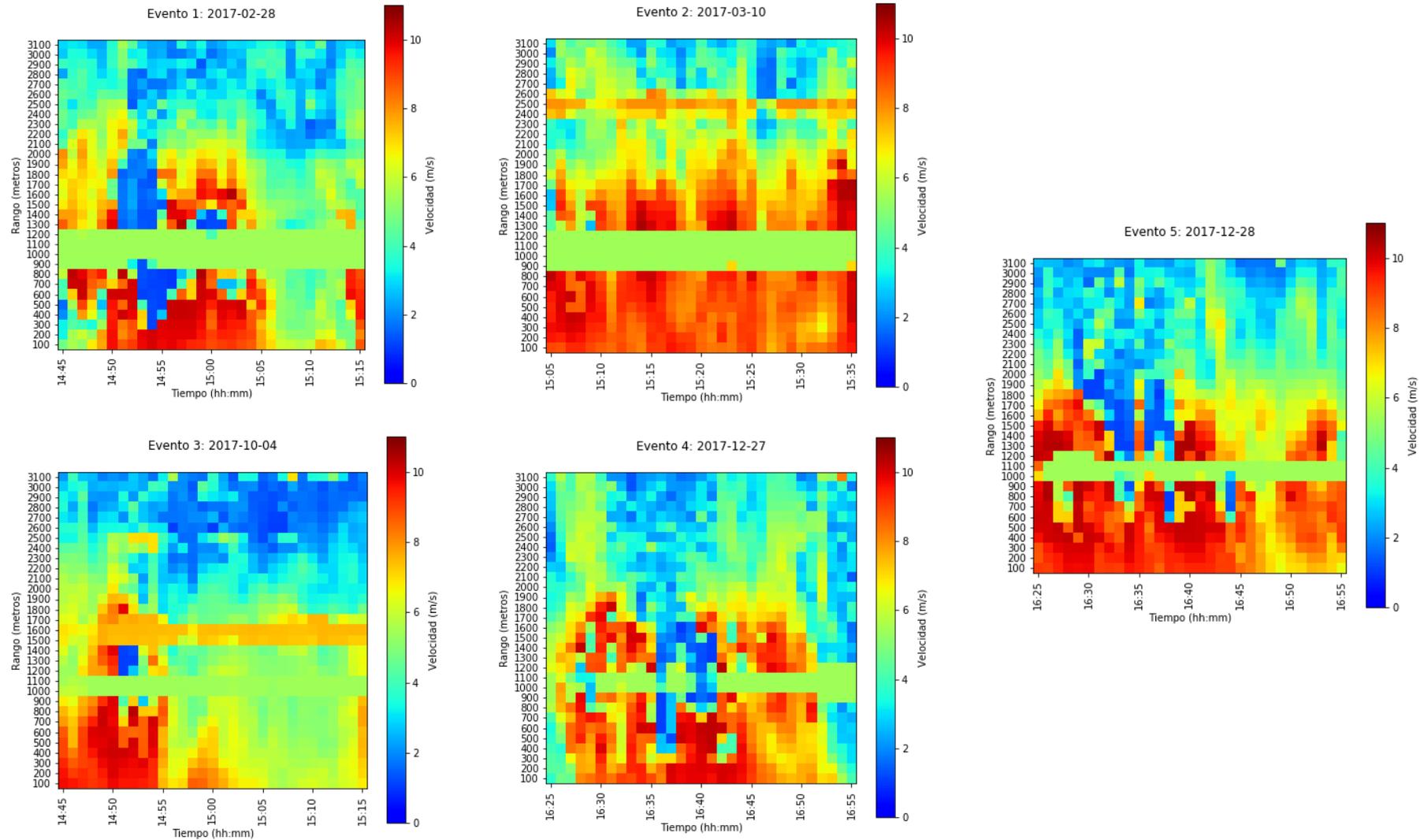


Figura 7: Distribución vertical y temporal de las velocidades (m/s) de caída de las gotas, para los 5 eventos estudiados.

Fuente: Autores, 2019

3.2.3 Relaciones entre la distribución del diámetro de gotas con el potencial erosivo

En la Figura 8 se muestra la tendencia que tiene la distribución del tamaño de gotas para los diferentes rangos, por cada uno de los eventos seleccionados.

En todos los eventos se puede observar un mismo patrón de distribución, es decir, para diámetros pequeños ($D < 2$ mm) existe mayor cantidad de gotas y para diámetros mayores ($D > 2$ mm y < 4 mm) la cantidad de gotas disminuye.

Entre los 200 y 800 metros, la tendencia que siguen las curvas es similar, dependiendo de cada uno de los eventos. En cambio, si nos fijamos en la curva del Rango 100, aunque esta curva sigue la misma tendencia se va separando de las curvas de los rangos superiores, debido a que en este rango aumenta el número de gotas en cada una de las clases de diámetros.

La distribución del tamaño de gotas va a ser diferente entre los eventos, los eventos más erosivos son los que tienen una mayor concentración de gotas grandes. En este caso, los eventos 2 y 5 contienen una mayor concentración de gotas grandes en comparación con los eventos 1, 3 y 4.

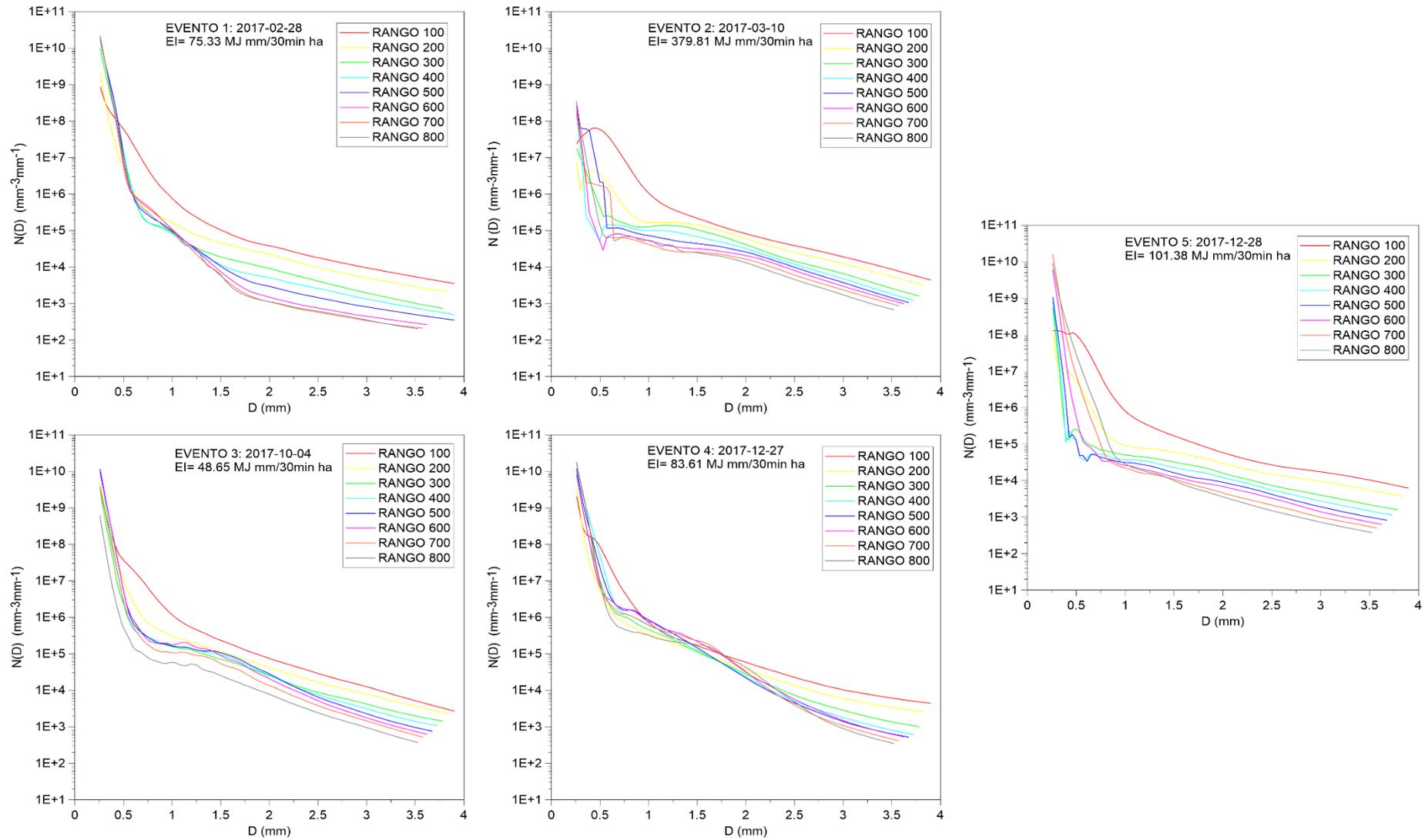


Figura 8: Distribución del tamaño de gotas para los 800 primeros metros del perfil vertical, por cada evento



Fuente: Autores, 2019

4 CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objetivo principal analizar la influencia de las propiedades microfísicas de la lluvia en el índice de erosividad para eventos de precipitación en el sitio de estudio del Campus Balzay de la Universidad de Cuenca. Se estudió el periodo Febrero 2017- Febrero 2018, utilizando datos proporcionados por un disdrómetro láser Thies y un Micro Rain Radar (MRR-2). Una vez finalizado este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se identificaron cinco eventos fuertemente erosivos, cuyos índices de erosividad varían desde 48.65 MJ mm/30min ha hasta 379.81 MJ mm/30min ha. Con el resultado del EI para cada uno de los eventos, se pudo observar que las propiedades microfísicas de la lluvia al estar combinadas tienen una influencia directa sobre la energía cinética y por ende sobre el índice de erosividad.
- La influencia que tienen las gotas pequeñas y velocidades de caída bajas en la energía cinética es significativamente menor a la influencia que tienen las gotas grandes y velocidades de caída altas (presentan mayor energía cinética). Por ende, los eventos que tuvieron una mayor presencia de gotas grandes y velocidades de caída altas, presentaron valores de índices de erosividad mayores.
- Al analizar el comportamiento y las características de la lluvia (velocidad de caída y tamaño de gotas) en el perfil vertical se encontró que existen altas variaciones en la distribución vertical y temporal de las mismas. Observando que la influencia en cuanto al índice de erosividad estuvo de acuerdo a las capas más cercanas a tierra (100 a 400 metros).
- En cuanto a la cantidad de precipitación y la velocidad de caída de las gotas, se observó el mismo comportamiento. Es decir, cuando los eventos estuvieron caracterizados por valores altos de estas variables y se mantuvieron constantes durante el evento de 30 min, el índice de erosividad presentó valores muy altos. Sin embargo, cuando la intensidad de lluvia fue muy variable o discontinua o las velocidades de caída variaron en ciertos intervalos de tiempo, el índice de erosividad presentó valores bajos.



- Respecto a la distribución del tamaño de gotas en el perfil vertical, se encontró que existe el mismo patrón para todos los eventos en los diferentes rangos de altura. Es decir, existió una mayor cantidad de gotas de diámetros pequeños y una menor cantidad de gotas para diámetros grandes. En los eventos con mayor índice de erosividad, hubo una mayor concentración de gotas de lluvia con diámetros grandes.

Trabajos a futuro

Se han identificado varias actividades que pueden servir para futuras investigaciones:

- Analizar la erosividad de la lluvia en diferentes ecosistemas, con el fin de poder conocer si existe una diferencia a nivel geográfico.
- Analizar la influencia que tienen los fenómenos de El Niño y La Niña en la erosividad de la lluvia.
- Aplicar la metodología de este estudio para realizar un cálculo mensual del índice de erosividad, con la finalidad de estudiar el comportamiento en cada mes del año.



5 BIBLIOGRAFÍA

- Adolf Thies. (2010). Manual Laser Precipitation Monitor. Retrieved March 14, 2019, from https://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/01/5.4110.xx_.xxx_.pdf
- Alvarado Cardona, M., Colmenero Robles, J. A., & Valderrábano Almegua, M. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3). Retrieved from <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=10414309>
- Angulo-Martínez, M., & Barros, A. P. (2015). Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains. *Geomorphology*, 228, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.036>
- Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Beguería, S., ... Panagos, P. (2017). Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 579, 1298–1315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.123>
- Beguería, S., Serrano-Notivoli, R., & Tomas-Burguera, M. (2018). Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts. *Science of The Total Environment*, 637–638, 359–373. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.400>
- Besteiro, S. I., & Delgado, M. I. (2011). Evaluación de la agresividad de las precipitaciones en la cuenca del Arroyo El Pescado, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Facultad de Agronomía*, 110, 9.
- Bizzarri, & Eva Colotti. (1999). La erosividad: cualidad de la lluvia poco conocida. *Terra Nueva Etapa*, XV(24), 99–116.
- Cruz, E., Chela, E., Monar, C., & Valverde, F. (2010). Evaluación en la pérdida productiva y económica por la erosión hídrica en tres sistemas de producción en



la microcuenca del Río Alumbre, provincia Bolívar, Ecuador. Presented at the XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Santo Domingo. Retrieved from <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/13.-Elena-Cruz.-Erosion.-INIAP-EESC-Ecuador>

FAO. (1994). *Erosión de suelos en América Latina*. Santiago, Chile: FAO.

Fischer, F., Hauck, J., Brandhuber, R., Weigl, E., Maier, H., & Auerswald, K. (2016). Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data (RADOLAN). *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.024>

Foster, W. D. 1950. A comparison of nine indices of rainfall intensity. *Trans. Am. Geophys. Union*. 31: 894-900.

Geográfica, C. E. de I. (1986). *La erosión en el Ecuador*. Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica.

GEONICA, S.A. (2017). Micro Rain RADAR. Retrieved November 20, 2017, from <http://metek.de/product-group/micro-rain-radar-24-ghz/>

Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. Á., Vázquez-Alarcón, A., & Ruíz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 19(1), 45–66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>

Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo*. Reverte.

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2012). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE).

Jash, D., Resmi, E. A., Unnikrishnan, C. K., Sumesh, R. K., Sreekanth, T. S., Sukumar, N., & Ramachandran, K. K. (2019). Variation in rain drop size distribution and rain integral parameters during southwest monsoon over a tropical station: An



inter-comparison of disdrometer and Micro Rain Radar. *Atmospheric Research*, 217, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.10.014>

José A. Fernández Yuste, & Margarita Roldán Soriano. (2006). ESTIMACIÓN DE LA EROSIVIDAD DE LA LLUVIA A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA.

Lal, R. (1979). Soil erosion problems on an alfisol in western Nigeria and their control. IITA monograph No. 1, Ibadan, Nigeria: IITA, (p. 208).

Nearing, M. A., Yin, S., Borrelli, P., & Polyakov, V. O. (2017). Rainfall erosivity: An historical review. *CATENA*, 157, 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.004>

Ochoa, P. A., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J. I., Ruíz-Sinoga, J. D., & Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *CATENA*, 140, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>

Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., & Boll, J. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes OF Southern Ecuador: SOIL EROSION RISK BY LAND-COVER CHANGE IN SOUTHERN ECUADOR. *Land Degradation & Development*, 26(6), 565–573. <https://doi.org/10.1002/ldr.2219>

Orellana Alvear, J., Célleri, R., Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2017). Analysis of Rain Types and Their Z–R Relationships at Different Locations in the High Andes of Southern Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(11), 3065–3080. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0009.1>

Páez, 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



- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., ... Alewell, C. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511, 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., & Borrelli, P. (2017). Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology*, 548, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006>
- Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., & Mikoš, M. (2010). The rainfall kinetic energy–intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia. *Journal of Hydrology*, 391(3–4), 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.031>
- Petek, M., Mikoš, M., & Bezak, N. (2018). Rainfall erosivity in Slovenia: Sensitivity estimation and trend detection. *Environmental Research*, 167, 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.020>
- Pierre, P. (1986). PAPEL DE LAS PRECIPITACIONES EN LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS. IMPACTO DE LAS LLUVIAS EXCEPCIONALES. Apartado 6596. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-01/23658.pdf.
- Ramírez, F. A., Hincapie, E., & Sadeghian, S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. Retrieved from <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/157>
- 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.
- Risal, A., Lim, K. J., Bhattarai, R., Yang, J. E., Noh, H., Pathak, R., & Kim, J. (2018). Development of web-based WERM-S module for estimating spatially distributed rainfall erosivity index (EI30) using RADAR rainfall data. *CATENA*, 161, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.015>



- Sánchez-Hernández, R., Mendoza-Palacios, J. de D., De la Cruz Reyes, J. C., Mendoza Martínez, J. E., & Ramos-Reyes, R. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *Universidad Y Ciencia*, 29(2), 153–161.
- Semmar, N., & Boulmer-Leborgne, C. (2012). Pulsed laser surface treatment of multilayer gold–nickel–copper (Au/Ni/Cu) coatings to improve the corrosion resistance of components in electronics. In *Laser Surface Modification of Alloys for Corrosion and Erosion Resistance* (pp. 109–123). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095831.1.109>
- Shin, S. S., Park, S. D., & Choi, B. K. (2016). Universal Power Law for Relationship between Rainfall Kinetic Energy and Rainfall Intensity [Research article]. <https://doi.org/10.1155/2016/2494681>
- Shin, J.-Y., Kim, T., Heo, J.-H., & Lee, J.-H. (2019). Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea. *CATENA*, 176, 125–144. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.005>
- Sorensen, C. S., & Yanites, B. J. (2019). Latitudinal trends in modern fluvial erosional efficiency along the Andes. *Geomorphology*, 329, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.030>
- Tayupanta J. Jorge R. (1993). La erosión hídrica: Procesos, factores y formas. (Boletín Divulgativo No. 229). Quito Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/271/4/iniapscbd229.pdf>
- Torres, D. S. (1994). La lluvia como agente erosivo: formación, distribución, erosividad e interceptación. *Ingeniería Hidráulica en México*, IX, 5–18.
- Tsitsagi, M., Berdzenishvili, A., & Gugeshashvili, M. (2018). Spatial and temporal variations of rainfall-runoff erosivity (R) factor in Kakheti, Georgia. *Annals of Agrarian Science*, 16(2), 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.03.010>



- Uijlenhoet, R., & Stricker, J. N. M. (1999). A consistent rainfall parameterization based on the exponential raindrop size distribution. *Journal of Hydrology*, 218(3–4), 101–127.
- Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39(1–2), 111–126. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00020-1)
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions, American Geophysical Union*, 39(2), 285. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p0028>
- Xie, Y., Yin, S., Liu, B., 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>
- Yin, S., Xie, Y., Liu, B., & Nearing, M. A. (2015). Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4113–4126. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4113-2015>