

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSGRADO

**// CARACTERIZACION FISICA DE LLUVIAS BAJO DOS REGIMENES
PLUVIOMETRICOS Y UN PERFIL ALTITUDINAL EN COSTA RICA**

**Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico del Programa de
Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

por

**✓
AMAEL OMAR JIMENEZ GUERRA**

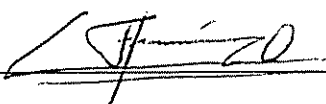
Turrialba, Costa Rica

1996


Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:



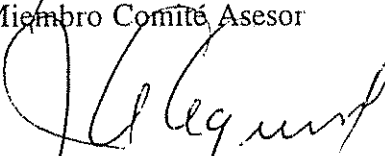
Profesor Consejero



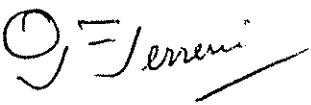
Miembro Comité Asesor



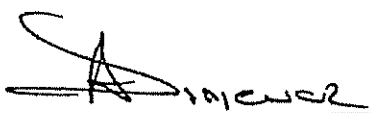
Miembro Comité Asesor



Jefe, Area de Postgrado



Director, Programa de Enseñanza



Candidato

DEDICATORIA

A mi madre:

Brenilda, quien sufre mis penas y goza de mis alegrías, brindandome su insustituible apoyo.

Especialmente a la memoria de mi padre:

Evaristo, quien en vida, me brindo todo su cariño y aprecio.

A mis hermanos *Iris, Ilka, David y Ariel* que con su sacrificio me proporcionaron mi educación profesional.

MELO . . .

AGRADECIMIENTOS

A mi comité asesor:

FRANCISCO JIMENEZ
JORGE FAUSTINO
HERNAN SOLIS

Quienes me brindaron todo su apoyo, para la culminación con éxito de mi trabajo, y demostraron su amistad.

A mis amigos, y compañeros de promoción que me brindaron su amistad y apoyo en los momentos difíciles, ellos son:

Toribio Contreras, Justino González, Jorge Ramos, Raúl Maas, Leslie Salgado, Blanca Navas, Isabel Gutiérrez, María Mendoza, Jefferson Vasconcelos, Ogden Rodas, Lorena Tortos, Mario Talavera, Pablo Dubon, Sergio García, Yudis Heredia, Ernesto Méndez, Nicanor Cabrera, Pedro Pineda, Efraín Espinoza Julio López y Francisco López.

A Marvin Nuñez, Carlos Hernández y Carlos Castillo, por su apoyo irrestricto en la fase de laboratorio.

A Gustavo López, por su colaboración, en el análisis estadístico de mi trabajo.

A Francisco Solano, fotógrafo de CATIE, por el apoyo brindado.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	IX
LISTA DE CUADRO.....	XI
LISTA DE FIGURA.....	XIV
I INTRODUCCION.....	1
II OBJETIVOS.....	4
GENERAL.....	4
ESPECÍFICOS.....	4
III HIPOTESIS.....	4
IV REVISION DE LITERATURA.....	5
4.1 LA PRECIPITACIÓN.....	5
4.2 CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS DE COSTA RICA.....	6
4.3 LA EROSIÓN HÍDRICA.....	9
4.4 PRECIPITACIÓN Y EROSIÓN.....	11
4.5 INTENSIDAD DE LA LLUVIA.....	12
4.6 DURACIÓN DE LAS LLUVIAS.....	14
4.7 FRECUENCIA DE LAS LLUVIAS.....	15
4.8 DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE GOTAS.....	16
4.9 EL IMPACTO DE LA GOTAS DE LLUVIA.....	19
4.10 VELOCIDAD DE CAÍDA DE LAS GOTAS DE LLUVIA Y ENERGÍA CINÉTICA.....	21
V. MATERIALES Y METODOS.....	27
5.1 AREA DE ESTUDIO.....	27

5.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN, DIÁMETRO MEDIO DE LAS GOTAS Y LA CURVA DE CALIBRACION	30
5.2.1 Determinación del volumen medio de las gotas.	30
5.2.2 Determinación del diámetro medio de las gotas.....	31
5.2.3 Obtención de la relación entre diámetro medio de gotas y la masa media de agregados formados.	31
5.3 MUESTREOS DE LLUVIAS NATURALES EN ALAJUELA Y TURRIALBA.....	32
5.4 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LAS LLUVIAS	34
5.5 DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LAS LLUVIAS EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.....	35
5.6 ANÁLISIS DE DATOS	36
VI. RESULTADOS Y DISCUSION	37
6.1 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN, DIÁMETRO MEDIO DE LAS GOTAS Y LA CURVA DE CALIBRACIÓN DIÁMETRO-MASA.	37
6.2 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GOTA Y ENERGÍA CINÉTICA DE LLUVIAS NATURALES EN ALAJUELA Y TURRIALBA.	41
6.2.1 Distribución de tamaño de gotas.....	41
6.2.2 Energía cinética de las lluvias naturales en Turrialba y Alajuela.....	45
6.3 CARACTERÍSTICAS DE LA LLUVIA EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD	51
6.3.1 Duración de las lluvias.....	51
6.3.2 Intensidad de las lluvias	57
6.3.3 Cantidad de las lluvias.....	67
VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
VIII LITERATURA CITADA.....	75
APENDICE	82
ANEXO.....	107

JIMENEZ GUERRA, A. O. 1996. Caracterización física de lluvias bajo dos regímenes pluviométricos y un perfil altitudinal en Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., CATIE. 117 p.

Palabras claves: Lluvia, diámetro de gotas, energía cinética, intensidad, duración, cantidad, variación con la altitud, regimen pluviométrico, erosión.

Resumen

Existe poco conocimiento sobre la mayoría de las características físicas de las lluvias en zonas tropicales, a pesar de su importancia en la erosión de los suelos y en la planificación, diseño e implementación de obras hidráulicas y agrícolas.

El objetivo de este estudio fue contribuir al conocimiento de este tema mediante el análisis de la distribución y tamaño de gotas y energía cinética en dos sitios representativos del régimen Atlántico y Pacífico de precipitación de Costa Rica (Turrialba y Alajuela respectivamente). Además, se estudió la variación de la cantidad, la intensidad y la duración de las lluvias en un perfil altitudinal constituido por 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica (Volcán Irazú, Sanatorio Durán, Coliblanco, Pacayas, San Antonio, Platanillo, CATIE, Diamantes, La Lola y Limón).

Los resultados de esta investigación mostraron que el diámetro promedio de las gotas de lluvia fue mayor en Alajuela (2,76 mm) que en Turrialba (2,30 mm), aunque las diferencias no fueron significativas; el diámetro medio ponderado por el número de gotas fue igual ambos sitios (1,67). El diámetro promedio aumentó con la intensidad de la lluvia tanto en Alajuela como en Turrialba; el diámetro medio ponderado por el número de gotas tuvo la misma tendencia, principalmente en Turrialba.

La distribución de diámetros de gotas mostró que en Turrialba predominan las gotas entre 1 y 2 mm (80%) de frecuencia, mientras que en Alajuela, aunque

éste fue el diámetro más frecuente (60%); los diámetros menores de 1 y entre 2 y 3 mm, tuvieron frecuencias mayores al 20%.

La energía cinética promedio de las lluvias en Alajuela y en Turrialba fue similar; y en general, en ambos sitios aumentó, al incrementarse la intensidad de la lluvia.

Se encontró variación en la duración promedio diaria de la lluvia en función de la altura para las 10 estaciones analizadas. Estadísticamente se identificaron básicamente dos grupos de estaciones, las ubicadas por encima de 700 msnm y las situadas por debajo de esa altitud.

Las intensidades máximas promedios en 30, 60 y 120 minutos disminuyeron conforme aumentó la altitud con un coeficiente de regresión entre ambas variables de 0,83, 0,86 y 0,86, respectivamente.

La cantidad promedio anual de la lluvia tuvo una tendencia a disminuir conforme aumentó la altitud ($r^2 = 0,56$). Sin embargo, la altitud no es el único factor que modifica la lluvia. La zona Atlántica en estudio es muy irregular desde el punto de vista geomorfológico y produce resultados heterogéneos.

Los resultados obtenidos indican que la erosividad de las lluvias disminuye con la altitud, lo que reduce el potencial erosivo en las zonas de mayor pendiente en la vertiente Atlántica.

JIMENEZ GUERRA, A.O. 1996. Physical characterization of rains under two pluviometric regimes and one altitudinal profile in Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., CATIE. 117 p.

Keywords: rain, raindrops diameter, kynetic energy, intensity, duration, amount, altitude variation, pluviometric regime, erosion.

Summary

There is limited knowledge about a wide range of physical characteristics of rains in tropical areas, despite their importance regarding soils erosion, planification, design and implementation of agricultural and hydraulic works.

The objetive of this study was to contribute to the better understanding of this topic, analyzing the distribution and size of raindrops and also the kynetic energy of two sites, representing the Atlantic and the Pacific precipitation regimes of Costa Rica (Turrialba and Alajuela respectively). The variation amount as well as the intensity and duration of rains was also studied through an altitudinal profile involving 10 meteorological stations from the Atlantic versant (Volcán Irazú, Sanatorio Durán, Coliblanco, Pacayas, San Antonio, Plantanillo, CATIE, Diamantes, La Lola and Limón).

The results of this research showed that the average diameter of draindrops was higher in Alajuela (2,76 mm) than in Turrialba (2,30 mm), though differences were not significant. The average diameter weighted by the raindrops number was similar for both sites (1,67 mm). The mean diameter increased with rain intensity both in Alajuela and Turrialba. The mean diameter weighted by the number of raindrops had the same tendency, especially in Turrialba.

The distribution of raindrop diameters showed that 1 to 2 mm raindrops prevailed in Turrialba (80% frequency), while in Alajuela, though this diameter was also the most frequent (60%), less than 1 mm and between 2 and 3 mm raindrop diameters also showed frequencies above 20%.

The average rain kinetic energy in Alajuela and Turrialba was similar, and in general, it increased with rain intensity at both sites.

There was variation in the daily average rain duration in function of height in the 10 meteorological stations analyzed. Two groups of stations were identified for statistical purposes, the ones above 700 masl and those located under that altitude.

The maximum average intensities for 30, 60 and 120 minutes diminished as altitude increased, showing a regression coefficient among both variables of 0,83, 0,86 and 0,86, respectively.

The annual average rain amount tended to decrease as altitude increased ($r^2 = 0,56$). Nevertheless, altitude is not the only factor which modifies rain. The Atlantic zone under study is very irregular geomorphologically speaking, which generates heterogeneous results.

The results obtained indicate that rain erosion diminishes with altitude, thus reducing the erosive potential in the highest slope areas of the Atlantic versant.

LISTA DE CUADRO

Cuadro 1. Cantidad de lluvia, intensidad y pérdidas de suelo Chinchina, Colombia.....	14
Cuadro 2. Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía.....	22
Energía cinética = $1/2 * masa * (velocidad)^2$.....	22
Cuadro 3. Velocidad terminal (m/s) para gotas de agua de acuerdo	26
a su diámetro para alturas de caída superior a 8 m.....	26
Cuadro 4. Estaciones meteorológicas de la Vertiente Atlántica de Costa Rica utilizadas en el estudio sobre la variación altitudinal de la cantidad, intensidad y duración de la lluvia.	30
Cuadro 5. Datos del volumen y diámetro medio de gota.....	39
Cuadro 6. Datos sobre el diámetro medio de las gotas de agua y la masa media de los agregados de harina formados.	40
Cuadro 7. Diámetro promedio y diámetro medio ponderado (mm) de las..	46
gotas de lluvia para diferentes intervalos de intensidades de ...	46
lluvia en Turrialba y Alajuela.	46
Cuadro 8. Energía cinética promedio (J/m².mm) para diferentes intervalos	48
de intensidades de lluvia en Turrialba y Alajuela.....	48
Cuadro 9. Comparación entre la energía cinética de la lluvia obtenida en este estudio (método de Eigel y Moore) y la estimada por el método Wischmeier y Smith (EUPS).	51
Cuadro 10. Datos de duración diaria promedio (horas y minutos) de la lluvia para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica.....	53
Cuadro 11. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para ...	55
las duraciones diarias promedios de la lluvia por mes, en 10 ...	55
estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica	55
de Costa Rica.....	55

Cuadro 12. Datos de intensidades máximas para 30 minutos, (mm/30 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).	59
Cuadro 13. Datos de intensidades máximas para 60 minutos, (mm/60 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).	62
Cuadro 14. Datos de intensidades máximas para 120 minutos, (mm/120 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).	65
Cuadro 15. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para... las intensidades máximas promedio de lluvia en 30, 60 y 120 .. minutos, en 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.	67
Cuadro 16. Datos de lluvia promedio por mes (mm), para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.	69
Cuadro 17. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para.. las cantidades promedios diarias de lluvia por mes en, 10 .. estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.	70
APENDICE	83
Cuadro 1A. Diámetros y distribución de diámetros de gotas para diferentes eventos de lluvia en Turrialba, régimen atlántico de Costa Rica.	84
Cuadro 2A. Diámetros y distribución de diámetros de gotas para diferentes eventos de lluvia en Alajuela (Fabio Baudrit), régimen Pacífico de Costa Rica.	89
Cuadro 3A. Datos de energía cinética de las lluvias muestreadas en Turrialba (CATIE), régimen Atlántico de Costa Rica.	96

Cuadro 4A. Datos de energía cinética de las lluvias muestreadas en Alajuela (Fabio Baudrit), régimen Pacífico de Costa Rica.....	101
---	------------

LISTA DE FIGURA

FIGURA 1. OROGRAFÍA GENERAL DE COSTA RICA.....	8
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PERTENECIENTES A LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA, UTILIZADAS EN EL ESTUDIO SOBRE LA VARIACIÓN ALTITUDINAL DE LA CANTIDAD, INTENSIDAD Y DURACIÓN DE LA LLUVIA.	29
FIGURA 3. CURVA DE CALIBRACIÓN OBTENIDA EN EL LABORATORIO PARA LA RELACIÓN ENTRE LA MASA MEDIA DE LOS AGREGADOS DE HARINA Y EL DIÁMETRO MEDIO DE LAS GOTAS DE AGUA.	41
FIGURA 4. FRECUENCIA PROMEDIO DE DIÁMETROS DE GOTAS DE LLUVIA PARA LOS....	42
EVENTOS MUESTREADOS EN TURRIALBA (CATIE).	42
FIGURA 5. RELACIÓN ENTRE EL DIÁMETRO MEDIO PONDERADO DE LAS GOTAS Y LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA EN TURRIALBA (CATIE).....	43
FIGURA 6. FRECUENCIA PROMEDIO DE DIÁMETROS DE GOTAS DE LLUVIA PARA LOS....	44
EVENTOS MUESTREADOS EN ALAJUELA (EST. FABIO BAUDRIT).....	44
FIGURA 7. RELACIÓN ENTRE EL DIÁMETRO MEDIO PONDERADO DE LAS GOTAS Y LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA PARA ALAJUELA (ESTACIÓN. FABIO BAUDRIT)...	44
FIGURA 8. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA Y LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA PARA TURRIALBA (CATIE).....	47
FIGURA 9. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA Y LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA PARA ALAJUELA (FABIO BAUDRIT).....	47
FIGURA 10. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA Y EL DIÁMETRO MEDIO PONDERADO DE LAS GOTAS DE LLUVIA EN TURRIALBA (CATIE).	49
FIGURA 11. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA CINÉTICA Y EL DIÁMETRO MEDIO PONDERADO DE LAS GOTAS DE LLUVIA EN ALAJUELA (FABIO BAUDRIT). ...	49
FIGURA 12A. COMPORTAMIENTO DE LA DURACIÓN MEDIA DIARIA DE LA LLUVIA EN	52
FUNCIÓN DE LA ALTITUD PARA 10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.....	52

FIGURA 12B. COMPORTAMIENTO DE LA DURACIÓN MEDIA DIARIA DE LA LLUVIA EN	56
FUNCIÓN DE LA ALTITUD PARA 9 ESTACIONES METEOROLÓGICAS	
DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.....	56
FIGURA 13. COMPORTAMIENTO DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS EN 30 MINUTOS EN....	58
FUNCIÓN DE LA ALTITUD PARA 10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS	
DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.....	58
FIGURA 14. COMPORTAMIENTO DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS EN 60 MINUTOS EN....	61
FUNCIÓN DE LA ALTITUD PARA 10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS	
DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.....	61
FIGURA 15. COMPORTAMIENTO DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS EN 120 MINUTOS EN .	64
FUNCIÓN DE LA ALTITUD PARA 10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS	
DE LA VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.....	64
FIGURA 16. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL EN FUNCIÓN ..	68
DE LA ALTITUD PARA 10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA	
VERTIENTE ATLÁNTICA DE COSTA RICA.	68
FIGURA 17. MAPA DE ISOYETAS ANUALES (MM) DE COSTA RICA (IMN, 1987).....	71
ANEXO.....	108
FIGURA 1A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS	
LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LIMÓN	
DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.	109
FIGURA 2A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS	
LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA LA LOLA	
DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	110
FIGURA 3A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS	
LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DIAMANTES	
DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	111

FIGURA 4A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA CATIE DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	112
FIGURA 5A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PLATANILLO DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	113
FIGURA 6A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA SAN ANTONIO DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.	114
FIGURA 7A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PACAYAS DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	115
FIGURA 8A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA COLIBLANCO DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	116
FIGURA 9A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA SANATORIO DURÁN DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.....	117
FIGURA 10A. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS DURACIONES DIARIAS DE LAS LLUVIAS OBSERVADAS EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA VOLCÁN IRAZÚ DURANTE EL PERÍODO 1978 - 1992.	118

I- INTRODUCCION

En Centro América, la erosión hídrica es la principal causa de disminución de la productividad del suelo. Fuera del sitio sus efectos también son evidentes e involucran la deposición de partículas en suspensión en los campos agrícolas, planicies, y en el caso de embalses, ríos y lagos la sedimentación. Además afecta la calidad del agua y origina daños en los ecosistemas acuáticos debido a la disminución de la concentración de oxígeno en el agua.

El fenómeno de la erosión de los suelos forma parte del proceso de degradación del ambiente y recibe cada vez más la atención de las autoridades políticas, administrativas, investigadores y organizaciones que promueven la protección de los recursos naturales, debido a su intensificación casi constante. La presencia de surcos, cárcavas, deslizamientos, agotamiento de la fertilidad del suelo, deterioro de la estructura de los mismos y la pérdida de horizontes superficiales ya no son excepciones.

En Costa Rica, por ejemplo, las tasas de erosión son generalmente altas debido a la topografía accidentada, la mala planificación y manejo de los cultivos y los suelos, pero principalmente por las características de las lluvias. En la zona norte de Cartago se han obtenido datos de pérdida de suelo por erosión hídrica de 108 ton/ha en un solo día (Costa Rica - MAG, 1994). De acuerdo a datos de la FAO, en 1954 el fenómeno de la erosión en Costa Rica se limitaba principalmente al Valle Central y la Península de Nicoya, sin embargo, en un estudio realizado en 1989 (Jeffery *et al*), se estima que el 42% del área agrícola del país sufre de erosión hídrica entre moderada y muy severa.

Así, siendo la lluvia uno de los factores principales que causan la degradación del suelo y la pérdida de su capacidad productiva, el conocimiento de las características fundamentales de la lluvia tales como cantidad, intensidad,

duración, frecuencia, diámetro y distribución de tamaño de gotas, velocidad terminal de caída y energía cinética, resultan indispensables no solo en los estudios de erosión, sino también el planeamiento y ejecución de obras y prácticas de conservación de suelos y aguas, para decidir los cultivos y las prácticas de cultivos más favorables al uso sostenible del suelo y de los recursos naturales dentro de una cuenca, en el diseño de obras hidráulicas, en el diseño de estudios sobre el comportamiento hidrodinámico de los suelos (infiltración, escorrentía, almacenamiento de agua). Además, en complemento con el conocimiento de las características del suelo, permiten prever desastres naturales como inundaciones y establecer zonas y períodos críticos.

Si bien existen estaciones con registros de cantidad diaria y mensual de lluvia, esta información no siempre es suficiente para muchas aplicaciones de las antes mencionadas. El conocimiento de las principales características de la lluvias permiten sustentar la planificación y operación agrícola sobre bases más científicas.

Existen muy pocos estudios en zonas tropicales y ninguno en Centro América sobre el diámetro y distribución de tamaños de gotas de las lluvias naturales. Su conocimiento permitiría disipar muchas dudas sobre la confiabilidad de las estimaciones de energía cinética, basadas en datos de otras regiones con características pluviométricas diferentes al trópico. Por ejemplo, Stocking (1987) refiriéndose a la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978), la cual ha sido frecuentemente usada en Costa Rica y otros países tropicales para estimar la erosión, indica que debido al empirismo de la misma (calibrada para el medio oeste de los Estados Unidos con sus características climáticas, edáficas, geomorfológicas, de uso y manejo de suelo, etc), no puede aplicarse a zonas con condiciones diferentes como los trópicos húmedos, sin una amplia calibración previa, para lo cual se requiere obviamente de datos. En el mismo sentido Vahrson (1991) menciona que los valores máximos de erosividad

anual de lluvias obtenidas en Costa Rica, son cerca de 50% más altos que los valores para Estados Unidos, y que por lo tanto se salen completamente del rango de la calibración de la EPUS.

Aunque en el desarrollo actual de las ciencias es muy difícil para el hombre mantener bajo control en fenómeno de las lluvias o modificar sus características morfológicas, si pueda estudiarlas para conocerlas bien y con esta base no solo protegerse de sus efectos perjudiciales, sino más bien aprovecharla para su beneficio. Este estudio trata justamente de conocer las características de las lluvias en varias estaciones meteorológicas (sitios) de Costa Rica por su relación con la erosión hídrica. Debido al determinismo y distribución bastante similar de las lluvias en cada vertiente: Pacífico y Caribe de Centro América, consideramos que parte de la información, principalmente la relacionada con las características energéticas de la lluvia, pueden ser extrapoladas de otras áreas de la región.

II OBJETIVOS

General:

Contribuir al conocimiento de las características físicas de las lluvias que afectan la erosión de los suelos bajo condiciones tropicales.

Específicos:

Estudiar el tamaño de gotas, distribución de tamaño de gotas y la energía cinética de las lluvias en función de la intensidad en una estación típica del régimen pluviométrico Pacífico y otra del régimen Atlántico de Costa Rica.

Caracterizar la cantidad, intensidad y duración de las lluvias para diez estaciones meteorológicas ubicadas en un perfil altitudinal de la Vertiente Atlántica de Costa Rica.

III HIPOTESIS

Existe diferencia en las características físicas de las lluvias en Costa Rica dependiendo del régimen pluviométrico predominante.

Existe diferencia en las características físicas de la lluvia en función de la altitud sobre el nivel del mar.

IV REVISION DE LITERATURA

4.1 La precipitación

La lluvia, la llovizna, la nieve y el granizo se designan en conjunto con el nombre de precipitación, y se produce cuando grandes masas de aire experimentan un descenso uniforme de la temperatura por debajo del punto de rocío, en cuyo caso se genera una rápida condensación del vapor de agua en el interior de las nubes que luego precipitan en forma de lluvia (Heuveldop *et al*, 1986).

La precipitación es el principal factor que controla el ciclo hidrológico de una región. Mucha de la ecología, geografía y uso de la tierra de una región depende de las funciones del ciclo hidrológico y, por lo tanto, la lluvia provee limitantes y oportunidades en el manejo de la tierra y el agua. La precipitación tiene muchas características que afectan tanto la planificación como la operación de las actividades del hombre, lo que hace necesario su estudio y análisis (Dunne y Leopold, 1978).

La lluvia es la forma de precipitación más importante, la mejor conocida y la que en la mayoría de los casos, más influye y determina la producción agrícola y degradación del suelo. Hay tres causas principales de la lluvia, todas las cuales involucran el ascenso y enfriamiento de masas de aire con la subsecuente condensación del vapor de agua (Leyton y Rodda, 1970):

Convectivas: las masas de aire en contacto con la superficie terrestre se calientan y ascienden, penetrando las capas de aire superiores más frías.

Orográficas: el aire es forzado a ascender por las laderas de las montañas, empujado por más aire desde abajo.

Frontales: dos masas de aire con diferentes propiedades físicas se encuentran y una de ellas es forzada a subir, resultando con frecuencia en la formación de nubes.

La caracterización más común de la lluvia es a través de la cantidad y la intensidad, pero también puede ser caracterizada por las variaciones en tamaño de las gotas, las diferencias en velocidades de impacto y la energía cinética (Park et al, 1982). Estos parámetros no solamente son importantes en la erosión por salpique, sino que también están relacionados a la erosividad de la lluvia. Sin embargo, las características físicas de la lluvia son difíciles de medir periódicamente; la relación entre tales características y parámetros más comunes como la intensidad requieren ser determinadas (Park et al, 1983).

Además de la cantidad de lluvia, la intensidad, distribución de la intensidad de los aguaceros, energía cinética, momentum y tamaño de gotas son parámetros importantes que afectan la erosión del suelo (Lal, 1976).

4.2 Características pluviométricas de Costa Rica

Las lluvias de Costa Rica presentan dos regímenes principales divididos por las cordilleras que, con una dirección noroeste-sureste, llegan a altitudes de 3000 msnm, causando diferentes cantidades y distribuciones anuales y diarias de la lluvia (Ramírez, 1982): el régimen de la Vertiente del Caribe o Atlántico y régimen de la Vertiente del Pacífico. La Vertiente del Caribe puede dividirse en dos regiones: una comprende la zona de la costa y sus cercanías y otra comprende el resto, incluyendo las montañas.

La Vertiente del Pacífico posee, inducida por la migración de la zona de convergencia intertropical, una época seca y una lluviosa muy bien definidas. La época lluviosa se extiende de mayo a noviembre con una disminución relativa de

las cantidad de lluvia en los meses de julio y agosto que se conoce como veranillo. Las lluvias ocurren principalmente en la tarde y en la noche (figura 1).

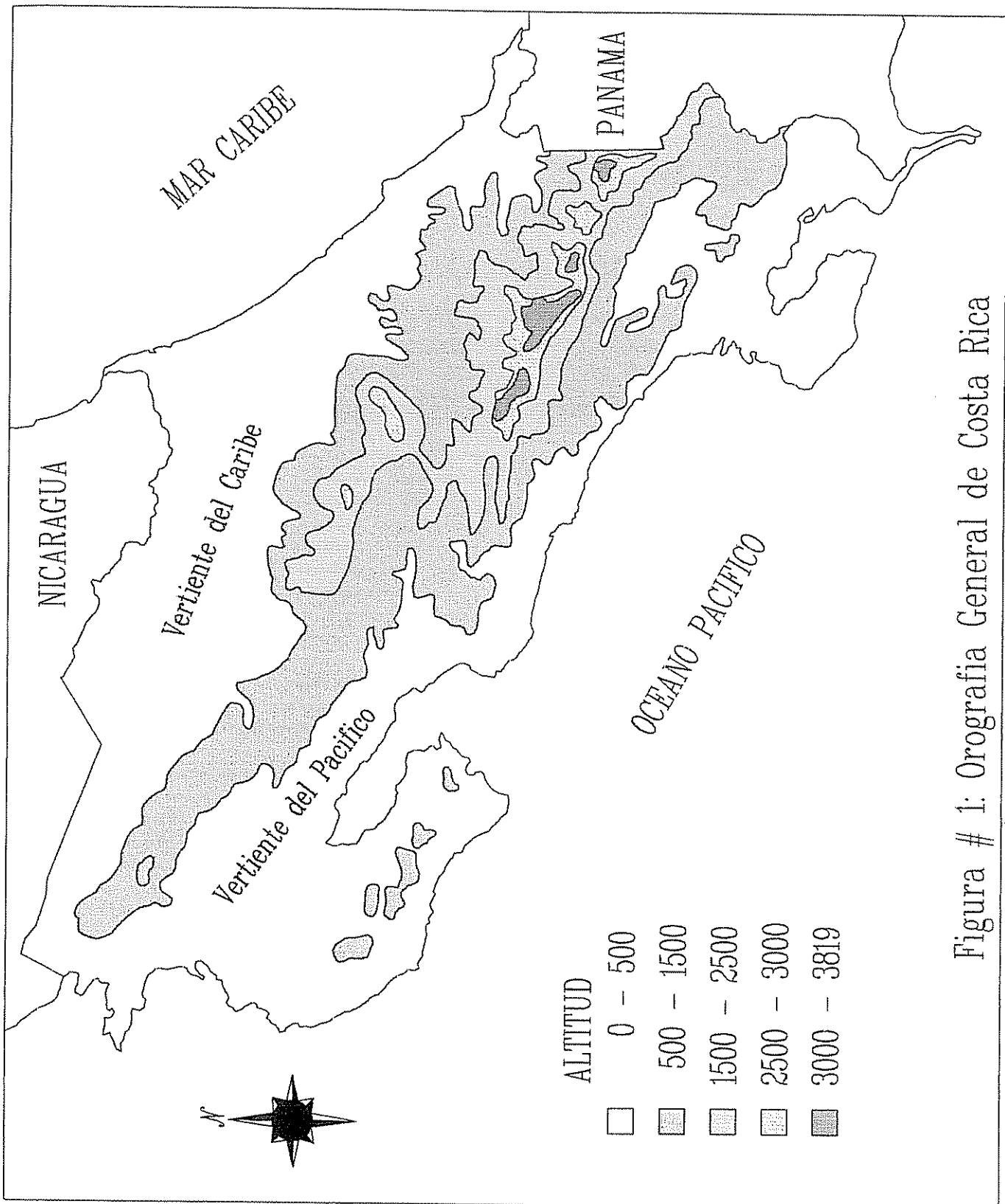


Figura # 1: Orografia General de Costa Rica

La Vertiente del Caribe, expuesta casi continuamente a las influencia de los vientos alisios del este, no presenta una estación seca propiamente dicha, solamente una disminución de la lluvia cuando este flujo se debilita en setiembre y octubre. En los meses secos la lluvia se mantiene generalmente por encima de 100 mm mensuales. El regimen de lluvias sobre la región es típicamente orográfico.

En la región costera del régimen Caribe, se pueden definir dos periodos relativamente secos, uno cubre los meses de febrero a abril y otro los meses de setiembre y octubre

En la zona montañosa de la Vertiente del Caribe sólo se produce una reducción de la precipitación en los meses de marzo a abril. El resto del año es lluvioso. La distribución horaria de la lluvia presenta un máximo en la tarde y las primeras horas de la noche, durante el período de mayo a noviembre, el resto del año, las lluvias están distribuidas en 24 horas del día, aunque los máximos se producen en la noche.

La precipitación anual promedio (Vahrson, 1990) varía entre 1400 mm (algunas zonas de Guanacaste y Cartago) hasta 7700 mm (estación T-6, aproximadamente 25 km al noreste de Cartago). Por su localización dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), las lluvias con altas intensidades ocurren en Costa Rica con cierta frecuencia: el valor máximo diario encontrado hasta ahora es de 657 mm en la estación Bartolo cerca de Quepos en la Costa Pacífica, sin embargo, valores máximos mayores de 400 mm en 24 horas poseen una alta frecuencia; también existen lluvias de alta intensidad con duraciones más cortas. Por ejemplo, Vahrson y Dercksen (1990) indican que eventos con una intensidad de 120 mm en una hora y 220 mm en 5 horas; también hacen referencia a un evento de 75 mm en 15 minutos.

Los principales mecanismos productores de lluvia en Costa Rica son fundamentalmente la convección, los frentes de brisa, el ascenso orográfico, la convergencia y la presencia de la Zona de Confluencia Intertropical. Junto con estos procesos, los disturbios sinópticos pueden producir precipitaciones intensas (Ramírez, 1982).

En la Vertiente del Pacífico los fenómenos causantes de lluvias intensas, con gran capacidad erosiva, son principalmente dos: un huracán en el Caribe con una ruta entre 72° y 85° de longitud oeste (Hidalgo, 1980), o un disturbio tropical situado entre 5° y 15° norte y la presencia de un centro de alta presión sobre Costa Rica y Panamá (Coen, 1955).

En la Vertiente del Caribe, los principales factores productores de lluvia son las ondas del este, los frentes fríos (nortes), lluvias orográficas por aumento de los vientos alisios, la posición de la ZCI, el desplazamiento del anticiclón de las Bermudas y la presencia de centro de baja presión en el Caribe (Hidalgo, 1980, Ramírez, 1982).

4.3 La erosión hídrica

La erosión hídrica se define como la acción de desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte por el agua que escurre sobre el terreno. Cuando no hay más energía para el transporte, ocurre la sedimentación de las partículas.

En el proceso de erosión hídrica se pueden distinguir tres fases: desprendimiento, transporte y sedimentación. En la primera fase el impacto de las gotas de lluvia causa una desagregación de los agregados del suelo que tienen como consecuencia el desprendimiento de partículas de éste. En la segunda fase, si la cantidad de lluvia que cae sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo, se produce un escurrimiento superficial que arrastra las partículas desprendidas

por acción de las gotas de lluvia. Cuando el flujo de agua de escorrentía alcanza cierta velocidad, llamada velocidad erosiva, ocurre un desprendimiento acelerado de los agregados del suelo y se produce la erosión en surcos o en cárcavas. La velocidad erosiva promedio varía entre 0,6 m/s para suelos arenosos y 0,9 m/s para suelos arcillosos. Finalmente la fase de sedimentación se da cuando el escurrimiento alcanza velocidades bajas ($<0,3$ m/s) entonces las partículas de suelo arrastradas empiezan a sedimentar. Este proceso se localiza generalmente en las partes planas del terreno, en ciertas partes del cauce de los ríos y en lugares en que el terreno presenta obstáculos, en represas y en el mar. La erosión se puede clasificar en : erosión por salpique, erosión laminar, erosión en surcos, erosión en cárcava y remoción en masa (Costa Rica-MAG, 1994.).

Según Vahrson y Cervantes (1991), la erosión hídrica y, en especial, la erosión laminar y en surcos pequeños, es la forma de erosión que más afecta la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos y, a la vez, afecta más significativamente a la producción de sedimentos en los ríos. Este fenómeno se da a nivel mundial como lo confirman, por ejemplo, Stocking (1984) para Zimbawe y Dunne y Leopold (1978) para los Estados Unidos.

Para el cálculo de la erosividad de la lluvia se han utilizado diferentes metodologías, tales como las propuestas por Hudson (1971), Lal (1976), Wischmeier (1959) y Fournier (1960).

El método más común es el propuesto por Wischmeier, en el cual se determina la agresividad de las lluvias considerando la energía cinética del aguacero y su intensidad máxima en 30 minutos, y donde se llega al valor anual sumando todos los valores de las lluvias anuales (Wischmeier y Smith, 1978). Sin embargo, algunos autores (Hudson, 1971; Lal et al, 1978; Morgan, 1979; Aguilar y Rondón, 1988) han cuestionado el uso de este índice para estimar la erosividad de la lluvia en latitudes tropicales; ya que las tormentas son más grandes

(cantidad), de mayor intensidad, el diámetro de las gotas es mayor, la distribución es diferente y con frecuencia están acompañadas por fuertes vientos.

En Costa Rica, varios investigadores han realizado estudios sobre la erosividad pluvial usando principalmente el método de Wischmeier y Smith: Amézquita (1974) para Turrialba; Gutiérrez (1987) para la Cuenca del Río Grande de Térraba; Mora (1987) para la cuenca del río Pejibaye, Vahrson (1989) para la cuenca del río Reventazón, Vahrson (1990) para diferentes estaciones, según regiones climáticas.

4.4 Precipitación y erosión

Existe una asociación obvia entre cantidad de lluvia y cantidad de suelo erosionado, es decir, a mayor lluvia corresponde mayor erosión. Sin embargo, en diversos estudios se ha observado que la relación estadística entre ambas variables es baja (Wischmeier y Smith, 1959). En efecto, la misma cantidad total de lluvia puede dar lugar, en diferentes circunstancias, a intensidades de erosión muy diversas, de manera que se requieren otras medidas más específicas para describir la capacidad erosiva de la lluvia (Hudson, 1964).

Suárez de Castro (1982) también sostiene que las lluvias pueden causar pérdidas de suelo muy diferentes, aún cuando las cantidades totales de precipitación sean similares. Señala por ejemplo, que en Colombia, para un período de 8 años, el 9,9% de las lluvias causaron el 88,7% de las pérdidas de suelo. Otros varios autores (Roose y Lelong, 1976; Apolo, 1980; Bermúdez 1980; Oster, 1980) también han observado que unas pocas lluvias en el año (generalmente menos de 15) son responsables de la mayor parte de la erosión de los suelos.

Un aspecto importante de la efectividad de la lluvia en la erosión y producción agrícola es su distribución durante el año. En los climas templados es

común tener una distribución relativamente uniforme que favorece la agricultura intensiva e induce menos a la erosión, mientras que en climas tropicales es más común que la lluvia se concentre en una parte del año. En el trópico, la erosión es facilitada tanto por la mayor pluviosidad durante el período de lluvias, como por la desecación de la vegetación durante la época de sequía (Hudson, 1964).

4.5 Intensidad de la lluvia

La intensidad de la precipitación es la cantidad total de agua caída por unidad de tiempo y se mide en mm/hora. Esta característica es muy importante en climatología aplicada, particularmente en los trópicos, donde las cantidades, intensidades y poder erosivo de la precipitación son generalmente más altas que en sistemas templados y subtropicales (Kowal y Kassam, 1977, Lal, 1977, Heuvelop et al, 1986) En los países templados las intensidades pluviométricas rara vez sobrepasan los 75 mm/h, mientras que en los trópicos son comunes los eventos que rebasan los 150 mm/h (Lal, 1974, 1976, 1977). Según Hudson (1982), en condiciones tropicales las lluvias son en un 40% de intensidades mayores de 25 mm/h, que generalmente ya son erosivas, mientras que en zonas templadas solamente un 5% de las lluvias tienen alta intensidad y poder erosivo.

Cuando la intensidad de la lluvia es alta, aumenta la probabilidad y gravedad de inundaciones locales y es, por lo tanto, un factor importante que debe ser considerado en la planificación y construcción de represas, embalses, canales de drenaje, puentes, etc. Más aún, la intensidad tiene una fuerte influencia en la efectividad de la lluvia para la agricultura ya que cuando la intensidad excede la tasa máxima de infiltración del suelo, se genera escorrentía superficial y una parte de la lluvia se pierde. Debido a este proceso, la intensidad de la lluvia afecta también la erosión del suelo, el lavado de nutrimentos, los deslizamientos y la de sedimentación en lagos y represas (Heuvelop *et al*, 1986).

La intensidad de las lluvias o aguaceros es el factor pluviométrico más importante que afecta la escorrentía y la erosión, aunque ejerce mayor influencia sobre el segundo fenómeno. Por ejemplo, Suárez de Castro (1982) en estudios realizados en Colombia obtuvo que una lluvia de 22 mm a una intensidad máxima en 5 minutos de 1 mm, produjo pérdidas de suelo 100 veces menores que una lluvia de 20,6 mm, pero con una intensidad máxima en 5 minutos de 7,9 mm (cuadro 1). Resultados similares obtuvo Greer (1971) en el Sur de Estados Unidos donde los aguaceros de alta intensidad contribuyeron con el 37% del total de lluvias; produjeron cerca del 55% del total de escorrentía y cerca del 75% del total de suelo perdido por erosión.

Cuadro 1. Cantidad de lluvia, intensidad y pérdidas de suelo Chinchina, Colombia.

Cantidad de lluvia (mm.)	Intensidad máxima en 5 min.	Escorrentía (mm.)	Erosión (ton/ha)
20,6	7,9	6,8	7,35
21,4	5,0	11,1	1,74
18,0	4,5	7,8	1,06
21,8	2,2	4,5	0,47
20,0	1,9	0,8	0,12
22,0	1,0		0,06

Fuente: Suárez de Castro, 1982

Existen pruebas contundentes de la asociación que hay entre la erosión e intensidad de lluvia, razón por la cual ningún experimento sobre erosión puede funcionar adecuadamente sin algún tipo de registrador de intensidad. Cualquier índice de erosividad basado única o principalmente en la intensidad, tiene por tanto, mayor posibilidad de aplicación que uno basado en otra característica, tal como la cantidad.

Las mediciones de intensidad, suficientes para trabajos agrometeorológicos, suelen obtenerse mediante pluviógrafos, en los que los incrementos sucesivos de lluvia se registran en un gráfico cuya velocidad de avance depende de un mecanismo de relojería, asociado a la frecuencia con que pueda ser cambiado, por lo general diariamente, o, en zonas remotas o inaccesibles, semanal o mensualmente. La intensidad se calcula a partir de la variación en la cantidad de lluvia registrada en el tiempo, es decir, a partir de la pendiente de la gráfica resultante.

Se dispone de instrumentos que registran directamente la intensidad de la lluvia, en lugar de la simple cantidad; estos instrumentos suelen emplearse en experimentos sobre erosión del suelo, pero rara vez se incluyen en el equipo de las estaciones meteorológicas convencionales.

4.6 Duración de las lluvias:

La duración de las lluvias es el complemento de la intensidad; la asociación de las dos determina la precipitación total. Al caer una lluvia de intensidad uniforme sobre un suelo, el agua se infiltra durante un lapso más o menos largo según sean las condiciones previas de humedad del suelo y la intensidad de la precipitación; después comienza la escorrentía, la cual va aumentando su volumen en proporciones cada vez más pequeñas hasta alcanzar un volumen estable (Suárez de Castro, 1982).

Neal (1938) encontró que cuando la escorrentía comenzó durante el primer período de 10 minutos, a partir del momento de iniciarse la lluvia, la pérdida máxima de suelo ocurrió durante el segundo período de 10 minutos. Tomando esta pérdida de suelo como unidad, comprobó que durante el primer período se perdió un promedio de peso de suelo de 0,63. Cuando la escorrentía se inició entre los 10 y 20 minutos de haber comenzado la lluvia, la máxima pérdida de

suelo se retardó del tercer al sexto período de 10 minutos. Así mismo, la densidad de la escorrentía disminuyó hasta finalizar la primera hora. Al continuar la lluvia, la densidad se uniformó.

En general, puede afirmarse que las lluvias de larga duración son de baja intensidad y cubren un área más extensa, en tanto que las lluvias intensas presentan una condición más localizada y duran menor tiempo.

4.7 Frecuencia de las lluvias:

La frecuencia se refiere al número de eventos por unidad de tiempo, o lo que es similar al intervalo de tiempo entre las lluvias. La frecuencia de las lluvias es crítica con respecto a las condiciones de los suelos. Si los intervalos entre lluvias son cortos y el contenido de humedad del suelo es alto al comenzar éstas, aumentan los riesgos de que se originen escorrentías, aun con lluvias de baja intensidad. Si por el contrario, los períodos entre lluvias son largos, el suelo estará seco y no habrá escorrentías con aguaceros de baja intensidad (Suárez de Castro, 1982). La extensión y las características del área cubierta por la lluvia también son importantes. El centro del aguacero puede ser muy pequeño y causar diferentes daños aun en regiones próximas. Si toda una cuenca está mal protegida, pueden presentarse inundaciones.

Es necesario, por lo tanto, tener en cuenta las frecuencias de ocurrencia de las lluvias y las variaciones periódicas de intensidad para ajustar a ellas la aplicación de prácticas culturales y de manejo y de conservación. Se acepta que hay una forma de combinación de la intensidad, la duración y la frecuencia de las lluvias que guarda relación, en términos generales, con las pérdidas de suelos y agua (Suárez de Castro, 1982).

En tanto la magnitud e intensidad de una lluvia guarden una relación directa con su frecuencia promedio de ocurrencia, parece que la lluvia total anual de una región es independiente del número o de la magnitud de las precipitaciones fuertes que puedan ocurrir en determinado lapso y esta cifra, lo mismo que los promedios anuales o mensuales, aunque proporcionen una indicación válida del volumen total de escorrentía, no guarda relación alguna con el peso de suelo erosionado, pues mucha escorrentía puede tener una intensidad menor que la crítica (Ayres, 1960).

4.8 Distribución y tamaño de gotas

Las primeras mediciones del tamaño de las gotas de lluvia de que se tiene noticia fueron efectuadas por Lowe en 1892, quien las recogió en placas planas que habían sido cuadrículadas, de manera que el tamaño de las gotas interceptadas pudieran medirse. Este método de calcular el tamaño de una gota a partir del tamaño de la señal que deja el impacto en algún dispositivo colector, es uno de los más populares (Hudson, 1964).

Otra técnica consiste en tomar papel absorbente y esparcir ligeramente su superficie con un tinte soluble en agua. En seco el tinte es invisible, pero al contacto con el agua se disuelve y cada gota deja una mancha circular que puede medirse después. El tamaño de la gota puede calcularse a partir de la fórmula $D = aS^b$, siendo D el diámetro de la gota, S el diámetro de la mancha teñida, y a y b constantes que se establecen calibrando en el laboratorio el papel usado.

Otro método popular es el de los "agregados de harina". Recoge una muestra de lluvia en un plato que contiene harina. Cada gota de lluvia forma un pequeño agregado de harina húmeda que, cuando se deseca la muestra en un horno, se convierte en un glóbulo duro, fácilmente separable de la harina no aglutinada. Una calibración en el laboratorio habrá establecido previamente la relación entre el tamaño del agregado y el de la gota que forma (Hudson, 1964).

Empleando tales métodos, la gama de tamaños de gotas de lluvia ha sido medida en varios países de zonas templadas, y en tipos de lluvias muy diferentes. El límite superior parece ser de unos 5 mm de diámetro; las gotas superiores a ese tamaño se disgregan en otras más pequeñas. Blanchard (1950), realizando experimentos en un túnel de viento, demostró que las gotas son estables hasta 4,6 mm de diámetro, e inestables por encima de 5,4 mm, con un margen intermedio en que las gotas se desintegran o no, según la turbulencia. Las fotografías estroboscópicas demuestran que la forma de las gotas que caen no es en absoluto parecida a la convencional forma de lagrima, sino que son esferas aplanadas a causa de la resistencia del aire. Las observaciones de campo concuerdan con los tamaños indicados. Muy raras veces se encuentran gotas de más de 5 ó 6 mm de diámetro, aunque se presentan en ocasiones. Esto sucede probablemente cuando dos gotas colisionan para formar una "supergota", que alcanza el suelo antes de que haya tenido tiempo de partirse (Hudson, 1964).

La deformación de la gota de lluvia en aire quieto depende de su tamaño. Pequeñas gotas de menos de 3 mm de diámetro son casi esféricas en la velocidad final (Mutchler, 1967). Como el diámetro aumenta, entonces, las gotas son deformadas y parecidas a un bollo de pan; esféricas en la parte de arriba y aplastadas en la parte de abajo (Park, 1983).

Puesto que la lluvia está compuesta por gotas de todos los tamaños, se hace necesario también determinar la proporción de gotas grandes y pequeñas, o sea, la distribución por tamaños, y el modo en que esta distribución varía con otras características de la lluvia como la intensidad, y cantidad. A partir de la observación cotidiana se deduce claramente que la lluvia de baja intensidad que puede durar varios días está formada principalmente por gotas pequeñas, mientras que la lluvia muy intensa de una tormenta, tiene por lo menos algunas gotas mucho mayores. Empleando tanto el método de la gota teñida, como el de

los agregados de harina, se recoge una muestra de lluvia y así puede determinarse la distribución por tamaños. Los estudios clásicos en este campo fueron realizados por Laws y Parsons (1943).

Una de las dificultades del muestreo de la lluvia es la de recoger muestras de grandes tormentas, que ocurren con muy poca frecuencia; durante muchos años nuestro conocimiento de la distribución del tamaño de las gotas se limitó a las lluvias de poca intensidad. Estudios recientes de lluvias intensas han cambiado de manera importante el panorama (Hudson, 1964).

No es fácil describir una distribución mediante un parámetro único. El tamaño "medio" de las gotas arroja poca luz sobre cómo está formada, y probablemente un mejor índice para las distribuciones de gotas es el diámetro del volumen mediano (D_{50}), o diámetro correspondiente a la mediana del volumen. Este es el diámetro de gota para el cual la mitad, en volumen, de la precipitación cae en gotas menores, y la otra mitad en gotas mayores. Se obtiene a partir de un gráfico del volumen acumulado en relación al diámetro de las gotas. Estudios como los de Best (1950) mostraron que la relación entre D_{50} y la intensidad I tiene la forma $D_{50} = aI^b$ (a y b son constantes), y no hay duda de que esta fórmula, que implica un tamaño mayor para una mayor intensidad, es válida para intensidades bajas. Sabemos, sin embargo, que existe un límite físico superior para el tamaño de las gotas, y los estudios de lluvias muy intensas (Hudson, 1963) mostraron que, de hecho, existe una inversión de esta tendencia a intensidades altas.

El tamaño de las gotas de lluvia tiene una estrecha relación con la intensidad. Las lluvias de baja intensidad generalmente son prolongadas, de bajo volumen y gotas pequeñas. Por el contrario, las lluvias de alta intensidad son cortas, de gran volumen y compuesta de gotas grandes (Gutiérrez, 1987).

Mediciones de tamaño de gotas de lluvias no orográficas han mostrado una buena concordancia entre el diámetro medio de las gotas y la intensidad de los eventos pluviométricos. Se ha reconocido una relación diferente entre diámetro de gotas e intensidad dependiendo del tipo de lluvia (Smith y Wischmeier, 1962). Las lluvias orográficas, en las cuales las gotas se forman a bajas altitudes y en condiciones de nubes cálidas, raramente exceden 2 mm de diámetro y las intensidades generalmente no exceden 25 mm por hora. El diámetro medio de gotas para este tipo de lluvia es cerca de la mitad del que ocurre en lluvias no orográficas de la misma intensidad (Blanchard citado por Smith y Wischmeier, 1962).

Varios autores indican que la distribución del tamaño de gotas está relacionada a la intensidad de la lluvia (Mutchler y Young, 1975; Lal, 1977; Laws y Parsons, 1943; Ekern, 1953; Gunn y Kinzer, 1949).

El número de gotas que componen un evento de precipitación, varía con la cantidad de lluvia y la distribución del tamaño de gota. Este número de gotas es una importante característica de la lluvia, que la diferencia de una masa de agua igual, y que también asegura la evaluación estadística de la distribución del tamaño de gota (Park, 1983).

4.9 El impacto de la gotas de lluvia

El impacto de la gota de lluvia provoca erosión y transporte en diferentes maneras. El impacto de la gota rompe el suelo formando agregados, separando partículas y esparciendo material en todas direcciones (Jansson, 1982).

El salpique de las gotas de lluvia como un agente erosivo contribuye en al menos tres diferentes vías al proceso de erosión:

- Primero: puede separar el suelo en los puntos de impacto, ya sea cuando la gota golpea sobre el suelo o cuando golpea sobre una delgada lámina de agua que cubre el suelo.
- Segundo: pueden transportar partículas separadas o desprendidas por el salpique de ellas al aire que está sobre la superficie del suelo.
- Tercero: durante el escurrimiento superficial puede impartir energía en la forma de turbulencia a la superficie del agua y por eso aumenta grandemente, tanto el desprendimiento, como la capacidad de transporte.

La gota de lluvia separa las partículas de la superficie del suelo por "explosión", de igual forma que una explosión de una dinamita pequeña. Según Sreenivas et al (1947), durante una lluvia fuerte más de un billón de estas pequeñas gotas "explotarán" por acre; en campos abiertos, de suelos fácilmente separables, estas gotitas pueden salpicar más de 100 toneladas de suelo por acre en el aire. Algunas de éstas serán lanzadas a más de 60 cm de altura y más de 150 cm en dirección horizontal, aunque la mayoría solamente alcanza unos pocos centímetros.

Ekern (1953) usó un pequeño banco de estándares de suelos en estudios experimentales del proceso de dispersión. Él encontró que un impacto mínimo es necesario para iniciar la erosión de impacto. Así mismo encontró que con el factor suelo constante, la erosión de contacto está en función de la intensidad de la lluvia, la duración, la masa de las gotas, la velocidad de las gotas y el área de impacto de las gotas. Resultados similares obtuvo Ellison (1947).

El impacto de la gota de lluvia es más erosivo cuando la misma lámina delgada de agua superficial está presente, aproximadamente un quinto (1/5) de el diámetro de la gota., y es relativamente no erosivo cuando el suelo está cubierto

con agua con una profundidad igual o mayor de tres diámetros de gotas (Jansson, 1982).

Para (Hudson, 1964), la erosión del suelo es un trabajo mecánico en el sentido físico del término, según el cual, trabajo equivale a un gasto de energía, y esta se gasta en todas las fases de la erosión: para romper los agregados del suelo, para dispersar las partículas en el aire, en la turbulencia del flujo superficial, en desprender y transportar partículas de tierra, etc. Si se consideran las fuentes de energía cinética disponibles, puede explicarse por qué es tan importante la erosión de impacto en el conjunto del proceso erosivo. En el cuadro 2 se compara la energía cinética de la lluvia que cae con la que corresponde al agua de escorrentía.

Cuadro 2. Energía cinética de la lluvia y de la escorrentía
Energía cinética = $1/2 * \text{masa} * (\text{velocidad})^2$

	Lluvia	Escorrentía
Masa	Supongamos que la masa de la lluvia que cae es R.	Si se supone un 25% de escorrentía, la masa circulante es R/4
Velocidad	Supongamos una velocidad límite de 8 m/seg.	Supongamos una velocidad de flujo superficial igual a 1 m/seg.
Energía Cinética	$1/2 * R * (8)^2 = 32R$	$1/2 * R/4 * (1)^2 = R/8$

Fuente: Hudson, 1964.

Así pues, la lluvia tiene 256 veces más energía cinética que la escorrentía.

Desde luego, existe una interacción entre erosión de impacto y escorrentía, ya que el impacto tiende a sellar la superficie del suelo y aumenta la escorrentía, pero, de todos modos, la erosión en condiciones naturales depende principalmente del impacto de la lluvia (Hudson, 1964).

4.10 Velocidad de caída de las gotas de lluvia y energía cinética:

Un cuerpo que cae libremente por efecto de la gravedad, irá acelerándose hasta que la resistencia del aire sea igual a la atracción gravitatoria y luego continuará cayendo a la misma velocidad. Esta recibe el nombre de velocidad terminal y depende del tamaño y forma del objeto (Hudson, 1964).

La velocidad de caída de las gotas de lluvia depende de su masa y la distancia recorrida. A medida que aumentan el tamaño de las gotas es mayor su velocidad terminal. Además, la distancia que debe recorrer la gota para lograr la velocidad máxima está en función de su tamaño (Lal, 1977). Por otra parte, se ha demostrado que la capacidad de la gota de lluvia en esparcir las partículas del suelo está en función de la velocidad, del diámetro de la gota y la intensidad de la precipitación (Sreenivas *et al.* 1947).

Una gota de lluvia liberada en el aire requiere una velocidad inicial a cierta distancia de caída antes de alcanzar la velocidad final. Cuando la distancia de caída es insuficiente, la velocidad de impacto de la gota de lluvia es menor que la velocidad final. La velocidad de impacto para una distancia de caída dada podrá ser determinada por el uso de la relación del coeficiente de arrastre. La aceleración varía con la velocidad de caída, incrementándose entonces la fuerza de arrastre. La fuerza ejercida en una gota de lluvia acelerada consiste de la fuerza flotante (la fuerza de arrastre) y otra fuerza de resistencia debido a la inercia del aire y la turbulencia (Park, 1983).

Chow *et al* (1994) proponen la siguiente fórmula para calcular la velocidad terminal de las gotas de agua:

$$V_t = \frac{[4gD(\rho_w - 1)]^{1/2}}{[3C_d(\rho_a - 1)]^{1/2}} \quad (1)$$

Donde V_t es la velocidad terminal, g es la aceleración de la gravedad, D es el diámetro de la gota, C_d es el coeficiente de arrastre, ρ_w es la densidad del agua y ρ_a es la densidad del aire.

Existen estudios experimentales que demuestran que el poder erosivo de la lluvia se relaciona con parámetros compuestos deducidos de las combinaciones de varias propiedades físicas. La energía cinética de la lluvia y su cantidad de movimiento son ejemplo de éstas. Si se conoce el tamaño de las gotas y su velocidad terminal, es posible calcular la cantidad de movimiento de la lluvia que cae, o su energía cinética, sumando los valores de las distintas gotas. En conjunto, este método indirecto de cálculo ha dado mejores resultados que los intentos de medir directamente la cantidad de movimiento o la energía cinética de la lluvia que cae (Hudson, 1964).

Sin embargo, la capacidad del flujo superficial a transportar las partículas de suelo separadas o desprendidas es enormemente incrementado por la velocidad que imparte el impacto de la gota de lluvia. La velocidad del movimiento horizontal del agua fuera de la situación del impacto por la superficie está en función del ancho máximo del hueco esparcido y del tiempo que tome para esparcir hasta alcanzar la altura máxima (Mutchler y Young, 1975). El ancho del dispersar varía con la profundidad del agua superficial y el diámetro de la gota (Jansson, 1982).

Tanto la cantidad de movimiento como la energía cinética tienen con la intensidad una relación muy similar, y la cuestión técnica es saber cual de las dos se puede medir con más facilidad y con más exactitud. La investigación de este asunto se ve estimulada por el conocimiento de que existe una fuerte relación entre la cantidad de movimiento o la energía de la lluvia y su poder para producir erosión (Hudson, 1964).

El principal agente de erosión y transporte son el impacto de la gota de lluvia y el flujo superficial del agua. La energía cinética de la gota de lluvia y corte de el flujo superficial que realiza el trabajo de erosión y transporte. La intensidad de la precipitación es responsable de la energía cinética con el cual se han hecho muchos trabajos (Jansson, 1982).

La ecuación de la energía cinética (EC) viene dada por la relación entre la masa (M) y la velocidad (V):

$$EC = 1/2 MV^2 \quad (2)$$

Así, si conocemos: La intensidad de la precipitación, el tamaño de la distribución de la gota de lluvia y la velocidad de cada clase de tamaño de gota, se puede calcular la energía cinética.

La erosividad de la lluvia es la habilidad potencial de la lluvia para causar erosión y depende de las características propias de la lluvia (Hudson, 1971). La mayoría de las expresiones que describen la erosividad están relacionadas a la energía cinética o momentum, ambos por unidad de lluvia o por unidad de área de impacto de la gota. Aun para índices recientemente desarrollados (Ghadiri y Payne, 1977, 1979; Imeson *et al*, 1981) la expresión puede ser descrita como (Meyer, 1965; Bubenzer, 1979):

$$E \propto D^p V^q \quad (3)$$

Donde E es la erosividad; D es el diámetro equivalente de la gota (m); V es la velocidad de caída (m/s), p y q son coeficientes. Alternativamente la ecuación anterior puede ser escrita como:

$$E \propto M^y V^z \quad (4)$$

Donde M es la masa de la gota (kg); y, z son coeficientes.

De estas ecuaciones resulta evidente que la velocidad de impacto de las gotas es uno de los factores más importantes en la determinación de la erosividad

de la lluvia. También el conocimiento de la velocidad de caída de las gotas es un factor necesario para la validación de índices de erosividad de base física. Estos índices son esenciales si se investigan los principios básicos de la mecánica de erosión (Epema y Riezebos, 1983). A partir de esos principios pueden ser construídos modelos con base física sobre los sistemas de erosión como lo indica Morgan (1980).

Aunque hubo varios intentos previos, la velocidad de caída de las gotas de agua definitivamente fue medida por Laws (1941), Gunn y Kinzer (1949), y más recientemente por Wang y Purppacher (1977), Asseline y Valentín (1978), Epema y Riezebos (1983). Los resultados de todos estos estudios son muy similares y muestran que la velocidad de caída es una función del tamaño de la gota (diámetro o masa) y la altura de caída, para diámetro de gotas entre 1,2 y 6,2 mm y alturas de 0,5 a 20 m)

Varios investigadores han estudiado estas relaciones; por ejemplo Laws (1941), Spilhaus (1948), Gunn y Kinzer (1949), Wobus *et al* (1971), Dingle y Lee (1972), Beard (1977, 1980), Epema y Riezebos (1983). El cuadro 3 muestra la velocidad terminal de gotas de lluvia de varios tamaños.

Cuadro 3. Velocidad terminal (m/s) para gotas de agua de acuerdo a su diámetro para alturas de caída superior a 8 m.

Diámetro de gotas									
Autor	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Laws	6.58	7.41	8.06	8.52	8.86	9.10	9.25	9.30	9.30
Gunn y Kinzer	6.49	7.42	8.06	8.52	8.83	9.00	9.09	9.15	-
Epema y Riezebos	6.68	7.41	7.99	8.46	8.75	8.96	9.08	9.13	9.24

El impacto de las gotas de lluvia sobre la erosión del suelo, la destrucción de agregados, el sellamiento de la superficie, y la infiltración ha sido demostrada

(Laws, 1940; Levine, 1952; Wischmeier, 1959). Este efecto es comúnmente representado desde el punto de vista matemático en términos de energía cinética o momentum por unidad de lluvia. Hudson (1981) describe varios métodos directos para medir la energía cinética; incluyendo sensores acústicos, transductores de presión y sensores piezoeléctricos, pero indica que estos instrumentos son sensitivos al viento y otros efectos, son caros, y están limitados a aplicaciones de investigación. El método más común de determinar el contenido de energía de lluvias naturales o artificiales es calcular esta a partir de las propiedades físicas de las gotas de lluvia. Para hacer esto es necesario conocer (Eigel y Moore, 1983): a) velocidad de caída de las gotas de lluvia (V_i); b) el tamaño de las gotas de lluvia (d_i); y c) la distribución del tamaño de gotas (n_i o μ_j).

La energía cinética por unidad de volumen de lluvia, E (J/m^2 mm) es:

$$EC = 1/2 \rho \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3 v_i^2 n_i}{\sum_{i=1}^N d_i^3 n_i} \quad (5)$$

Donde ρ es la densidad de la gota de lluvia (g/cm^3), n_i es el número o fracción de gotas en el intervalo de diámetros de gotas y caracterizado por un diámetro efectivo d_i (mm), v_i es la velocidad de impacto de la gota de lluvia (m/s), y N es número de intervalos de diámetro de gotas.

La distribución de gotas es frecuentemente presentada en términos del porcentaje de volumen total en el intervalo de diámetro específico, m_j , más que como n_i (Laws y Parson, 1943). Estas distribuciones están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$m_j = \frac{n_j d_j^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3} \quad (6)$$

V. MATERIALES Y METODOS:

5.1 Area de estudio:

El estudio de las características de la lluvia referentes al tamaño y distribución de tamaño de gotas y energía cinética de gotas se realizó en dos sitios: 1) La Estación Experimental Fabio Baudrit perteneciente al régimen de precipitación Pacífico, ubicada en Alajuela, con una elevación de 840 msnm, y coordenadas geográficas correspondientes a 10°01' de Latitud Norte y 84°16' de Longitud Oeste. El sitio pertenece a la formación ecológica Bosque Húmedo Premontano. 2) El campus del CATIE en Turrialba, provincia de Cartago, con una elevación de 602 msnm con coordenadas geográficas 09°53' de Latitud Norte y 83°38' de Longitud Oeste, perteneciente al régimen pluviométrico Atlántico o Caribe. Este sitio corresponde a la formación ecológica Bosque Muy Húmedo Premontano según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1987).

Para el estudio de las características de la lluvia concernientes a la cantidad, intensidad, duración y su comportamiento con respecto a la altura sobre el nivel del mar, se utilizaron pluviogramas provenientes de diez estaciones meteorológicas ubicadas en un perfil altitudinal correspondiente a la vertiente del Caribe. Estas son las estaciones: Volcán Irazú, Sanatorio Durán, Coliblanco, Pacayas, San Antonio, Platanillo, CATIE, Diamantes, La Lola y Limón. La ubicación geográfica de todas las estaciones mencionadas se indican en la figura 2 y el cuadro 4.

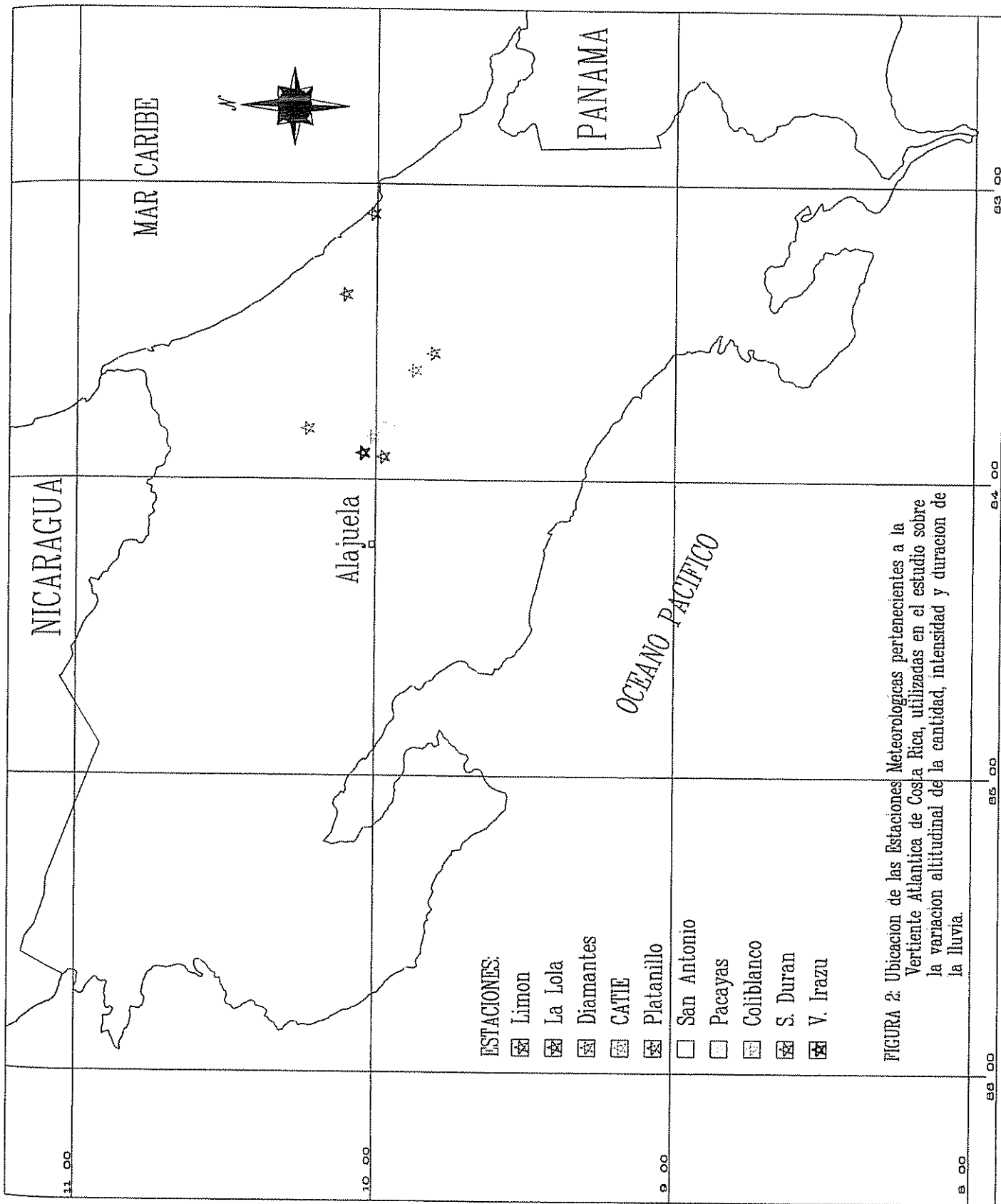


FIGURA 2: Ubicacion de las Estaciones Meteorologicas pertenecientes a la Vertiente Atlantica de Costa Rica, utilizadas en el estudio sobre la variacion altitudinal de la cantidad, intensidad y duracion de la lluvia.

Cuadro 4. Estaciones meteorológicas de la Vertiente Atlántica de Costa Rica utilizadas en el estudio sobre la variación altitudinal de la cantidad, intensidad y duración de la lluvia.

Estación	Número	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Volcán Irazú	73081	09°51'	83°51'	3400
Sanatorio Durán	73011	09°56'	83°53'	2337
Coliblanco	73078	09°57'	83°48'	2200
Pacayas	73022	09°55'	83°49'	1735
San Antonio	73074	09°58'	83°43'	1190
Platanillo	75003	09°49'	83°34'	889
CATIE	73010	09°53'	83°38'	602
Diamantes	73013	10°13'	83°46'	249
La Lola	77002	10°06'	83°23'	40
Limón	81003	10°00'	83°03'	5

5.2 Determinación del volumen, diámetro medio de las gotas y la curva de calibración diámetro-masa.

Esta parte de la metodología consistió de tres etapas: determinación del volumen medio de las gotas, cálculo del diámetro medio de las gotas y obtención de la curva de calibración diámetro-masa de las gotas.

5.2.1 Determinación del volumen medio de las gotas.

Para determinar el diámetro de las gotas de lluvia es necesario conocer su volumen. Esta fase metodológica se realizó en el laboratorio de suelos del CATIE. Para ello, se instaló sobre un soporte utilizado generalmente para buretas, un émbolo de 10 cc de capacidad volumétrica, al cual se le conectó una llave de regulación del flujo de agua para poder controlar la velocidad de formación de gotas. A esta llave se conectaron sucesivamente agujas de diferentes diámetros, lo que permitió obtener gotas de diferente volumen.

Para obtener gotas pequeñas (no era posible con las agujas encontradas en el mercado) se utilizó una micropipeta marca Eppendorf que permite formar gotas entre 1 a 20 microlitros. Paralelamente a la toma de la muestra, se tomó la temperatura del agua, para realizar la corrección de la densidad del agua por efecto de este factor.

De cada aguja se dejaron salir 40 gotas en grupos de 5 cada uno (8 mediciones), las que se recogieron sobre un beaker de 50 ml y se pesaron en una balanza analítica. Luego se obtuvo el peso promedio por gota. Para obtener el volumen promedio por gota se utilizó la ecuación $d = m/v$, donde v es el volumen, m es la masa o peso de la gota y d es la densidad del agua corregida por la temperatura.

5.2.2 Determinación del diámetro medio de las gotas.

Para ello, se utilizó la ecuación descrita por Asseline y Valentín (1978) para el cálculo del diámetro de una gota; utilizando los datos de volumen obtenidos en el paso anterior.

$$D = \sqrt[3]{6V / 3,1416} \quad (7)$$

Donde:

D = Diámetro medio de la gota

V = Volumen medio de la gota

Este procedimiento permitió obtener gotas de los siguientes diámetros: 1,56; 1,98; 2,18; 2,29; 2,70; 2,72; 2,86; 2,95; 2,96; 3,29; 3,33; 3,55; 4,74 mm.

5.2.3 Obtención de la relación entre diámetro medio de gotas y la masa media de agregados formados.

Para la determinación de esta relación se utilizó el método de los agregados de harina propuesto por Hudson (1964). Este consiste en determinar la masa de los agregados de harina formados por gotas de diámetro conocido. En este caso se dejaron caer por gravedad 30 gotas de cada uno de los diámetros antes mencionados sobre un recipiente que contenía una capa de harina de 2,5 cm de espesor.

Los émbolos de las jeringuillas fueron colocados sobre una base-soporte para mantenerlos firmes y a una altura constante de 1,20 m. Al igual que en el paso anterior entre el émbolo y las agujas se colocó una llave de paso para dejar salir las gotas en forma constante y controlar la velocidad de salida. Siempre la columna de agua se mantuvo a la misma altura.

Posteriormente los agregados formados para cada diámetro de gota, se dejaron secar al aire durante dos horas; luego se extrajeron de los recipientes con harina mediante el uso de cucharas pequeñas y se colocaron en bolsas de papel, para luego ser secados al horno a una temperatura de 110 °C, por un período de dos horas. Se pesaron en la balanza analítica y se determinó la masa total de los agregados según el diámetro de las gotas. La masa promedio de los agregados, se obtuvo dividiendo la masa total de los agregados entre el número de agregados obtenidos. Luego de hacer esta experimentación para los diferentes diámetros disponibles, se construyó la curva de calibración diámetro medio de la gota en función de la masa media del agregado y su respectiva expresión matemática.

5.3 Muestreos de lluvias naturales en Alajuela y Turrialba:

Los muestreos para determinar tamaño de gotas, la distribución de tamaños de gotas se realizó en dos sitios: la Estación Experimental Fabio Baudrit ubicada en Alajuela, con una elevación de 840 msnm, correspondiente al régimen de precipitación Pacífico, y el en campus del CATIE en Turrialba, perteneciente al régimen pluviométrico Atlántico o Caribe. Los muestreos en la Fabio Baudrit se realizaron en agosto de 1996 y en CATIE entre agosto y septiembre, 1996.

La metodología seguida para los muestreos fue la siguiente:

Previamente a la toma de las muestras se colocaron dos pluviómetros en una determinada área muy cerca de la estación meteorológica y se tomaba el tiempo en el que fueron expuestos y retirados de la lluvia con el fin de determinar la intensidad del evento. En este intervalo de tiempo se exponían recipientes plásticos de 21,5 cm de ancho por 30 cm de largo y 6,5 cm de alto, con harina de tipo comercial fina, al impacto de gotas de lluvia durante 1 a 3 segundos, tiempo que dependía de la intensidad de la lluvia, de manera que fuese suficiente para

que varias gotas impactaran en el recipiente, pero que no cayeran sobre otras gotas.

Los agregados formados se secaron primero al aire libre, luego se extraían de los recipientes agregado por agregado con cucharas de cocina, para ser colocados en bolsas de papel manila, separándolos por fechas y horas de muestreos. Luego se pasaron a través de tamices entre un rango de 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 4,75, 6,35, a 8,0 mm de diámetro, para obtener así la distribución de frecuencias del tamaño de agregados. Los agregados para cada ámbito de tamaño fueron contados, excepto cuando eran demasiados, en cuyo caso se estimó el número a partir de una muestra y el peso total de los agregados.

Seguidamente estos agregados fueron secados al horno a 110 °C durante dos horas. Posteriormente fueron pesados en una balanza analítica, obteniendo así la masa total de los agregados. La masa media de los agregados se obtuvo dividiendo la masa total entre el número de agregados.

Paralelamente a los muestreos se determinó la intensidad de cada una de las lluvias donde se tomaron las muestras, a fin de poderla relacionar con la distribución de tamaños de gotas. Se realizaron varios muestreos a través del evento pluviométrico y en diferentes eventos a fin de obtener la relación mencionada. Esta fase del estudio se hizo generalmente para lluvias de tipo convectivo. Además se realizaron comparaciones de las mediciones obtenidas con los pluviómetros y la registrada por la banda en el pluviógrafo de cada sitio.

Los diámetros medios de las gotas de lluvia fueron entonces obtenidos empleando la ecuación de mejor ajuste resultante de la calibración de la masa media de agregados en función del diámetro medio de las gotas, tal y como se describió en el apartado 5.2.3

5.4 Determinación de la energía cinética de las lluvias:

Para calcular la energía cinética se utilizó la información obtenida para las diferentes intensidades (distribución de tamaño de gotas) y la velocidad de caída. Estudios realizados (Laws, 1941; Gunn y Kinzer, 1949; Epema y Riezebos, 1983) han mostrado resultados casi idénticos que muestran que para alturas superiores a 8 m, la velocidad terminal de las gotas de lluvia varía muy poco con la altura y depende básicamente de su diámetro. (Ver cuadro 3, revisión bibliográfica). A partir de los datos de esos autores se obtuvo una ecuación logarítmica $\ln(V)=1,52 + 0,4467\ln(d)$ ($r^2=0,91$) para calcular la velocidad terminal en función de los diámetros obtenidos de las gotas de lluvias.

Para el cálculo de la energía cinética de las lluvias muestreadas se utilizó la siguiente ecuación propuesta por Eigel y Moore (1983):

La energía cinética (E) por unidad de volumen de lluvia, $J/m^2 \cdot mm$) es:

$$E = 1/2 \rho \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3 v_i^2 n_i}{\sum_{i=1}^N d_i^3 n_i} \quad (8)$$

Donde:

ρ = Densidad de la gota de lluvia (g/cm^3)

n_i = número o fracción de gota de lluvia en el intervalo de diámetros de gotas.

d_i = diámetro efectivo de gotas de lluvia (mm).

v_i = velocidad de impacto de la gota de lluvia (m/s)

N = número de intervalos de diámetro de gotas.

5.5 Determinación de características de las lluvias en función de la altitud.

Se analizaron los pluviogramas diarios de 15 años, (1978 - 1992) para cada una de diez estaciones meteorológicas ubicadas en un perfil altitudinal en la Vertiente Atlántica: Volcán Irazú, Sanatorio Durán, Coliblanco, Pacayas, San Antonio, Platanillo, CATIE, Diamantes, La Lola y Limón. Para cada estación se analizaron:

a) Las intensidades máximas para 30, 60 y 120 minutos para cada uno de los meses durante 15 años analizados.

b) Las duraciones promedio diarias de las lluvias en cada uno de los meses y promedio general para los 15 años estudiados. Para ello se obtuvo la duración total del (o de los) eventos pluviométricos de cada día, para cada mes de los 15 años, en cada estación meteorológica. Luego se calcularon los promedios para cada mes dividiendo la suma total de duraciones diarias entre el número de días con lluvias en el mes correspondiente. Finalmente se obtuvo el promedio general para todo el período de años estudiado.

c) La cantidad promedio mensual y anual de lluvia para cada uno de los meses, tomada de los registros del Instituto Meteorológico Nacional.

La información de las estaciones Volcán Irazú, Coliblanco, Pacayas, Diamantes y Limón fue facilitada por el Instituto Meteorológico Nacional; de las estaciones Sanatorio Durán, Platanillo y San Antonio fueron facilitadas por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Finalmente la información de las estaciones CATIE y la Lola se tomó de los registros que se mantienen en CATIE de esas estaciones, ya que pertenecen a esta institución.

5.6 Análisis de datos:

Para la obtención de la curva de calibración diámetro de gotas-masa de agregados se utilizó los procedimientos Proc Reg de SAS a fin de obtener la ecuación de mejor ajuste. Similar procedimiento se empleó para obtener la ecuación de velocidad terminal de las gotas en función de su diámetro.

Para el análisis de los datos de tamaño de gotas de lluvia, distribución de tamaños de gotas y energía cinética se utilizarón los paquetes informáticos Excel y SAS.

Finalmente para el análisis de la cantidad, intensidad y duración de lluvia en función de la altitud se usaron los procedimientos Proc Freq y Proc Reg de SAS así como Excel.

VI. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Determinación del volumen, diámetro medio de las gotas y la curva de calibración diámetro-masa.

El cuadro 5 muestra los datos obtenidos en el laboratorio en la determinación del volumen y diámetro de las gotas. Se puede observar que fue posible obtener diámetros de gota entre 1,56 mm y 4,75 mm, ámbito de tamaño que se puede considerar típico de las gotas de lluvia, ya que generalmente las gotas mayores de 5 mm tienden a dividirse en varias más pequeñas (Blanchard 1951). La obtención de gotas más pequeñas de 1,6 mm de diámetro es muy difícil aún bajo condiciones de laboratorio, debido a su pequeño volumen y peso, lo que hace que el viento interfiera con las mediciones.

En el cuadro 6 y la figura 3 se presenta los resultados correspondientes a la relación entre el diámetro medio de las gotas y la masa media de los agregados. El análisis estadístico de los datos mostró que existe una estrecha relación entre esas dos variables, obteniéndose un coeficiente de regresión de 0,99 (altamente significativo) para el modelo de regresión lineal logarítmico, que fue con el que se obtuvo el mejor ajuste. La ecuación que se obtuvo fue la siguiente: $\ln(d)=0,233 + 0,3244\ln(m)$, donde d es el diámetro de las gotas y m la masa media de los agregados de harina. Otros autores (Blanchard, 1951; Meyer, 1958; Asseline y Valentín, 1977). También han encontrado una estrecha correlación entre la masa de agregado y el diámetro de la gota, cualquiera que sea su tamaño, utilizando este mismo método de la harina. Este método ha sido empleado, tanto para lluvias naturales, como para lluvias simuladas y en diferentes condiciones ecológicas. Dada su sencillez, bajo costo y efectividad lo hace accesible para cualquier situación aún en países con limitaciones económicas. Sin embargo, se requiere de los cuidados normales de procedimientos de laboratorio.

Cuadro 5. Datos del volumen y diámetro medio de gota.

Muestra	temperatura del agua (° C)	Densidad del agua corregida por temperatura (g/cm ³)	Peso Promedio por gota de agua (g)	Volumen del agua (µl)	Diámetro medio de las gotas (mm)
12	23	0,9965	0,01218	12,22	1,5631
4	26	0,9959	0,00407	4,09	1,9842
5	26	0,9959	0,00539	5,41	2,1783
8	25	0,9961	0,00624	6,26	2,2866
2	23	0,9965	0,01022	10,26	2,6956
1	23	0,9965	0,01056	10,60	2,7249
3	23	0,9965	0,01219	12,23	2,8585
9	26	0,9959	0,01339	13,44	2,9499
10	26	0,9959	0,01359	13,64	2,9648
7	25	0,9961	0,01857	18,65	3,2898
13	24	0,9963	0,01933	19,40	3,3340
6	25	0,9961	0,02340	23,49	3,5532
11	26	0,9959	0,05576	55,99	4,7464

Cuadro 6. Datos sobre el diámetro medio de las gotas de agua y la masa media de los agregados de harina formados.

Muestra	Diámetro medio de las gotas (mm)	Nº de agregados	Masa o peso de los agregados (g)	Masa media de los agregados (mg)
12	1,5631	30	0,0500	1,67
4	1,9842	35	0,1428	4,08
5	2,1783	48	0,2704	5,63
8	2,2866	31	0,2166	6,90
2	2,6956	26	0,2796	10,75
1	2,7249	26	0,2845	10,94
3	2,8585	19	0,2428	12,78
9	2,9499	30	0,4097	13,66
10	2,9648	39	0,5593	14,34
7	3,2898	29	0,5287	18,23
13	3,3340	30	0,6030	20,10
6	3,5532	30	0,6976	23,25
11	4,7464	32	1,7584	54,95

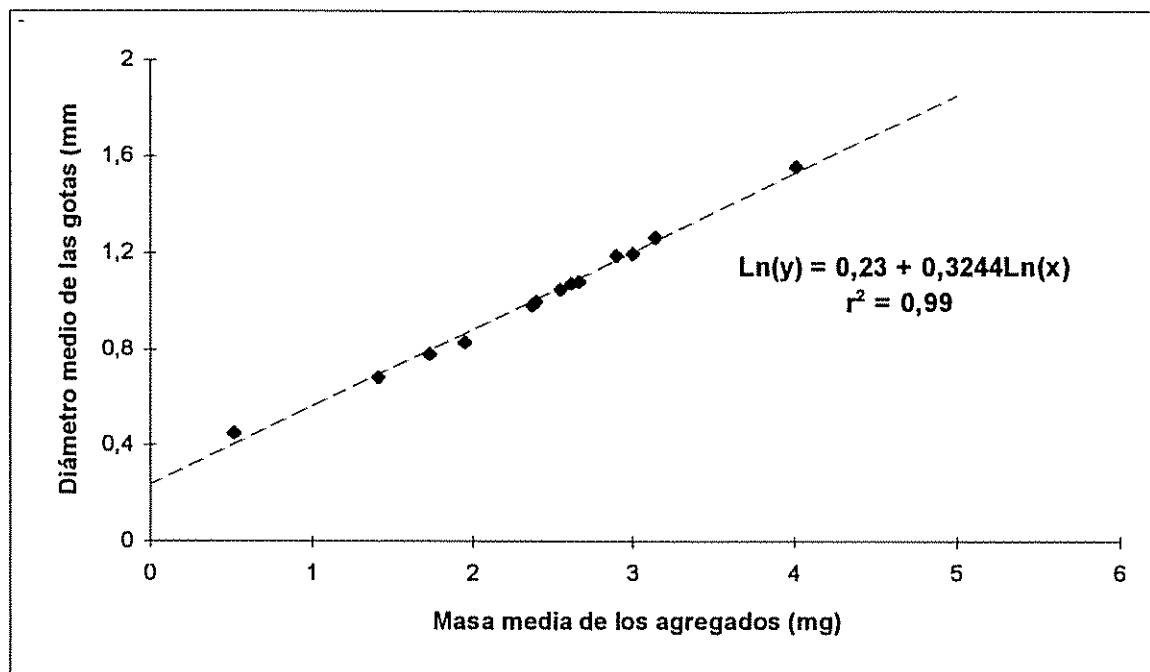


Figura 3. Curva de calibración obtenida en el laboratorio para la relación entre la masa media de los agregados de harina y el diámetro medio de las gotas de agua.

6.2 Distribución de tamaño de gota y energía cinética de lluvias naturales en Alajuela y Turrialba.

6.2.1 Distribución de tamaño de gotas

El cuadro 1A, presenta la distribución de diámetro de agregados, el número de agregados, su frecuencia relativa, el diámetro medio de las gotas de lluvia y el diámetro medio ponderado de gotas para eventos pluviométricos en el CATIE. Las intensidades de las lluvias muestreadas variaron entre 2,8 mm/h y 105,4 mm/h, aunque la mayoría fueron inferiores a 35 mm/h. Los diámetros medio de gotas oscilaron entre 0,83 mm (evento # 10) y 6,6 mm (evento # 14). En todos los eventos muestreados el diámetro de gotas predominante estuvo entre 1 y 2 mm (figura 4), aunque, como se observa en el cuadro 1A, en los eventos mayores de 20 mm/h, hubo una tendencia a presentarse bastantes gotas de diámetros entre 2 y 3 mm. La mayoría de los eventos menores de 10 mm/h no presentaron gotas con diámetros mayores de 3,2 mm, mientras que sí fueron frecuentes, para las lluvias con intensidades por encima de ese valor.

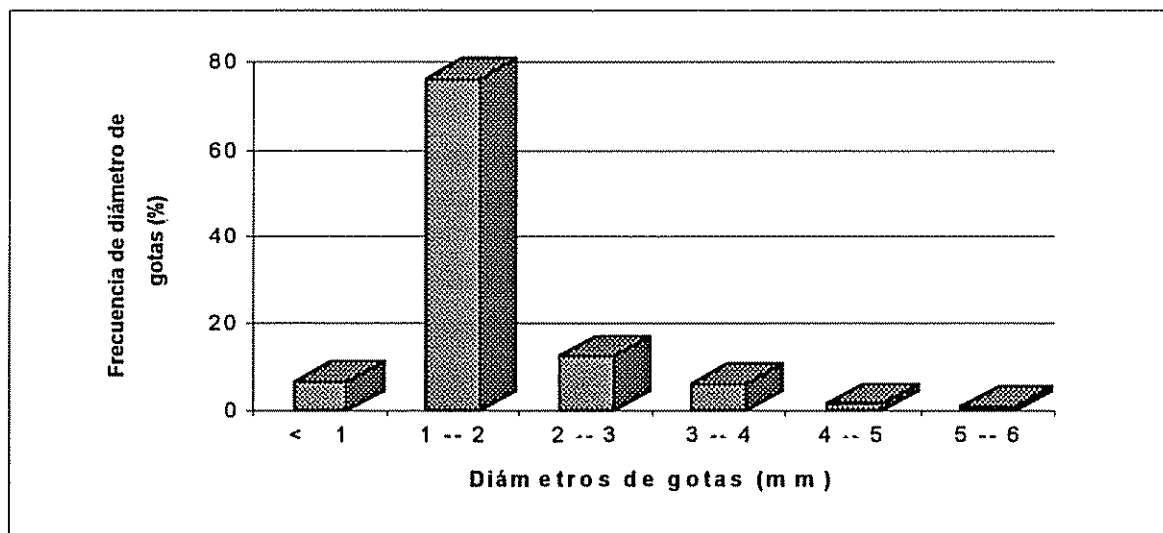


Figura 4. Frecuencia promedio de diámetros de gotas de lluvia para los eventos muestreados en Turrialba (CATIE).

Al determinar el diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia para cada evento, se obtuvo que este varía entre 1,36 y 2,36 mm, con cierta tendencia a aumentar conforme aumenta la intensidad de la lluvia (figura 5). Sin embargo la correlación estadística entre diámetro medio ponderado e intensidad fue relativamente bajo ($r^2=0,56$). Por ejemplo el mayor diámetro se obtuvo para una intensidad de 22,6 mm/h, superando al diámetro obtenido cuando la intensidad fue de 105,4 mm/h, (figura 5). La poca variación en el diámetro medio ponderado de la gota se debe a la alta predominancia de gotas con diámetros entre 1 y 2 mm.

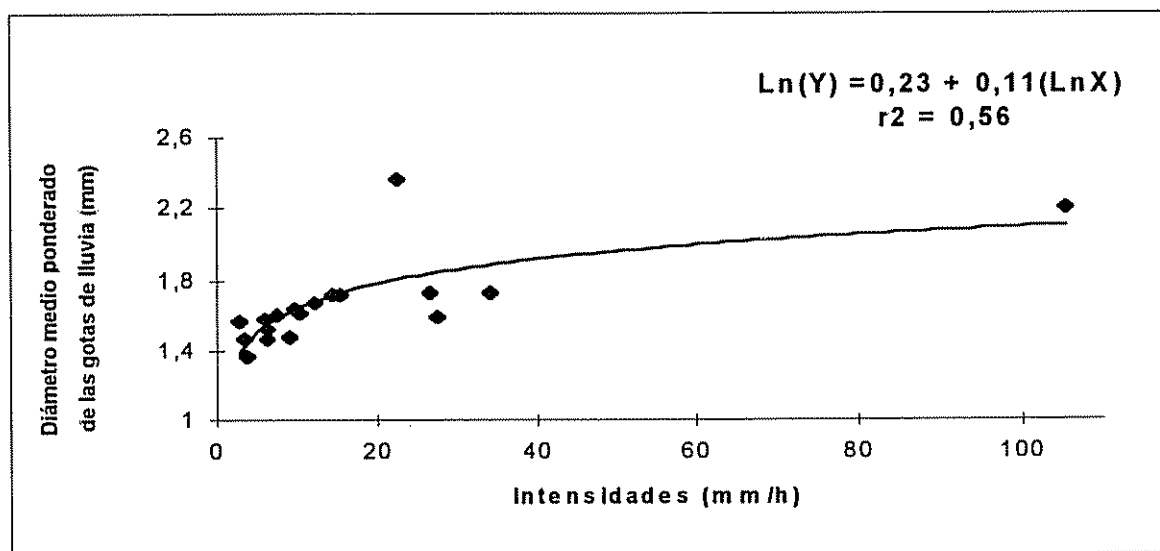


Figura 5. Relación entre el diámetro medio ponderado de las gotas y la intensidad de la lluvia en Turrialba (CATIE).

Los resultados de la distribución de agregados, número de agregados, frecuencia relativa, diámetro medio de las gotas de lluvia y el diámetro medio ponderado de gotas, para los eventos muestreados en Alajuela (estación Fabio Baudrit), se muestran en el cuadro 2A. Las intensidades de las lluvias muestreadas para dicha estación variaron de 1,5 mm/h a 91,4 mm/h. Por su parte los diámetros medios de gotas oscilaron entre 0,75 mm y 7,39 mm, (eventos 2 y 18), respectivamente. Para todos los eventos muestreados los diámetros de gotas predominantes estuvieron entre 1 y 2 mm al igual que los resultados

obtenidos en el CATIE. Sin embargo, para este caso las gotas con diámetros menores de 1 mm alcanzaron una frecuencia de 28%. También las gotas entre 2 y 3 mm fueron más frecuentes en relación a la obtenida en Turrialba (figura 6). En este caso, el diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia, similar al caso de Turrialba, estuvo poco asociado estadísticamente a las intensidades de la precipitación ($r^2 = 0,2$) tal y como lo muestra la figura 7, pero con una clara tendencia a aumentar conforme aumenta la intensidad de la lluvia.

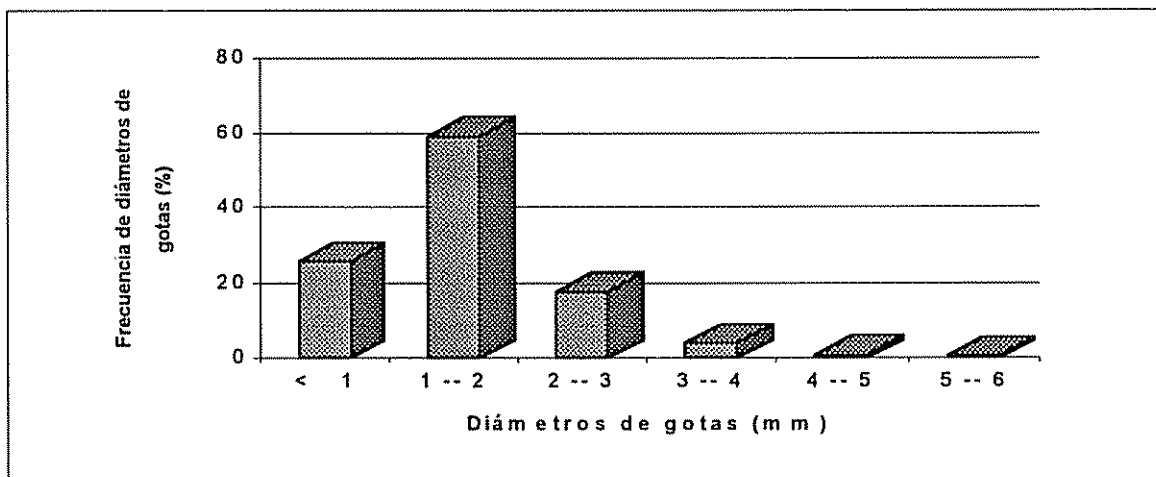


Figura 6. Frecuencia promedio de diámetros de gotas de lluvia para los eventos muestreados en Alajuela (Est. Fabio Baudrit).

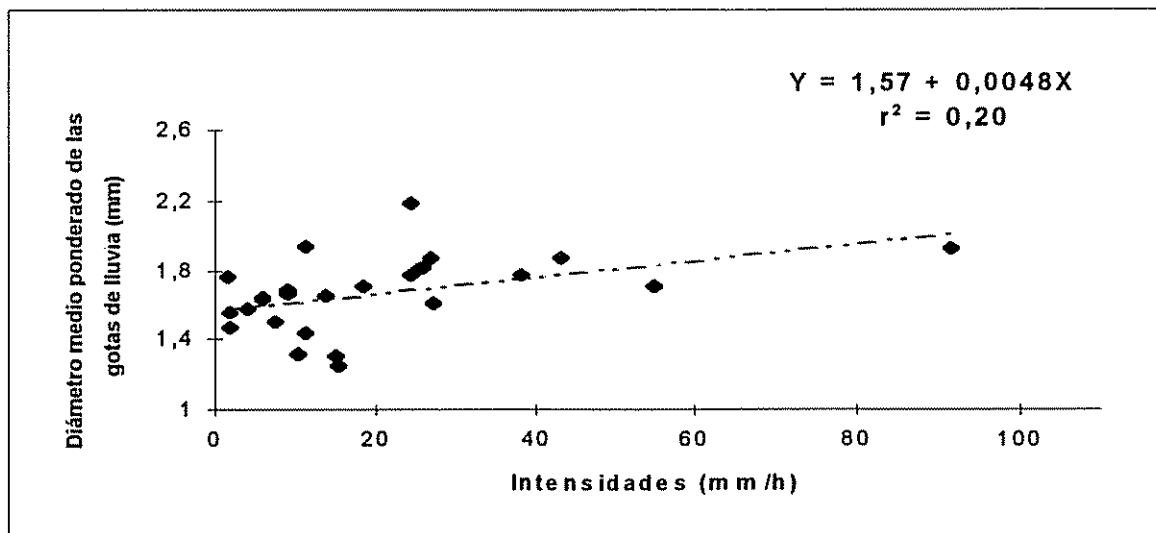


Figura 7. Relación entre el diámetro medio ponderado de las gotas y la intensidad de la lluvia para Alajuela (Estación. Fabio Baudrit).

Otros varios autores (Laws y Parsons, (1943); Chapman, (1948); Rogers et al, (1967); Carter et al, (1974); Bubenzer, (1979); Hudson, (1964); muestran datos donde el diámetro medio de las gotas varía poco en función de la intensidad de la lluvia. Por ejemplo, Laws y Parsons, (1943); indican diámetros medios de gotas que varían entre 1 mm para una intensidad de 0,3 mm/h y 3,1 mm/h para una intensidad de 152,4 mm/h; Chapman (1948); presenta datos que van desde diámetros de gotas de 1,4 mm para intensidades de 2,3 mm/h a diámetros de 2,1 mm para 35 mm/h. Carter et al (1974) y Hudson (1964) indican que el tamaño de gotas aumenta con la intensidad de la lluvia hasta valores de 80 a 100 mm/h pero que luego decrece a intensidades todavía mayores. Por ejemplo los primeros autores antes mencionados muestran datos donde el máximo diámetro de gotas (3 mm) se obtuvo con una intensidad de 76,2 mm/h, aunque dichas intensidades variaron desde 1,3 hasta 203 mm/h.

El cuadro 7 presenta un resumen del diámetro promedio y diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia para diferentes intensidades de ésta, tanto para Turrialba (CATIE) como para Alajuela (EEFB). Se observa que en promedio no hubo diferencias entre ambos sitios (diámetro medio ponderado igual a 1,67). Tampoco hubo diferencias estadísticamente significativas para diámetro promedio. A nivel de clases de intensidad los valores son también bastante similares entre sitios, para una misma clase y tienen tendencia a aumentar conforme se incrementa la intensidad de la lluvia. Excepto para el evento de 105,4 mm/h de Turrialba, en todas las otras lluvias en Turrialba y Alajuela, el diámetro medio ponderado varió entre 1,5 y 2 mm, cuando estos datos se promediaron para diferentes intervalos de clase de intensidades de lluvia.

Cuadro 7. Diámetro promedio y diámetro medio ponderado (mm) de las gotas de lluvia para diferentes intervalos de intensidades de lluvia en Turrialba y Alajuela.

Intensidad (mm/h)	n	Diámetro promedio (mm)		n	Diámetro medio Ponderado (mm)	
		Turrialba	Alajuela		Turrialba	Alajuela
0 - 10	9	1,89	2,03	9	1,52	1,61
10 - 20	4	2,47	2,87	7	1,68	1,51
20 - 40	4	2,84	3,19	7	1,85	1,83
> 40	1	3,20	3,77	3	2,20	1,83
Promedio	18	2,30	2,76	26	1,67	1,67

6.2.2 Energía cinética de las lluvias naturales en Turrialba y Alajuela.

En los cuadros 3A y 4A se presentan los resultados de la energía cinética de las lluvias en Turrialba (régimen Atlántico) y Alajuela (régimen Pacífico), respectivamente. En Turrialba la energía cinética varió entre 15,2 y 33,2 $J/m^2 \cdot mm$, mientras que en Alajuela osciló entre 15,5 y 37,6 $J/m^2 \cdot mm$. En el caso de Turrialba, hubo una tendencia a aumentar la energía cinética a medida que aumentó la intensidad de la lluvia (figura 8). Sin embargo, la ausencia de datos para intensidades entre 40 y 100 mm/h dificulta un análisis detallado del comportamiento. En el caso de Alajuela (figura 9) el comportamiento es más claro, obteniéndose un modelo lineal con buen ajuste ($r^2=0,75$), y en donde la energía cinética aumenta conforme aumenta la intensidad de las lluvias. Los valores de energía cinética encontrados en este estudio, tanto para Turrialba como Alajuela, están dentro de los límites mencionados en la literatura. Por ejemplo Kowal y Kassan (1977) obtuvieron para 18 lluvias entre 6,6 y 60 mm,

ámbitos de energía cinética entre 21,8 y 39,5 J/m².mm, mientras que Elwell y Stocking obtuvieron en Rodesia energía del orden de 19 J/m².mm.

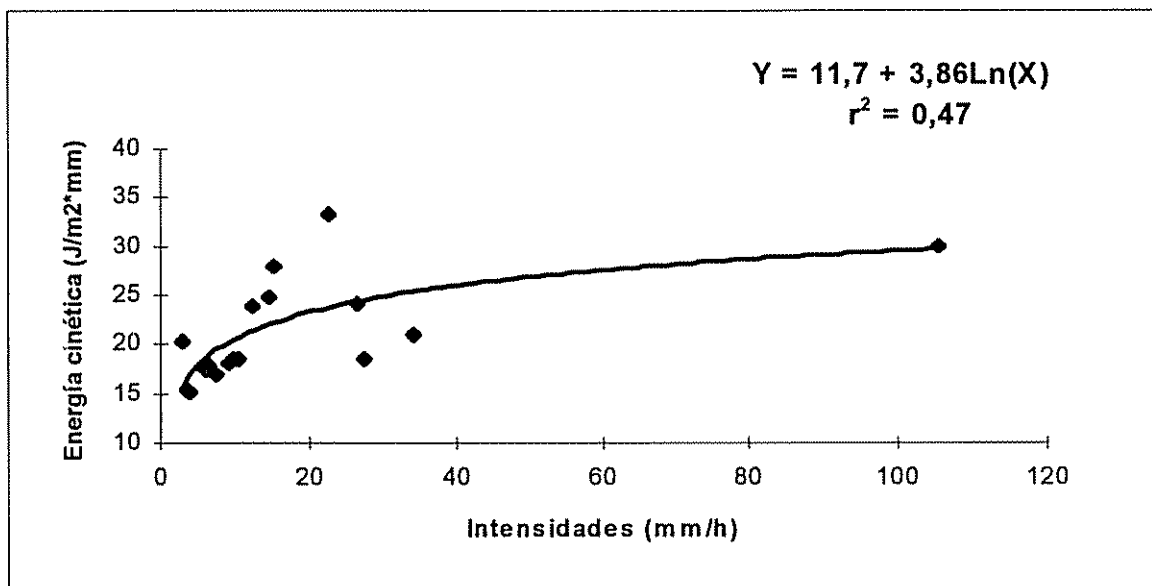


Figura 8. Relación entre la energía cinética y la intensidad de la lluvia para Turrialba (CATIE).

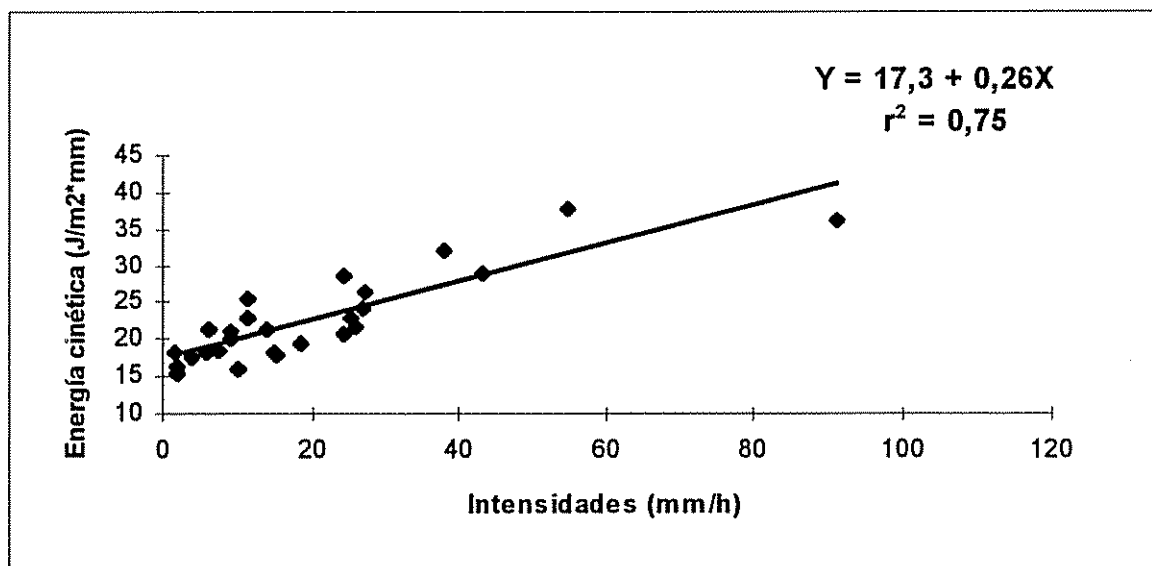


Figura 9. Relación entre la energía cinética y la intensidad de la lluvia para Alajuela (Fabio Baudrit).

El cuadro 8 presenta un resumen de la energía cinética promedio para diferentes intervalos de intensidad de lluvia, tanto en Turrialba como en Alajuela. Los datos indican que en promedio las lluvias fueron levemente más energéticas en Alajuela (22,64 J/m².mm) que en Turrialba (21,05 J/m².mm), aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Es de esperar que en Alajuela las lluvias tengan menos influencia de la orografía que en Turrialba, por lo que se puede considerar que los datos tienen una tendencia lógica. A nivel de clases de intensidad los resultados son más variables; el bajo número de observaciones limita hacer conclusiones definitivas, aunque de todas formas no hubo diferencias significativas entre las medias de ambos sitios para los diferentes intervalos de clase de intensidades.

Cuadro 8. Energía cinética promedio (J/m².mm) para diferentes intervalos de intensidades de lluvia en Turrialba y Alajuela.

Intensidad (mm/h)	Energía cinética promedio			
	n	Turrialba	n	Alajuela
0 - 10	9	17,48	9	18,52
10 - 20	4	23,73	7	20,22
20 - 40	4	24,20	7	25,38
> 40	1	29,90	3	34,20
Promedio	18	21,05	26	22,64

También se encontró una tendencia bastante clara entre la energía cinética como función del diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia (figuras 10 y 11), tanto en Alajuela como en Turrialba. En ambos casos la energía cinética aumentó conforme aumenta el diámetro medio ponderado de las gotas, aunque los datos son más dispersos en el caso de Alajuela. Los modelos de mejor ajuste obtenidos fueron los siguientes: Para Turrialba $Y = 3,6 + 34,78(\text{Ln}X)$ con un $r^2=0,84$ y para Alajuela $\text{Ln}(Y) = 2,6 + 1,06(\text{Ln}X)$ con un $r^2=0,33$. Resulta bastante

obvio que la energía cinética aumenta conforme lo hace el diámetro de las gotas, puesto que ésta se incrementa de manera proporcional a la masa y a la velocidad terminal de las gotas y entre masa y diámetros de las gotas y velocidad y diámetro existe también una relación directa.

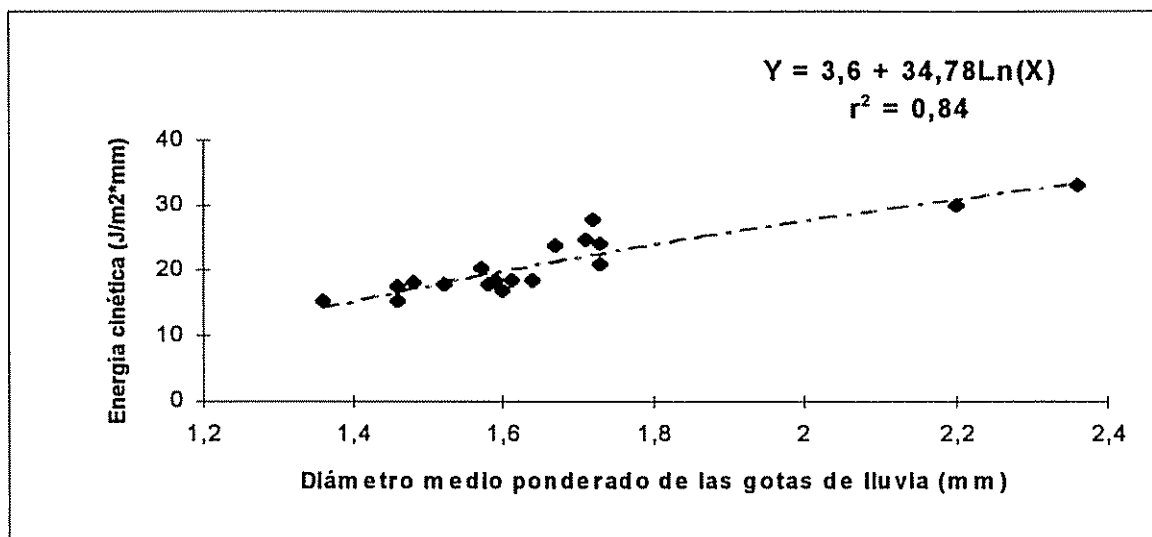


Figura 10. Relación entre la energía cinética y el diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia en Turrialba (CATIE).

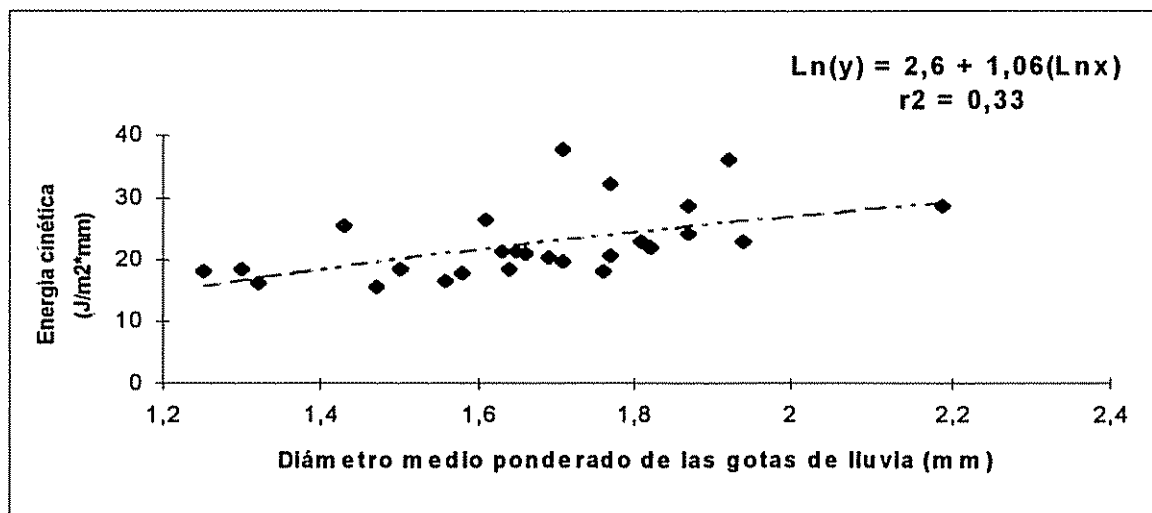


Figura 11. Relación entre la energía cinética y el diámetro medio ponderado de las gotas de lluvia en Alajuela (Fabio Baudrit).

Resulta interesenta hacer una comparación entre la energía cinética calculada de acuerdo a la distribución de tamaño de gotas (método de Eigel y Moore, 1983), utilizado en este estudio y la estimada a partir de la relación encontrada por Wischmeier y Smith (1958) y que se utiliza en la ecuación de pérdida universal del suelo. En el cuadro 9 se presentan esos resultados. Se observa que en el caso de Turrialba (CATIE) para intensidades bajas de lluvia (< 10 mm/h) en general, el método de W y S subestima la energía cinética y en intensidades mayores tiende a sobreestimarla, pero en promedio la diferencia solo fue de $0,3 \text{ J/m}^2 \cdot \text{mm}$ de lluvia. En Alajuela, por el contrario a intensidades menores de 15 mm/h y mayores de 27 mm/h hubo una tendencia a la subestimación de la energía cinética cuando se empleó el método de W y S, pero a nivel de promedio las diferencias se compensan bastante resultando una diferencia de $1 \text{ J/m}^2 \cdot \text{mm}$ de lluvia en favor del método de E y M. Tanto en Turrialba como en Alajuela las diferencias entre las medias para ambos métodos no fueron estadísticamente significativas.

Cuadro 9. Comparación entre la energía cinética de la lluvia obtenida en este estudio (método de Eigel y Moore) y la estimada por el método Wischmeier y Smith (EUPS).

Evento	Turrialba						Alajuela					
	Intensidad (mm/hr)		Energía cinética (J/m ² .mm)		E y M		Intensidad (mm/h)		Energía cinética (J/m ² .mm)		E y M	
	W	Y S	E	M	W	Y S	W	Y S	E	M	W	Y S
1	2,8	20,3	15,8	1,30	1,50	18,2	13,4	1,35				
2	3,4	15,3	16,5	0,93	1,96	15,5	14,4	1,08				
3	3,9	15,2	17,0	0,89	1,97	16,3	14,4	1,13				
4	5,9	17,7	18,6	0,95	4,00	17,6	17,1	1,02				
5	6,2	17,4	18,8	0,92	5,80	18,3	18,5	1,00				
6	6,4	17,8	18,9	0,94	6,10	21,2	18,7	1,13				
7	7,8	17,0	19,6	0,87	7,40	18,5	19,5	0,95				
8	9,0	18,1	16,5	1,10	9,10	20,2	20,2	1,00				
9	9,7	18,5	19,4	0,95	9,20	20,9	20,3	1,03				
10	10,2	18,5	20,7	0,89	10,2	16,1	20,7	0,78				
11	12,3	23,9	21,4	1,12	11,4	22,8	21,1	1,08				
12	14,4	24,7	22,0	1,12	11,4	25,6	21,1	1,21				
13	15,2	27,8	22,2	1,25	13,9	21,2	21,9	0,97				
14	22,6	33,2	23,7	1,40	15,1	18,3	22,4	0,82				
15	26,5	24,2	24,3	1,00	15,2	18,0	22,4	0,80				
16	27,5	18,4	24,4	0,75	18,6	19,6	23,0	0,85				
17	34,2	21,0	25,3	0,83	24,4	20,7	24,0	0,86				
18	105,4	29,9	29,5	1,01	24,4	28,6	24,0	1,19				
19					25,4	23,0	24,1	0,95				
20					26,0	21,8	24,2	0,90				
21					27,0	24,1	24,4	1,00				
22					27,4	26,3	24,5	1,07				
23					38,1	33,2	25,7	1,29				
24					43,4	28,8	26,2	1,10				
25					54,9	37,6	27,1	1,39				
26					91,4	36,2	29,0	1,25				
Promedio	17,97	21,1	20,8	1,01	20,2	22,6	21,6	1,05				

6.3 Características de la lluvia en función de la altitud

6.3.1 Duración de las lluvias

Las duraciones promedio diarias variaron entre dos horas y cuarenta y nueve minutos para la estación Sanatorio Durán y tres horas y cincuenta y cuatro minutos para la estación Coliblanco, con una ligera tendencia a ser más corta a baja altitud (figura 12 a). En el cuadro 10 aparecen las estadísticas descriptivas: promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, valor máximo y valor mínimo de la duración diaria promedio de la lluvia para los diferentes meses en 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica ubicada en un perfil altitudinal entre 5 y 3400 metros sobre el nivel del mar.

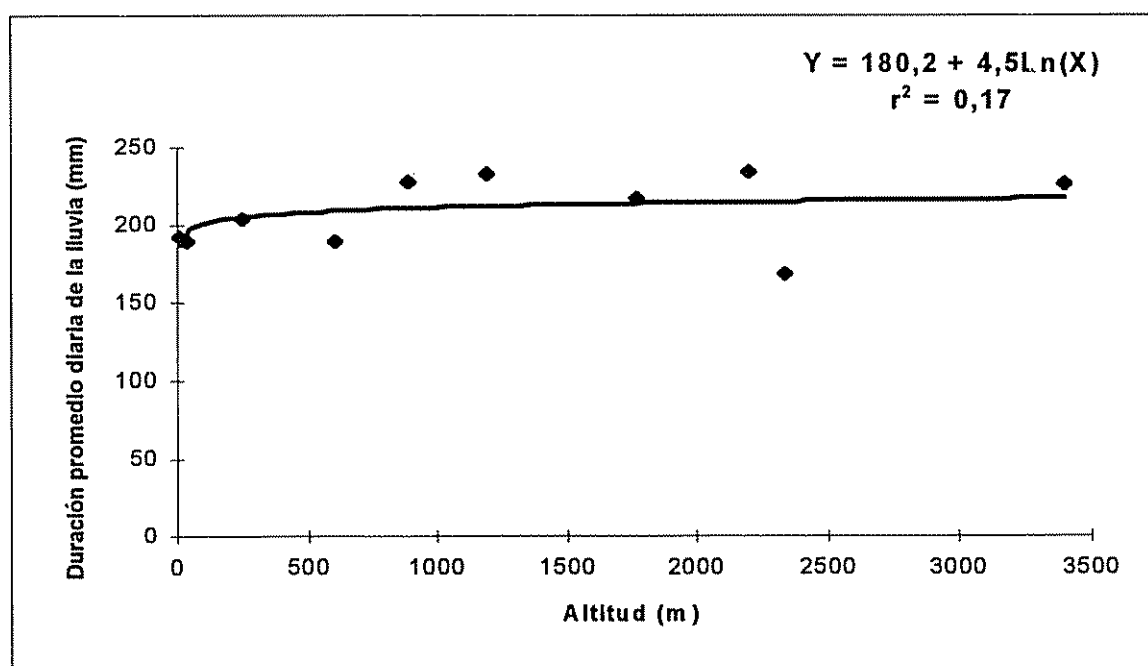


Figura 12a. Comportamiento de la duración media diaria de la lluvia en función de la altitud para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

Cuadro 10. Datos de duración diaria promedio (horas y minutos) de la lluvia para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica.

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses													
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Pro.	
Limón	5	Pro.	2:44	4:12	3:08	3:00	3:10	2:54	3:36	3:09	2:31	3:03	3:30	3:25	3:12	
		D.E.	3:02	3:38	3:48	3:17	3:03	2:17	3:00	2:59	2:10	3:21	3:02	3:27	3:13	
		C.V.	1:11	1:21	1:21	1:09	96	79	83	83	95	86	110	87	101	100
		Max.	16:25	23:50	22:10	17:56	15:30	10:20	20:00	20:00	18:25	10:55	22:05	15:20	20:00	17:43
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05
La Loia	40	Pro.	3:33	3:37	4:13	3:37	3:01	2:43	2:21	2:31	3:09	3:05	3:21	3:00	3:10	
		D.E.	3:11	2:32	2:50	2:26	3:15	2:43	2:52	2:36	2:04	2:47	3:16	3:21	2:49	
		C.V.	90	70	67	67	108	100	122	103	66	90	98	112	91	
		Max.	20:50	18:25	14:20	13:30	16:30	14:00	12:45	14:10	14:10	9:40	17:00	18:00	23:20	16:05
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05
Diamantes	249	Pro.	4:27	3:18	2:52	3:39	2:56	3:13	2:58	3:15	2:34	3:09	3:56	4:27	3:24	
		D.E.	5:48	3:36	3:33	3:52	2:28	2:46	2:48	2:39	2:16	3:03	4:23	4:45	3:30	
		C.V.	130	109	124	106	84	86	94	82	89	97	112	107	102	
		Max.	21:50	21:00	20:05	18:30	11:15	14:40	17:00	14:00	14:00	13:15	20:30	21:30	21:25	17:55
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05
CATIE	602	Pro.	3:55	3:05	3:32	2:39	2:51	2:23	2:27	5:50	2:22	3:14	2:37	3:04	3:09	
		D.E.	5:18	3:48	4:36	2:56	2:24	1:55	2:27	2:17	2:07	3:10	3:00	3:32	3:07	
		C.V.	135	123	130	111	84	80	100	39	89	98	115	115	102	
		Max.	24:00	16:40	22:00	17:15	14:20	9:00	14:10	13:30	11:10	21:00	18:20	18:00	16:37	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	
Platanillo	889	Pro.	3:56	4:37	4:08	3:33	3:29	3:17	3:04	3:05	3:24	4:30	4:14	4:02	3:47	
		D.E.	5:15	5:28	4:58	3:50	2:51	2:39	3:10	3:01	2:49	4:00	4:47	5:07	4:00	
		C.V.	133	118	120	108	82	80	104	98	83	89	113	127	105	
		Max.	24:00	24:00	24:00	24:00	13:00	16:20	22:30	19:20	16:40	20:55	24:00	24:00	21:03	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	

....Continuación

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Dic.	Pro.
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.			
San Antonio	1190	Pro.	5:00	4:51	4:44	4:17	3:24	3:00	3:01	3:04	2:36	3:36	4:00	5:00	3:53	
		D.E.	5:22	5:06	5:09	4:33	3:15	2:25	3:02	2:58	2:23	3:23	4:33	5:31	3:58	
		C.V.	107	105	109	106	96	81	101	97	92	94	114	110	101	
		Max.	24:00	24:00	23:10	23:50	18:25	11:10	19:00	19:25	14:10	17:45	24:00	24:00	20:14	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	
Pacayas	1765	Pro.	4:57	3:22	3:14	3:46	2:58	2:43	2:47	2:48	2:48	3:55	4:27	5:32	3:37	
		D.E.	4:48	3:39	3:09	3:38	2:27	2:18	2:56	2:22	2:17	3:21	4:30	5:15	3:23	
		C.V.	97	109	97	96	82	85	105	85	85	85	101	95	97	
		Max.	23:00	20:50	17:00	18:50	11:10	14:00	21:20	13:15	11:20	20:00	23:10	23:10	18:05	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	
Coliblanco	2200	Pro.	4:55	4:24	4:19	4:02	3:37	2:51	2:37	2:47	2:32	3:33	4:52	6:24	3:54	
		D.E.	4:57	4:25	4:30	4:04	2:57	2:07	2:27	2:14	2:04	3:09	4:14	5:06	3:31	
		C.V.	101	100	104	101	82	74	94	80	80	82	87	80	90	
		Max.	24:00	21:45	20:01	16:00	14:00	9:55	16:00	12:00	10:00	20:30	20:20	21:30	16:47	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	
Sanatorio	2337	Pro.	3:25	2:15	1:20	2:26	3:09	2:47	2:26	2:25	2:48	3:56	3:33	3:14	2:49	
		D.E.	3:09	2:43	1:13	2:52	2:44	2:41	2:41	2:26	2:16	3:28	3:18	4:13	2:49	
		C.V.	92	120	91	118	87	96	110	100	100	81	93	130	101	
		Max.	11:20	12:20	4:30	13:10	15:10	15:00	16:00	15:40	9:50	20:50	15:40	20:00	14:07	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	
Irazú	3400	Pro.	4:17	3:56	2:27	3:29	3:32	3:28	3:23	3:29	3:12	3:40	4:50	5:23	3:46	
		D.E.	4:52	4:37	2:55	3:46	3:22	3:01	2:48	2:55	2:42	2:56	4:42	5:38	3:47	
		C.V.	114	117	119	108	94	84	80	84	84	85	79	98	104	
		Max.	23:20	21:20	17:35	16:55	17:00	19:10	14:10	18:30	12:10	15:25	23:25	23:50	18:34	
		Min.	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	0:05	

La prueba de comparación de medias (cuadro 11) muestra que hay diferencias estadísticamente significativas entre estaciones, teniéndose básicamente dos grupos: las estaciones por debajo de 700 m (CATIE, Diamantes, La Lola y Limón) que no difieren estadísticamente entre sí y las estaciones ubicadas por encima de la altitud antes mencionada (Platanillo, San Antonio, Coliblanco, Volcán Irazú) que tampoco difieren estadísticamente entre ellas. La estación de Pacayas presenta un comportamiento confuso, puesto que no difiere estadísticamente de la estación Coliblanco, ni de las estaciones de la zona baja.

Cuadro 11. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para las duraciones diarias promedios de la lluvia por mes, en 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

Estaciones	Altitud (msnm)	Duración Promedio (h)
Limón	5	3:00 c
La Lola	40	3:06 c
Diamantes	249	3:06 c
Catie	602	3:06 c
Platanillo	889	3:30 a
San Antonio	1190	3:30 a
Pacayas	1735	3:12 cb
Coliblanco	2200	3:24 ab
Sanatorio Durán	2337	2:30 d
Volcan Irazú	3400	3:30 a

Medias con la misma letra en una columna no difieren estadísticamente $\alpha = 0,05$

La estación Sanatorio Durán se puede considerar atípica, ya que su ubicación corresponde a una zona de mucho menor precipitación que las restantes estaciones. Todos los otros sitios tienen duraciones promedios entre tres horas y seis minutos y tres horas y cincuenta y cuatro minutos. Incluso si no se incluye esta estación, se mejora considerablemente el ajuste en el modelo

estadístico que relaciona la altitud con la duración promedio diaria de la lluvia (figura 12 b).

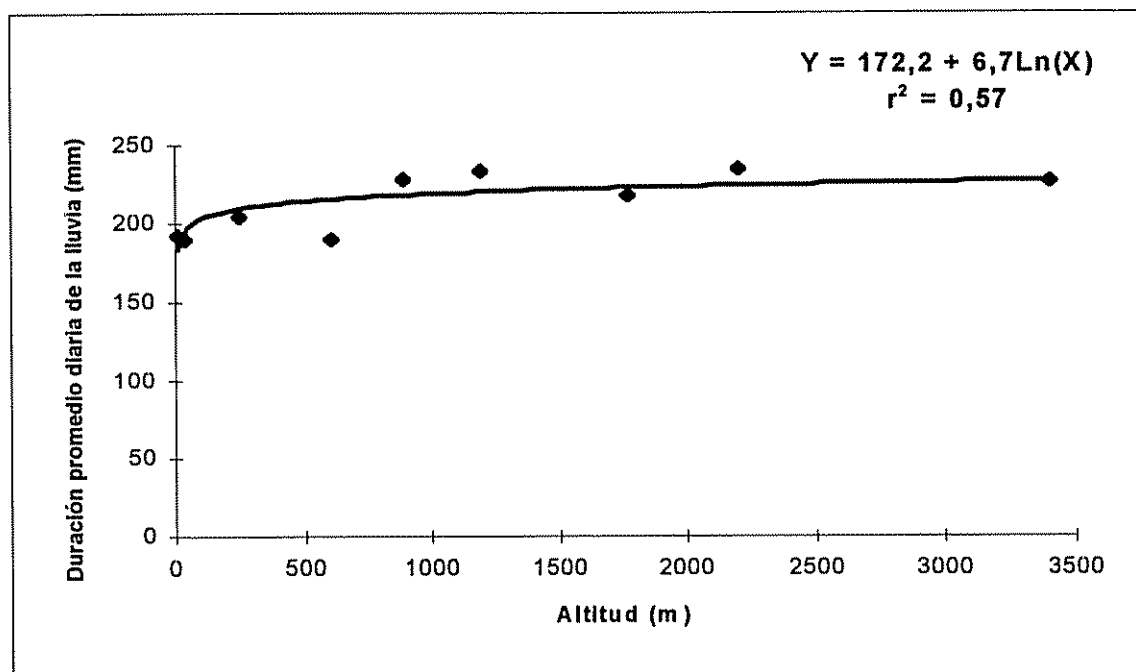


Figura 12b. Comportamiento de la duración media diaria de la lluvia en función de la altitud para 9 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

La distribución de frecuencias de duraciones diarias promedio de la lluvia en todas las estaciones analizadas, aparecen en las figuras 1A hasta 10A del anexo. Se puede observar que en todos los casos la tendencia es similar: la duración predominante es la de menos de una hora con frecuencias entre 22,38 % (estación Coliblanco) y 34,74% (estación CATIE) y las lluvias menores de 4 horas abarcan entre el 66,6 % (estación La Lola) y el 54,19 % (estación Irazú). Para todos los casos las lluvias de gran duración (más de doce horas) son muy poco frecuentes. Estos casos son de tendencia y distribución muy similar al reportado en la literatura para otros sitios (Stern et al, 1982; Stern y Dale, 1983).

A nivel mensual existen mayores variaciones en todas las estaciones y como es típico de las lluvias tropicales el coeficiente de variación aún dentro de los mismos meses es muy alto. En Limón las lluvias fueron más cortas en septiembre y más largas en febrero; en la Lola fueron más cortas en julio y más largas en marzo; en Diamantes fueron más cortas en septiembre y más largas en diciembre y enero; para el CATIE la duración mínima se tuvo en noviembre y la máxima en agosto; para Platanillo la menor duración ocurrió en julio y agosto y la máxima en febrero; en Sanatorio Durán la mínima ocurre en septiembre y la máxima en diciembre y enero; para Pacayas la menor duración se tuvo en julio y la máxima en diciembre; en Coliblanco el mes con la lluvia más corta fue septiembre, mientras que diciembre tuvo la lluvia de mayor duración; en Sanatorio Durán las mínimas ocurrieron en marzo y las máximas en octubre; finalmente en Volcán Irazú las lluvias son más cortas en marzo y más prolongadas en diciembre. Apartir de la estación San Antonio (1190 m) y exceptuando el caso de la Sanatorio Durán, las lluvias tienen una mayor duración en diciembre.

6.3.2 Intensidad de las lluvias

Se analizaron las intensidades máximas reales, de las lluvias para las 10 estaciones para períodos de 30, 60 y 120 minutos.

A nivel general existe una clara tendencia a disminuir la intensidad a medida que aumenta la altitud (figura 13), teniéndose un coeficiente de regresión de 0,83 para el modelo semilogarítmico que relaciona las intensidades máximas en 30 minutos con la altitud. Las intensidades máximas promedio general y por meses para 30 minutos se presentan en el (cuadro 12). Durante el período analizado la intensidad promedio más alta en 30 minutos corresponde a 38,62 mm/30 min, correspondiente a la estación Diamantes, en el mes de agosto, y la más baja de solo 8,4 mm/30 min en la estación Sanatorio Durán seguida muy de cerca por la estación Irazú por 9,3 mm/30 min.

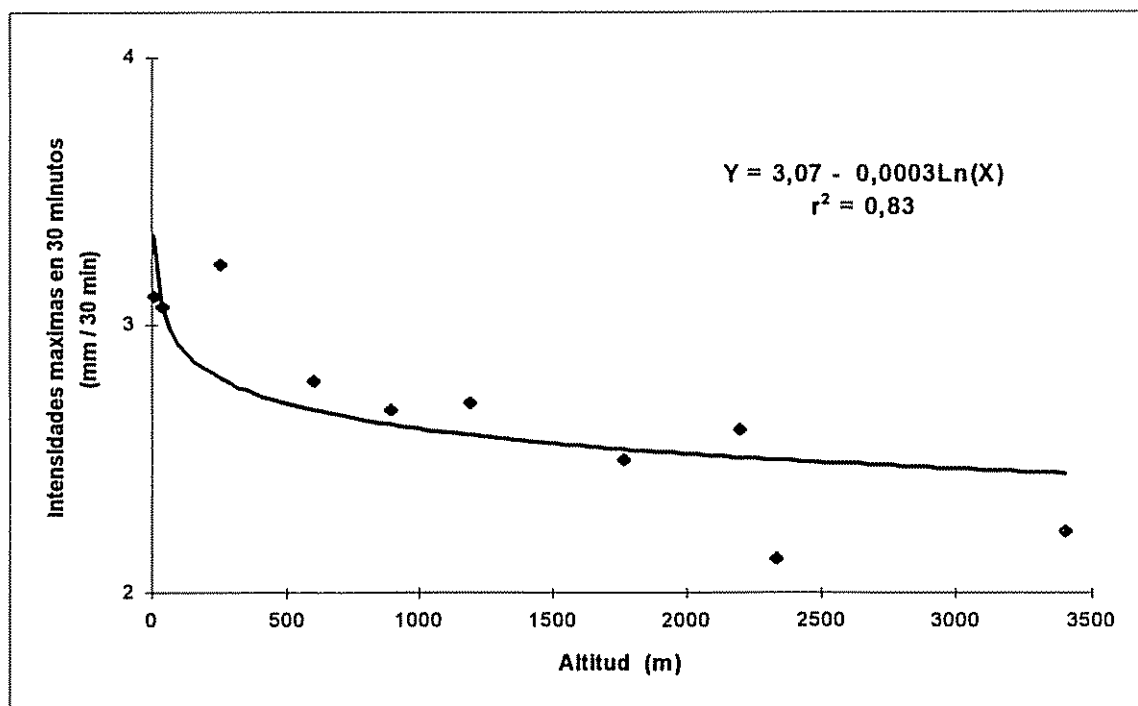


Figura 13. Comportamiento de las intensidades máximas en 30 minutos en función de la altitud para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica.

Cuadro 12. Datos de intensidades máximas para 30 minutos, (mm/30 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Pro.	
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		
Limón	5	Pro.	16,32	14,94	14,35	16,65	29,33	25,86	30,69	28,26	23,94	21,68	22,88	22,97	22,3	
		D.E.	6,08	4,25	5,95	5,24	7,83	8,61	10,75	7,86	11,74	8,32	9,10	6,99	7,7	
		C.V.	37	28	41	31	27	33	35	35	28	49	38	40	30	34,7
		Max	28,8	22,4	25,7	24,9	42,9	35,6	53,5	41,9	45,1	32,9	39,9	39,9	36,5	35,8
		Min	9,9	9	5,5	7,2	18,3	5,4	17,1	19	10,9	7	7,8	7,8	8,2	10,4
La Lola	40	Pro.	13,35	13,14	13,46	13,14	25,93	27,20	25,83	24,06	24,72	35,56	21,89	20,94	21,6	
		D.E.	7,10	4,12	8,61	7,04	10,08	12,14	8,28	8,66	10,85	9,63	9,90	5,59	8,5	
		C.V.	53	31	64	54	39	45	32	36	44	27	45	27	27	41,4
		Max	23,5	17,9	35,7	25,3	50,7	44,3	37,1	40,4	40	56,6	48,6	48,6	33,2	37,8
		Min	3,9	6,5	4,8	3,5	10,1	6,8	8,2	12,8	11,1	19,8	10,2	14,7	14,7	9,4
Diamantes	249	Pro.	10,98	13,87	13,68	16,25	30,85	32,63	31,48	38,62	35,81	29,20	27,77	21,14	25,2	
		D.E.	4,22	11,02	8,42	11,54	12,11	13,47	14,26	8,51	7,96	9,47	12,57	6,20	9,98	
		C.V.	38	79	62	71	39	41	45	22	22	32	45	29	43,8	
		Max	19,7	42,1	27,8	48,3	56,9	55,1	58,4	51	50,2	50,4	60,6	34	46,2	
		Min	5	4,2	4,6	5,2	13,5	12,7	14,7	23,7	25,9	16,4	13,9	12,7	12,7	
CATIE	602	Pro.	7,86	6,07	11,82	9,15	21,88	25,55	18,52	24,70	26,97	18,05	14,02	11,81	16,4	
		D.E.	6,36	2,69	9,94	5,38	7,85	5,64	6,25	7,92	5,27	6,66	5,38	4,52	6,1	
		C.V.	81	44	84	59	36	22	34	32	20	37	38	38	43,8	
		Max	25,2	10,9	30,8	18,6	33,8	37,6	32,2	40,1	34,8	28	21,7	22,3	28	
		Min	1,6	1,6	1,9	1,8	4,6	14,4	8,6	11,4	17,4	7,6	7,8	5,1	6,94	
Platanillo	889	Pro.	3,56	5,21	6,85	9,65	24,30	20,99	17,27	22,44	23,60	19,79	12,16	9,56	14,6	
		D.E.	2,48	3,26	4,54	7,36	7,88	8,36	8,91	6,32	9,76	8,75	6,21	4,09	6,5	
		C.V.	70	63	66	76	32	40	52	28	41	44	51	43	51	
		Max	10	10,7	16,9	21,6	34	32,8	28	37	43,5	34,8	26,8	20,5	26,4	
		Min	1	1	1,3	1	9,5	6,1	5,5	14	8,5	8,5	4,4	4,6	5,5	

.... Continuación

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Dic.	Pro.
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.			
San Antonio	1190	Pro.	6,25	8,16	7,83	9,45	17,43	22,35	16,03	28,71	17,95	16,32	15,64	13,49	14,9	
		D.E.	3,32	8,29	5,37	6,02	7,76	13,44	7,99	7,99	12,09	5,86	5,23	6,32	9,30	7,6
		C.V.	53	102	69	64	45	60	50	50	42	33	32	40	69	54,9
		Max	14	31,8	18,8	19,5	32,5	53	31,5	51	29,5	26,2	30	34,6	31	31
		Min	3	1,5	2,4	1,7	2,2	5,7	5,1	8,2	10,3	6,1	4	5	4	5
Pacayás	1765	Pro.	4,41	3,56	5,51	5,86	18,26	19,34	15,83	14,25	22,11	19,25	10,18	6,94	12,1	
		D.E.	2,03	2,63	4,55	4,79	8,06	5,57	6,60	5,35	7,94	8,43	4,82	2,95	5,3	
		C.V.	46	74	83	82	44	29	42	38	36	44	47	42	50,6	
		Max	7,4	11,4	15,3	19,85	30,6	30,2	31,5	23,4	39	38,4	20,3	13	23,4	
		Min	1,5	0,6	0,5	1,4	7,5	11,2	7,3	5,95	9,5	8,3	3	3	4,98	
Coliblanco	2200	Pro.	5,62	5,31	6,21	10,48	15,61	24,86	14,19	16,21	21,79	16,49	18,26	8,46	13,6	
		D.E.	1,47	4,16	5,52	8,49	7,14	8,93	3,83	3,50	7,80	5,26	11,97	6,64	6,2	
		C.V.	26	78	89	81	46	36	27	22	36	32	66	78	51,4	
		Max	7,6	14,7	15,6	28	26,9	41,3	18,7	21,5	33,05	24,1	43,1	20,9	24,6	
		Min	3,3	1,6	1	1,1	3,5	11,2	9,85	11,3	12,6	8,2	6,4	2,9	6,08	
Sanatorio Durán	2337	Pro.	2,32	1,23	1,83	10,22	8,65	15,22	8,42	8,95	10,22	19,37	12,07	2,80	8,4	
		D.E.	1,59	1,13	1,49	8,66	5,69	9,62	5,79	3,45	4,39	1,46	6,76	2,19	4,3	
		C.V.	69	92	82	85	66	63	69	39	39	43	8	56	78	
		Max	5	3,1	4,4	24,5	20,9	34	18,5	13,1	20	20,6	22	22	6,6	
		Min	0,9	0,2	0,9	2	4,7	3,5	2,4	4,6	8	16,7	4,5	1	4,1	
Irazú	3400	Pro.	3,15	2,80	2,62	6,04	14,78	14,77	9,47	12,97	12,28	12,82	12,92	7,04	9,3	
		D.E.	1,91	1,47	2,15	5,80	5,29	5,78	3,79	5,39	3,47	3,50	4,75	3,66	3,9	
		C.V.	61	53	82	96	36	39	40	42	28	27	37	52	49,4	
		Max	6,6	5,2	6,5	22,7	26,2	26,4	19,8	22,4	18,7	20,8	21,4	14,7	17,6	
		Min	0,9	0,45	0,3	0,7	7,25	6,4	5,15	6,8	7,35	7	5,1	1,7	4,09	

A nivel mensual los coeficientes de variación son relativamente bajos en todas las estaciones. En todos los casos las intensidades promedio más altas ocurren entre los meses de mayo a noviembre, correspondiendo con la época más lluviosa de la zona.

Al igual que las intensidades máximas en 30 minutos, existe una tendencia clara a disminuir la intensidad máxima en 60 minutos a medida que aumenta la altitud sobre el nivel del mar (figura 14). El coeficiente de regresión obtenido en este caso fue de 0,86. Las intensidades máximas en 60 minutos de las 10 estaciones meteorológicas se presentan en el cuadro 13. En este caso la intensidad máxima promedio se presenta en la estación Diamantes (34,3 mm/60 min) y la menor en Volcán Irazú (12,7 mm/60 min). La distribución mensual de las intensidades muestra que estas son más altas entre mayo y noviembre.

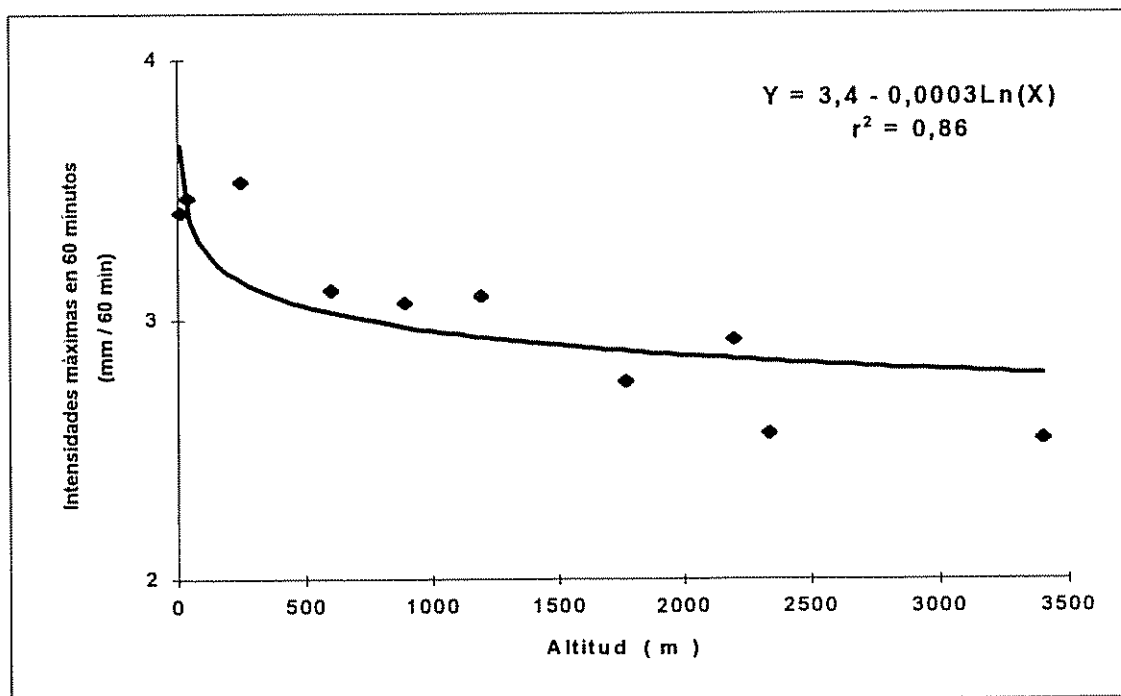


Figura 14. Comportamiento de las intensidades máximas en 60 minutos en función de la altitud para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica.

Cuadro 13. Datos de intensidades máximas para 60 minutos, (mm/60 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Pro.
			Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Limon	5	Pro.	20,60	19,26	18,33	23,70	39,83	35,30	44,21	38,34	30,95	29,56	31,93	32,56	30,38
		D.E.	6,21	6,50	7,13	8,96	10,61	13,07	19,70	10,85	19,93	11,59	14,00	11,37	11,66
		C.V.	30	34	39	38	27	37	45	28	64	39	44	35	38,3
		Max	34,4	29	29	41,8	54,1	56,5	81,6	58	74,2	45,7	58,2	55,2	51,48
		Min	13,2	9,8	7,7	8,7	21,1	9,5	20,3	24,9	11,1	7,6	10,5	9,9	12,86
La Lola	40	Pro.	19,35	16,90	18,91	18,80	32,88	36,78	33,64	37,97	63,04	50,40	28,87	28,14	32,14
		D.E.	12,78	6,19	13,12	10,91	11,16	18,66	10,81	13,50	92,41	14,84	13,22	11,29	19
		C.V.	66	37	69	58	34	51	32	36	147	29	46	40	54
		Max	45,6	26,6	50,9	38,8	57	71,7	45,3	57	59,5	83,1	60,8	49,5	53,8
		Min	4,5	8,3	5,4	3,4	17,6	7	8,2	20,4	13,9	31,2	14,1	14,9	12,4
Diamantes	249	Pro.	15,70	18,19	15,95	20,85	43,21	44,87	43,70	55,11	47,55	44,58	35,71	25,56	34,25
		D.E.	5,60	15,54	10,23	13,64	17,91	20,94	18,48	15,51	10,58	13,03	18,89	10,05	14,2
		C.V.	36	85	64	65	41	47	42	28	22	29	53	39	43
		Max	25,9	60,6	32,3	58,1	85,5	85,4	70,5	86,4	65,8	68,4	76,8	50,2	63,8
		Min	5,4	4,6	3,6	5,9	22,6	13,7	15,6	32	29,9	27,5	20,4	16,7	16,5
CATIE	602	Pro.	10,43	8,92	16,18	12,75	26,30	33,83	26,27	34,48	37,92	24,28	20,69	16,60	22,39
		D.E.	7,65	4,35	12,96	7,60	10,12	12,79	9,62	13,69	11,81	8,43	5,48	8,55	9,4
		C.V.	73	49	80	60	38	38	37	40	31	35	26	52	46,6
		Max	30,1	15,4	40,3	29,1	45,7	65,9	49,2	72,2	61,4	42,8	28,5	37,8	43,2
		Min	2,4	1,8	2,2	2,3	6,6	17,7	11	21	20,9	11,2	14,5	5,4	9,75
Platanillo	889	Pro.	5,81	7,74	11,17	15,29	32,79	31,40	25,09	34,05	32,04	29,26	17,03	14,55	21,35
		D.E.	4,38	4,34	6,06	12,67	11,26	11,78	12,79	12,51	9,17	10,98	7,31	6,92	9,18
		C.V.	75	56	54	83	34	38	51	37	29	38	43	48	48,8
		Max	18,5	15,5	20	45	54,2	53,7	40,5	64	50	45,2	35,3	32	39,5
		Min	2,3	1,4	2,6	1,7	12	9,5	8,6	20,1	13,4	13	7,9	7,8	8,36

..... Continuación

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Pro.
			Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
San Antonio	1190	Pro.	10,85	12,24	11,83	14,65	26,04	32,11	21,94	40,55	27,88	25,81	20,53	18,69	21,92
		D.E.	6,58	11,68	8,43	9,46	12,06	20,34	10,04	19,40	9,28	7,78	9,77	12,50	11,4
		C.V.	61	95	71	65	46	63	46	48	33	30	48	67	56,1
		Max	25,2	44,6	28,8	36	48,6	68	37	74,5	51,8	34,9	42,2	45,5	44,8
		Min	3,9	3	4,2	4	3,6	6,8	8,2	18	13,8	13	6,2	5,6	7,5
Pacayas	1765	Pro.	6,17	5,34	7,48	8,51	23,42	25,53	20,63	18,47	26,06	24,35	13,43	9,47	15,74
		D.E.	2,38	4,04	5,29	5,70	11,09	7,30	8,25	7,65	8,39	11,14	5,88	4,30	6,8
		C.V.	39	76	71	67	47	29	40	41	32	46	44	45	48,1
		Max	11,3	17,5	17,4	21	39,1	40	36,6	29,9	43	54,8	21,6	19,6	29,3
		Min	3,6	0,7	0,7	2	7,3	13,8	10	7,4	13	11,5	4,9	3,7	6,6
Coliblanco	2200	Pro.	8,35	7,81	8,80	14,16	22,47	32,21	18,44	22,81	27,85	21,99	24,54	13,98	18,62
		D.E.	1,82	6,13	6,94	11,85	10,51	10,47	4,63	5,29	8,90	6,01	13,30	10,09	8,0
		C.V.	22	78	79	84	47	33	25	23	32	27	54	72	48
		Max	11,4	19,9	20,8	38,2	39,2	49,9	24,9	32,8	42,9	29,6	45,4	32,5	32,3
		Min	5,6	2,5	1,4	1,2	5,7	16,9	12,5	14,7	16,1	12,4	8,8	4,4	8,5
Sanatorio Durán	2337	Pro.	4,00	1,73	3,08	13,32	12,28	19,77	14,87	14,57	16,37	30,48	20,08	5,50	13,00
		D.E.	2,88	1,48	2,74	9,38	6,00	10,83	10,55	6,63	4,53	8,91	12,01	4,89	6,7
		C.V.	72	85	89	70	49	55	71	45	28	29	60	89	61,8
		Max	9,7	4,4	7,8	27,6	22,9	39,4	36	24,3	24,1	46,5	41	13,3	24,8
		Min	1,6	0,4	1,1	5	6	8,5	5	7	10	18	7,5	1,4	5,96
Irazú	3400	Pro.	5,13	3,78	4,38	8,61	19,91	19,80	12,26	17,88	16,11	16,03	18,19	10,80	12,74
		D.E.	3,17	2,01	3,71	7,62	5,62	8,09	3,98	7,05	4,16	5,21	8,21	6,45	5,44
		C.V.	62	53	85	88	28	41	32	39	26	33	45	60	49,3
		Max	11,6	7,4	11,8	29,1	30,7	37,1	20,2	31,7	23,3	29,2	40	24,2	24,7
		Min	1,5	0,8	0,4	1	8,4	8,8	7	8,6	10,4	7,3	6,8	2,8	5,3

El comportamiento es muy similar al descrito para los casos anteriores: las intensidades más altas ocurren en la estación Diamantes y entre los meses de mayo y noviembre. El coeficiente de regresión para el modelo semilogarítmico, que relaciona las intensidades máximas de 120 minutos con la altitud, en este caso fue igual al obtenido para las intensidades en 60 minutos (figura 15). En el cuadro 14 aparecen los datos de intensidades máximas para 120 minutos de las 10 estaciones en análisis.

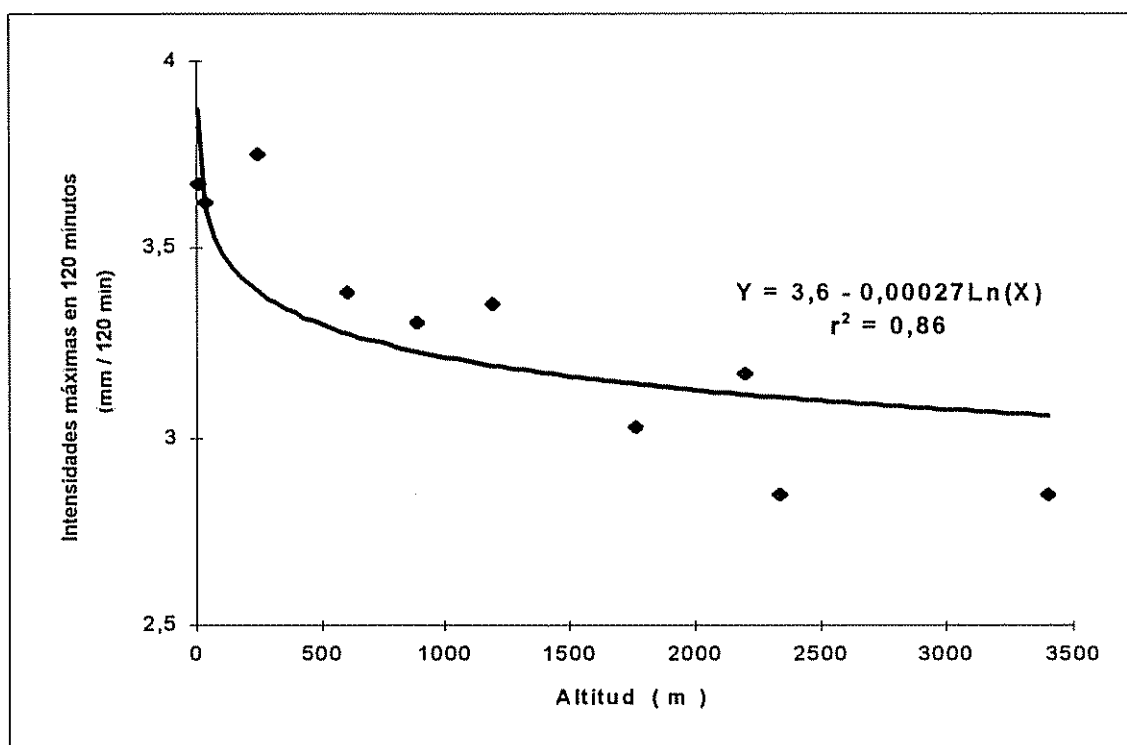


Figura 15. Comportamiento de las intensidades máximas en 120 minutos en función de la altitud para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica.

Cuadro 14. Datos de intensidades máximas para 120 minutos, (mm/120 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Pro.
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Limón	5	Pro.	27,98	28,18	26,07	30,51	55,68	46,30	55,41	49,18	34,94	37,82	38,69	39,32	39,17
		D.E.	10,93	13,60	11,54	11,29	20,44	20,41	35,54	14,96	23,25	15,54	18,52	15,08	17,6
		C.V.	39	48	44	37	37	44	64	30	67	41	48	38	44,8
		Max	51,7	48,3	49,6	47,9	93,1	79,7	141,4	84,8	85,8	62,3	76,2	74,1	74,1
		Min	15,9	12,2	11,4	9,7	21,8	9,8	21,8	31,6	13,4	9,5	12,8	12,1	15,2
La Lola	40	Pro.	26,49	24,06	26,13	22,22	40,61	46,06	39,85	50,28	40,30	58,43	37,45	36,11	37,33
		D.E.	19,56	11,68	18,49	12,42	15,27	19,83	13,66	20,11	17,45	16,84	16,85	16,64	16,6
		C.V.	74	49	71	56	38	43	34	40	43	29	45	46	44,1
		Max	67,5	46,9	71,6	40,5	68,3	82,2	62	79,9	66,8	92,6	81,6	68,4	69
		Min	5,4	9,6	7,6	3,4	22,7	10,8	10,6	22,7	17	32,9	21	14,9	14,9
Diamantes	249	Pro.	23,10	21,61	18,87	26,11	52,00	54,30	51,17	72,59	57,11	54,82	43,30	36,29	42,61
		D.E.	9,34	16,98	11,28	12,71	22,11	27,50	21,06	20,68	15,64	14,60	21,56	13,63	17,2
		C.V.	40	79	60	49	43	51	41	28	27	27	50	38	44,4
		Max	40,7	68,5	36,8	61	93,5	103	80,2	120,1	78,2	76,4	87,2	64,7	75,9
		Min	5,4	7,7	4,8	10,6	26,9	15	15,8	41,9	30,1	34,8	23,7	21,9	19,9
CATIE	602	Pro.	14,41	11,94	21,9	18,8	31,51	43,62	38,65	44,03	45,65	32,5	27,09	22,45	29,38
		D.E.	12,1	6,99	15,59	11,77	9,76	15,77	16,34	16,83	16,67	9,27	7,52	14,26	12,7
		C.V.	84	59	71	63	31	36	42	38	37	29	28	64	48,5
		Max	47,7	24,8	53,7	49,9	46,9	76,4	82,2	91,6	84,3	43,3	40,5	58,2	58,3
		Min	3	2,5	7,1	2,7	10,3	18,8	17,2	28	22,7	18,1	16,7	6,4	12,8
Platanillo	889	Pro.	9,31	10,67	16,05	20,45	38,44	38,98	34,18	41,67	36,09	36,29	24,39	19,76	27,19
		D.E.	8,16	6,06	8,30	18,23	12,78	15,29	17,23	16,75	8,42	12,98	8,20	10,58	11,9
		C.V.	88	57	52	89	33	39	50	40	23	36	34	54	49,6
		Max	32,8	20,8	29,1	61,3	60,1	72,5	59,2	74,2	52,9	65,5	39,8	42,7	50,9
		Min	2,6	2,5	5,3	3,1	17,5	14,2	13,8	20,9	18	20,9	8,7	8	11,3

Cuadro 14. Datos de intensidades máximas para 120 minutos, (mm/120 min) de 10 estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica de Costa Rica (1978-1992).

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Dic.	Pro.
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.			
Limon	5	Pro.	27,98	28,18	26,07	30,51	55,68	46,30	55,41	49,18	34,94	37,82	38,69	39,32	39,17	
		D.E.	10,93	13,60	11,54	11,29	20,44	20,41	35,54	14,96	23,25	15,54	18,52	15,08	17,6	
		C.V.	39	48	44	37	37	44	64	30	67	41	48	38	44,8	
		Max	51,7	48,3	49,6	47,9	93,1	79,7	141,4	84,8	85,8	62,3	76,2	68	74,1	
		Min	15,9	12,2	11,4	9,7	21,8	9,8	21,8	31,6	13,4	9,5	12,8	12,1	15,2	
La Lola	40	Pro.	26,49	24,06	26,13	22,22	40,61	46,06	39,85	50,28	40,30	58,43	37,45	36,11	37,33	
		D.E.	19,56	11,68	18,49	12,42	15,27	19,83	13,66	20,11	17,45	16,84	16,85	16,64	16,6	
		C.V.	74	49	71	56	38	43	34	40	43	29	45	46	44,1	
		Max	67,5	46,9	71,6	40,5	68,3	82,2	62	79,9	66,8	92,6	81,6	68,4	69	
		Min	5,4	9,6	7,6	3,4	22,7	10,8	10,6	22,7	17	32,9	21	14,9	14,9	
Diamantes	249	Pro.	23,10	21,61	18,87	26,11	52,00	54,30	51,17	72,59	57,11	54,82	43,30	36,29	42,61	
		D.E.	9,34	16,98	11,28	12,71	22,11	27,50	21,06	20,68	15,64	14,60	21,56	13,63	17,2	
		C.V.	40	79	60	49	43	51	41	28	27	27	50	38	44,4	
		Max	40,7	68,5	36,8	61	93,5	103	80,2	120,1	78,2	76,4	87,2	64,7	75,9	
		Min	5,4	7,7	4,8	10,6	26,9	15	15,8	41,9	30,1	34,8	23,7	21,9	19,9	
CATIE	602	Pro.	14,41	11,94	21,9	18,8	31,51	43,62	38,65	44,03	45,65	32,5	27,09	22,45	29,38	
		D.E.	12,1	6,99	15,59	11,77	9,76	15,77	16,34	16,83	16,67	9,27	7,52	14,26	12,7	
		C.V.	84	59	71	63	31	36	42	38	37	29	28	64	48,5	
		Max	47,7	24,8	53,7	49,9	46,9	76,4	82,2	91,6	84,3	43,3	40,5	58,2	58,3	
		Min	3	2,5	7,1	2,7	10,3	18,8	17,2	28	22,7	18,1	16,7	6,4	12,8	
Platanillo	889	Pro.	9,31	10,67	16,05	20,45	38,44	38,98	34,18	41,67	36,09	36,29	24,39	19,76	27,19	
		D.E.	8,16	6,06	8,30	18,23	12,78	15,29	17,23	16,75	8,42	12,98	8,20	10,58	11,9	
		C.V.	88	57	52	89	33	39	50	40	23	36	34	54	49,6	
		Max	32,8	20,8	29,1	61,3	60,1	72,5	59,2	74,2	52,9	65,5	39,8	42,7	50,9	
		Min	2,6	2,5	5,3	3,1	17,5	14,2	13,8	20,9	18	20,9	8,7	8	11,3	

..... Continuación

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Meses												Pro.
			Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
San Antonio	1190	Pro.	17,59	16,46	16,75	18,69	33,11	41,33	27,55	53,89	33,74	32,47	24,29	26,90	28,56
		D.E.	11,67	13,45	10,28	13,01	15,43	26,54	13,34	24,42	11,62	8,44	11,23	19,47	14,9
		C.V.	66	82	61	70	47	64	48	45	34	26	46	72	55,1
		Max	45,7	47	34,6	51,5	66	94	46,7	91	58,1	45,6	44,1	67	57,6
		Min	4,1	5,2	6,6	5	8,7	9	8,3	27	14,9	15,8	6,2	5,6	9,7
Pacayas	1765	Pro.	9,02	7,38	10,06	10,76	29,38	34,22	29,42	23,71	30,49	33,01	18,16	12,42	20,67
		D.E.	3,73	4,66	7,66	6,69	13,23	11,67	13,13	7,91	9,36	21,40	8,08	4,88	9,4
		C.V.	41	63	76	62	45	34	45	33	31	65	44	39	48,2
		Max	16,1	19,3	25,9	26,4	48,3	54,8	61,4	40,8	55,2	97,8	34,3	22,6	41,9
		Min	3,7	1,2	0,7	2,4	9	22,4	12,1	9	13,4	14,2	6,5	5,7	8,4
Coliblanco	2200	Pro.	13,13	10,51	11,69	14,96	29,83	39,67	22,85	29,43	38,08	26,05	27,65	21,50	23,78
		D.E.	4,50	7,28	8,37	13,32	15,18	10,07	5,59	5,59	9,44	4,69	15,13	13,87	9,4
		C.V.	34	69	72	89	51	25	24	18	25	18	55	64	45,3
		Max	22	22,9	27,9	40,2	61,6	56,3	34,4	35,4	45,6	31,7	54,4	43,8	39,7
		Min	9	3,4	2,2	2	16,4	28,8	17,8	18,1	17,6	18,3	9,2	5,6	12,4
Sanatorio Durán	2337	Pro.	5,85	2,08	4,28	17,85	19,13	24,73	20,67	19,77	23,08	36,53	25,53	7,32	17,24
		D.E.	4,28	1,78	4,29	9,75	10,56	10,59	12,99	9,84	3,91	11,95	12,13	7,10	8,3
		C.V.	73	85	100	55	55	43	63	50	17	33	48	97	60
		Max	14,4	5,2	11,7	28,6	41,6	40,2	44,8	34,3	28,1	55,8	46,6	20,6	31
		Min	2,5	0,6	1,6	7,3	8,3	12,9	6	7,5	16,8	20	13,7	1,5	8,2
Irazú	3400	Pro.	8,44	5,45	5,79	12,84	23,81	26,46	16,87	24,81	20,77	20,33	24,96	16,41	17,24
		D.E.	5,70	2,88	5,40	10,39	6,33	10,06	4,73	8,64	6,50	6,69	13,92	12,51	7,8
		C.V.	67	53	93	81	27	38	28	35	31	33	56	76	51,5
		Max	19,2	10,2	17,4	35,3	35,2	50,4	27	44,2	36,6	36,5	57,4	45,7	34,6
		Min	2,2	1,4	0,5	1,4	11,8	13	9,6	14,5	12,6	7,4	10	2,8	7,3

- El cuadro 15 presenta la comparación de medias de intensidades máximas para las estaciones estudiadas. Se observa que existe diferencias estadísticas significativas entre estaciones para las tres intensidades, y que en general existe una tendencia a presentarse tres grupos de estaciones: las de la parte baja de la vertiente, las de la zona intermedia y las de la zona más alta.

Cuadro 15. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para las intensidades máximo promedio de lluvia en 30, 60 y 120 minutos, en 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

Estaciones	Altitud (msnm)	Intensidades máximas promedio		
		30 minutos	60 minutos	120 minutos
Limón	5	22,4 a	30,5 a	39,2 a
La Lola	40	18,3 b	25,0 b	31,7 b
Diamantes	249	24,6 a	33,5 a	41,4 a
Catie	602	15,7 c	21,5 bc	28,1 b
Platanillo	889	14,6 c	21,3 bc	27,1 b
San Antonio	1190	15,0 c	21,9 b	28,6 b
Pacayas	1735	10,8 de	13,9 d	18,0 cd
Coliblanco	2200	13,1 cd	17,9 c	22,0 c
Sanatorio Durán	2337	8,3 e	12,8 d	16,6 d
Volcan Irazú	3400	8,8 e	11,5 d	15,5 d

Medias con la misma letra en una columna no difieren estadísticamente $\alpha = 0,05$

Frere et al (1975), estudiaron la relación entre la cantidad media de agua por día lluvioso, como índice de intensidad y la altitud en la zona andina y obtuvieron que la tendencia general fue de una disminución de la intensidad a medida conforme aumentaba la altura, aunque los datos fueron más dispersos entre 1000 y 3000 msnm.

Los resultados antes presentados deben ser una guía importante en el diseño y manejo de prácticas de conservación de suelos y aguas. Así como en la determinación del riesgo de las diferentes zonas a los problemas de erosión. Resulta obvio que las zonas con menos altitud y con pendiente fuerte serían las

más susceptibles a sufrir degradación por efecto de las lluvias. Los datos obtenidos en este estudio muestra el mismo comportamiento que los obtenidos por Vahrson, (1991), para intensidades máximas absolutas en 15 minutos. En efecto este autor obtuvo que la menores intensidades correspondían a los sitios de mayor altitud y que había una tendencia clara a aumentar a medida que se reducía la altura sobre el nivel del mar.

6.3.3 Cantidad de las lluvias

La tendencia observada es que a medida que aumenta la altitud disminuye la lluvia (figura 16), aunque existe bastante dispersión de los datos representado por el coeficiente de regresión del modelo estadístico de mejor ajuste que fue solamente de 0,56. En el cuadro 16 se presenta los datos de lluvia promedio por mes para las 10 estaciones meteorológicas en estudio, el promedio general y el promedio anual por estación.

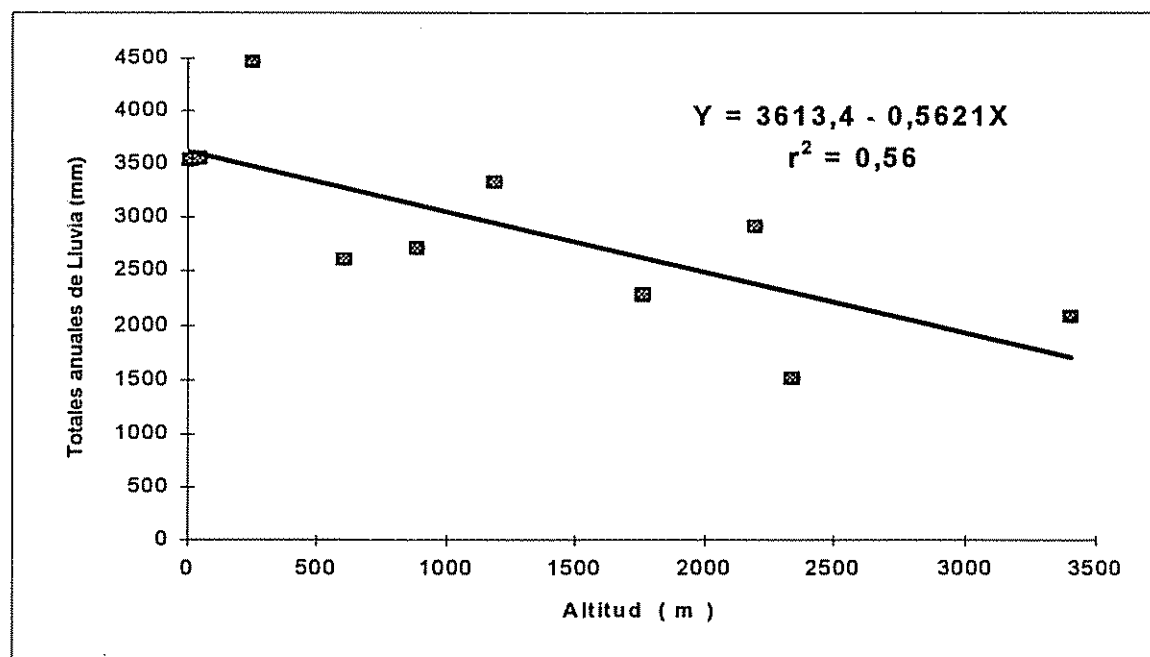


Figura 16. Comportamiento de la precipitación promedio anual en función de la altitud para 10 estaciones meteorológicas de la Vertiente Atlántica de Costa Rica.

Cuadro 16. Datos de lluvia promedio por mes (mm), para 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

Estación	Altitud (msnm)	Estad.	Enc.	Meses												Pro.
				Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		
Limón	5	Pro.	317	211	204	276	282	296	427	312	145	206	391	445	3531	
		D.E.	160	118	102	199	139	166	233	167	89	197	206	253	169	
		C.V.	50	56	50	72	49	56	54	53	61	96	53	57	59	
La Lola	40	Pro.	304	214	167	223	280	312	402	297	184	249	432	500	3563	
		D.E.	175	171	93	165	136	130	226	140	110	103	238	269	163	
		C.V.	58	80	56	74	46	42	56	47	60	41	55	54	56	
Diamantes	249	Pro.	289	220	190	245	399	430	482	428	358	446	489	485	4466	
		D.E.	131	158	100	162	132	126	179	132	122	130	217	266	155	
		C.V.	45	72	53	66	33	29	37	31	34	29	44	55	44	
CATIE	602	Pro.	169	127	86	122	224	280	276	252	249	255	261	306	2605	
		D.E.	92	115	72	115	86	76	113	78	73	82	137	226	105	
		C.V.	53	87	89	94	39	27	41	32	29	33	50	74	51	
Platanillo	889	Pro.	139	100	77	127	254	326	261	264	300	310	306	268	2718	
		D.E.	95	88	65	154	86	109	111	86	103	105	161	251	118	
		C.V.	68	88	85	121	34	33	42	33	34	34	53	93	60	
San Antonio	1190	Pro.	260	185	167	190	262	329	332	334	286	316	344	389	3327	
		D.E.	113	111	108	139	183	82	175	81	88	72	159	269	132	
		C.V.	43	60	65	73	70	25	53	24	31	23	46	69	49	
Pacayas	1765	Pro.	169	82	65	99	182	220	223	199	236	278	237	245	2285	
		D.E.	82	58	44	88	70	73	90	65	85	109	101	143	84	
		C.V.	48	71	67	89	39	33	40	33	36	39	43	58	50	
Coliblanco	2200	Pro.	208	127	92	150	244	279	300	282	278	346	294	299	2912	
		D.E.	104	69	46	116	70	70	121	66	59	107	119	198	95	
		C.V.	50	54	50	77	29	25	40	23	21	31	40	66	42	
Sanatorio Durán	2337	Pro.	29	15	9	41	190	211	133	156	212	277	164	77	1516	
		D.E.	24	14	12	50	88	77	58	69	81	95	95	63	61	
		C.V.	82	96	143	123	47	37	44	44	38	34	58	82	69	
Irazú	3400	Pro.	86	57	33	97	208	223	171	206	229	275	281	162	2085	
		D.E.	59	56	36	106	79	72	68	71	52	82	128	123	78	
		C.V.	68	98	112	110	38	32	40	35	23	30	46	76	59	

La prueba de comparación de medias (cuadro 17) muestra que existe diferencias estadísticamente significativas entre estaciones, aunque no hay agrupación evidente de las mismas. Esta heterogeneidad es consecuente con la gran variabilidad de cantidad de lluvia registrada en la zona atlántica de Costa Rica (figura 17) donde las isoyetas muestran promedios mensuales desde 2000 hasta 6500 m, posiblemente debido en gran parte a la irregularidad geomorfológica de esta región.

Cuadro 17. Comparación de medias mediante la prueba de Duncan para las cantidades promedios diarias de lluvia por mes en, 10 estaciones meteorológicas de la vertiente Atlántica de Costa Rica.

Estaciones	Altitud (msnm)	Cantidad Promedio (mm)
Limón	5	297,0 b
La Lola	40	292,7 b
Diamantes	249	371,8 a
Catie	602	217,3 bc
Platanillo	889	227,7 bc
San Antonio	1190	282,8 b
Pacayas	1735	186,3 cd
Coliblanco	2200	241,6 bc
Sanatorio Durán	2337	126,2 d
Volcan Irazú	3400	169,5 cd

Medias con la misma letra en una columna no difieren estadísticamente $\alpha = 0,05$

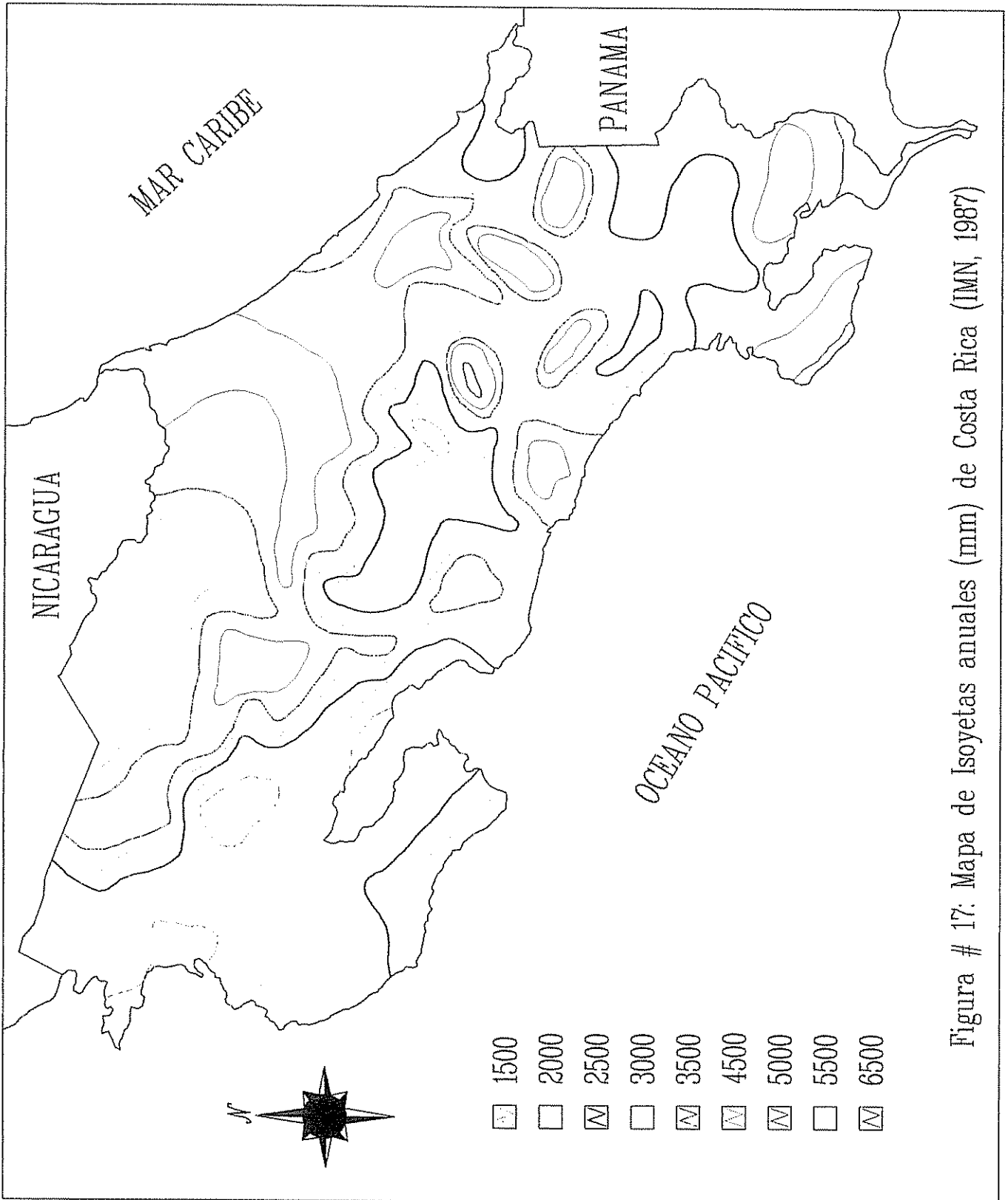


Figura # 17: Mapa de Isoyetas anuales (mm) de Costa Rica (IMN, 1987)

Los trabajos realizados por Weischet (1965), indican que la lluvia en las regiones ecuatoriales y tropicales aumenta con la altitud hasta el nivel de 1300 a 1500 m y después disminuye continuamente. Sin embargo, Frere et al (1975), en un estudio realizado en la zona andina encontraron en algunos casos, la existencia de un punto de inversión de la cantidad de lluvia, pero a altitudes que variaban entre menos de 1000 y más de 3200 metros; en otros casos obtuvieron una disminución de la precipitación con la altitud, pero con una tendencia casi lineal, similar a la obtenida en este estudio. En regiones montañosas de África oriental Nieuwolt (1973), indica que las lluvias presentan un punto de inversión entre 2600 y 3400 metros, mientras que Griffiths y Hemming (1963), calcularon que estaba entre 2800 y 4000 metros.

Mendizabal (1973), en un estudio realizado para observar el comportamiento que rige la distribución de la precipitación con la altura para ciertas regiones de América Central, ubicó 3 perfiles altitudinales y seleccionó 16 estaciones meteorológicas para la vertiente Atlántica de Costa Rica y 9 estaciones pertenecientes a la vertiente del Pacífico, ubicadas en Panamá. Obtuvo que hay un aumento de la precipitación desde el nivel más bajo hasta alcanzar un máximo entre los 700 a 800 msnm, y a partir de allí observó una disminución hasta los 1950 m, para las estaciones Palmira, vertiente del Atlántico (Costa Rica) y Cerro Punta Vertiente del Pacífico (Panamá). Observándose en el otro perfil un máximo absoluto de la precipitación hasta los 2000 m y a partir de allí se obtuvo una disminución de la precipitación con la altura hasta los 2800 m, sitio de mayor altitud considerado en el trabajo para la estación Ojo de agua ubicada en la vertiente Atlántica de Costa Rica.

La información existente sugiere que no existe una relación universal entre cantidad de lluvia y altitud, tal como concluye Rumby (1965) luego de analizar varios estudios, y concuerda con Peck y Brown, (1962) en que la altitud puede explicar gran parte de la variación de las lluvias, solamente cuando el estudio de

la relación existente se limita a zonas relativamente pequeñas con características topográficas similares.

Otros factores muy importantes que junto con la altitud determina la cantidad de lluvia que ha de precipitar en distintos lugares dentro de la misma zona climática general son la exposición, la inclinación y forma del terreno; todos ellos determinan el mecanismo de producción de lluvia de un modo u otro, a través de los procesos de convergencia, convección y ascenso de las masas de aire por la orografía del terreno.

Frere et al (1975), indican que generalmente ocurre una interacción de factores que pueden producir amplias variaciones, por lo que el efecto de un sólo factor es bastante limitada, por ejemplo Spreen (1947), analizaron las lluvias no solamente en relación con la altitud, sino que tuvieron en cuenta la pendiente máxima del terreno, la exposición y la orientación, llegan a la conclusión que en ciertas zonas de los Estados Unidos solo el 30% de la variación de la lluvia podría ser atribuida a la altitud; mientras que considerando los parámetros topográficos antes mencionados, se podía explicar el 88% de la variación. En nuestro caso (figura 15) el 56% de la variación de la lluvia es explicada por la altitud.

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Existe una alta correlación entre el diámetro medio de las gotas de agua y la masa media de los agregados de harina formados lo que permite el uso de esta metodología a nivel de campo para determinar tamaño y distribución de tamaño de gotas de lluvias.
2. El diámetro promedio de las gotas de lluvia fue mayor en Alajuela (2,76 mm) que en Turrialba (2,30 mm), aunque las diferencias no fueron significativas; el diámetro medio ponderado por el número de gotas fue igual ambos sitios (1,67 mm).
3. El diámetro promedio aumentó con la intensidad de la lluvia tanto en Alajuela como en Turrialba; el diámetro medio ponderado por el número de gotas tuvo la misma tendencia, principalmente en Turrialba.
4. La distribución de diámetros de gotas mostró que en Turrialba predominan las gotas entre 1 y 2 mm (80%) de frecuencia, mientras que en Alajuela, aunque éste fue el diámetro más frecuente (60%); los diámetros menores de 1 y entre 2 y 3 mm, tuvieron frecuencias mayores al 20%.
5. La energía cinética promedio de las lluvias en Alajuela y en Turrialba fue similar; y en general en ambos sitios aumentó al incrementarse la intensidad de la lluvia.
6. La energía cinética obtenida en este estudio, de acuerdo a la distribución de tamaño de gota (método de Eigel y Moore) y la calculada por el método Weismeier y Smith (basado en la intensidad de la lluvia) fueron muy similares, tanto en Turrialba como en Alajuela.
7. Se encontró variación en la duración promedio diaria de la lluvia en función de la altura para las 10 estaciones analizadas. Estadísticamente se identificaron básicamente dos grupos de estaciones; las ubicadas por encima de 700 msnm y las situadas por debajo de esa altitud.
8. Las intensidades máximas promedios en 30, 60 y 120 minutos disminuyeron conforme aumento la altitud con un coeficiente de regresión entre ambas variables de 0,83, 0,86 y 0,86 respectivamente.
9. La cantidad promedio anual de la lluvia tuvo una tendencia a disminuir conforme aumento la altitud ($r^2 = 0,56$) Sin embargo, la altitud no es el único

factor que modifica la lluvia. La zona Atlántica en estudio es muy irregular desde el punto de vista geomorfológico y produce resultados heterogéneos.

10. Los resultados obtenidos indican que la erosividad de las lluvias disminuye con la altitud; lo que reduce el potencial erosivo en las zonas de mayor pendiente en la vertiente Atlántica.

RECOMENDACIONES

1. El método utilizado en los muestreos de lluvias ofrece ventajas como: bajo costo, sencillez y efectividad, lo que hace lo accesible a países con limitaciones económicas.
2. Estudiar el comportamiento de la ecuación universal de pérdida de suelo, haciendo mediciones directas de energía cinética de acuerdo a la distribución y tamaño de gotas y mediciones de erosión.
3. Utilizar una mayor red o grupo de estaciones meteorológicas para observar el comportamiento de las características de la lluvia con respecto a la altitud, ubicando a la vez muchos más sitios donde realizar los muestreos de lluvias.
4. Realizar un trabajo similar para la Vertiente del Pacífico, seleccionando estaciones meteorológicas desde la costa del Pacífico hasta la Cordillera Central.
5. Los períodos para los muestreos de las lluvias deben cubrir por lo menos los meses de la época lluviosa (mayo a octubre).

VIII LITERATURA CITADA

- AGUILAR, L. y RANDON, V. 1988. Indices para determinar la agresividad climática con fines de predecir la erodabilidad de los suelos en la explotación del ecosistema bosque; caso Ticoporo (Parte I). Revista Forestal (Venezuela), 30: 41-77.
- ALFARO, M. 1981. Algunos aspectos de la precipitación en Costa Rica. Tesis de Grado, Universidad de Costa Rica. 107 p.
- AMEZQUITA, E. 1974. Estudios hidrológicos y edafológicos para conservación de aguas y suelos en Turrialba, Costa Rica. Tesis MSc, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 212 p.
- APOLO, W.A. 1980. Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un patizal con árboles aislados en la Suiza, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, UCR-CATIE. 69 p.
- ASSELINE, J. y VALENTIN C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltrometre a aspersion. Cahiers Orstom. Serie Hydrologie. vol. XV, No 4. 1978. p 321-350.
- AYRES, Q.C. 1960. La erosión del suelo y su control. Barcelona, Omega. 442 p.
- BEARD, K.V. 1977a. Terminal velocity adjustment for cloud and precipitation drops aloft. Journal of the Atmospheric Sciences 34: 1293-1298.
- BEARD, K.V. 1980. The effects of altitude and electrical force on the terminal velocity of hydrometers. Journal of the Atmospheric Sciences 37:1363-1374.
- BERMUDEZ, M. 1980. Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema café (*Coffea arabica*), poró (*Erythrina poeppigiana*) y laurel (*Cordia alliodora*) en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, UCR-CATIE. 74 p.
- BEST, A.C. 1950. "Empirical formulae for the terminal velocity of waterdrops falling through the atmosphere" Quart. J. Roy. Met. Soc. 76: 302.
- BLANCHARD, D.C. 1951. The distribution of raindrops in natural rain. Occasional Report No 15, General Electric Research Lab. Project Cirrus.
- BUBENZER, G.D. 1979. Rainfall characteristics important for simulation. USDA-SEA, ARM-W-10 p. 22-34.

- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. 1994. Hidrología Aplicada. Trad. Juan G. Saldarriaga, Germán R. Santos. McGraw-Hill Interamericana, S. A. Santafé de Bogotá, Colombia. p. 67-70.
- COSTA RICA. Ministerio de agricultura y ganadería. 1994. Manual de conservación de suelos y aguas. MAG-FAO. 2a. ed., San José, Costa Rica, EUNED. 300 P.
- DINGLE, A.N.; LEE, Y. 1972. Terminal fallspeeds of raindrops. Journal of Applied Meteorology. 11, 877-879.
- EIGEL, J.D.; MOORE, I. D. 1983. A Simplified Technique for Measuring Raindrop Size and Distribution. Transactions of the ASAE. Special Edition. Soil and Water 26:1079-1084.
- EKERN, P.S. 1953. Problems of raindrop impact erosion. Agricultural Engineering. Journal of the American Society of Agricultural Engineers. p. 23-25
- ELLISON, W.D. 1947. Soil Erosion Studies. Parts I to VII; Agric. Eng. 28 p.
- EPEMA, G.F.; RIEZEBOS, H.T. 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain.
- FOSTER G.R.; McCOOL, D.K.; RENAR, K.G. y MOLDENHAUER, W.C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation 36: 355-359.
- FRERE, M. et al. 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina: Roma, FAO-UNESCO-OMM. 375 P.
- GHADIRI, H.; PAYNE, D. 1977. Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs. Journal of Soil Science 28: 247-258.
- GREER, J.D. 1971. Effects of excessive rate rainstorms on erosion. Journal of Soil and Water Conservation 26: 196-197.
- GRIFFITHS, J. F. ;HEMMING, C. F. 1963. A Rainfall map of eastearn Africa and Southern Arabia. East Africa met. dept. Memoirs, Vol. II, Nº 10.
- GUN, R.; KINZER, G.D. 1949. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. Journal of Meteorology 6(4): 243-248.

- GUTIERREZ, D.M.A. 1987. Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la Cuenca del Río Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba; C. R., CATIE. 127 p.
- HEUVELDOP, J.; PARDO, T.J.; QUIROS, C.S.; ESPINOSA, P.L. 1986. Agroclimatología Tropical. San José, Costa Rica, EUNED. 394 p.
- HIDALGO, H. 1980. Heavy rainfall in Costa Rica. Thesis. Birmingham University.
- HOLDRIDGE, L. E. 1987. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.
- HUDSON, N. W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion. Tesis M.Sc., University of Cape Tawn.
- HUDSON, N.W. 1971. Soil Conservation, Cornell University. Press, New York, 314 p.
- HUDSON; N.W. 1981. Instrumentation for studies for the erosive power of rainfall. Proc. Erosion and Sed. Trans. Meas. Symp. held in Florence, Italy. IAHS Publ. No. 133. p. 383-390.
- IMESON, A.C.; VIS, R.; DE WATER, E. 1981. The measurement of waterdrop impact forces with a piezo-electric transducer. CATENA 8, 83-96.
- INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL. 1988. Catastro de las series de precipitaciones medidas en Costa Rica. San Jose Costa Rica. 361 p.
- JANSSON, M.B. 1982. Land erosion by water in different climates. Department of Physical Geography, Uppsala University. UNGI Rapport No. 57. p. 151.
- JEFFERY P.; DERCKSEN D.; SONNEVELD, B. 1989. Evaluación de los estados de erosión hídrica de los suelos en Costa Rica. San José, Costa Rica, SENACSA. 145 p.
- KOWAL, J.M. y KASAM, A.H. 1977. Analysis of factors affecting rainfall erosivity and soil erodibility. In: D.J. Greenland y R. Lal (eds). Soil Conservation and management in the humid tropics. Chichester, Wiley and Sons. P. 57-70.
- LAL, R. 1974. La erosión del suelo y la agricultura migratoria. Boletín de Suelos de la Revista FAO. Roma, Italia. No 24. p. 41-42.

- LAL, R. 1976. Soil erosion problems on an alfisol in western Nigeria and their control. Ibadan, Nigeria, IITA Monograph No.1.208 p.
- LAL, R. 1977. Analysis of factors affecting rainfall erosivity and soil erodibility. In: D.J. Greenland y R. Lal (eds). Soil Conservation and management in the humid tropics. Chichester, Wiley and Sons. P. 40-56.
- LAL, R.; LAWSON, T.L.; ANSTASE, A.H. 1978. Erosivity of tropical rains. In: Assessment of erosion in USA and Europe. Proc. Conf. Ghent, Belgium. P 143-151.
- LAWS, J.O. 1941. Measurement of the fall velocity of waterdrops and raindrops. Trans. Am. Geophy. Union 22:709-721.
- LAWS, J.O.; PARSONS, D.A. 1943. Relation of raindrop size to intensity. Trans. Am. Geophy. Union 24: 452-460.
- LAWS, J.O. 1940. Recent studies in raindrops and erosion. Agricultural Engineering 21(11): 431-433.
- LEVINE, G. 1952. Effects of irrigation droplet size on infiltration and aggregate breakdown. Agricultural Engineering 33(9): 559-560.
- LEYTON, L.; RODDA, J.C. 1970. Precipitation and forest. In: Joint FAO-USSR. International symposium of forest influences and watershed management. Proceedings. Moscow, USSR, FAO. P. 16-27.
- MEYER, L.D. 1958. An investigation of methods for simulating rainfall on standart run-off plots and a Study of the Drop Size, Velocity, and kinetic Energy of selected spray nozzle, Purdue Univers., special Report N° 81, 42 p.
- MEYER, L.D. 1965. Symposium on simulation of rainfall for soil erosion research. Transactions of the ASAE 8(1): 63-65.
- MENDIZABAL, M.T. 1973. Distribución de la precipitación con la altura. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- MORA, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS): aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejibaye, vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis MSc., CATIE, Turrialba, Costa Rica. 104 p.
- MORGAN, R.P.C. 1979. Soil erosion: tropics in applied geography. London, Longman Lda, 304 p.

- MUTCHLER, C.K. 1967. Parameters for describing raindrop splash. *Journal Soil and Water Conservation*. 22: 91.
- MUTCHLER, C.K.; YOUNG, R.A. 1975. Soil detachment by raidrops. US Dep. Agric., Agric. Res. Serv. (ARS-S-40).
- NEAL, J.H. 1938. Effect of degree of slope and rainfall characteristics on run-off and soil erosion. *Agricultural Enginnering* 19: 213-217.
- NIEUWOLT, S. 1973. Normales climatológicas de las estaciones que emiten mensaje climat y climat ship para el período 1931-1960. Geneve, OMM N° 117, p 52.
- OSTER, R. 1980. Conservación de suelos en las tierras altas de Chiriquí. *Ciencias agropecuarias (Panamá)*3:23-26.
- PARK, S.W.; MITCHELL, J.K.; BUBENZER, G.D. 1983. Rainfall Characteristics and Their Relation to Splash Erosion. *Transactions of the ASAE. Special Edition. Soil and Water. Vol. 26 p.795-801.*
- PARK, S.W.; MITCHELL, J.K.; BUBENZER, G.D. 1982. Splash erosion modeling: *Transactions of the ASAE. 25(2): 357-361.*
- PECK, F. L.; BROWN, M. J. 1962. An appruach to the development of isohyetas maps for mountainous areas. *J. Geaph. Res.* 67, N°. 2,68.
- RAMÍREZ, P. 1982. La estación lluviosa en Costa Rica y los veranillos. In: *Agroambiente. Compendio de presentaciones. CATIE. Serie Materiales de Enseñanza No. 13. P. 182-198.*
- RICHARDSON, C.W.; FOSTER, G.R. y WRIGHT, D.A. 1983 Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Transactions of the ASAE. p. 153-156, 160.*
- ROOSE, E.; LELONG, F. 1976. Les facteurs de l'erosion hydrique en Afrique Tropicale. *Etudes sur petites parcelles experimentales de sols. Revue de Géographie Physique et de Geologie Dynamique* 18: 365-374.
- RUMBY, G. B. 1965. An investigation of the distribution of rainfall ithelevation for selected stations in Ecuador. Texas A and M. University, Dept. of ocean. and meteorol.
- SMITH, D.D.; WISCHMEIER, W.H. 1962. Rainfall erosion. *Advances in Agronomy* 14: 109-148.

- SPIILHAUS, A.F. 1948. A raindrop size, shape and falling speed. *Journal of Meteorology*, 5, 108-110
- SPREEN, W. C. 1947. A determination of the effect of topography on precipitation. *Trans. AM. Geoph. Uniw*, 28: 285-290.
- SREENIVAS, L.; JOHNSTON, J.R.; HILL, H.O. 1947. Some Relationships of Vegetation and Soil Detachment in the Erosion Process. *Soil Science Society of America, Proceedings*. p. 479-484.
- STERN R. D. ; DENNETT, M. D. ; DALE, I. C. 1982. Analysing daily rainfall measurements to give agronomically vs eful results. II. A. modelling approach. *Experimental Agriculture* 18: 237-253.
- STERN R. D. ; DALE, I. C. 1983. Modelling daily rainfall data. In: *Statical methods for Tropical drought analysis based on rainfall data*. W. M. O. Appendix 2. p. 1-4.
- STOCKING M. 1987. Measuring land degradation. In: *Blaikie, P. y Brook-Field, H. Land degradation and society*. London p.49-63.
- SUAREZ DE CASTRO, F. 1982. *Conservación de suelos*. 3a ed., San José, Costa Rica, IICA. p. 21-30.
- VAHRSON, W.G. 1989. La erosividad pluvial en la cuenca del río Reventazón, Costa Rica. In: *Congreso Nacional de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Memorias*. San José Costa Rica. p. 124-137.
- VAHRSON, W.G. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14: 15-24.
- VAHRSON, W.G. y DERCKSEN, P. 1990. Intensidades críticas de lluvia para el diseño de obras de conservación de suelos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14: 141-150.
- VAHRSON, W.G. 1991. Aspectos climáticos de la erosión hídrica en Costa Rica, América Central. In: *Vahrson, W.G., Alfaro M., y Palacios, G., eds. Taller de erosión de suelos. Memoria*. Heredia, Costa Rica. p. 33-47.
- VAHRSON, W.G.; CERVANTES, C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. In: *Vahrson, W.G; Alfaro, M. y Palacios, G, eds. Taller de erosión de Suelos. Memoria*. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. p. 116-130.

- WANG, P.K.; PRUPPACHER, H. 1977. Acceleration to terminal velocity of cloud and raindrops. *Journal of Applied Meteorology*. 16(3): 275-80.
- WEISCHET, W. 1965. The tropical convectonal and extra-tropical advectional type of precipitation. *Erdkunde* 19, band xix,6.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. American Geophys Union*. 39(2).
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society American, Proceedings (EE.UU)* 23(3): 246-249.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA-SEA, Agriculture Handbook No. 537. 58 p.
- WOBUS, H.B.; MURRAY, F.W.; KOENIG, L.R. 1971. Calculation of the terminal velocity of waterdrops, *Journal of Applied Meteorology* 10: 751-754.

APENDICE

Cuadro 1A. Diámetros y distribución de diámetros de gotas para diferentes eventos de lluvia en Turrialba, régimen atlántico de Costa Rica.

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
1	2,8	0,50 - 1,00	30	4,88	0,94	2,47	1,57
		1,01 - 2,00	520	86,04	1,49		
		2,01 - 3,00	34	5,67	2,36		
		3,01 - 4,00	19	3,07	3,17		
		4,01 - 4,75	2	0,34	4,39		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
2	3,4	0,50 - 1,00	36	2,61	0,97	1,78	1,46
		1,01 - 2,00	1282	93,35	1,45		
		2,01 - 3,00	54	3,90	2,13		
		3,01 - 4,00	2	0,14	2,57		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
3	3,9	0,50 - 1,00	40	3,57	0,94	1,75	1,36
		1,01 - 2,00	1010	90,26	1,32		
		2,01 - 3,00	63	5,63	2,14		
		3,01 - 4,00	6	0,54	2,59		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
4	5,9	0,50 - 1,00	25	2,22	0,95	1,86	1,58
		1,01 - 2,00	932	82,84	1,47		
		2,01 - 3,00	150	13,33	2,19		
		3,01 - 4,00	18	1,60	2,83		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
5	6,2	0,50 - 1,00	38	2,77	0,99		
		1,01 - 2,00	1129	82,41	1,34		
		2,01 - 3,00	192	14,01	2,20		
		3,01 - 4,00	11	0,80	2,99	1,88	1,46
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
6	6,4	0,50 - 1,00	49	3,74	0,92		
		1,01 - 2,00	1074	81,98	1,41		
		2,01 - 3,00	179	13,66	2,27		
		3,01 - 4,00	8	0,61	3,13	1,93	1,52
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
7	7,6	0,50 - 1,00	32	2,54	0,88		
		1,01 - 2,00	1034	82,61	1,53		
		2,01 - 3,00	186	14,85	2,13		
		3,01 - 4,00	0	0	0	1,51	1,60
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
8	9	0,50 - 1,00	19	1,65	0,97		
		1,01 - 2,00	987	85,75	1,36		
		2,01 - 3,00	124	10,77	2,26		
		3,01 - 4,00	21	1,82	3,03	1,90	1,48
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
9	9,7	0,50 - 1,00	24	2,20	0,85	1,94	1,64
		1,01 - 2,00	932	85,16	1,56		
		2,01 - 3,00	116	10,56	2,18		
		3,01 - 4,00	23	2,08	3,16		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
10	10,2	0,50 - 1,00	117	14,07	0,83	1,93	1,61
		1,01 - 2,00	633	76,23	1,64		
		2,01 - 3,00	66	8,00	2,40		
		3,01 - 4,00	14	1,71	2,87		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
11	12,3	0,50 - 1,00	86	10,00	0,87	2,35	1,67
		1,01 - 2,00	528	61,40	1,37		
		2,01 - 3,00	163	18,95	2,23		
		3,01 - 4,00	77	8,95	3,18		
		4,01 - 4,75	6	0,70	4,11		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
12	14,4	0,50 - 1,00	102	8,52	0,93	2,5	1,71
		1,01 - 2,00	874	73,02	1,51		
		2,01 - 3,00	119	9,94	2,34		
		3,01 - 4,00	92	7,69	3,36		
		4,01 - 4,75	10	0,84	4,35		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
13	15,24	0,50 - 1,00	244	11,13	0,98		
		1,01 - 2,00	1629	74,32	1,57		
		2,01 - 3,00	190	8,67	2,46		
		3,01 - 4,00	84	3,83	3,52	3,10	1,72
		4,01 - 4,75	42	1,92	4,82		
		4,76 - 6,35	3	0,14	5,30		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
14	22,6	0,50 - 1,00	41	10,85	0,96		
		1,01 - 2,00	149	39,86	1,73		
		2,01 - 3,00	74	19,68	2,37		
		3,01 - 4,00	85	22,74	3,40	3,52	2,36
		4,01 - 4,75	16	4,33	4,51		
		4,76 - 6,35	8	2,26	5,09		
		6,36 - 8,00	1	0,28	6,60		
15	26,5	0,50 - 1,00	452	23,97	0,95		
		1,01 - 2,00	1056	56,03	1,73		
		2,01 - 3,00	274	14,52	2,37		
		3,01 - 4,00	87	4,64	3,33	3,02	1,73
		4,01 - 4,75	12	0,63	3,82		
		4,76 - 6,35	4	0,22	5,90		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
16	27,5	0,50 - 1,00	16	0,99	0,93		
		1,01 - 2,00	1390	85,79	1,48		
		2,01 - 3,00	202	12,49	2,35		
		3,01 - 4,00	10	0,60	2,96	2,41	1,59
		4,01 - 4,75	2	0,13	4,32		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
17	34,2	0,50 - 1,00	77	5,32	0,61		
		1,01 - 2,00	1015	70,63	1,56		
		2,01 - 3,00	290	20,18	2,37		
		3,01 - 4,00	54	3,79	3,14	2,40	1,73
		4,01 - 4,75	1	0,07	4,39		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
18	105,4	0,50 - 1,00	88	7,39	0,99		
		1,01 - 2,00	787	65,99	1,88		
		2,01 - 3,00	144	12,11	2,51		
		3,01 - 4,00	131	10,97	3,75	3,20	2,20
		4,01 - 4,75	37	3,12	4,50		
		4,76 - 6,35	5	0,43	5,35		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Cuadro 2A. Diámetros y distribución de diámetros de gotas para diferentes eventos de lluvia en Alajuela (Fabio Baudrit), régimen Pacífico de Costa Rica.

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
1	1,5	0,50 - 1,00	67	6,80	0,81	1,56	1,76
		1,01 - 2,00	731	74,21	1,75		
		2,01 - 3,00	187	18,98	2,12		
		3,01 - 4,00	0	0	0		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
6,36 - 8,00	0	0	0	0			
2	1,96	0,50 - 1,00	62	6,01	0,75	1,35	1,47
		1,01 - 2,00	807	78,20	1,44		
		2,01 - 3,00	163	15,79	1,85		
		3,01 - 4,00	0	0	0		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
6,36 - 8,00	0	0	0	0			
3	1,97	0,50 - 1,00	58	7,09	0,78	1,41	1,56
		1,01 - 2,00	609	74,45	1,55		
		2,01 - 3,00	151	18,46	1,90		
		3,01 - 4,00	0	0	0		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
6,36 - 8,00	0	0	0	0			
4	4,0	0,50 - 1,00	75	9,46	0,92	1,85	1,58
		1,01 - 2,00	594	74,56	1,52		
		2,01 - 3,00	123	15,47	2,21		
		3,01 - 4,00	4	0,51	2,75		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
6,36 - 8,00	0	0	0	0			

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
5	5,8	0,50 - 1,00	72	8,57	0,83	1,92	1,64
		1,01 - 2,00	623	74,17	1,59		
		2,01 - 3,00	142	16,90	2,27		
		3,01 - 4,00	3	0,36	3,00		
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
6	6,1	0,50 - 1,00	2228	23,47	0,99	2,77	1,63
		1,01 - 2,00	4881	51,43	1,53		
		2,01 - 3,00	2066	21,77	2,30		
		3,01 - 4,00	301	3,18	3,23		
		4,01 - 4,75	9	0,09	3,74		
		4,76 - 6,35	6	0,06	4,84		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
7	7,4	0,50 - 1,00	330	24,23	0,85	2,29	1,50
		1,01 - 2,00	951	69,82	1,63		
		2,01 - 3,00	56	4,11	2,32		
		3,01 - 4,00	20	1,47	3,05		
		4,01 - 4,75	5	0,37	3,60		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
8	9,1	0,50 - 1,00	2418	32,87	0,93	2,55	1,69
		1,01 - 2,00	4299	58,45	1,99		
		2,01 - 3,00	572	7,78	2,48		
		3,01 - 4,00	61	0,83	3,07		
		4,01 - 4,75	4	0,06	4,28		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
9	9,2	0,50 - 1,00	1430	28,23	0,85		
		1,01 - 2,00	2915	57,55	1,83		
		2,01 - 3,00	629	12,42	2,50		
		3,01 - 4,00	82	1,62	3,20	2,55	1,66
		4,01 - 4,75	9	0,18	4,35		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
10	10,2	0,50 - 1,00	3063	34,24	0,91		
		1,01 - 2,00	5671	63,41	1,49		
		2,01 - 3,00	190	2,12	2,39		
		3,01 - 4,00	18	0,20	3,09	2,94	1,32
		4,01 - 4,75	1	0,01	4,27		
		4,76 - 6,35	2	0,02	5,51		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
11	11,4	0,50 - 1,00	1077	14,04	0,96		
		1,01 - 2,00	3783	49,32	1,77		
		2,01 - 3,00	2484	32,38	2,45		
		3,01 - 4,00	312	4,07	3,17	3,56	1,94
		4,01 - 4,75	11	0,14	3,97		
		4,76 - 6,35	2	0,03	6,07		
		6,36 - 8,00	2	0,03	6,54		
12	11,4	0,50 - 1,00	4184	33,71	0,85		
		1,01 - 2,00	5744	46,28	1,37		
		2,01 - 3,00	1949	15,70	2,26		
		3,01 - 4,00	448	3,61	3,51	3,41	1,43
		4,01 - 4,75	56	0,45	4,61		
		4,76 - 6,35	26	0,21	5,00		
		6,36 - 8,00	5	0,04	6,25		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
13	13,9	0,50 - 1,00	6328	23,71	0,98		
		1,01 - 2,00	15352	57,51	1,63		
		2,01 - 3,00	4523	16,94	2,50		
		3,01 - 4,00	462	1,73	3,24	3,61	1,65
		4,01 - 4,75	17	0,06	4,13		
		4,76 - 6,35	11	0,04	5,58		
		6,36 - 8,00	1	0,004	7,23		
14	15,1	0,50 - 1,00	5137	61,59	0,91		
		1,01 - 2,00	2723	32,65	1,84		
		2,01 - 3,00	421	5,05	2,35		
		3,01 - 4,00	60	0,72	3,05	2,04	1,30
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
15	15,2	0,50 - 1,00	8128	68,67	0,93		
		1,01 - 2,00	3089	26,10	1,87		
		2,01 - 3,00	563	4,76	2,37		
		3,01 - 4,00	56	0,48	2,94	2,03	1,25
		4,01 - 4,75	0	0	0		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
16	18,6	0,50 - 1,00	330	21,77	0,94		
		1,01 - 2,00	964	63,59	1,80		
		2,01 - 3,00	214	14,12	2,40		
		3,01 - 4,00	7	0,46	3,15	2,49	1,71
		4,01 - 4,75	1	0,07	4,16		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
17	24,4	0,50 - 1,00	216	8,99	1,09		
		1,01 - 2,00	1604	66,71	1,65		
		2,01 - 3,00	517	21,51	2,25	2,52	1,77
		3,01 - 4,00	63	2,61	3,34		
		4,01 - 4,75	4	0,17	4,26		
		4,76 - 6,35	0	0	0		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
18	24,4	0,50 - 1,00	854	23,66	0,96		
		1,01 - 2,00	1244	34,48	2,06		
		2,01 - 3,00	890	24,66	2,56	3,73	2,19
		3,01 - 4,00	568	15,73	3,56		
		4,01 - 4,75	43	1,18	4,41		
		4,76 - 6,35	9	0,26	5,20		
		6,36 - 8,00	1	0,03	7,39		
19	25,4	0,50 - 1,00	632	21,65	0,99		
		1,01 - 2,00	1457	49,91	1,72		
		2,01 - 3,00	763	26,14	2,51	3,13	1,81
		3,01 - 4,00	54	1,85	3,40		
		4,01 - 4,75	11	0,38	4,49		
		4,76 - 6,35	2	0,07	5,66		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
20	26	0,50 - 1,00	426	15,83	1,02		
		1,01 - 2,00	1507	56,00	1,71		
		2,01 - 3,00	693	25,75	2,40	3,09	1,82
		3,01 - 4,00	57	2,12	3,29		
		4,01 - 4,75	7	0,26	4,35		
		4,76 - 6,35	1	0,04	5,76		
		6,36 - 8,00	0	0	0		

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	N° de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
21	27	0,50 - 1,00	716	19,58	0,97		
		1,01 - 2,00	1893	51,78	1,78		
		2,01 - 3,00	952	26,04	2,53		
		3,01 - 4,00	74	2,02	3,27	3,22	1,87
		4,01 - 4,75	15	0,41	4,54		
		4,76 - 6,35	6	0,16	6,25		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
22	27,4	0,50 - 1,00	2914	41,37	0,87		
		1,01 - 2,00	2262	32,12	1,56		
		2,01 - 3,00	1374	19,51	2,55		
		3,01 - 4,00	429	6,10	3,49	2,97	1,61
		4,01 - 4,75	56	0,79	4,25		
		4,76 - 6,35	8	0,11	5,12		
		6,36 - 8,00	0	0	0		
23	38,1	0,50 - 1,00	6522	29,97	0,95		
		1,01 - 2,00	10091	46,36	1,54		
		2,01 - 3,00	2742	12,60	2,52		
		3,01 - 4,00	1705	7,84	3,72	3,70	1,77
		4,01 - 4,75	551	2,53	4,74		
		4,76 - 6,35	118	0,54	5,68		
		6,36 - 8,00	35	0,16	6,77		
24	43,4	0,50 - 1,00	4514	26,65	0,99		
		1,01 - 2,00	7837	46,26	1,67		
		2,01 - 3,00	3128	18,47	2,66		
		3,01 - 4,00	1193	7,05	3,76	3,67	1,87
		4,01 - 4,75	187	1,10	4,42		
		4,76 - 6,35	73	0,43	5,12		
		6,36 - 8,00	8	0,05	7,10		

....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Intervalo de diámetros de agregados (mm)	Nº de agregados	Frecuencia (%)	Diámetro medio de gotas (mm)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro medio ponderado de gotas (mm)
25	54,9	0,50 - 1,00	926	28,26	1,01		
		1,01 - 2,00	1791	54,65	1,52		
		2,01 - 3,00	291	8,88	2,41		
		3,01 - 4,00	157	4,80	3,86	3,80	1,71
		4,01 - 4,75	58	1,77	4,88		
		4,76 - 6,35	43	1,30	6,03		
		6,36 - 8,00	11	0,35	6,88		
26	91,4	0,50 - 1,00	6284	33,69	0,91		
		1,01 - 2,00	7837	42,01	1,79		
		2,01 - 3,00	2091	11,21	2,61		
		3,01 - 4,00	1683	9,02	3,90	3,83	1,92
		4,01 - 4,75	497	2,66	4,86		
		4,76 - 6,35	191	1,02	5,88		
		6,36 - 8,00	72	0,38	6,90		

Cuadro 3A. Datos de energía cinética de las lluvias muestreadas en Turrialba (CATIE), régimen Atlántico de Costa Rica.

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
1	2,8	0,94	4,44	20,3
		1,49	5,46	
		2,36	6,72	
		3,17	7,65	
		4,39	8,85	
		0	0	
2	3,4	0	0	15,3
		0,97	4,52	
		1,45	5,39	
		2,13	6,40	
		2,57	6,98	
		0	0	
3	3,9	0	0	15,2
		0,94	4,44	
		1,32	5,18	
		2,14	6,42	
		2,59	7,00	
		0	0	
4	5,9	0	0	17,7
		0,95	4,46	
		1,47	5,43	
		2,19	6,50	
		2,83	7,28	
		0	0	
		0	0	
		0	0	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Díámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² *mm
5	6,2	0,99	4,56	17,4
		1,34	5,21	
		2,20	6,50	
		2,99	7,46	
		0	0	
6	6,4	0	0	17,8
		0	0	
		0	0	
		0,92	4,41	
		1,41	5,33	
7	7,6	2,27	6,59	17,0
		3,13	7,61	
		0	0	
		0	0	
		0	0	
8	9	0,88	4,33	18,1
		1,53	5,53	
		2,13	6,41	
		0	0	
		0	0	
		0,97	4,52	
		1,36	5,24	
		2,26	6,58	
		3,03	7,50	
		0	0	
		0	0	
		0	0	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Díámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
9	9,7	0,85	4,24	18,5
		1,56	5,57	
		2,18	6,47	
		3,16	7,64	
		0	0	
10	10,2	0	0	18,5
		0	0	
		0	0	
		0,83	4,20	
		1,64	5,71	
11	12,3	2,40	6,76	23,9
		2,87	7,33	
		0	0	
		0	0	
		0	0	
12	14,4	0,87	4,30	24,7
		1,37	5,27	
		2,23	6,55	
		3,18	7,66	
		4,11	8,60	
		0	0	
		0	0	
		0,93	4,43	
		1,51	5,50	
		2,34	6,69	
		3,36	7,86	
		4,35	8,82	
		0	0	
		0	0	

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² *mm
13	15,24	0,98	4,53	27,8
		1,57	5,59	
		2,46	6,83	
		3,52	8,03	
		4,82	9,23	
		5,30		
		0		
14	22,6	0,96	4,49	33,2
		1,73	5,85	
		2,37	6,72	
		3,40	7,90	
		4,51	8,96	
		5,09	9,46	
		6,60		
		10,62		
15	26,5	0,95	4,47	24,2
		1,73	5,84	
		2,37	6,73	
		3,33	7,83	
		3,82	8,32	
		5,90	10,10	
		0		
16	27,5	0,93	4,42	18,4
		1,48	5,44	
		2,35	6,70	
		2,96	7,42	
		4,32	8,79	
		0	0	
		0		

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² mm
17	34,2	0,61	3,66	21,0
		1,56	5,58	
		2,37	6,72	
		3,14	7,62	
		4,39	8,85	
		0	0	
18	105,4	0	0	29,9
		0,99	4,55	
		1,88	6,07	
		2,51	6,90	
		3,75	8,26	
		4,50	8,96	
	5,35	9,67		

Cuadro 4A. Datos de energía cinética de las lluvias muestreadas en Alajuela (Fabio Baudrit), régimen Pacífico de Costa Rica.

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
1	1,5	0,81	4,15	18,2
		1,75	5,87	
		2,12	6,40	
		0	0	
2	1,96	0	0	15,5
		0	0	
		0	0	
		0	0	
3	1,97	0,75	4,02	16,3
		1,44	5,39	
		1,85	6,01	
		0	0	
4	4,0	0	0	17,6
		0	0	
		0	0	
		0	0	
		0,92	4,40	
		1,52	5,52	
		2,21	6,52	
		2,75	7,19	
		0	0	
		0	0	
		0	0	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² *mm
5	5,8	0,83	4,20	18,3
		1,59	5,62	
		2,27	6,60	
		3,00	7,47	
		0	0	
		0	0	
6	6,1	0,99	4,56	21,2
		1,53	5,53	
		2,30	6,63	
		3,23	7,72	
		3,74	8,24	
		4,84	9,25	
7	7,4	0	0	18,5
		0,85	4,26	
		1,63	5,69	
		2,32	6,65	
		3,05	7,52	
		3,60	8,10	
8	9,1	0	0	20,2
		0,93	4,42	
		1,99	6,22	
		2,48	6,86	
		3,07	7,55	
		4,28	8,75	
		0	0	
		0	0	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Díámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
9	9,2	0,85	4,26	20,9
		1,83	5,99	
		2,50	6,88	
		3,20	7,68	
		4,35	8,82	
		0	0	
		0	0	
10	10,2	0,91	4,39	16,1
		1,49	5,46	
		2,39	6,75	
		3,09	7,57	
		4,27	8,74	
		5,51	9,80	
		0	0	
11	11,4	0,96	4,50	22,8
		1,77	5,91	
		2,45	6,82	
		3,17	7,66	
		3,97	8,46	
		6,07	10,23	
		6,54	10,58	
12	11,4	0,85	4,24	25,6
		1,37	5,26	
		2,26	6,58	
		3,51	8,01	
		4,61	9,05	
		5,00	9,39	
		6,25	10,37	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
13	13,9	0,98	4,53	21,2
		1,63	5,68	
		2,50	6,89	
		3,24	7,73	
		4,13	8,62	
		5,58	9,85	
		7,23	11,06	
14	15,1	0,91	4,39	18,3
		1,84	6,00	
		2,35	6,70	
		3,05	7,53	
		0	0	
		0	0	
		0	0	
15	15,2	0,93	4,43	18,0
		1,87	6,05	
		2,37	6,72	
		2,94	7,40	
		0	0	
		0	0	
		0	0	
16	18,6	0,94	4,44	19,6
		1,80	5,95	
		2,40	6,76	
		3,15	7,64	
		4,16	8,64	
		0	0	
		0	0	

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² *mm
17	24,4	1,09	4,74	20,7
		1,65	5,71	
		2,25	6,57	
		3,34	7,83	
		4,26	8,73	
		0	0	
18	24,4	0,96	4,49	28,6
		2,06	6,32	
		2,56	6,95	
		3,56	8,06	
		4,41	8,88	
		5,20	9,55	
19	25,4	7,39	11,17	23,0
		0,99	4,55	
		1,72	5,83	
		2,51	6,89	
		3,40	7,89	
		4,49	8,94	
20	26	5,66	9,92	21,8
		0	0	
		1,02	4,62	
		1,71	5,82	
		2,40	6,76	
		3,29	7,78	
		4,35	8,82	
		5,76	10,00	
		0	0	

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética J/m ² *mm
21	27	0,97	4,50	24,1
		1,78	5,92	
		2,53	6,92	
		3,27	7,76	
		4,54	8,98	
		6,25	10,36	
	0	0		
22	27,4	0,87	4,30	26,3
		1,56	5,57	
		2,55	6,94	
		3,49	7,99	
		4,25	8,73	
		5,12	9,48	
	0	0		
23	38,1	0,95	4,47	33,2
		1,54	5,55	
		2,52	6,91	
		3,72	8,22	
		4,74	9,16	
		5,68	9,94	
	6,77	10,74		
24	43,4	0,99	4,55	28,8
		1,67	5,75	
		2,66	7,08	
		3,76	8,26	
		4,42	8,88	
		5,12	9,48	
	7,10	10,97		

.....Continuación

Evento	Intensidad (mm/hr)	Diámetro medio de gotas por intervalo de clase (mm)	Velocidad Terminal (m/s)	Energía cinética $J/m^2 \cdot mm$
25	54,9	1,01	4,59	37,6
		1,52	5,52	
		2,41	6,77	
		3,86	8,36	
		4,88	9,28	
		6,03	10,20	
26	91,4	6,88	10,82	36,2
		0,91	4,38	
		1,79	5,93	
		2,61	7,02	
		3,90	8,40	
		4,86	9,27	
	5,88	10,09		
	6,90	10,83		

ANEXO

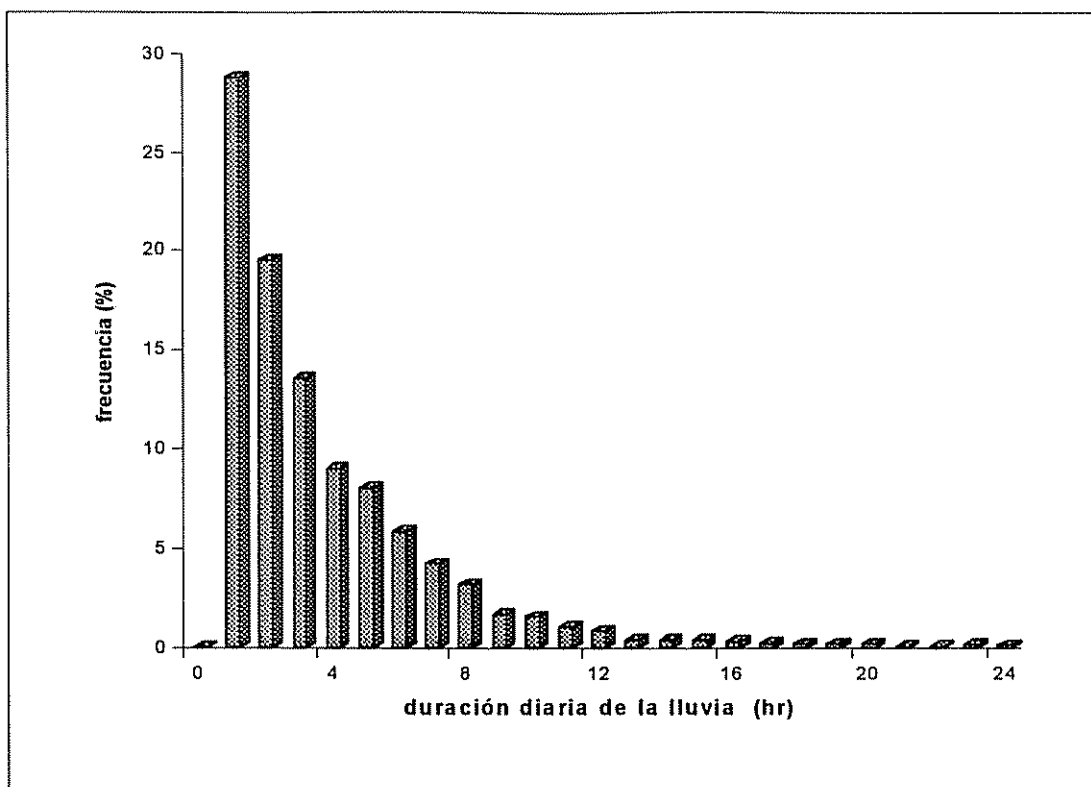


Figura 1A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Limón durante el período 1978 - 1992.

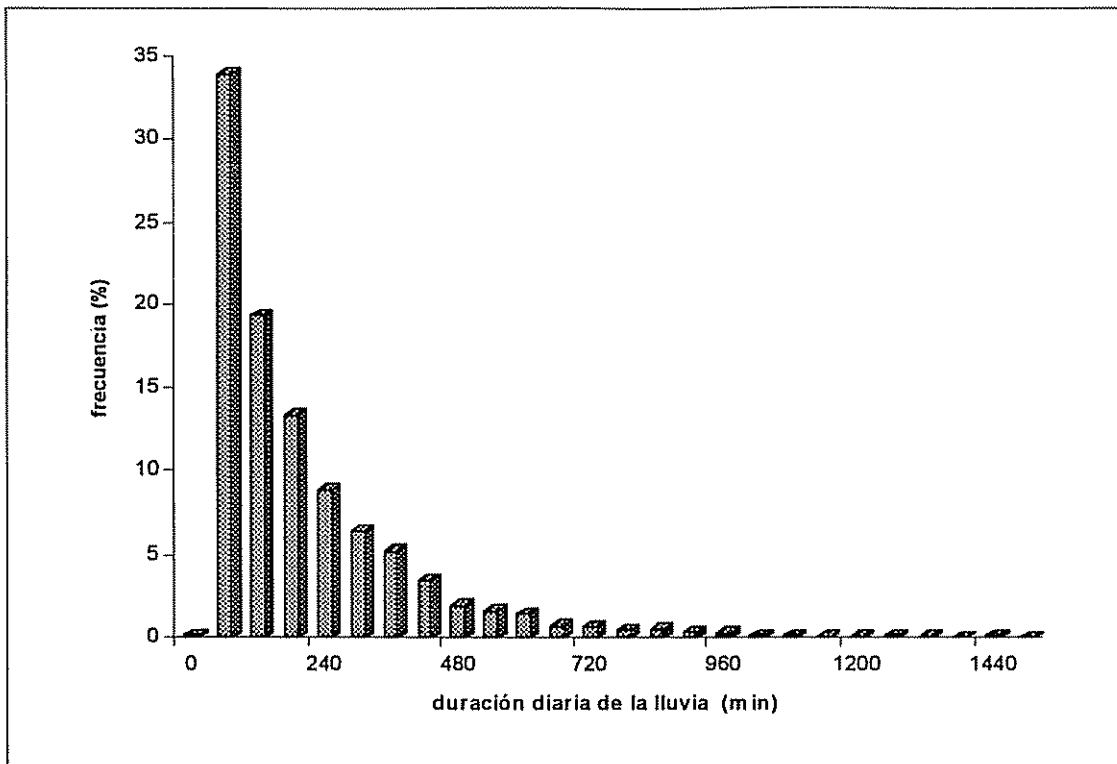


Figura 2A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica La Lola durante el período 1978 - 1992.

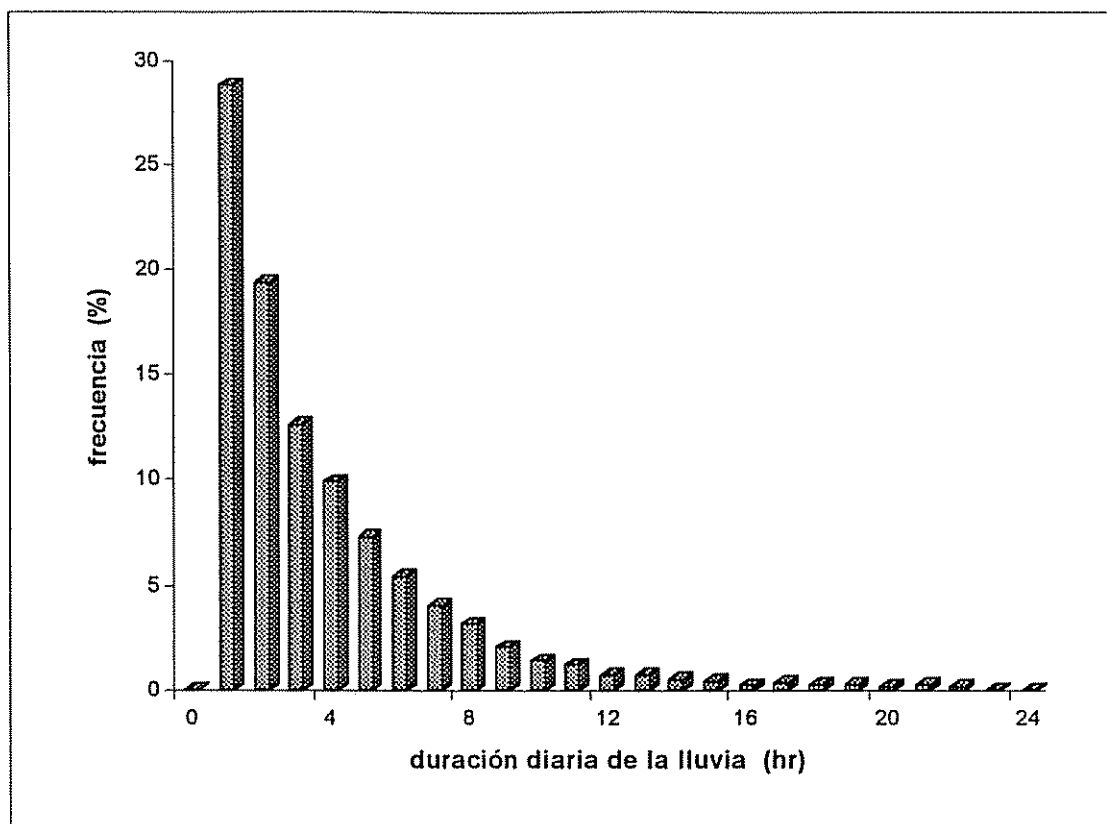


Figura 3A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Diamantes durante el período 1978 - 1992.

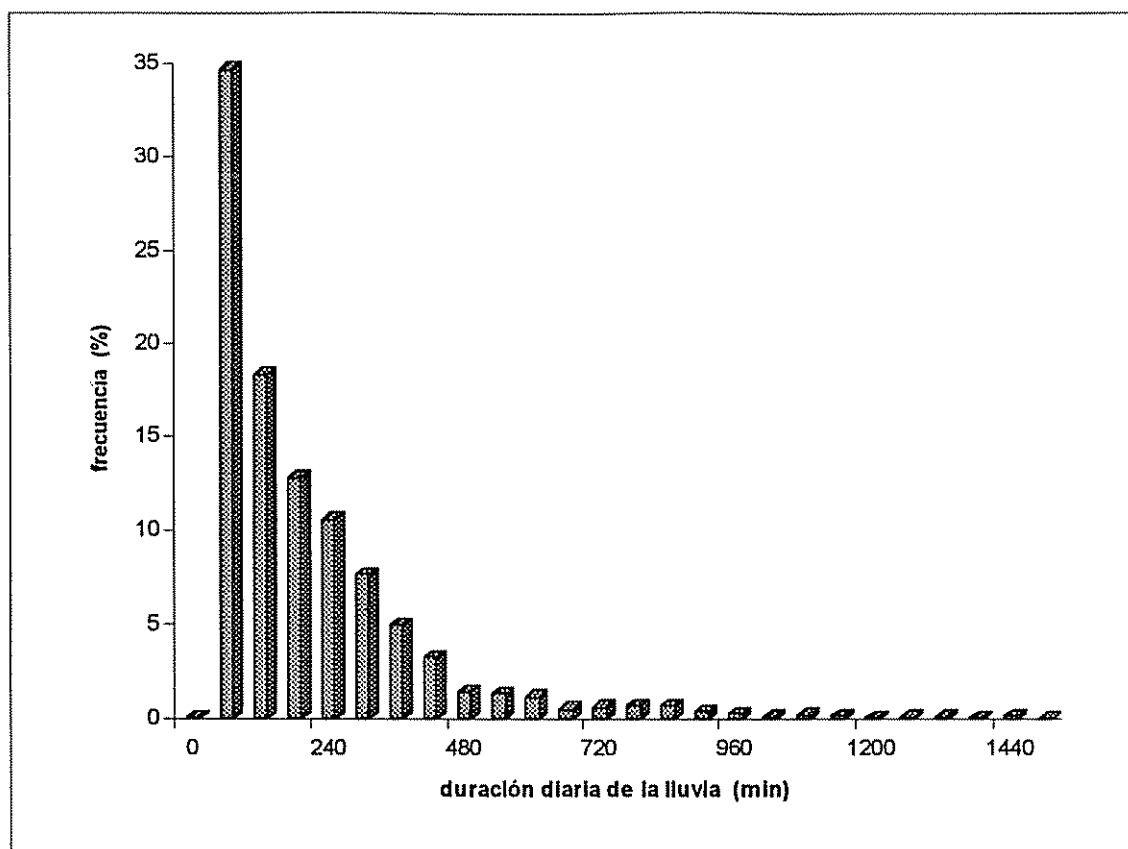


Figura 4A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Catie durante el período 1978 - 1992.

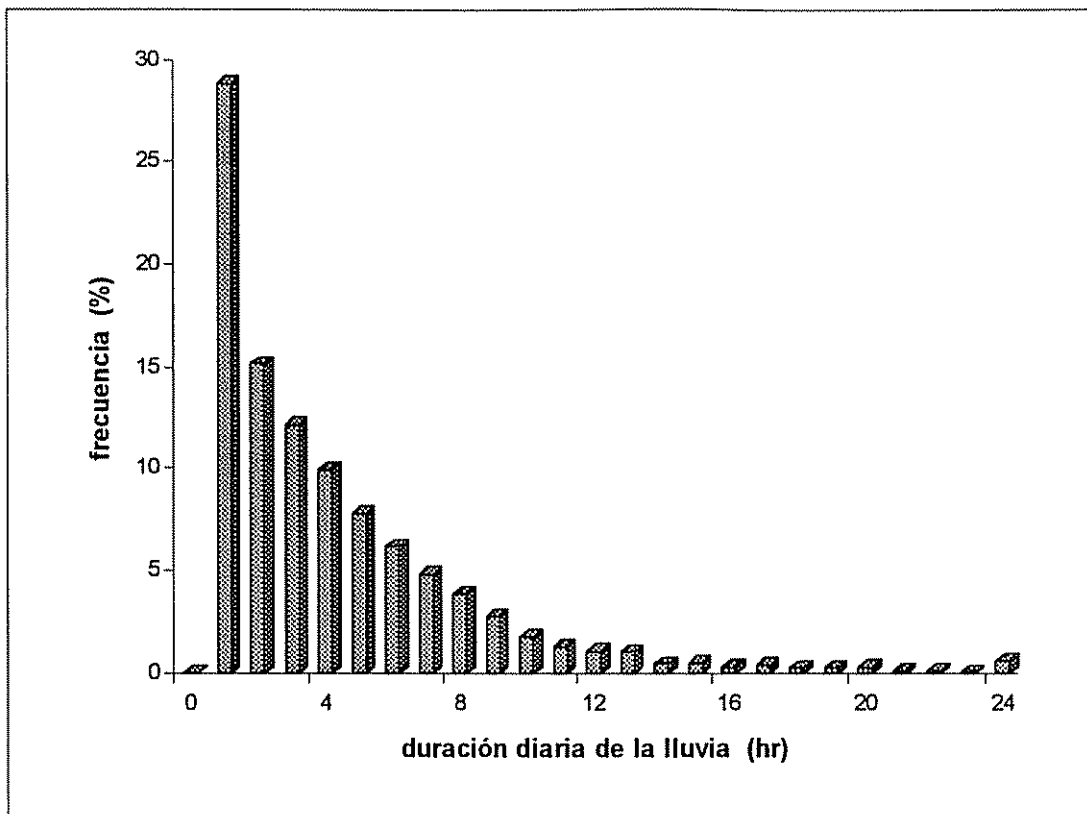


Figura 5A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Platanillo durante el período 1978 - 1992.

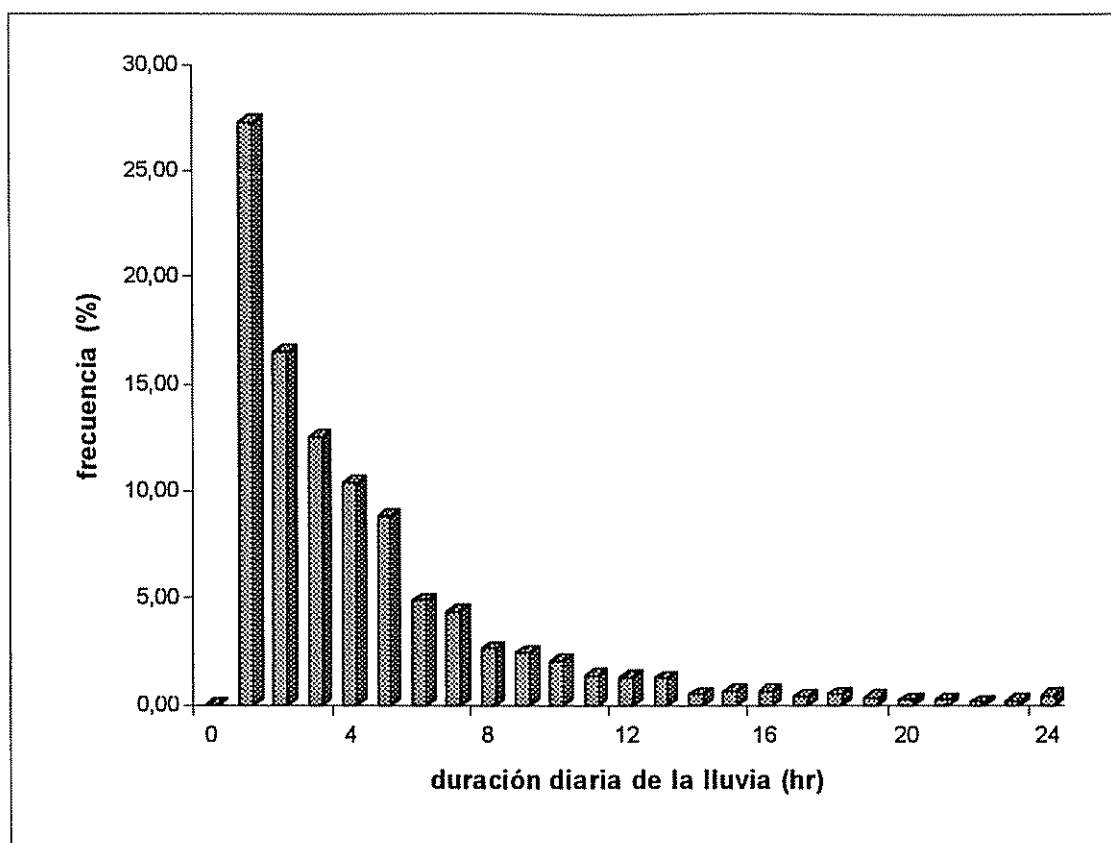


Figura 6A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica San Antonio durante el período 1978 - 1992.

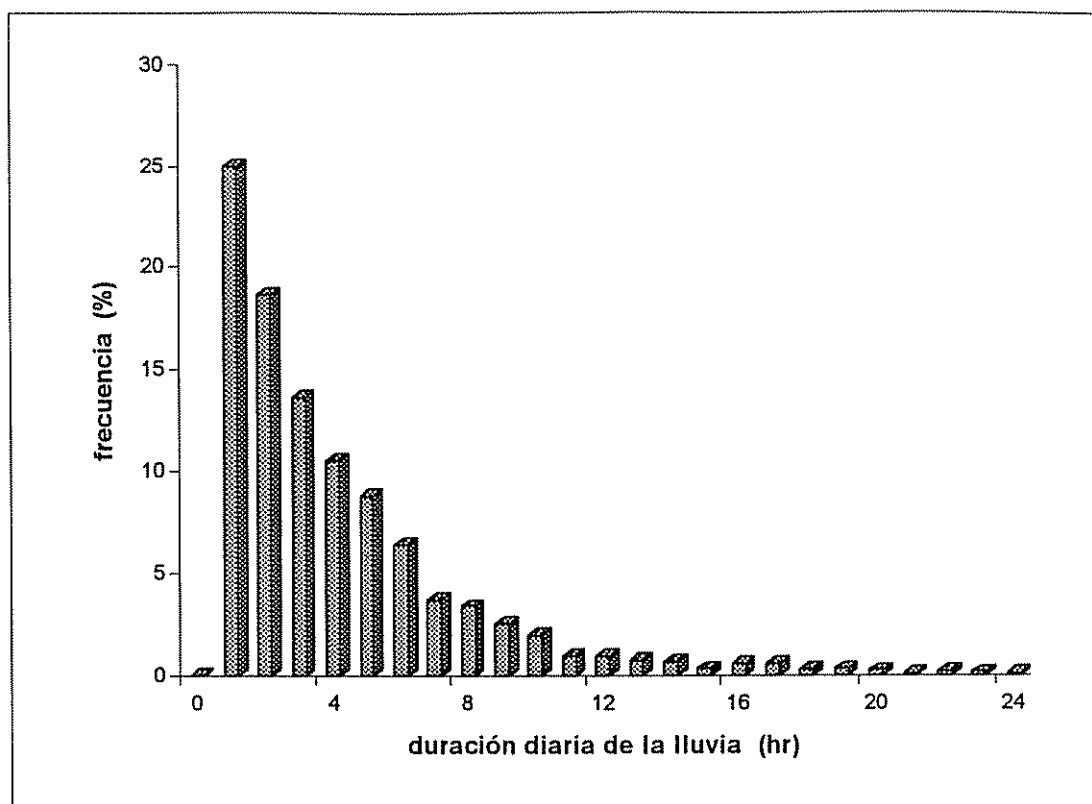


Figura 7A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Pacayas durante el período 1978 - 1992.

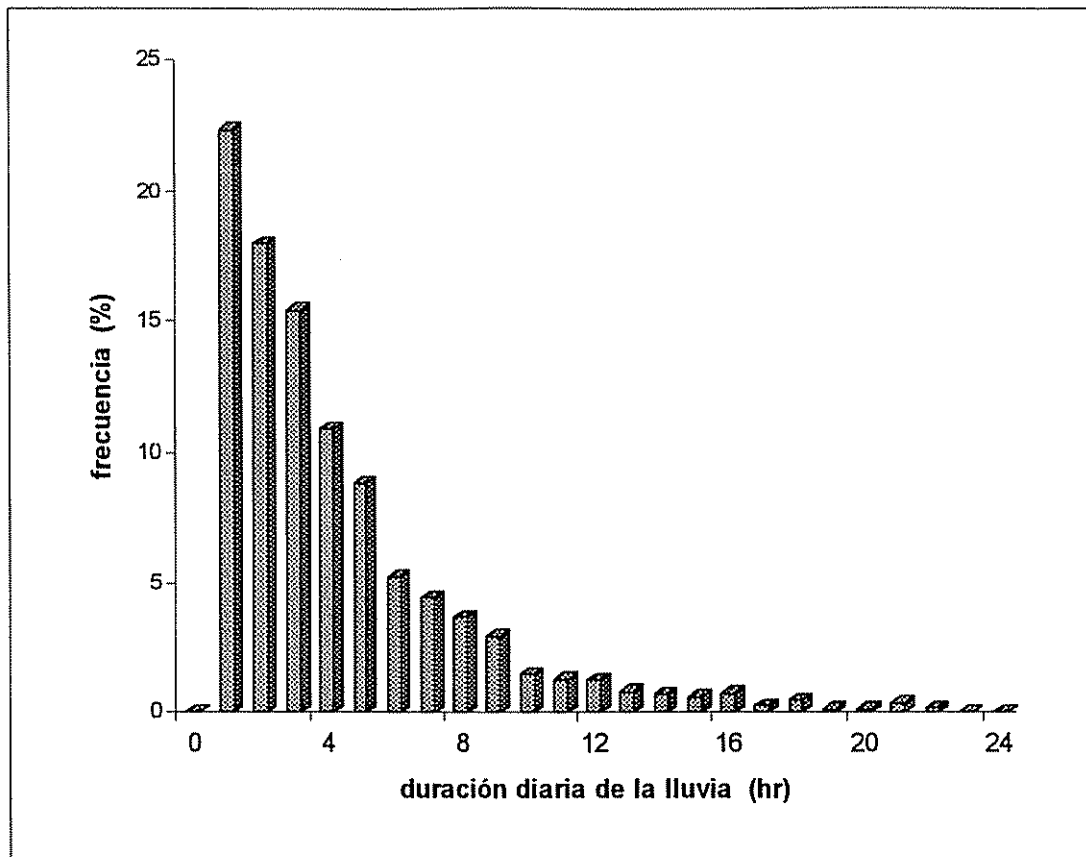


Figura 8A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Coliblanco durante el período 1978 - 1992.

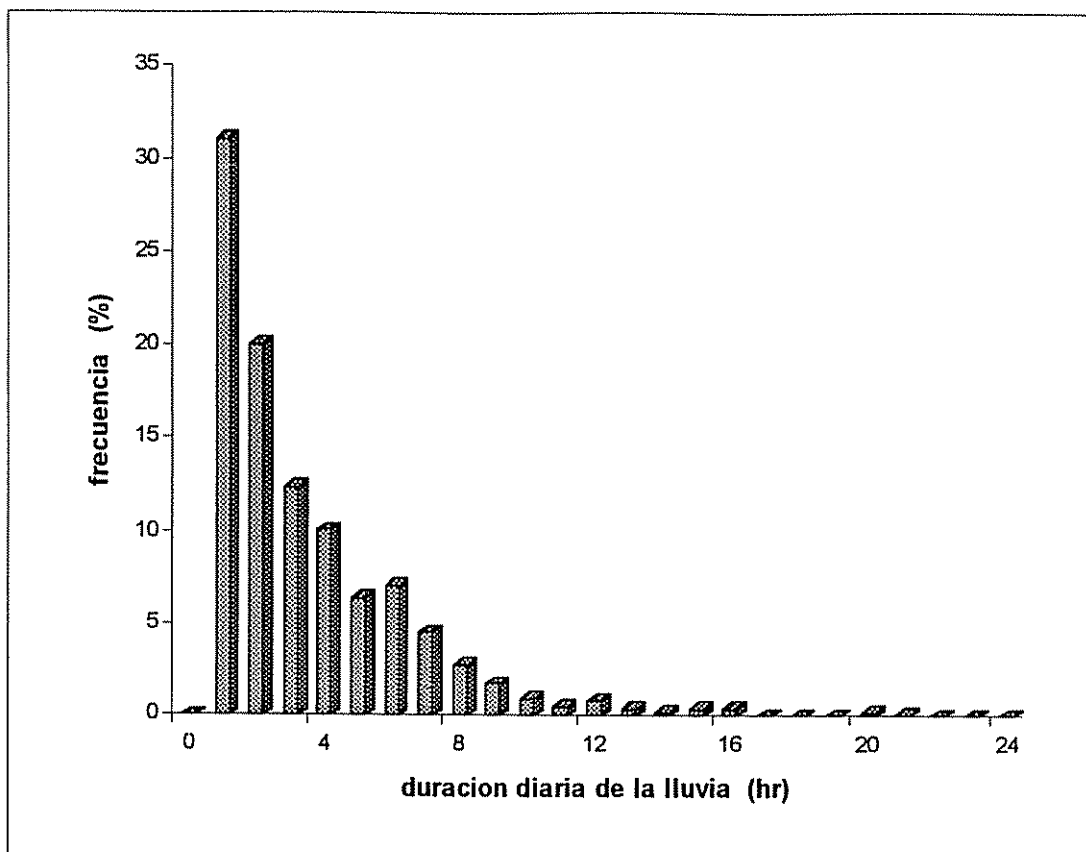


Figura 9A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Sanatorio Durán durante el período 1978 - 1992.

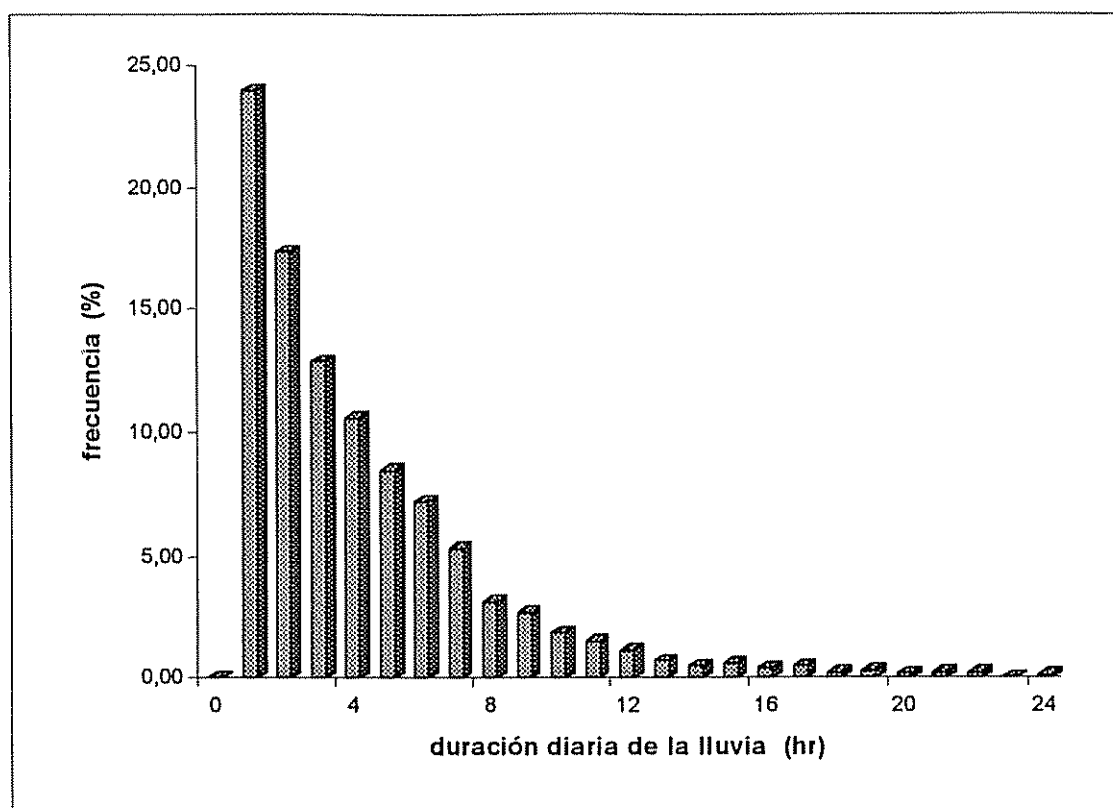


Figura 10A. Distribución de frecuencias de las duraciones diarias de las lluvias observadas en la estación meteorológica Volcán Irazú durante el período 1978 - 1992.