

Critical rainfall for debris-flow generation in Catia La Mar

Francois Courtel, José Luis López, Tania Gascón

Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Tel. 212-6053131, Fax. 6053040

fcourtel@imf.ing.ucv.ve; jllopez@imf.ing.ucv.ve; gascontania@gmail.com

Abstract

A graphical relation is proposed in order to evaluate the possibility of debris-flow generation in the area of Catia La Mar, in the State of Vargas. The graphic uses two rainfall indicators, one indicator representing the short-term rainfall (recent hours) and the other one the long-term rainfall (recent days), to define a critical line which separates a safe zone from a risky zone. To determine the critical line in the evaluation graphic, a historic investigation was necessary as to represent both debris-flow events occurred in the past (causing rainfalls) and extreme past rainfalls that did not cause debris flows (non-causing rainfalls). The chart is currently being used as a tool in an early warning system that has been installed to protect the town of Catia La Mar. The system is composed by rainfall stations and water level stations that transmit real time data to a control station. The data will be used to calibrate and adjust the threshold line with the purpose of improving, progressively, the debris-flow-alert prediction in the region.

Key words: Critical rainfall, debris flows, Catia La Mar.

Umbrales de lluvia para ocurrencia de aludes torrenciales en Catia La Mar

Resumen

En este trabajo se propone una relación gráfica para evaluar la posibilidad de ocurrencia de aludes torrenciales en la zona de Catia La Mar, en el Estado Vargas. El gráfico utiliza dos indicadores de lluvia, uno representando la lluvia de corto plazo (horas recientes) y otro representando la lluvia acumulada de largo plazo (días recientes), para definir una línea crítica que separa una zona de peligro (ocurrencia) de una zona segura (no ocurrencia). Para la determinación de la línea crítica fue necesario realizar un análisis de los datos históricos observados en las estaciones hidrometeorológicas vecinas al área de estudio, a los fines de seleccionar las lluvias extremas causantes de aludes, y las lluvias extremas que no causaron aludes torrenciales. El gráfico está siendo utilizado como una herramienta preliminar para la generación de alertas en un sistema de alerta temprana que ha sido instalado para proteger a la población de Catia La Mar. El sistema consta de un conjunto de estaciones pluviométricas e hidrométricas, las cuales transmiten información en tiempo real a una sala de control. Los datos generados por estas estaciones serán utilizados a futuro para ajustar y calibrar la línea de umbrales críticos a los fines de mejorar progresivamente las predicciones de alerta contra aludes torrenciales en la región.

Palabras clave: Lluvia crítica, aludes torrenciales, Catia La Mar.

Introducción

Una de las causas de la gran cantidad de víctimas por los deslaves de 1999 en el Estado Vargas, fue la ausencia de sistemas de monitoreo y alerta que pudieran dar aviso previo a la población a fin de evacuar las zonas de peligro. Un sistema de alerta temprana requiere de datos generados en tiempo real por una red de estaciones hidrometeorológicas instaladas en las cuencas, las cuales monitorean la lluvia y los niveles de agua en los cauces. El sistema debe examinar en cada evento si las precipitaciones superan valores críticos, que abran la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa o aludes torrenciales. Esto requiere de herramientas gráficas o numéricas que permitan transformar en señales de alerta los datos registrados en las estaciones. En este trabajo se realiza un análisis de los datos históricos de lluvias extremas en el litoral central y se propone una relación gráfica para evaluar la posibilidad de ocurrencia de aludes torrenciales en las cuencas que drenan hacia la población de Catia La Mar, una de las áreas afectadas por las lluvias extremas de Diciembre de 1999 en el estado Vargas. A pesar de que las inundaciones de agua con transporte convencional de sedimentos, son eventos frecuentes que también han producido daños considerables en la zona de estudio, el presente trabajo se limita al desarrollo de una herramienta de protección contra aludes torrenciales.

Revisión de literatura

Desde 1975 aproximadamente, muchos autores han buscado cuantificar la relación existente entre la ocurrencia de aludes torrenciales y la precipitación. Los aludes torrenciales en cauce, considerados generalmente como un tipo de movimientos en masa [1], están asociados íntimamente a otros tipos de movimientos en masa en las laderas, fluidos (aludes de orden menor) o no fluidos (deslizamientos y derrumbes). Es la razón por la cual, las investigaciones sobre ocurrencia de aludes torrenciales incluyen con frecuencia, no siempre de manera explícita, recopilaciones de datos que abarcan todo tipo de movimiento en masa. La revisión de literatura efectuada condujo entonces a agrupar los métodos en tres clases principales, que difieren en cuanto

al número de indicadores usados, y a la importancia que atribuyen a las lluvias anteriores al evento (lluvias antecedentes) como factor causante de los movimientos en masa, y más específicamente de los aludes torrenciales.

1. Precipitación acumulada en determinado tiempo

Este es el modelo más simple que intenta relacionar la ocurrencia de movimientos en masa con la precipitación caída sobre periodos muy variables de tiempo, que van desde 1 día hasta 1 año. Entre estos se encuentra el trabajo de Glade en 1998 [1] que compara la magnitud de la lluvia diaria con la ocurrencia de deslizamientos durante el período 1862-1995 para Wellington, Nueva Zelandia, estableciendo valores críticos para deslizamientos.

2. Curvas intensidad versus duración

Este enfoque utiliza dos características del evento como parámetros principales: la duración (en horas) y la intensidad de la precipitación durante el evento (en mm/h), es decir la precipitación total dividida por la duración. Después del gráfico pionero de Caine en 1980 [1], varios autores establecen de esta manera líneas críticas las cuales intentan separar los eventos causantes de los eventos no causantes. Entre estos trabajos se encuentran Kanji *et al.* [2], Pando *et al.* [3] para Puerto Rico y Jan y Chen [4] en Taiwan.

3. Curvas precipitación de corto plazo versus precipitación de largo plazo

En este enfoque se usa un indicador “de largo plazo” que refleja la precipitación anterior conjuntamente con otro que refleja la precipitación más reciente (indicador “de corto plazo”). El periodo tomado en cuenta para el primero varía ampliamente según los estudios, desde 2 días hasta varios meses, tratándose en este último caso de apreciar la lluvia de toda la estación. Sin embargo el periodo más usado es de algunas semanas. En cuanto al indicador de corto plazo se trata de la precipitación acumulada en lapsos que van de 1 a 48 horas. Referencias sobre este enfoque pueden leerse en Salcedo [5] y López *et al.* [6], quienes usan gráficos extraídos de experiencias japonesas para evaluar eventos extremos en Venezuela [7-10].

Trabajos previos sobre umbrales en Venezuela

Pocas referencias se encuentran en nuestro país para describir la relación entre la cantidad de lluvia y la ocurrencia de deslizamientos o aludes torrenciales. Guillén [11] describe las estaciones telemétricas de alarma contra inundaciones y el sistema instalado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en 1990 en la cuenca del río Limón. La misma agencia como parte de un estudio de prevención de desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas, elaboró un gráfico de líneas críticas de precipitación, destinado a servir de base en el futuro a decisiones de emisión de alerta y de orden de evacuación en el Área Metropolitana de Caracas [12].

Área de estudio

El área en estudio corresponde a las cuencas del Río Mamo y de las quebradas Tacagua y La Zorra (Figura 1). La quebrada Tacagua y el Río Mamo nacen a alturas cercanas a los 2000 metros en la Cordillera de la Costa y sus cursos discurren siguiendo una pendiente suave hasta descargar en el Mar Caribe, atravesando la población de Catia La Mar. La quebrada La Zorra presenta un recorrido paralelo más corto y pronun-

ciado desde los 900 msnm aproximadamente. Las áreas de las cuencas de Mamo, Tacagua y La Zorra son de 141, 93,50 y 6,34 km², respectivamente, siendo la de Mamo la hoya hidrográfica más grande de todas las cuencas del Litoral Central que fueron afectadas por el evento torrencial de 1999. Las pendientes medias de los cauces son de 5,5, 7,1 y 32,6% respectivamente. La precipitación anual en el sector, se encuentra entre los 600 y 1000 mm al año.

Información hidrológica

Una sola estación se encuentra dentro del área de estudio, Mamo (Escuela Naval), por lo que se decidió extender el procesamiento de datos a otras estaciones en cuencas vecinas que tenían datos diarios y horarios disponibles: a) Maiquetía (FAV) y Cagigal (Armada) se encuentran en los límites de ella y están lo suficientemente cerca para considerarlas representativas, una de la cuenca baja y otra de la cuenca alta; b) estaciones de la zona central de Vargas, entre ellas Macuto con una serie bastante larga, y las estaciones del Proyecto PROCEDA-UCV en la cuenca de San José de Galipán, que disponían de datos horarios del evento de Febrero 2005; c) la antigua estación Subida del Ávila en Caracas que tenía datos horarios del evento de 1951, d) la estación Rancho Grande, ubicada en el estado Aragua, re-

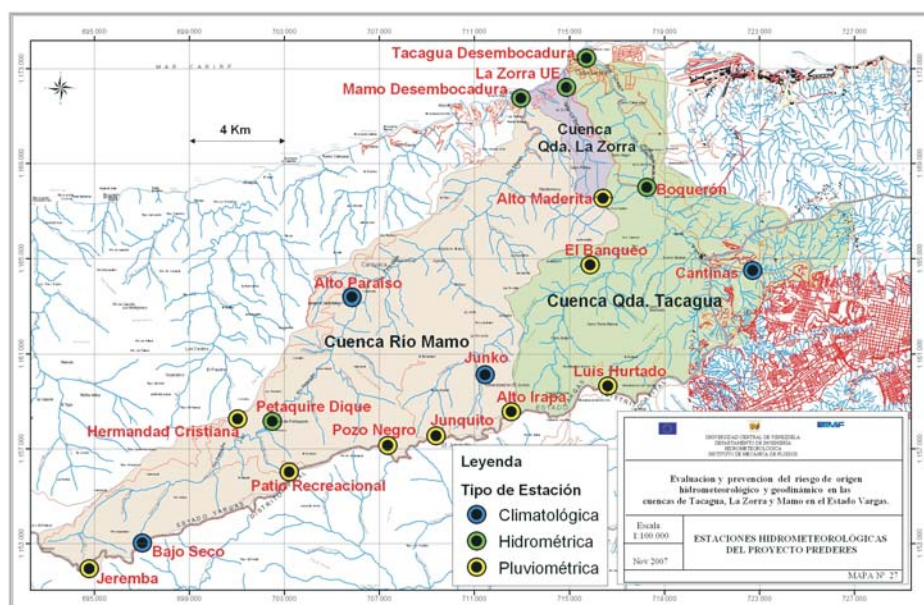


Figura 1. Ubicación de las cuencas hidrográficas en estudio (Mamo, Tacagua y La Zorra).

presentativa del evento torrencial de 1987, también con datos diarios. La Tabla 1 presenta las características de las estaciones pluviométricas utilizadas para el presente estudio y los periodos de registro recopilados, cubriendo un periodo de 59 años. A partir de estos datos se hizo una selección de eventos extremos, con el criterio de tener series continuas de lluvias, con 1 día de interrupción como máximo, que hayan alcanzado un total mayor o igual a 80 mm, y que incluyan por lo menos una lluvia diaria igual o mayor a 20 mm. Este último criterio (fijado a partir de las experiencias japonesas) se usa como un filtro destinado a des-

cartar precipitaciones no relevantes. Entre estos eventos se destacan algunos eventos más notables por la importancia de las precipitaciones, algunos causantes de aludes torrenciales, como los eventos de Febrero 1951, Septiembre 1987 (El Limón), Diciembre 1999 y Febrero 2005, y otros no causantes, tales como los eventos de Febrero-Marzo 1970 y Abril 1981.

Metodología de trabajo

Se ha seleccionado la metodología de la Precipitación de Trabajo [10] para analizar los datos

Tabla 1
Resumen de los datos de precipitación recopilados

	Serial	Estación	Datos diarios	Datos horarios
Vargas Oeste	1425	Alto Ño León	1948-51 / 53-63 / 67-94 / 97-98 / 2000-2001	-
	9311	Carayaca	1967-95 / 97-98	-
	5003	Corralito	1956-63 / 67-83	-
	422	Catia La Mar	1970-72 / 75-82	-
	0502	Maiquetía-INOS	1948-59 / 61-63 / 67-83	-
	0503	Maiquetía FAV	1961-2005	1967, 1970, 1981, 1990, 1991 (eventos), Feb 2005
	9308	Mamo-EN	Diciembre 1999	Diciembre 1999
	1401	Mamo-INOS	1956-63 / 67-83	-
	9361	Petaquire Dique	1971-1983	
Vargas Central	0519	Humboldt	1958-74 / 2000-2006 (Ene-Ago)	Dic 2000-Ene 2002, 2004-2006 (Ago)
	0508	Macuto	1952-63 / 67-95 / 97-98	-
		Macuto PROCEDA	2004-2005	Febrero 2005 (evento)
	0630	Manzanares	2004-2006 (Ene-Jun)	-
	S/N	Picacho Galipán	2004 (Jun-Dic)-2006 (Ene-Oct)	Jun 2004-Jul 2005
	S/N	San Francisco	2004 (Feb-Dic)-2005 / 2007 (Ene-Ago)	Febrero 2005 (evento)
	0631	San José	2004 (Ene-Oct)-2005 / 2006 (Ene-Ago)	Febrero 2005 (evento)
	0629	San Isidro	2004-2006 (Ene-Ago)	Febrero 2005 (evento)
Valle de Caracas	0531	Cagigal	1891-1988	1981-Agosto 2004
	5024	Subida Pico Ávila	1967-1974	Febrero 1951 (evento)
Aragua	0426	Rancho Grande	1967-2003	Septiembre 1987 (evento)

y generar las curvas de umbrales críticos de lluvia. Este método muy usado en Japón tiene varias variantes pero en todas ellas el procedimiento consiste en: a) seleccionar en los registros históricos los episodios más significativos de lluvia continuada sobre varios días y determinar cuáles produjeron aludes y cuáles no; b) representarlos en un gráfico construido en base a dos parámetros: el “indicador de precipitación de largo plazo” refleja la precipitación acumulada el mismo día y los días anteriores al momento considerado y el “indicador de corto plazo” refleja la precipitación caída en la hora o las horas inmediatamente anteriores al momento considerado; c) tratar de separar en este gráfico los eventos que causaron aludes (“eventos causantes”) de los que no causaron (“eventos no-causantes”) por una Línea Crítica, que separe de esta manera una zona “insegura” de una zona “segura” en cuanto a la amenaza por aludes.

Como se expuso más arriba otros métodos usan también dos tipos de indicadores de precipitación, pero se ha podido constatar por la experiencia que el uso de una suma sin ponderación para estos indicadores permite que en ocasión de lluvias poco intensas pero muy prolongadas se alcancen los valores críticos, sin que existan realmente las condiciones para la producción de aludes. Para evitar este inconveniente, el método usa como precipitación acumulada, la “precipitación de trabajo” P_w definida como la suma de las precipitaciones de la serie de lluvias, afectadas de un coeficiente de reducción que refleja su antigüedad en la serie:

$$P_w = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + \dots = \sum \alpha_t P_t \quad (1)$$

donde P_t es la precipitación t horas antes del momento del cálculo; α_t es un coeficiente de reducción correspondiente a P_t calculado por la relación $\alpha_t = 0,5^{t/T}$; T es el “tiempo de media vida”, es decir tiempo en que el coeficiente de reducción se hace igual a 0,5.

Si por ejemplo $T = 1$ hora se tiene:

$$P_w = 0,5P_1 + 0,25P_2 + 0,125P_3 + \dots$$

La variante utilizada en el presente trabajo usa los siguientes indicadores para la definición de los umbrales críticos: en abscisa, la precipitación de trabajo calculada con tiempo de media

vida de 72 horas (PT72) o tres días, y en la ordenada, la precipitación de trabajo calculada con tiempo de media vida de 1,5 horas (PT1.5). Una vez calculados los coeficientes de reducción según la antigüedad, para los tiempo de media vida definidos, se puede observar que las precipitaciones de más de 12 horas dejan de tener influencia sobre el valor del indicador de corto plazo, y las de más de 24 días sobre el indicador de largo plazo, visto que se ven afectadas por coeficientes de reducción menores a 0,5% [13].

Determinación de umbrales de lluvia

La mayor dificultad en la aplicación de la metodología para determinar la línea crítica en el área de estudio (litoral central de Vargas), es que se dispone de muchos datos diarios y de pocos datos horarios, siendo estos últimos los que requiere propiamente la metodología. Se estableció entonces un artificio que permitió estimar las precipitaciones de trabajo a partir de series diarias:

- para los días anteriores al día pico se considera la precipitación del día como si se hubiera repartido por igual en todas las horas del día. Debido a la forma exponencial de los coeficientes de ponderación, esta suposición equivale a concentrar la precipitación diaria a las 12 p.m., y a hacerla entrar en la suma ponderada con el coeficiente que corresponde a esta hora. El error introducido por esta aproximación se hace más pequeño a medida que la precipitación considerada es más antigua.
- para el propio día pico, se estableció una relación empírica entre la contribución de este día a cada uno de los indicadores (PT1.5 y PT72) y la precipitación total del día, en base a los 8 registros horarios de eventos extremos que se habían recopilado.

Con este artificio se procesaron los datos disponibles en las distintas estaciones para los 4 eventos causantes y 14 eventos no-causantes que se muestran en la Tabla 2. Para los eventos causantes, el momento culminante o momento pico corresponde en principio al momento de la ocurrencia del alud. Sin embargo como no se tiene suficiente información acerca de este aspecto

(salvo para el evento de 1987), se consideró para todos los eventos, causantes y no causantes, como momento culminante el momento cuando el punto representativo se ha alejado más del origen, antes de iniciar su regreso hacia ésta. Las precipitaciones medidas y calculadas (PT72 y PT1.5) correspondientes a los momentos picos de los eventos se presentan en la Tabla 2. Se debe señalar que los “días pico” son los días cuando el punto representativo se ha alejado más del origen del gráfico. No corresponde siempre con el día de mayor precipitación, existiendo a veces un retraso.

En la Figura 2 se han graficado los valores obtenidos de PT1.5 (abscisas) versus PT72 (ordenadas), para los eventos extremos analizados, causantes o no causantes de aludes. Se propone como línea crítica a la línea con pendiente negativa de 45° que pasa por el punto más a la izquierda de los eventos causantes, en este caso el representativo de Mamo (1999). Esta línea corta el eje de las abscisas en 220 mm aproximadamente. La línea crítica propuesta deja en la zona segura a los puntos representativos de Alto Ño León (1951), Cagigal (1951) y Humboldt (2005), aunque se trate de eventos considerados como causantes de aludes. Estos puntos no se tomaron en cuenta para el trazado de la línea, porque los aludes no ocurrieron en las áreas cercanas a estas estaciones. En efecto a pesar del pequeño tamaño de las cuencas, las precipitaciones en un mismo evento pueden variar mucho entre las distintas zonas de la cuenca, especialmente entre zonas bajas costeras y zonas altas montañosas. En consecuencia los puntos relativos a un mismo evento pueden estar representados por puntos muy distantes en el gráfico, debido a estas diferencias en las precipitaciones.

Por su parte los eventos no causantes quedaron todos en la zona segura a excepción del de Febrero-Marzo 1970, donde algunas estaciones pasaron ligeramente la línea crítica. Se puede tratar de un error de estimación de los indicadores, ya que no se disponía de valores horarios para estos puntos, pero se han señalado en todo caso para este evento numerosos movimientos en masa en laderas. Un análisis de sensibilidad del indicador de largo plazo mostró que el cambio en el tiempo de media vida (TMV) utilizado no parece influir en la separabilidad de los eventos.

Cualquiera que sea el TMV el evento de 1970 queda en la zona insegura. Por lo tanto se propone utilizar el TMV de 72 horas, propuesto originalmente para el método.

Una gran ventaja de la metodología usada es que se puede seguir en el gráfico la trayectoria del punto representativo de la lluvia durante el evento, a lo largo de lo que se conoce como *sna-ke-line* o línea-serpiente. Al recibir los datos de precipitación en tiempo real, la situación se podrá evaluar según la posición del punto representativo a lo largo de la “línea-serpiente” y permitirá dar señales de alerta cuando se acerque a la línea crítica. Esto se ilustra en la Figura 3 donde se presenta la evolución en el tiempo del evento de 1999 mediante el trazado de la línea serpiente en el gráfico de línea crítica.

Conclusiones y recomendaciones

Se ha desarrollado una línea de umbrales críticos que relaciona la precipitación con la posibilidad de ocurrencia de aludes torrenciales en la región de Catia La Mar, basada en 59 años de registros de lluvias en el litoral central de Vargas. Debido a la ausencia de datos de lluvia, y a la falta de eventos (aludes) documentados, en la zona específica de Catia La Mar, fue necesario utilizar datos de estaciones vecinas y elaborar una línea regional, en lugar de una local. Con el monitoreo futuro de las cuencas de Catia La Mar (se han instalado 19 estaciones hidrometeorológicas), y la ocurrencia de eventos adversos de cierta magnitud, los datos generados por las nuevas estaciones serán utilizados para ajustar y calibrar la línea de umbrales críticos, a los fines de mejorar progresivamente las predicciones de alerta contra aludes torrenciales en esta área.

La metodología utilizada toma en cuenta la suma de las precipitaciones antecedentes afectadas por un coeficiente de reducción, de forma tal que el peso de las precipitaciones anteriores va disminuyendo a medida que éstas se hacen más antiguas. El método utiliza dos indicadores para la definición de los umbrales críticos. El primero representa la lluvia de largo plazo (precipitación de trabajo calculada con tiempo de media vida de 72 horas o tres días), y el segundo indicador representa la lluvia de corto plazo (precipitación de trabajo calculada con tiempo de media vida de

Tabla 2
Precipitaciones de trabajo para los días pico de los eventos procesados

Eventos	Año	Mes	Estaciones	Día pico			Hora pico		
				Fecha	Nº Días Precipitaciones anteriores	Precipitación acumulada (mm)	Precip. Día pico (mm)	PT72 (mm)	PT1.5 (mm)
Causantes	1951	Febrero	Alto Ño León	17/02/51	3	150.2	44.4	121.6	11.0
			Cagigal	18/02/51	3	100.9	18.7	84.7	4.6
			El Infernito	16/02/51	-	518.3	419.0	374.7	31.3
			Maiquetía INOS	16/02/51	2	196.8	193.0	184.3	47.7
			Subida Pico Ávila	17/02/51	3	295.7	149.9	264.4	22.1
	1987	Septiembre	Rancho Grande	06/09/87	4	212.1	182.7	195.0	57.5
	1999	Diciembre	Maiquetía FAV	16/12/99	16	1197.7	410.4	787.7	101.4
			Mamo	16/12/99	5	276.9	138.9	208.9	10.5
	2005	Febrero	Humboldt	10/02/05	4	158.6	44.1	115.0	8.2
			Macuto	10/02/05	4	427.2	110.7	320.0	17.0
No Causantes	1954	Diciembre	Maiquetía FAV	10/02/05	4	299.8	70.5	220.0	20.7
			Maiquetía INOS		7	166.4	55.4	118.2	13.7
	1955	Diciembre	Alto Ño León		4	85.0	53.8	76.9	13.2
			Macuto	13/12/55	6	208.8	37.4	148.0	9.2
	1956	Enero	Maiquetía INOS		6	222.4	80.0	184.2	19.8
	1967	Marzo	Carayaca	18/03/67	4	174.6	27.0	126.7	6.7
			Corralito		4	112.6	18.6	83.0	4.6
	1970	Feb-Mar	Alto Ño León		4	125.0	43.3	97.3	10.7
			Cagigal		3	78.3	41.0	67.4	10.1
			Carayaca	03/03/70	4	318.2	61.8	236.0	15.3
Catia La Mar				3	222.7	161.6	193.7	39.9	
Corralito				4	282.0	54.0	206.0	13.3	
Macuto			03/03/70	4	281.2	40.2	213.4	9.9	
Maiquetía FAV				4	210.5	89.7	179.1	12.5	
Maiquetía INOS			03/03/70	3	221.0	127.0	185.6	31.4	
Mamo INOS				4	232.5	39.7	179.4	9.8	

Tabla 2 (Continuación)

Eventos	Año	Mes	Estaciones	Fecha	Día pico			Hora pico	
					Nº Días Precipitación anteriores	Precipitación acumulada (mm)	Precip. Día pico (mm)	PT72 (mm)	PT1.5 (mm)
No Causantes	1971	Agosto	Carayaca		5	148,2	72,5	147,6	17,9
	1972	Abril-Mayo	Corralito		12	158,9	72,8	95,1	17,9
			Petaquire Dique		3	99,0	53,9	67,3	6,5
	1973	Noviembre	Carayaca		15	182,1	33,0	128,3	8,2
	1981	Abril	Cagigal		12	198,6	59,9	108,0	30,9
			Carayaca	26/04/81	15	315,7	30,5	129,9	7,5
			Corralito		12	305,6	55,2	164,5	13,6
			Maiquetía FAV	20/04/81	3	124,7	24,6	94,3	9,1
			Macuto	25/04/80	15	337,4	43,6	144,4	10,8
			Petaquire Dique		13	298,4	35,0	154,2	8,7
	1985	Diciembre	Carayaca		11	178,0	119,0	131,2	29,4
	1988	Agosto	Carayaca		10	184,0	56,0	88,5	13,8
	1990	Mayo	Carayaca	03/05/90	13	184,1	40,9	107,8	10,1
	1991	Noviembre	Carayaca		8	132,0	45,4	98,0	11,2
	2001	Noviembre	Maiquetía FAV		9	176,2	38,7	97,9	4,1
			Maiquetía FAV		8	106,0	23,5	64,4	5,8

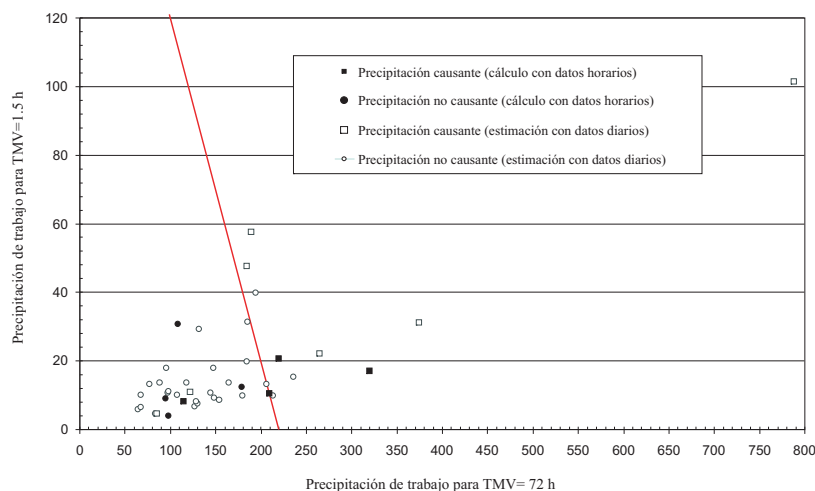


Figura 2. Línea crítica propuesta y ubicación de eventos extremos.

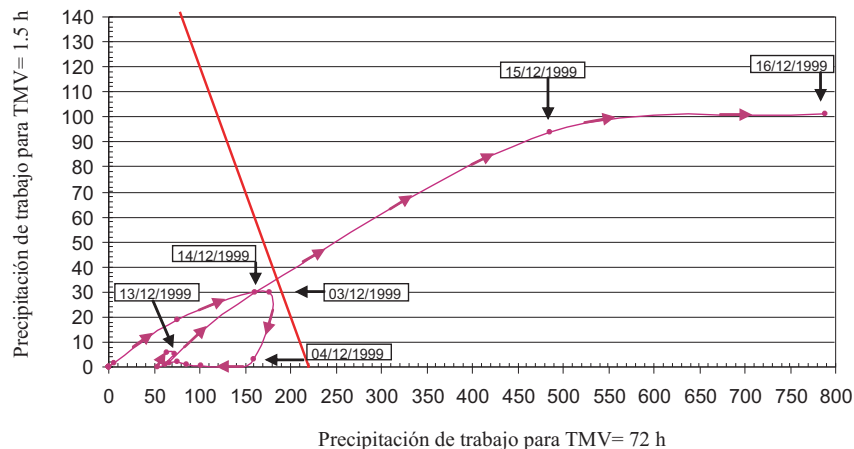


Figura 3. Línea serpiente para Maiquetía (Estación FAV) en Diciembre de 1999.

1,5 horas). La línea crítica determinada corta el eje de las abscisas (indicador de largo plazo) en 220 mm (Figura 2). Esta línea constituye una representación gráfica de los umbrales críticos de lluvia y permite separar aproximadamente los eventos causantes de aludes (a la izquierda) de los no-causantes (a la derecha). Un análisis de sensibilidad del indicador de largo plazo mostró que el cambio en el tiempo de media vida (TMV) utilizado no parece influir en la separabilidad de los eventos.

Entre las limitaciones del gráfico se menciona que se estableció esencialmente en base a datos diarios, debido a la ausencia de datos horarios en la mayoría de las estaciones seleccionadas. Por lo tanto, para aplicar la metodología propuesta, hubo que elaborar un artificio de cálculo para estimar las precipitaciones de trabajo en

base a los datos diarios, usando coeficientes empíricos calculados en las estaciones con doble registro (diario y horario), lo cual pudiera modificar un poco la ubicación real del punto representativo en el gráfico de umbrales. El método utilizado permite seguir la trayectoria en tiempo real del punto representativo de la precipitación, lo cual permite ubicar en cada momento el evento con respecto a la zona insegura. El acercamiento a la línea crítica y el paso de la misma pueden servir de base a la emisión de alerta de amenaza por aludes torrenciales. El paso de la línea crítica abre la posibilidad de ocurrencia de aludes torrenciales, pero no significa una ocurrencia segura, lo que se traduce en la posibilidad de emisión de alertas no-acertadas (falsas alertas). Debido a todos los factores de incertidumbre involucrados en el desarrollo del gráfico propuesto, las

falsas alertas son inevitables de generarse, por lo que la comunidad debe estar informada sobre esta eventualidad, para no afectar la credibilidad del sistema.

El gráfico de la Figura 2 representa una primera aproximación al problema de definir umbrales de lluvia ante aludes torrenciales en el Estado Vargas, y está siendo utilizado como una herramienta preliminar para la generación de alertas en un sistema de alerta temprana que ha sido instalado para proteger a la población de Caltia La Mar.

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada en el marco del proyecto PREDERES, financiado por Corpovargas y la Unión Europea, a quienes se agradece el apoyo prestado.

Referencias bibliográficas

1. Wiczeorek G. and Glade T.: Climatic factors influencing occurrence of debris flow. En: M. Jakob and O. Hungr (ed), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer and Praxis (2005), Chapter 14.
2. Kanji M., Gramani M., Massad F., da Cruz P.T. y Araujo H.: Main Factors intervening in the Risk Assessment of Debris Flows. En: José L. López y R. García (ed), *Los Aludes Torrenciales de 1999 en Venezuela*, Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. (2000).
3. Pando M.A., Ruiz M.E. y Larsen M.C.: "Deslizamientos en Puerto Rico producidos por Lluvias: Descripción General", *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 4(1) 53 (2003).
4. Jan C.D. and Chen C.L: Debris flows caused by typhoon Herb in Taiwan. En: M. Jakob and O. Hungr (ed) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer and Praxis, (2005) Chapter 2.
5. Salcedo D.: "Los Flujos Torrenciales Catastróficos de Diciembre de 1999 en el Estado Vargas y en el Área Metropolitana de Caracas. Características y Lecciones Aprendidas". En: José L. López y R. García (ed), *Los Aludes Torrenciales de 1999 en Venezuela*, Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. (2000).
6. López J.L., Pérez H.D., y García R.: "Una visión panorámica de los aludes torrenciales de diciembre de 1999 en Venezuela", *Revista Técnica de Ingeniería (LUZ)*, Vol. 24, N° 3, (2001), 157-168.
7. Ortigao J.A.R., D'Avila C., Justi M.G., d'Orsi R. y H. Brito: *Rio-Watch 2000: The Rio de Janeiro Landslide Alarm System*. En: José L. López y R. García (ed), *Los Aludes Torrenciales de 1999 en Venezuela*, Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. (2000).
8. Tashita, M.: "Medidas de Alarma y Refugio contra los Desastres de Tierra y Arena en Japón", Sección de Conservación, Departamento de Control de Erosión de Tierra, Ministerio de Transporte, Japón, 2001.
9. González-García A.J. y Mayorga-Márquez R.: "Thresholds for Rainfall Events that induce Landslides in Colombia". En: Lacerda, Ehrlich, Fontoura and Sayao (ed), *Landslides: Evaluation and Stabilization*, Taylor and Francis Group, London (2004).
10. IDI-Infrastructure Development Institute, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.(Japan). "Development of Warning and Evacuation System against Sediment Disasters in Developing Countries", 2004.
11. Guillén M.: "Sistema de Alerta contra Flujo de Lodo, Cuenca del río Limón", Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente, MARN-DGSICASV, 1990.
12. JICA: "Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas", Informe Técnico elaborado para la Alcaldía Metropolitana de Caracas, 2005.
13. Gascón T.: "Umbrales de lluvia para aludes torrenciales en el área oeste del Estado Vargas", Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Hidrometeorologista, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 2008.

Recibido el 9 de Julio de 2009

En forma revisada el 21 de Junio de 2010