

XIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

VARIACIÓN DEL GRADEX DE PRECIPITACIÓN CON LA DURACIÓN DE LAS TORMENTAS

Carlos Daniel Ruiz Carrascal¹, Germán Poveda Jaramillo² y Maria Victoria Vélez Otálvaro²

(1) Estudiante (2) Profesores Asociados
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

RESUMEN

El método Gradex es una herramienta muy útil para estimar caudales extremos asociados con diferentes períodos de retorno en cuencas con información histórica escasa de crecientes o con registros de poca extensión. Está basado en la distribución de frecuencia de las precipitaciones máximas anuales de una determinada duración y en las características más simples de transformación lluvia-escorrentía. En Colombia es común encontrar muchas cuencas en las cuales sólo existen estaciones pluviométricas las cuales permiten la obtención únicamente de registros de precipitaciones diarias. En este trabajo se presenta la sensibilidad del Gradex a la duración de las tormentas máximas seleccionadas, haciendo especial énfasis en tormentas de duración menor a 3 horas. Para tal efecto, se escogieron en total 28 estaciones pluviográficas del Departamento de Antioquia operadas por Empresas Públicas de Medellín: 4 en el Valle de Aburrá, 11 en la cuenca Penderisco-Murrí y 13 en la cuenca Negro-Nare. Se seleccionaron mínimo tres tormentas máximas por año y se escogieron los eventos máximos anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de duración, para el caso del Valle de Aburrá y 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración, para las otras dos regiones. Los resultados del análisis de frecuencia muestran comportamientos similares para la gran mayoría de estaciones y estabilización del parámetro, en algunos casos, a partir de duraciones de 45, 60 y 80 minutos. Se observa además una fuerte evidencia de los mecanismos físicos provenientes del Océano Pacífico sobre las series de precipitación de las estaciones Penderisco-Murrí. En general, en este trabajo se trata de relacionar el comportamiento del parámetro Gradex con la génesis de las tormentas máximas anuales sobre una determinada área.

ABSTRACT

The Gradex method is a very useful tool to estimate extreme flood values in ungaged basins or with short historical records, by using information of annual maximum rainfall series of different duration. Since most basins throughout Colombia lack precipitation records less than 24 hour, there is the need use the Gradex method considering different rainfall durations. We used 4 rainfall gaging stations having annual maximum rainfall series for 5,10,15,30,45,60,120 and 180 minutes of duration over the Valle de Aburrá region. Furthermore, another 24 rainfall gaging stations have been selected with annual maximum rainfall series for 20,30,45,60,75,90,105 and 120 minutes of duration over the Penderisco-Murrí and Negro-Nare regions in Antioquia. Our results indicate a strong dependence of the Gradex parameters with location. The duration at which the Gradex stabilizes is possibly associated with specific storm-generating mechanisms over the easternmost fringe of the Pacific Ocean and central Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El método Gradex (*Guillot y Duband, 1967*) permite la estimación de valores extremos de crecientes en cuencas con información histórica nula o deficiente, a partir de la distribución de registros máximos de precipitación. Supone que las curvas de frecuencia de las precipitaciones máximas anuales de una determinada duración y de los caudales máximos medidos sobre la misma duración, son paralelas cuando son dibujadas en un papel de probabilidad Gumbel. Además, asume que se presenta una lluvia uniformemente distribuida sobre todo el área de drenaje, que se traduce íntegramente en escorrentía superficial directa debido al estado de saturación del suelo. Admite que una cuenca alcanza la saturación por las condiciones pluviométricas que producen crecientes de 10 años de período de retorno. Algunas de estas suposiciones no están respaldadas por las observaciones, pero intentan simplificar el análisis.

La curva de frecuencia de valores máximos de precipitación se asume distribuida de acuerdo a una ley exponencial (generalmente ley de Gumbel). La función de distribución asintótica de probabilidades de la Distribución de Valores Extremos Tipo I tiene la forma:

$$x = \xi + \alpha [-\ln(-\ln(F_X(x)))] ,$$

en donde el término α (parámetro de escala) se conoce como el *Gradex* (**Gradiente** de valores **extremos**) de precipitación y corresponde a la pendiente de la asíntota graficada en papel de probabilidad Gumbel.

El método asume que para eventos anteriores a un cierto período de retorno T_0 , la cuenca tiende hacia un límite de saturación y por cada incremento dP en la precipitación se presenta un incremento dQ en la escorrentía, donde $dP=dQ$. Esta suposición, combinada con la suposición de lluvia uniforme, implica que desde el punto de vista asintótico, las funciones de distribución de frecuencia F y G , correspondientes a la precipitación y escorrentía directa pueden ser expresadas como:

$$G(Q) = F(Q + D) ,$$

donde D representa la cantidad de agua temporalmente retenida por la cuenca durante crecientes. De esta manera es posible extrapolar la distribución de crecientes empezando desde el período de retorno T_0 , correspondiente a las condiciones saturadas (este evento se supone igual a un período de retorno de 10 años).

El gradex de caudales α_q expresado en m^3/s se obtiene a partir del gradex α de precipitación a partir de la expresión:

$$\alpha_q = \frac{A\alpha}{3,6 t_c} ,$$

donde A representa el área de la cuenca en km^2 y t_c el tiempo de duración de la lluvia.

Obtenidos la creciente Q_{t_c} (10 años) y el gradex de caudales α_q , se pueden extrapolar los caudales de duración t_c , para diferentes períodos de retorno T mediante la relación:

$$Q_{t_c}(T) = Q_{t_c}(10) + \alpha_q \ln \frac{T}{10} .$$

2. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA UTILIZADA

Se seleccionaron 3 zonas del Departamento de Antioquia con características hidrológicas diferentes, a saber: valle de Aburrá, cuenca del río Penderisco-Murrí y cuenca del río Negro-Nare (véase figura 1). Para la primera mencionada, se recopilamos mínimo 3 tormentas intensas por año (suposición 3 días más lluviosos) registradas en las 4 estaciones pluviográficas presentadas en la tabla 1. A partir de estos eventos, se seleccionaron las precipitaciones máximas anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de duración. Para las cuenca de los ríos Penderisco-Murrí y Negro-Nare, se recopilamos mínimo 3 tormentas intensas por año (a partir del análisis cualitativo de eventos) registradas en las 11 y 13 estaciones pluviográficas presentadas en la tablas 2 y 3, respectivamente. A partir de estos registros, se seleccionaron las precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración.

*Tabla 1. Estaciones pluviográficas seleccionadas
Precipitaciones máximas anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de duración
Valle del Aburrá, Departamento de Antioquia*

CODIGO	TIPO	NOMBRE	SUBCUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORDENADAS	ELEV	ENTID	RG	INST	SUSP	PERÍODO
2701037	PG	FABRICATO	MEDELLIN	ANTI	BELLO	622 N 7536 W	2422	18	1	1949	9	1950 1988
2701045	PG	VILLAHERMOSA PLANTA	MEDELLIN	ANTI	MEDELLIN	616 N 7533 W	1690	18	1	1948	7	1950 1989
2701047	PG	MIGUEL AGUINAGA	MEDELLIN	ANTI	MEDELLIN	615 N 7534 W	1549	18	1	1954	6	1955 1986
2701053	PG	ALTO SAN ANDRES	MEDELLIN	ANTI	GIRARDOTA	626 N 7527 W	2240	18	1	1958	12	1959 1989

*Tabla 2. Estaciones pluviográficas seleccionadas
Precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración
Cuenca del río Penderisco-Murrí, Departamento de Antioquia*

CODIGO	TIPO	NOMBRE	SUBCUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORDENADAS	ELEV	ENTID	RG	FECHA INST	FECHA SUSP.
1107007	PG	CRUCES	PENDERISCO	ANTI	URRAO	629 N 7621 W	950	18	1	1978	3
1107008	PG	MANDÉ	PENDERISCO	ANTI	URRAO	626 N 7627 W	495	18	1	1978	3
1107009	PG	SANTA BÁRBARA	PENDERISCO	ANTI	URRAO	624 N 7604 W	2595	18	1	1978	3
1107010	PG	SIRENO EL	PENDERISCO	ANTI	URRAO	623 N 7614 W	1210	18	1	1978	3
1107011	PG	NENDÓ	PENDERISCO	ANTI	URRAO	620 N 7619 W	960	18	1	1978	3
1107012	PG	PABÓN	PENDERISCO	ANTI	URRAO	609 N 7608 W	1920	18	1	1978	3
1107014	PG	CHAQUENODÁ	PENDERISCO	ANTI	FRONTINO	637 N 7625 W	460	18	1	1980	5
1107015	PG	LA PALMERA	PENDERISCO	ANTI	URRAO	625 N 7630 W	800	18	1	1980	7
1107016	PG	PANTANOGRANDE	PENDERISCO	ANTI	FRONTINO	642 N 7628 W	820	18	1	1978	3
1107018	PG	LA BLANQUITA-MURRÍ	MURRI	ANTI	FRONTINO	644 N 7621 W	810	18	1	1978	3
1111005	PG	MUSINGA GRANDE	MUSINGA	ANTI	FRONTINO	641 N 7611 W	1930	18	1	1980	5

*Tabla 3. Estaciones pluviográficas seleccionadas
Precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración
Cuenca del río Negro-Nare, Departamento de Antioquia*

CODIGO	TIPO	NOMBRE	SUBCUENCA	DPTO	MUNICIPIO	COORDENADAS	ELEV	ENTID	RG	FECHA INST	FECHA SUSP.	
2308008	PG	INMARCO	NARE	ANTI	CARACOLI	618 N 7442 W	260	18	1	1968	7	
2308021	PG	LA FE	NARE	ANTI	RETIRO	606 N 7530 W	2150	18	1	1948	3	
2308022	PG	SEVERA LA	NEGRO	ANTI	GUARNE	616 N 7527 W	2170	18	1	1948	3	
2308023	PG	PALMAS LAS	NEGRO	ANTI	RETIRO	609 N 7532 W	2495	18	1	1948	4	
2308024	PG	VASCONIA	NEGRO	ANTI	RIONEGRO	612 N 7529 W	2510	18	1	1948	4	
2308025	PG	RETIRO EL	NEGRO	ANTI	RETIRO	603 N 7531 W	2190	18	1	1949	10	
2308026	PG	MOSCA LA	NEGRO	ANTI	GUARNE	619 N 7528 W	2250	18	1	1949	10	
2308027	PG	RIONEGRO LA MACARENA	NEGRO	ANTI	RIONEGRO	609 N 7522 W	2070	18	1	1949	10	
2308028	PG	CHUSCAL	NEGRO	ANTI	RETIRO	609 N 7522 W	2290	18	1	1949	10	1990 10
2308034	PG	RIOABAJO	NARE	ANTI	SAN VICEN'	615 N 7519 W	2070	18	1	1958	11	
2308042	PG	SAN LORENZO	NARE	ANTI	SAN RAFAE	623 N 7459 W	1320	18	1	1966	3	1992 5
2308044	PG	CORRIENTES	NARE	ANTI	SAN VICEN'	619 N 7516 W	1980	18	1	1967	12	
2308045	PG	REMANGO	NARE	ANTI	CONCEPCI	623 N 7511 W	1730	18	1	1967	12	

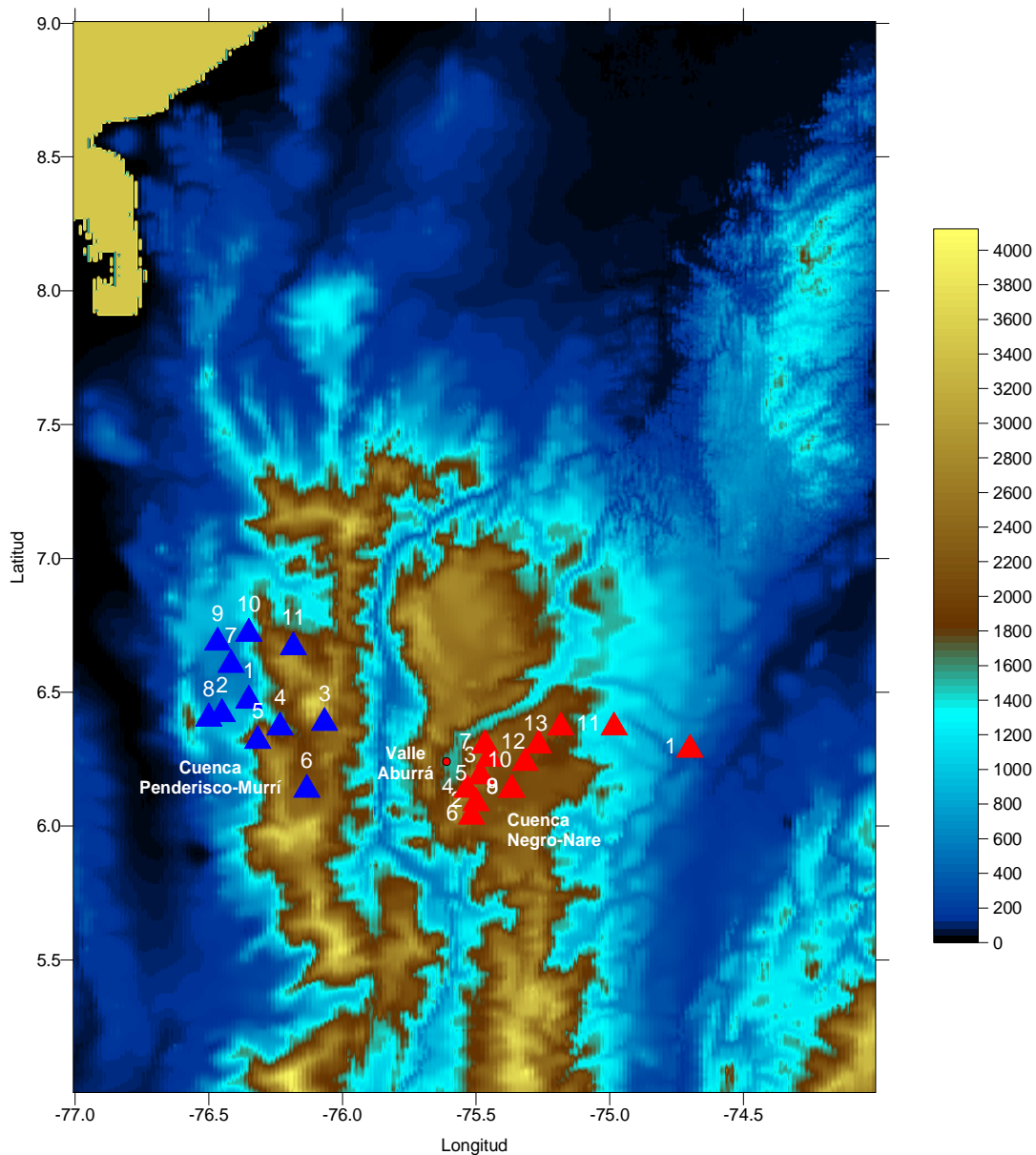


Figura 1. Zonas seleccionadas del Departamento de Antioquia para el desarrollo del estudio. La imagen corresponde a información topográfica con una resolución de 30" de arco. Las estaciones pluviográficas del **Valle de Aburrá** no se presentan en la imagen por razones de espacio. La ubicación general de la zona se muestra mediante el círculo rojo. Estaciones pluviográficas de la **cuenca Penderisco-Murrí -parte alta-** seleccionadas (azules): (1) Cruces, (2) Mandé, (3) Santa Bárbara, (4) El Sireno, (5) Nendó, (6) Pabón y (8) La Palmera. Estaciones pluviográficas de la **cuenca Penderisco-Murrí -parte baja-** seleccionadas (azules): (7) Chaquenodá, (9) Pantanogrande, (10) La Blanquita-Murrí y (11) Musinga. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. Estaciones pluviográficas de la **cuenca Negro-Nare -parte alta-** seleccionadas (rojas): (2) La Fe, (3) La Severa, (4) Las Palmas, (5) Vasconia, (6) El Retiro y (7) La Mosca. Estaciones pluviográficas de la **cuenca Negro-Nare -parte media-** seleccionadas (rojas): (8) Rionegro-La Macarena, (9) Chuscal y (10) Rioabajo. Estaciones pluviográficas de la **cuenca Negro-Nare -parte baja-** seleccionadas (rojas): (1) Inmarco, (11) San Lorenzo, (12) Corrientes y (13) Remango. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 2 se presentan las curvas de frecuencia de precipitaciones máximas anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de duración, para el caso de la estación pluviográfica 2701037 Fabricato, ubicada al norte del Valle de Aburrá.

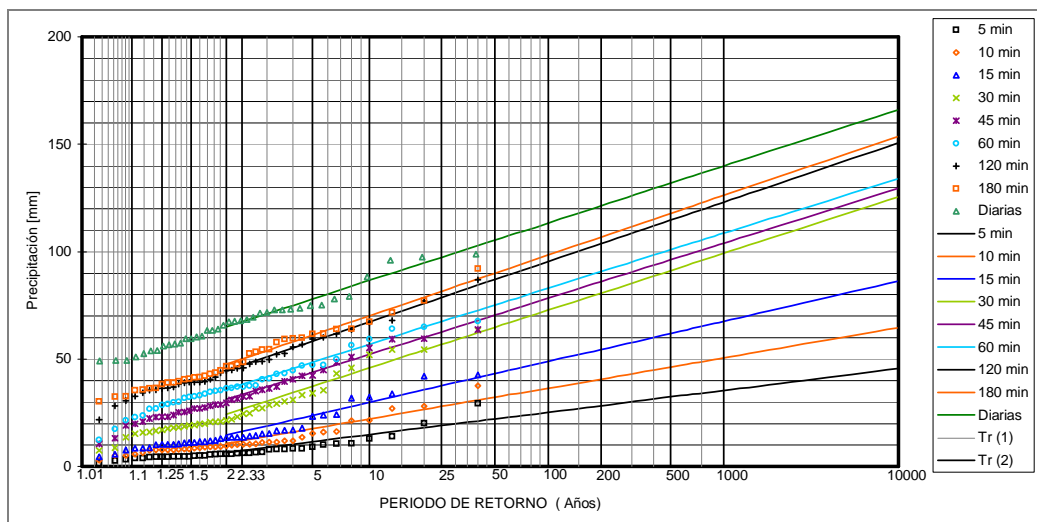


Figura 2. Curvas de Frecuencia. Distribución de Valores Extremos Tipo I. Series de precipitaciones máximas anuales de duraciones 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos. **Estación pluviográfica 2701037 Fabricato, Valle de Aburrá, Departamento de Antioquia.**

En la figura 3 se muestra el comportamiento del gradex de precipitación en función de la duración, para el caso de las estaciones pluviográficas que operan en el Valle de Aburrá.

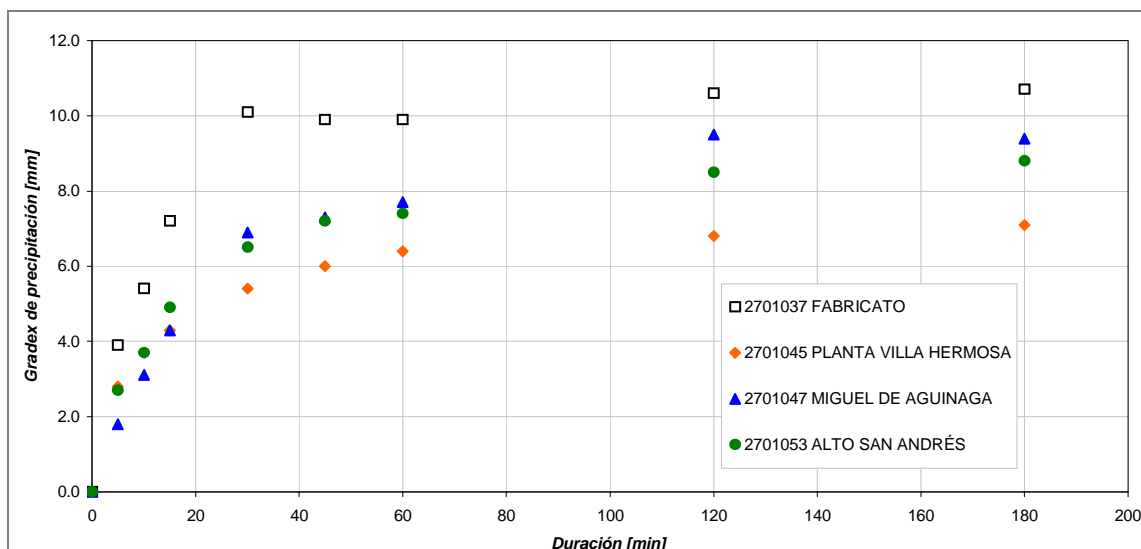


Figura 3. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Valle de Aburrá, Departamento de Antioquia.** Series de precipitaciones máximas anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de duración. Estabilización del gradex de precipitación a partir de los 60 minutos.

En las figuras 4 y 5 se muestran los comportamientos del gradex de precipitación en función de la duración, para las estaciones pluviográficas que operan en las partes alta y baja de la cuenca Penderisco-Murrí.

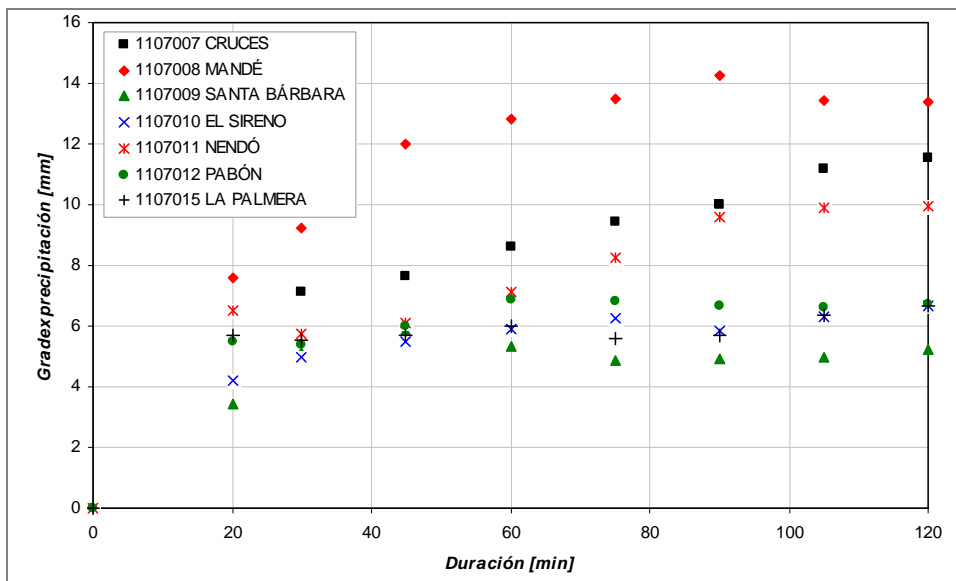


Figura 4. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Cuenca Penderisco-Murrí (parte alta)**. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. La estación pluviográfica Cruces no evidencia estabilización del parámetro Gradex (se requiere del análisis de tormentas de duración mayor a 120 minutos). La estación pluviográfica Nendó muestra un comportamiento anómalo. Las demás estaciones muestran estabilizaciones a partir de 45 minutos (Santa Bárbara y La Palmera), 60 minutos (El Sireno y Pabón) y 80 minutos (Mandé).

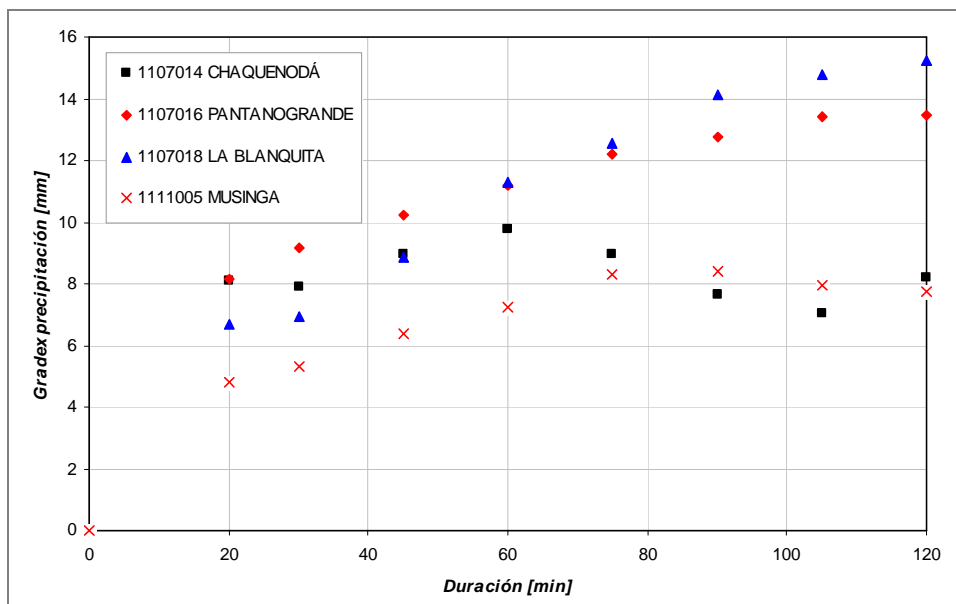


Figura 5. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Cuenca Penderisco-Murrí (parte baja)**. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. Las estaciones pluviográficas seleccionadas en esta zona muestran comportamientos anómalos. En algunos casos, se requiere del análisis de tormentas de duraciones mayores a 120 minutos.

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los comportamientos del gradex de precipitación en función de la duración, para las estaciones pluviográficas que operan en las partes alta, media y baja de la cuenca Negro-Nare.

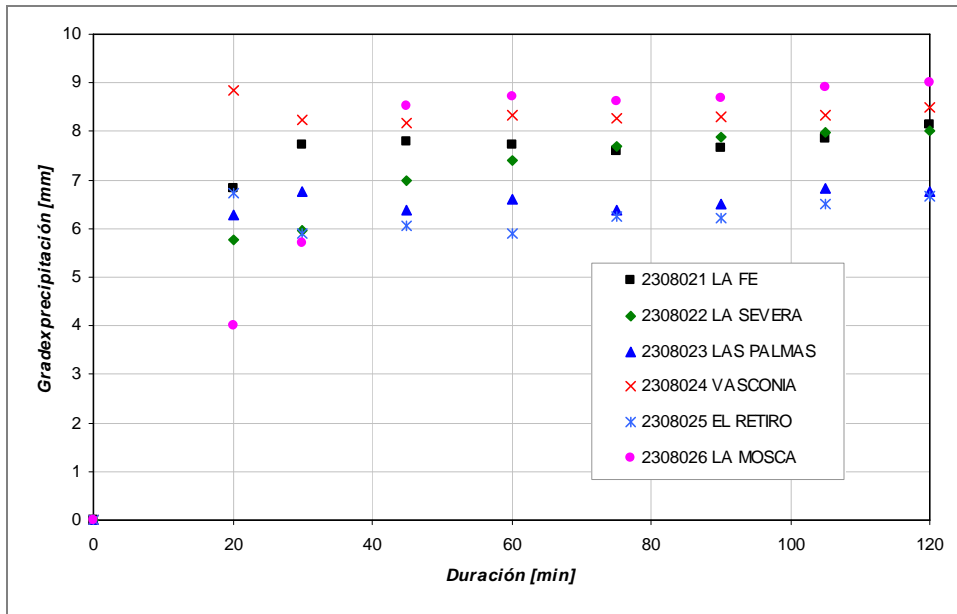


Figura 6. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Cuenca Negro-Nare (parte alta)**. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. Estabilización del parámetro a partir de los 45 minutos (estaciones pluviográficas La Fe, Las Palmas, El Retiro y La Mosca) y 60 minutos (La Severa). Comportamiento anómalo de las series de precipitaciones máximas anuales de la estación pluviográfica Vasconia.

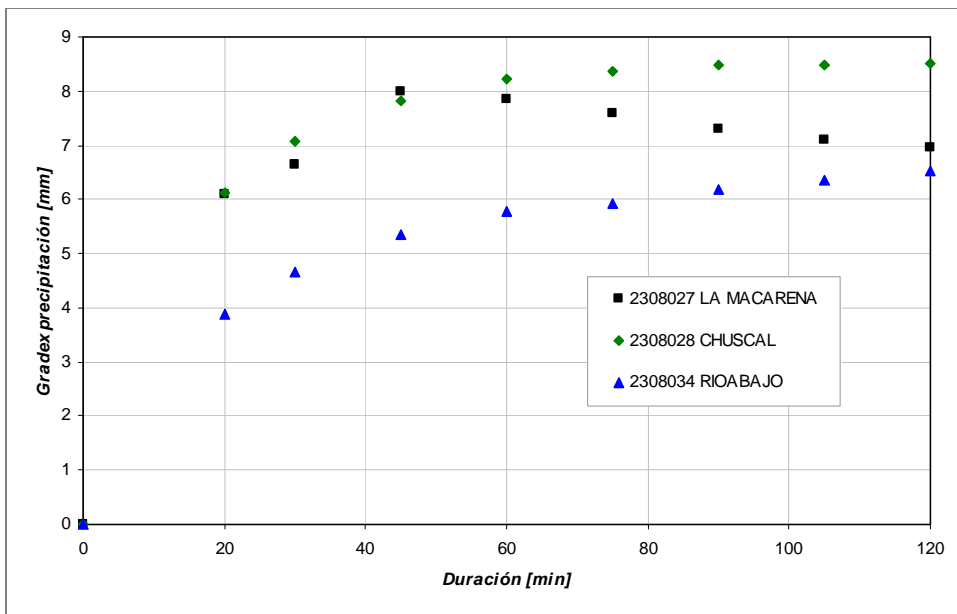


Figura 7. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Cuenca Negro-Nare (parte media)**. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. Estabilización del parámetro Gradex a partir de 60 minutos.

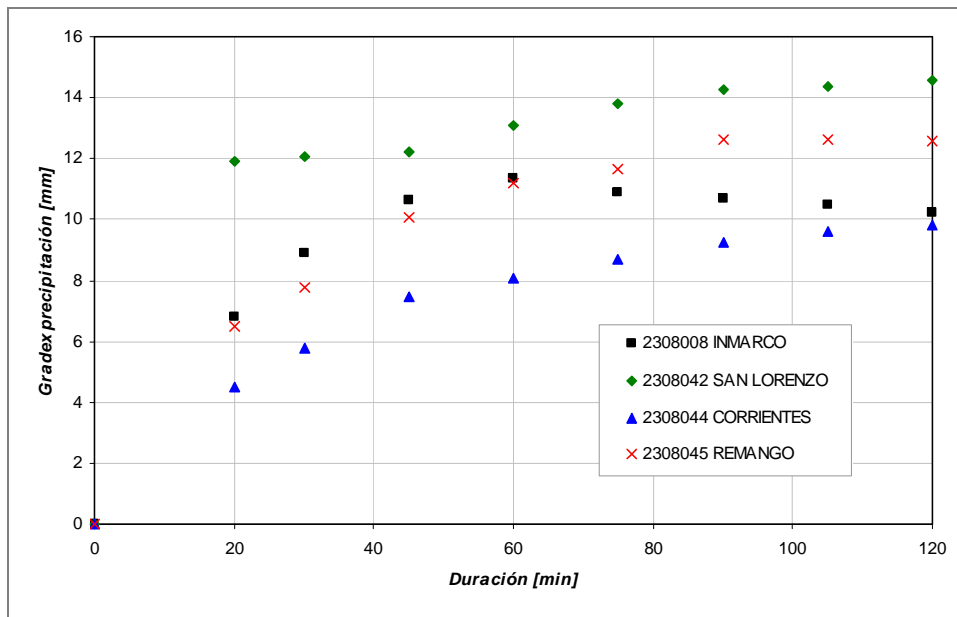


Figura 8. Comportamiento del gradiente de valores extremos de precipitación. **Cuenca Negro-Nare (parte baja)**. Series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de duración. Estabilización del parámetro Gradex a partir de 80 minutos.

4. CONCLUSIONES

Las series de precipitaciones máximas anuales de 5,10,15,30,45,60,120 y 180 minutos de las estaciones pluviográficas del Valle de Aburrá, exhiben un comportamiento creciente del parámetro gradex de precipitación cuando la duración es menor de 60 minutos. El parámetro gradex converge a un valor límite para duraciones mayores (véase figura 3).

Las series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de las estaciones pluviográficas de la cuenca Penderisco-Murrí (parte alta), evidenciaron comportamientos ascendentes del parámetro gradex de precipitación con la duración y posteriores estabilizaciones del mismo a partir de **45, 60 y 80 minutos** (véase figura 4).

Para el caso de las estaciones pluviográficas de la cuenca Penderisco-Murrí (parte baja), se observaron comportamientos ascendentes y en otros casos anómalos del parámetro gradex de precipitación con la duración. Para analizar la posible estabilización del parámetro, se deben considerar eventos de duración mayor a **120 minutos** (véase figura 5).

Las series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de las estaciones pluviográficas de la cuenca Negro-Nare (parte alta), evidenciaron comportamientos ascendentes del parámetro gradex de precipitación con la duración y posteriores estabilizaciones del mismo a partir de **45 y 60 minutos** (véase figura 6).

Las series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de las estaciones pluviográficas de la cuenca Negro-Nare (parte media), evidenciaron comportamientos ascendentes del parámetro gradex de precipitación con la duración y posteriores estabilizaciones del mismo a partir de **60 minutos** (véase figura 7).

Las series de precipitaciones máximas anuales de 20,30,45,60,75,90,105 y 120 minutos de las estaciones pluviográficas de la cuenca Negro-Nare (parte baja), evidenciaron comportamientos ascendentes del parámetro gradex de precipitación con la duración y posteriores estabilizaciones del mismo a partir de **80 minutos** (véase figura 8).

Para determinar las lluvias de diseño se utilizan duraciones mayores o iguales al tiempo de concentración de la cuenca. Si se poseen sólo registros de precipitación diaria y las cuencas tienen tiempos de concentración mayores de **45, 60 u 80 minutos** (dependiendo de la zona hidrológica en consideración), el gradex hallado con estos registros podría emplearse entonces de una manera confiable. Por el contrario, para cuencas con tiempos de concentración menores a **45, 60 u 80 minutos** (dependiendo de la zona en consideración), se requiere necesariamente de la implementación de estaciones pluviográficas para la medición de tormentas de duración menor a 1 hora y la posterior estimación confiable del parámetro. Esta observación está relacionada con la duración de las tormentas en nuestras latitudes, con la relación P_{1h}/P_{diaria} , y con las distribuciones temporales de los registros de muchas estaciones pluviográficas.

La estabilización del parámetro Gradex de precipitación a partir de 45 o 60 minutos (Valle de Aburrá, cuenca Negro-Nare partes alta y media) responde posiblemente a la duración, la distribución temporal y la distribución espacial de las tormentas máximas anuales que ocurren en la zona. En general, la precipitación se produce por celdas convectivas distribuidas en áreas menores a 50 km² y que generan tormentas de duraciones menores a 120-180 minutos.

La NO estabilización del parámetro Gradex de precipitación para duraciones menores a 120 minutos (parte baja de la cuenca Penderisco-Murri) puede responder, al igual que el caso anterior, a la duración, distribución temporal y distribución espacial de las tormentas máximas anuales que ocurren en la zona. En general, allí la precipitación se produce por complejos convectivos de mesoescala (CCM) distribuidos en áreas de 50 a 10³ km² y que generan tormentas de duraciones mayores a 3 horas. La dinámica y duración de los CCM que penetran por el Océano Pacífico al interior del país, y que están dinámicamente asociados con la existencia de la corriente superficial de chorro del occidente Colombiano o "Chorro del CHOCÓ" (Poveda, 1998; Poveda et al., 1999; Poveda y Mesa, 2000), afectan a la región del occidente de Antioquia de manera más directa, e influyen sobre la formación y mayor duración de las tormentas en esa zona del país. Este es un tema que merece profundizarse, en términos de la interpretación física de los resultados estadísticos presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

Garcon, R. "The Gradex method: for a statistically robust evaluation of extreme-value floods based on local characteristics", *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, Vol 1, 285-298, 1994.

Guillot, P. "The arguments of the Gradex method: a logical support to assess extreme floods", *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*, IASH, Publication 213, 287-298, 1993.

Poveda, G., "Retroalimentación Dinámica entre el ENSO y la Hidrología de Colombia", Disertación de Ph.D. en Ingeniería en Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1998.

Poveda, G., M. M. Gil, y N. Quiceno, The relationship between ENSO and the annual cycle of Colombia's climatology, *Proceedings 10th Symposium on Global Change Studies*, American Meteorological Society, Dallas, Texas, 157-160, 1999.

Poveda, G., y Mesa, O. J., "On the existence of Lloró (the rainiest locality on earth): enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low level jet", *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 11, 1675-1678, June 1, 2000.

Smith, R; y Vélez, M.V. "**Hidrología de Antioquia**". Publicación de la Secretaría de Obras Públicas Departamentales, 145-148, 1997.

Zuffo, A. C. "Relações estatísticas entre precipitações intensas e vazões máximas: Método Gradex. São Paulo, Dissertação de Mestrato, Escola Politécnica da USP. 287 p. 1993.

Zuffo, A. C. "Relações estatísticas entre precipitações intensas e vazões máximas: Método Gradex. RBE-Caderno de Recursos Hídricos. V11, n2, dezembro de 1993.

RECONOCIMIENTOS. Al Área de Hidrometría e Instrumentación de Empresas Públicas de Medellín. Se agradecen los aportes de Juan Esteban Quiroz Giraldo y Luis Fernando Carvajal Serna.