

Aplicación del Método Gradex

Rafael O. Ortiz Mosquera*, Javier Lancheros**, Jahir Hurtado**

RESUMEN

La deficiencia de información concerniente a niveles y caudales de ríos y quebradas, hace necesario recurrir a técnicas de análisis hidrológico que trabajan con información escasa como el Método Gradex. Esta metodología ha sido muy poco empleada en las diferentes zonas del País, a excepción del Departamento de Antioquia, por esto existe la necesidad de implementarlo en otras regiones y así poder determinar su efectiva aplicación.

Este trabajo muestra el procedimiento y los resultados obtenidos al utilizar el Método Gradex en unas cuencas del Departamento de Cundinamarca.

ABSTRACT

The deficiency of concerning information to levels and flows of rivers and gulches, makes necessary to appeal to technical of hydrological analysis that work with scarce information as the Method Gradex. This methodology has been very little employee in the different areas of the Country, whit exception of the Department of Antioquia, for what the necessity exists of implementing it in other regions and this way to be able to determine its effective application.

This work shows the procedure and the results obtained when are using the Method Gradex in some basins of the Department of Cundinamarca.

INTRODUCCIÓN

El método Gradex es una herramienta que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de crecientes extremas a partir de la distribución empírica de los valores de precipitación extremos y las características más esenciales de transformación lluvia - escurrimiento, ignorando deliberadamente la complejidad de los mecanismos que inician las crecientes.

Un caudal con 1.000 o 10.000 años de período de retorno inferido desde este tipo de análisis no tiene ninguna consistencia física real y debe ser tratada como un artificio con miras a

compensar nuestra ignorancia con respecto al evento extremo que ocurrirá dentro de un período de retorno determinado.

Cuando se diseña una estructura que puede estar expuesta a inundaciones, los ingenieros están obligados a tomar cierto riesgo, en parte como resultado del poco conocimiento de los eventos hidrológicos que pueden afectar la estructura durante su tiempo de vida. Se debe por tanto suponer algún valor alto para este caudal, para poder diseñar dentro de un margen seguro, pero se sabe que siempre hay algo de riesgo ya que el caudal supuesto puede llegar a ser excedido. Además, desde el punto de vista económico valores altos de caudales para los diseños, aunque nos representen un menor riesgo para la vida útil de las estructuras pueden llegar a presentar costos excesivamente altos.

La complejidad extrema de los mecanismos envueltos en la circulación atmosférica y procesos de drenaje hace que los datos necesarios para los diseños no puedan ser calculados usando métodos enteramente determinísticos.

I. MÉTODO GRADEX

A. CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO

El método de Gradex se basa en la estimación de caudales de crecientes en zonas con información histórica deficiente o con registros de poca extensión. Se usa en cuencas de tamaños desde unos cientos a varios miles de kilómetros cuadrados con patrones de precipitación relativamente uniformes sobre el área. Esto involucra consideraciones de espacio / tiempo en los procesos de precipitación - retención - escurrimiento directo como un proceso estadístico.

Las más desastrosas inundaciones son causadas por la infiltración y fuertes tormentas que son variables, pero eventualmente alcanzan un límite cuando el suelo llega a ser saturado. Esto parece ser algún límite físico para tormentas severas sobre una cuenca. Es probable que este límite superior guíe el concepto de seguridad de inundaciones chequeando la relación Precipitación Máxima Probable / Inundación Máxima Probable que este método busca determinar.

*Ingeniero Civil, Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia

**Estudiantes de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia

Este parámetro fundamental es llamado el **Gradex** (gradiente de valores extremos).

B. SUPOSICIONES DE LA PRECIPITACIÓN

La frecuencia de precipitación de duración que va desde unas horas a unos días, localizada o promediada sobre la totalidad de la cuenca (por la combinación lineal ponderada de valores localizados simultáneos) es una simple función exponencial decreciente:

$$\ln[1 - F(P)] = -P/\alpha + Kte$$

Donde:

F(P): frecuencia de Precipitación

α : el Gradex de precipitaciones extremas anuales

Esta suposición implica, matemáticamente, que la función de distribución asintótica para precipitaciones máximas anuales es una distribución Gumbel:

$$FA(P) = \exp \left[-\exp \left(\frac{(P - P_0)}{\delta} \right) \right]$$

Donde:

P₀: es el parámetro de posición o de modo.

Pero precisamente, la función de distribución de precipitaciones máximas anuales es el producto de las funciones de distribuciones de precipitaciones máximas estacionales. Ahora, la distribución de tormentas extremas en cada estación es caracterizada por un valor particular de *Gradex*. Esto implica que el *Gradex* para precipitaciones máximas en una temporada es también un parámetro característico de la distribución de todas las precipitaciones (incluyendo los valores cero) en esta misma temporada. De este se deriva el *Gradex* de las precipitaciones extremas anuales.

C. SUPOSICIONES EN EL LÍMITE DE PÉRDIDA DE RETENCIÓN Y EXTRAPOLACIÓN PARA LARGOS PERÍODOS DE RETORNO

1. SUPOSICIÓN PRINCIPAL:

La distribución de los volúmenes directos de caudales en inundaciones extremas anuales tiene el mismo comportamiento asintótico de la distribución de precipitaciones máximas anuales (todos los datos se expresan en milímetros):

$$G(Q) = \int_0^{\infty} H_p(Q) dF(P)$$

La precipitación total en cada evento de precipitación unitario, menos las pérdidas de infiltración, produce una precipitación de exceso que se encamina hacia la salida de la cuenca con la función de transferencia o el hidrograma unitario. El hidrograma de caudales totales es el resultado de la superposición de estos caudales unitarios. Como la cuenca comienza a saturarse en el transcurso de la tormenta cualquier incremento en la precipitación **dP** tiende a causar un incremento igual en el caudal **dQ**. Esto puede ser mostrado ya que la

probabilidad de caudal tiene la misma tendencia asintótica de las precipitaciones extremas:

$$G(Q) \rightarrow F(P - M(D))$$

Donde M(D) es la esperanza matemática de pérdida por retención; la distribución condicional de la capacidad de retención tiende hacia una distribución homosedástica limitada para fuertes tormentas.

2. HIDROGRAMAS DE CAUDALES

La última gran suposición del método proviene del principio de invarianza del hidrograma de caudales unitarios o de la función de transferencia promedio de los excesos de precipitación hacia el cauce, sin considerar la magnitud de la precipitación.

D. SELECCIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO

Con este método se debe empezar por estimar el tiempo base H, que representa el promedio de duración de la hidrógrafa que representa la escorrentía directa de la cuenca. H será usado como el tiempo base para el estudio de precipitaciones y caudales que puede ser estimado aproximadamente. La experiencia muestra que este puede ser doblado sin afectar los resultados, pues que se obtienen pendientes de las distribuciones teóricas de las precipitaciones máximas anuales aproximadamente iguales. Por razones prácticas se puede tomar un tiempo base de 24 horas cuando se están estudiando cuencas de tamaño promedio, aún cuando esto supone que se deben recolectar registros de precipitaciones máximas anuales de *t_c* horas de duración para iniciar la extrapolación de los valores extremos de pendientes pueden tomar rangos de 4 a 72 horas excepto para ciertos casos en particular.

E. DETERMINACIÓN DE LOS VALORES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN

La suposición básica se relaciona con la forma de la distribución de precipitación: La frecuencia de Ocurrencia de precipitación P, en H horas, en un lugar dado, puede ser expresado por una simple función exponencial decreciente:

$$1 - F(P) = \delta \cdot \exp \left(-P/\alpha \right)$$

El parámetro **α** es llamado el GRADEX (gradiente de valores extremos) que da nombre a este método. Corresponde a la pendiente de la asíntota de la distribución de precipitación modelada en papel Gumbel (ver figura 1). Puede ser calculada analíticamente a partir de los registros de precipitación y constituye una característica climatológica de la cuenca bajo estudio.

Se supone que la línea recta modelada en papel Gumbel es paralela a la línea recta de la distribución de caudales máximos anuales medidos sobre la misma duración.

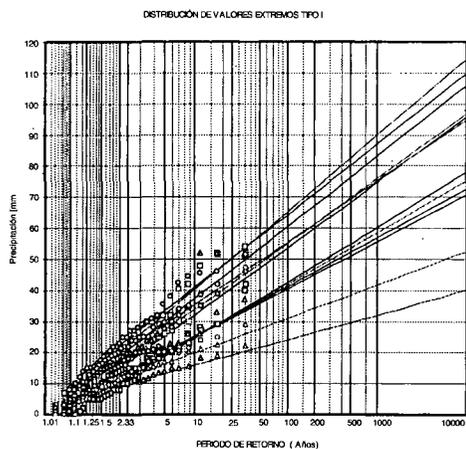


Figura 1

F. SATURACIÓN DEL SUELO

Se asume que para eventos posteriores a cierto período de retorno T_0 , la cuenca tiende hacia un límite de saturación y por cada incremento dP en la precipitación, resulta un incremento en la escorrentía dQ ; donde $dQ = dP$.

Esta suposición combinada con la anterior implica las funciones de distribución de frecuencias F y G desde un punto de vista asintótico correspondientes a la precipitación y escorrentía promedio, para un tiempo base H puede ser expresado como:

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

Entre más grande sea la cuenca de drenaje, más permeable y tenga pendientes más suaves, el período de retorno puede ser más grande.

Cuando la cuenca está saturada, toda precipitación de duración igual o mayor a T_0 , se convierte en incremento de caudal.

Para ΔQ_{t_c} expresado en m^3/s y haciendo conversión de unidades, se obtiene:

$$\Delta Q_{t_c} = \frac{S\alpha}{3,6 * t_c} \ln\left(\frac{T^1}{T}\right)$$

Resulta evidente que la ley de distribuciones de caudales medidos sobre una duración t_c posee también un comportamiento asintóticamente exponencial, donde el Gradex de escorrentía expresado en m^3/s , se deriva del Gradex de precipitación α en mm por la relación:

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

G. CÁLCULO DE CAUDALES INSTANTÁNEOS

Usando el mayor número posible de hidrógrafas, correspondientes a crecientes significativas, se puede calcular la razón media k entre el caudal máximo instantáneo y el caudal máximo promedio sobre un período t_c .

$$Q_i(T) = Q_{t_c}(T)k$$

Una vez obtenida una creciente $Q_{t_c}(10 \text{ años})$ y el Gradex de escorrentía α_q , a partir de la ecuación anterior, se pueden extrapolar los caudales de duración t_c , para períodos de retorno T por la relación:

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

Si ya se han extrapolado los $Q_{t_c}(T)$, se obtienen los $Q_i(T)$ multiplicando por la razón media.

H. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE SATURACIÓN DE LA CUENCA

Para la determinación del caudal de saturación de la cuenca, es posible utilizar el modelamiento probabilístico de las series de caudales máximos directamente, la analogía con otras cuencas parecidas o los métodos empíricos tales como el Índice de crecientes, las metodologías de regionalización de parámetros y las ecuaciones de regresión.

II. LIMITACIONES DEL MÉTODO GRÁDEX

La relevancia del método está limitada por las suposiciones. No es conveniente para cuencas demasiado grandes.

En caso de cuencas altamente permeables, con pendientes suaves y pocas precipitaciones, se encuentra problema. El período de retorno usado para extrapolar la distribución de caudales empíricos, usando el Gradex de precipitación, es a menudo alto con relación al tamaño de los registros de precipitación disponibles. Diez (10) años o a veces cien (100) años de eventos de precipitación son muy cortos para el nivel de saturación teórico de la cuenca.

En efecto entre más grande sea la cuenca, se tiene menor oportunidad de que sea saturada por precipitaciones simultáneas en el tiempo.

Para áreas grandes se espera que el método puede dar resultados dudosos, debido a que no se cumplen las relaciones de uniformidad de distribución de la lluvia.

La única dificultad en el caso de cuencas pequeñas es la de evaluar los Gradex de precipitación para unos tiempos de concentración bajos, razón por la cual es necesario disponer de estaciones pluviográficas.

III. ZONA DE ESTUDIO

Con base a la información cartográfica e hidrometeorológica, suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR – se escogieron para análisis 4 cuencas ubicadas al nor-occidente de la Sabana de Bogotá (ver figura 2) que por las características morfométricas e información disponible (ver figura 3: Estaciones Hidrometeorológicas), cumplen con los requerimientos del método.

Las cuencas seleccionadas para ser analizadas fueron:

- 1-Cuenca del Río Subachoque
- 2-Cuenca del Río Frío
- 3-Cuenca del Río Chicú
- 4-Cuenca del Río Bojacá



Figura 2. Ubicación de las cuencas en el Departamento de Cundinamarca

B. REGISTROS DE CAUDAL

Se escogieron los registros de caudales máximos mensuales de las estaciones que tuvieran al menos diez (10) registros. Estas se presentan en el cuadro 1.

Con base en la posición geográfica de las estaciones se trazaron las divisorias de las cuencas para cada una de las estaciones y se procedió a estimar los parámetros morfométricos de cada una de las cuencas: Área de la Cuenca (A), Longitud del Cauce Principal (L_{cp}), Pendiente Promedio de la Cuenca (S), Pendiente del Cauce Principal (P), Cota Mayor del Cauce Principal (C_M), Cota Menor del Cauce Principal (C_m), Longitud de la Cuenca (L) y el Perímetro de la cuenca (P_c). Con estos parámetros se calcularon los tiempos de concentración para las cuencas analizadas.

C. REGISTROS DE PRECIPITACIÓN

El método *Gradex* requiere para su aplicación una serie de registros que exige un análisis estadístico a las series de tiempo. Para este fin se escogieron las series históricas de precipitación máxima anual de 24 horas de longitud mayor o igual a diez (10) años. Se tuvo especial atención que las estaciones no tuvieran años faltantes en la toma de información y que no faltaran registros en algún mes de cada año. Cuando esto se presentó se marcaron las estaciones para posteriormente completar las series a través del modelamiento probabilístico de las mismas. Las estaciones pluviográficas y pluviométricas pueden apreciarse en cuadro 2.

Cuadro 1. Estaciones limnimétricas y limnigráficas

No	TIPO	CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	CUENCA	F.INST
1	LG	2120735	Puente La Virginia	R. Frío	R. Frío	1946-02
2	LG	2120766	La Pradera	R. Subachoque	R. Subachoque	1962-04
3	LG	2120879	Las Mercedes	R. Chicú	R. Chicú	1989-12
4	LM	2120795	Altamira	O. Mancilla	R. Bojacá	1968-07
5	LM	2120757	Acequia San Patricio	Acequia San Patricio	R. Subachoque	1960-02
6	LM	2120756	El Recreo	R. Bojacá	R. Bojacá	1960-03
7	LM	2120800	Puente Manrique	R. Subachoque	R. Subachoque	1949-12
8	LM	2120752	Puente Galindo	R. Bojacá	R. Bojacá	1956-04
9	LM	2120787	Santa Isabel	R. Frío	R. Frío	1964-02
10	LM	2120845	El Bosque	R. Subachoque	R. Subachoque	1975-02

Cuadro 2. Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas

No	TIPO	CODIGO	ESTACION	CORRIENTE	CUENCA	F.INST
1	CP	2120629	Venecia	R. Bojacá	R. Bojacá	1956-12
2	CP	2120631	Tisquesusa	R. Subachoque	R. Subachoque	1966-04
3	CP	2120557	La Primavera	R. Subachoque	R. Subachoque	1965-06
4	CP	2120565	Tabio	R. Chicú	R. Chicú	1970-07
5	PG	2120026	Ventalarga	R. Frío	R. Frío	1947-06
6	PG	2120044	La Pradera	R. Subachoque	R. Subachoque	1951-09
7	PM	2120055	La Unión	R. Subachoque	R. Subachoque	1960-01
8	PM	2120069	Tesoros	R. Bojacá	R. Bojacá	1931-08
9	PM	2120173	Campobello	R. Bojacá	R. Bojacá	1985-07
10	PM	2120174	Manjui	R. Bojacá	R. Bojacá	1963-04
11	PM	2120071	Las Margaritas	R. Subachoque	R. Subachoque	1959-08
12	PM	2120136	Santa Inés	R. Chicú	R. Chicú	1980-03
13	PM	2120176	Santa Isabel	R. Frío	R. Frío	1968-05

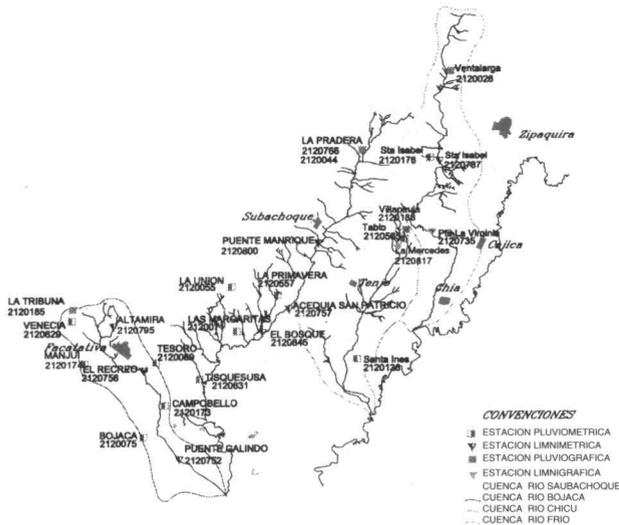


Figura 3. Ubicación de las estaciones Hidrometeorológicas en la zona de estudio

IV. INFORMACIÓN UTILIZADA

A. CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para el estudio de la delimitación de la zona de influencia del proyecto, se obtuvieron restituciones aerofotogramétricas a escala 1:50000 de la Sabana de Bogotá.

D. ANALISIS ESTADÍSTICO

En el análisis y el modelamiento de datos, a menudo se asume que los datos dados son estacionarios en la media y en la covarianza (estacionariedad de segundo orden).

Sin embargo, si se presentan cambios o tendencias en los datos, la suposición de estacionariedad no es suficientemente válida. En estos casos, el cambio o la tendencia necesitan ser identificados, modelados, estimados, para que los datos puedan ser removidos de las series antes del análisis.

Existen dos pasos para la detección de cambios y tendencias. El primer paso, llamado "análisis exploratorio de datos", tiene como objetivo descubrir propiedades importantes de los datos usando análisis gráficos simples y análisis estadísticos básicos. El análisis exploratorio debería ser usado siempre antes de cualquier análisis confirmatorio.

De especial interés son los cambios en la media y la varianza de una variable. Los cambios pueden ser positivos o negativos. (ver figuras 2 y 3)

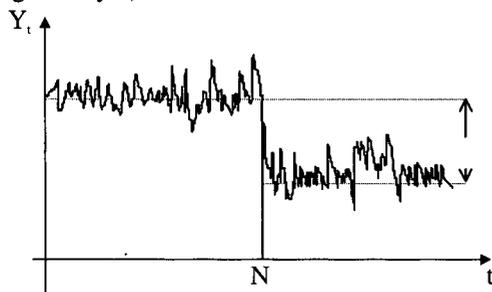


Figura 4. Cambio en la media

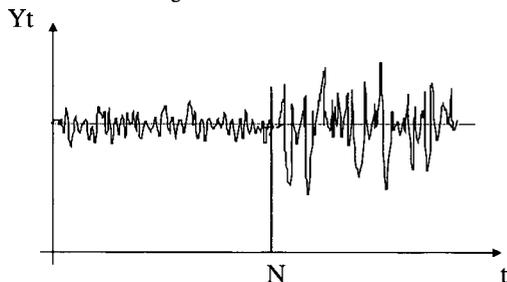


Figura 5. Cambio en la varianza

Tendencia: Es un cambio gradual progresivo en el nivel o la magnitud de un momento estadístico o parámetro de ciertas variables. De interés son las tendencias en la media y la varianza de una variable. (ver figuras 6 y 7)

Una serie con media y varianza constantes se dice que es homogénea, consistente, serie estacionaria de segundo orden. Cuando una serie tiene un cambio en la varianza no es una serie estacionaria de segundo orden (puede ser una serie estacionaria de primer orden).

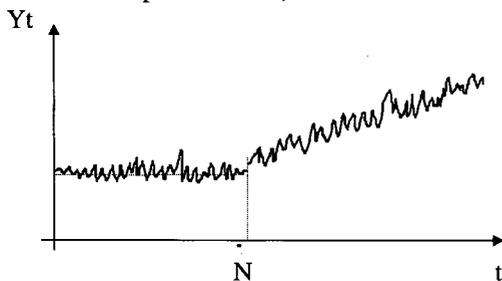


Figura 6. Tendencia en la media

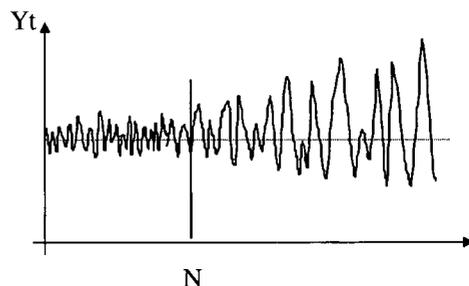


Figura 7. Tendencia en la varianza

Los anteriores ejemplos y figuras ilustran cambios y tendencias en la media y la varianza. Las técnicas para la detección de cambios y tendencias presentadas en este trabajo incluyen únicamente la media y la varianza.

1. ANÁLISIS EXPLORATORIO

ANÁLISIS GRÁFICO

Existen diferentes formas de gráficos que han sido sugeridos en la literatura para el análisis gráfico de una serie dada. Para la detección de cambios y tendencias en particular, los tipos de gráficos usados son:

1. Gráficos Registro vs. Tiempo (*Time Series Plot*).
2. Gráficos de Masa Simple (*Single Mass Plots*).
3. Gráficos de Doble Masa (*Double Mass Plots*).
4. Box Plots.

Los procedimientos gráficos presentados anteriormente son convenientes para usar en la detección de cambios y tendencias en la media de una serie. Sin embargo, dichas gráficas no son confiables cuando se usan en la detección de cambios y tendencias en momentos más altos.

2. ANÁLISIS CONFIRMATORIO

PRUEBAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA MEDIA

La mayoría de estas pruebas tratan de verificar la igualdad de las medias de dos variables aleatorias, es decir, si las muestras vienen de poblaciones con la misma media o no. Las pruebas de hipótesis utilizadas en este trabajo para analizar un posible cambio en la media son:

• Pruebas que requieren el punto de cambio:

1. Prueba T simple.
2. Prueba T modificada.
3. Prueba de Kruskal-Wallis.
4. Prueba de Signo.
5. Prueba de Friedman.

• Pruebas que no requieren el punto de cambio:

1. Prueba de Sumas Acumuladas.
2. Análisis Bayesiano.

PRUEBAS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA VARIANZA

En general, las pruebas estadísticas para la detección de cambios en la varianza de una serie hidrológica dada, evalúan la hipótesis nula de igualdad de varianzas entre las dos subseries resultantes de dividir la serie mencionada por el punto de cambio estimado, según el procedimiento descrito en el Análisis Bayesiano. Las pruebas estadísticas utilizadas en este estudio para la detección de cambios en la varianza de una serie hidrológica dada son:

1. Prueba F simple.
2. Prueba F modificada.
3. Prueba de Ansari-Bradley.
4. Prueba de Bartlett.
5. Prueba de Levene.

PRUEBAS DE DETECCIÓN DE TENDENCIAS EN LAS SERIES

En general, estas pruebas tratan de verificar la hipótesis nula de tendencia en la media de una serie hidrológica dada.

Las pruebas para la detección de tendencias en la media que se utilizaron en este estudio son:

- 1-Prueba T para la detección de tendencias lineales.
- 2-Prueba de Hotelling-Pabst.
- 3-Prueba de Mann-Kendall.
- 4-Prueba de Sen.

V. RESULTADOS

A. ISOGRADEX DE PRECIPITACION

Con base en el modelamiento probabilístico de las series de precipitación, se calcularon los Gradex de precipitación máxima, de las estaciones pluviométricas y pluviográficas que se encuentran en la zona de estudio. El Gradex será la pendiente de la línea recta que se ajusta a la distribución Gumbel Tipo I; sin embargo, este procedimiento se realizó también para las Distribuciones Log-normal y Pearson. Una vez que se obtengan estos Gradex de precipitación máxima se pueden dibujar líneas de isogradex, tanto a nivel mensual, como a nivel anual.(ver figura 8).

B. ISOGRADEX DE ESCORRENTÍA

Una vez encontrados los Gradex de precipitación, se pueden calcular los Gradex de escorrentía y dibujar las correspondientes isogradex, (ver cuadro 3)

C. EVENTOS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Además de las Isogradex, se obtuvieron los caudales para diferentes periodos de retorno (20,50,100,500 y 1.000 años) y se validaron mediante la modelación probabilística de las series de caudales máximos. Adicionalmente se tuvo en cuenta que; las cuencas alcanzan las condiciones de saturación, por

las condiciones pluviométricas que generan las crecientes de 10 años de período de retorno. (ver cuadro 4)

Cuadro 3. Gradex de Escorrentía

Código	Estación Limnigráfica o Limnigráfica	Código	Estación Pluviométrica o Pluviográfica	A (Km ²)	Tc (horas)	Gradex P. (mm)	Gradex Esc. (m ³ /seg)
2120756	El Recreo (LM)	2120174	Manjui (PM)	40	44,42	12,58	3,15
		2120185	La Tribuna (PG)	57,93	15,80	-	-
2120752	Pte. Galindo (CP)	2120173	Campobello (PM)	85,45	44,42	15,80	8,44
2120766	La Pradera (LG)	2120044	La Pradera (PG)	20,16	7,50	19,76	14,75
2120800	Pte. Manrique (LM)	2120044	La Pradera (PG)	88,64	26,80	8,50	7,81
2120843	Acq. San Patricio (LM)	2120557	La Primavera (CP)	145,94	24,00	11,86	20,03
		2120071	Las Margaritas (PM)	145,94	24,00	15,70	26,52
2120845	El Bosque (LM)	2120055	La Union (PM)	337,57	109,60	14,03	12,00
		2120071	Las Margaritas (PM)	337,57	109,60	15,70	13,43
		2120631	Tisquesusa (CP)	337,57	109,60	11,00	9,41
2120879	Las Mercedes (LG)	2120565	Tabio (CP)	11,13	4,50	10,39	7,14
2120787	Santa Isabel (LM)	2120176	Santa Isabel (PM)	70,99	23,04	22,71	19,44
		2120026	Ventalarga (PG)	70,99	16,40	9,74	11,71
2120735	Pte. La Virginia (LG)	2120176	Santa Isabel (PM)	122,15	64,85	22,71	11,88

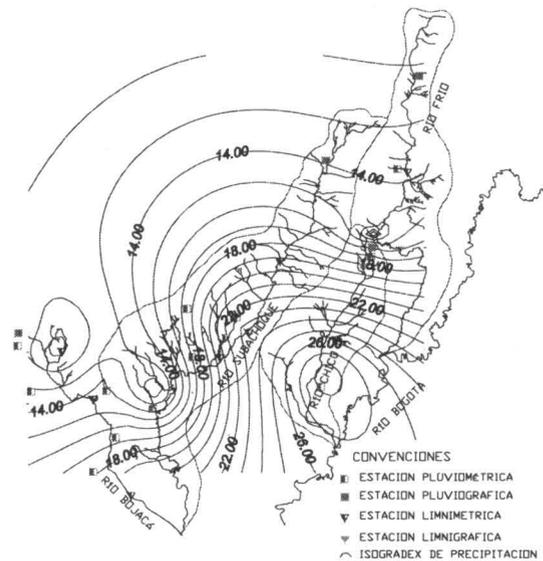


Figura 8. Isogradex de Precipitación Máxima anual (Distribución Gumbel)

Cuadro 4. Resumen comparativo de los eventos para diferentes períodos de retorno

Código	Estación Pluviométrica	Q(10)	10 Años	50 Años	100 Años	500 Años	1000 Años	MCM1	MCM1000	MCM1	
2120174	Manjui (PM)	8,7	8,7	13,76	11,6	15,95	12,8	21,01	15,7	23,19	16,9
2120185	La Tribuna (PG)										
2120173	Campobello (PM)	20,8	20,8	34,39	33,1	40,24	38,3	53,83	50,3	59,68	55,5
2120044	La Pradera (PG)	33,5	33,5	57,25	54,4	67,47	63,1	91,22	83,5	101,4	92,2
2120557	La Primavera (CP)	0,7	0,7	32,94	1	46,83	1,1	79,07	1,3	92,96	1,5
2120071	Las Margaritas (PM)			42,68		61,76		103,7		122,1	
2120055	La Union (PM)	4,3	4,3	23,62	5,7	31,94	6,3	51,26	7,7	59,58	8,3
2120071	Las Margaritas (PM)			21,62		30,93		52,55		61,86	
2120631	Tisquesusa (CP)			15,15		21,67		36,82		43,34	
2120565	Tabio (CP)	0,1	0,1	11,59	0,2	16,54	0,2	28,03	0,3	32,97	0,3
2120176	Santa Isabel (PM)	17,2	17,2	48,48	25,1	61,96	28,5	93,24	36,2	106,7	39,6
2120026	Ventalarga (PG)			18,85		26,97		45,82		53,93	
2120176	Santa Isabel (PM)	36,7	36,7	55,82	52,4	64,06	59,1	83,18	74,5	91,42	81,1

Caudales en (m³/seg)
MCM1: Modelamiento De las Series de Caudales Máximos Instantáneos

CONCLUSIONES

Se comprobó mediante el modelamiento probabilístico de las series de precipitaciones máximas anuales de 24 horas de duración y de las series de caudales máximos medidos durante la misma duración, que las pendientes son equivalentes teniendo en cuenta que han sido estimadas en las unidades

correspondientes a precipitación y caudal. Este resultado comprueba uno de las suposiciones del método en la cual se asume una relación directamente proporcional entre la precipitación y el caudal.

Los registros de precipitaciones máximas anuales de 24 horas de duración de las estaciones analizadas se pueden modelar con las distribuciones Log Normal II y III parámetros y con la distribución de valores extremos tipo I, porque las dispersiones encontradas con respecto a la serie ajustada no fueron considerables. En general la distribución de valores extremos es la que mejor se ajusta, y además la utilización de esta distribución reduce considerablemente el proceso de la información debido a la facilidad de la aplicación.

Los rangos de magnitud de los valores generados fueron similares al ser calculados por las distribuciones Normal y Gumbel tipo I. Por esta razón resulta indiferente escoger cualquiera de las dos distribuciones para modelar la precipitación. Los rangos del Gradex de precipitación encontrados están entre 6 mm – 34 mm y 10 mm – 28 mm para las distribuciones Normal y Gumbel tipo I respectivamente.

El caudal de saturación tiene gran peso en la generación de

eventos para diferentes períodos de retorno. Se nota grandes variaciones en dichos eventos cuando se varía este caudal.

En la década de los setenta se encontró que la mayoría de las estaciones tuvieron cambios en la media y/o varianza, comportamiento que se puede entender como un cambio regional de las condiciones climatológicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA, Z, Y RUIZ, C. *Adaptación del Método Gradex en Cuencas Antioqueñas*, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1997
2. GARCON, R. " The Gradex method: For a Statically robust evaluation of extreme value floods based on local characteristics." *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*. Netherlands, Volume I, 1994.
3. GUILLOT, P. " The arguments of the gradex method: A Logical support to assess extreme floods." *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. Great Britain, 1993.
4. LABORDE, J. *Elements d'Hydrologie de Surface*. Ecole Nationale des Ingénierus des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires. Francia, 1983.
5. SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, *Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Hidrología de Antioquía, 1997.