

Índice general

1. Probabilidad y Estadística en Hidrología	1
1.1. Introducción	1
1.2. Probabilidad	2
1.2.1. Axiomas de Probabilidad	3
1.2.2. Otras Propiedades	4
1.2.2.1. Probabilidad del Complemento	4
1.2.2.2. Regla Aditiva de la Teoría de Probabilidad	4
1.2.2.3. Probabilidad del Evento Nulo	5
1.2.2.4. Probabilidad de un Evento Incluido	5
1.2.2.5. Desigualdad de Boole	5
1.2.2.6. Probabilidad Condicional	5
1.2.2.7. Regla Multiplicativa de la Teoría de Probabilidad	6
1.2.2.8. Independencia Estocástica	6
1.2.3. Teorema de la Probabilidad Total	7
1.2.4. Teorema de Bayes	8
1.3. Variables Aleatorias	10
1.3.1. Probabilidad de Variables Aleatorias Discretas	10
1.3.2. Probabilidad de Variables Aleatorias Continuas	11
1.3.3. Descriptores de Variables Aleatorias	14
1.3.3.1. Valor Esperado	14
1.3.3.2. Momentos	15
1.3.3.3. Media	16
1.3.3.4. Varianza	16
1.3.3.5. Asimetría	17
1.3.3.6. Cuantiles	17
1.4. Análisis Exploratorios de Datos	18
1.4.1. Métodos Gráficos	20
1.4.1.1. Series de Tiempo	20
1.4.1.2. Diagrama de Líneas o Barras	21
1.4.1.3. Histograma	21
1.4.1.4. Polígono de Frecuencia	22
1.4.1.5. Diagrama de Frecuencia Relativa Acumulada	24
1.4.1.6. Diagrama de Puntos	24
1.4.1.7. Diagrama de Dispersión	24
1.4.2. Estimadores Muestrales	25
1.4.2.1. Media Muestral	25
1.4.2.2. Varianza Muestral	26
1.4.2.3. Asimetría Muestral	27

1.4.2.4.	Momentos Muestrales	27
1.4.2.5.	Cuantiles Muestrales	27
1.4.2.6.	Gráficas Box-Whiskers	30
1.4.2.7.	Coefficiente de correlación muestral	31
1.5.	Modelos de Probabilidad	32
1.5.1.	Distribuciones Discretas	33
1.5.1.1.	Binomial	33
1.5.1.2.	Geométrica	34
1.5.1.3.	Poisson	34
1.5.2.	Distribuciones Continuas	35
1.5.2.1.	Uniforme	35
1.5.2.2.	Triangular	36
1.5.2.3.	Normal	37
1.5.2.4.	Lognormal	39
1.5.2.5.	Gamma	41
1.5.2.6.	Beta	41
1.5.3.	Estimación de Parámetros	42
1.5.3.1.	Método de Momentos	43
1.5.3.2.	Método de Maxima Verosimilitud	44
1.5.3.3.	Método de Momentos Ponderados con Probabilidad / Momentos - L	45
1.5.4.	Distribuciones Multivariadas	58
1.5.4.1.	Distribución Normal Bivariada	59
1.5.4.2.	Otras Distribuciones Multivariadas	60
1.6.	Estimación de Intervalos de Confianza	62
1.6.1.	Intervalos de Confianza de la Media	64
1.6.2.	Intervalos de Confianza de la Varianza	67
1.7.	Pruebas de Hipótesis	68
1.7.1.	Procedimiento de Prueba	69
1.7.2.	Métodos Paramétricos	70
1.7.3.	Métodos no Paramétricos	77
1.7.3.1.	Pruebas de Hipótesis de Independencia	77
1.7.3.2.	Prueba de Signo para la Mediana	81
1.7.3.3.	Prueba de Wilcoxon de Signo para Datos de Dos Muestras	82
1.8.	Datos Anómalos	84
1.8.1.	Pruebas Z-score y Z-score Modificada	85
1.8.2.	Prueba de Grubbs	86
1.8.3.	Prueba de Tietjen y Moore	86
1.9.	Verificación de Ajuste de Modelos de Probabilidad	87
1.9.1.	Gráficas Q-Q	87
1.9.2.	Gráficas en Papeles de Probabilidad	88
1.9.3.	Pruebas de Hipótesis de Bondad de Ajuste	91
1.9.3.1.	Prueba Chi-cuadrado	91
1.9.3.2.	Prueba Kolmogorov-Smirnov	91
1.9.3.3.	Prueba Anderson-Darling	92
1.10.	Análisis de Regresión	94
1.10.1.	Regresión Lineal Simple	95
1.10.2.	Regresión Lineal Múltiple	99
1.11.	Variables y Distribuciones Derivadas de Probabilidad	103
1.11.1.	Variables Aleatorias Discretas	103
1.11.2.	Variables Aleatorias Continuas: Una Variable Independiente	105

1.11.3. Variables Aleatorias Continuas: Dos o Más Variables Independientes	110
1.11.4. Media y Varianza de Variables Derivadas	116
1.12. Análisis de Incertidumbre de Primer Orden Segundo Momento	118
1.13. Curvas de Duración de Caudales	121
1.13.1. Interpretación de las CDCs	122
1.13.2. Usos de las CDCs	127
1.13.3. Modelos de Probabilidad de las CDCs	129
2. Análisis de Frecuencia de Eventos Extremos	135
2.1. Introducción	135
2.2. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo	135
2.3. Período de Retorno	137
2.3.1. Definición del Período de Retorno	138
2.3.2. Riesgo Hidrológico	139
2.4. Propósitos del Análisis de Frecuencia de Eventos Hidrológicos Extremos	140
2.5. Datos para Realizar un Análisis de Frecuencia	141
2.5.1. Series	143
2.5.2. Pruebas de Hipótesis Pertinentes en las Series	144
2.6. Marco Conceptual del Análisis de Frecuencia	147
2.6.1. Distribuciones Apropriadas para el Análisis de Frecuencia de Eventos Extremos	147
2.6.2. Ecuación de Frecuencia	151
2.6.3. Distribución de X_T y Estimación de Límites de Confianza	151
2.7. Descripción de Algunas Distribuciones	152
2.7.1. Gumbel	154
2.7.2. Pearson Tipo III y Log Pearson Tipo III	156
2.7.3. Weibull	157
2.7.4. Fréchet	157
2.7.5. GEV	158
2.7.6. Pareto	159
2.7.7. Curvas de Frecuencia para Eventos Mínimos	160
2.7.8. Resumen de Distribuciones	161
2.8. Ajuste de una Distribución	173
2.8.1. Procedimiento de Ajuste	173
2.8.2. Más sobre la Prueba de Anderson-Darling	183
2.9. Selección entre Distribuciones	203
2.9.1. Criterios <i>AIC</i> y <i>BIC</i>	204
2.9.2. Comportamiento y Clases de Colas	204
2.9.3. Procedimiento para Determinar la Clase de Distribución	205
2.10. Otras Series	234
2.10.1. Serie Semestral	235
2.10.2. Serie Parcial	238
2.10.3. Subpoblaciones	243
2.10.3.1. Procedimientos para Estimar Curvas de Frecuencia con Subpoblaciones	247
2.10.3.2. Algunas Pruebas de Hipótesis para Subpoblaciones	250
2.11. Aproximación de Ley de Potencia	264
2.12. Diseño Hidrológico	267
2.12.1. Definición del Período de Retorno de Diseño	271
2.12.1.1. Prescripción de T_D	271
2.12.1.2. Selección de T_D con Base en el Riesgo Hidrológico	272
2.12.1.3. Selección de T_D Usando Análisis Económicos	274

2.12.2. Medidas de Mitigación de Daños por Inundaciones	277
2.12.3. Diseños Orientados por Confiabilidad	278
3. Modelos de Lluvia	287
3.1. Introducción	287
3.2. Medición de la Lluvia	288
3.3. Llegadas de Eventos de Lluvia	290
3.4. Modelos de Pulsos Rectangulares	293
3.4.1. Pulsos Rectangulares Individuales	293
3.4.1.1. Distribuciones de T_r , I_r , T_b y T_a	293
3.4.1.2. Distribuciones de la Profundidad h de Aguaceros	298
3.4.1.3. Modelo de Pulsos Rectangulares Individuales con Traslapo (PRP)	307
3.4.2. Pulsos Rectangulares en Grupos	312
3.4.2.1. Pulsos Rectangulares Neyman-Scott, PRNS	313
3.4.2.2. Pulsos Rectangulares Bartlett-Lewis, PRBL	318
3.5. Simulación de Modelos de Pulsos Rectangulares	325
3.5.1. Series Sintéticas del Modelo PRP	325
3.5.2. Series Sintéticas del Modelo PRNSM	328
3.5.3. Series Sintéticas del Modelo PRBLM	330
3.6. Un Modelo Probabilístico de Lluvia Anual	332
3.7. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia	335
3.7.1. Análisis de Frecuencia para la Estimación de Curvas IDF	336
3.7.2. Fórmulas Descriptivas de las Curvas IDF	337
3.7.3. Curvas IDF Generalizadas	340
3.7.3.1. Algunos Ejemplos de Curvas IDF para Colombia	341
3.7.3.2. Obtención de Curvas IDF con Modelos de Pulsos en Grupos	347
3.7.3.3. Hietogramas de Diseño a partir de Curvas IDF	349
4. Modelos Lluvia-Escorrentía	357
4.1. Introducción	357
4.2. Modelos de Caudal Derivados Analíticamente de Procesos de Lluvia	358
4.2.1. Modelo de Embalse Lineal Único (ELU)	359
4.2.2. Modelo de Dos Embalses Lineales en Paralelo (DEP)	360
4.2.3. Modelo Lluvia-Escorrentía PRP-DEP	363
4.2.4. Modelo Lluvia-Escorrentía PRNS-DEP	365
4.3. El Modelo Anual de Balance Hídrico de Eagleson	368
4.3.1. El Balance Anual	373
4.3.2. La Lluvia como Impulsora de la Dinámica del Balance	374
4.3.3. El Modelo Simplificado del Suelo	375
4.3.4. Aproximación Analítica a la Solución de la Ecuación de Richards	379
4.3.5. La Escorrentía Generada por un Aguacero	383
4.3.6. La Escorrentía Superficial Anual	385
4.3.7. La Infiltración y el Flujo Base Anuales	386
4.3.8. La Evaporación Producida durante el Período Seco entre Aguaceros	387
4.3.9. La Evapotranspiración Anual	390
4.3.10. El Balance Anual de la Humedad del Suelo y la Hipótesis de Selección Natural	391
4.3.11. El Rendimiento Hídrico Anual	392
4.4. Otros Modelos de Balance	395
4.4.1. El Modelo Ecohidrológico Mensual Estadístico-Dinámico	397
4.4.2. Un Modelo Probabilístico de la Dinámica del Suelo	409

4.4.3.	Modelación de Mecanismos de Generación de Escorrentía	418
4.5.	Hidrogramas Unitarios	422
4.5.1.	Obtención de un Hidrograma Unitario	423
4.5.2.	El Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico HUIGo	424
4.5.2.1.	Estructura de la Red de Drenaje	425
4.5.2.2.	Derivación del HUIGo	426
4.5.2.3.	El Caudal Pico y el Tiempo al Pico del HUIGo	430
4.5.2.4.	Hidrograma de Escorrentía Directa a partir del HUIGo	431
4.5.2.5.	Fdps para los Tiempos de Viaje en Corrientes	436
4.5.3.	Algunos Desarrollos Ulteriores al HUIGo	450
4.5.3.1.	El HUI Geomorfoclimático HUIGc	452
4.5.3.2.	El HUI Geomorfológico Gamma HUIGg	455
4.5.3.3.	El HUIG Gamma Extendido HUIGge	457
4.5.3.4.	El HUIG de Función de Anchura HUIGw	468
4.6.	Curvas Derivadas de Frecuencia de Caudales Máximos	469
4.6.1.	Un Ejemplo de Curvas de Frecuencia Derivadas de Caudales Máximos	476
4.7.	Modelación Hidrológica de SUDS	483
4.7.1.	Volumen de Captura para Tratamiento de Calidad del Agua	484
4.7.2.	Desempeño de Tipologías SUDS	492
4.7.2.1.	Almacenamiento Temporal de Volumen de Escorrentía	493
4.7.2.2.	Reducción del Caudal Máximo con un Almacenamiento Temporal	499
4.7.2.3.	Modelación de Techos Verdes	508
5.	Variabilidad Hidrológica	521
5.1.	Introducción	521
5.2.	Estacionaridad y Ergodicidad	522
5.2.1.	Estacionaridad	522
5.2.2.	Ergodicidad	524
5.2.3.	La Escala de Fluctuación	525
5.2.4.	Proceso de Promedio Móvil Local	525
5.2.5.	Proceso de Promedio Discreto	529
5.2.6.	Proceso de Muestreo Discreto	531
5.3.	Representación Espectral de Procesos Estocásticos	533
5.3.1.	Serie de Fourier	533
5.3.2.	Potencia Promedio	535
5.3.3.	Serie Complejas de Fourier	536
5.3.4.	El Espectro de Potencia	537
5.4.	Componentes de las Series de Tiempo	541
5.4.1.	Tendencias	541
5.4.2.	Saltos	542
5.4.3.	Remoción de Tendencias y Saltos en Series Anuales	543
5.4.4.	Estacionalidad	543
5.4.4.1.	Remoción de Tendencias, Saltos y Estacionalidad en Medias y Varianzas	544
5.4.5.	Variaciones Aleatorias y Autocorrelación	544
5.4.5.1.	Remoción de Autocorrelación	545
5.5.	Análisis de Series de Tiempo	545
5.5.1.	Propiedades Estadísticas de las Series de Tiempo	547
5.5.1.1.	Media	547
5.5.1.2.	Varianza	548
5.5.1.3.	Coficiente de Asimetría	548

5.5.1.4.	Correlograma	549
5.5.1.5.	El Fenómeno de Hurst	552
5.5.1.6.	Estimación del Coeficiente de Hurst	558
5.5.1.7.	Espectro de Potencia y Densidad Espectral	570
5.5.2.	Descomposición Modal Empírica	577
5.5.3.	Pruebas de Hipótesis en Series de Tiempo	584
5.5.3.1.	Pruebas de Hipótesis de Saltos	589
5.5.3.2.	Pruebas de Hipótesis de Tendencias	593
5.5.3.3.	Pruebas de Hipótesis de Cambio de Distribución	596
5.5.3.4.	Pruebas de Hipótesis de Normalidad	597
5.5.3.5.	Pruebas de Hipótesis de Aleatoriedad / Independencia	597
5.6.	Generación Sintética de Series de Caudales	605
5.6.1.	Modelos Anuales	605
5.6.1.1.	El Modelo de Thomas-Fiering Anual	605
5.6.1.2.	Los Modelos $AR(p)$	609
5.6.1.3.	Los Modelos $MA(q)$	613
5.6.1.4.	Los Modelos $ARMA(p, q)$	616
5.6.1.5.	Los Modelos $ARIMA(p, d, q)$	618
5.6.1.6.	Desarrollo de Modelos tipo $ARIMA(p, d, q)$	620
5.6.1.7.	Los Modelos $FARIMA(p, \delta, q)$	622
5.6.1.8.	Los Modelos $SMA(q)$	624
5.6.1.9.	Modelos Basados en EMD	625
5.6.2.	Modelos Estacionales	626
5.6.2.1.	Modelos Estacionales Tipo Thomas-Fiering	626
5.6.2.2.	Modelos Estacionales $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$	627
5.6.2.3.	Modelos Estacionales $FARIMA(p, \delta, q) \times (P, \Delta, Q)_s$	629
5.6.2.4.	Modelos de Desagregación	630
5.6.2.5.	Modelos Estacionales con Base en Modelos SMA y EMD	633
5.6.2.6.	Modelos Estacionales con Variables Exógenas	634
5.6.3.	Otros Modelos de Generación Sintética	640
A. Pruebas de Hipótesis No Paramétricas		645
B. Generación de Números Aleatorios		655
B.1.	Introducción	655
B.2.	Generación de Números Aleatorios Uniformes $U(0, 1)$	655
B.3.	Generación de Números Aleatorios de otras Distribuciones	657
B.3.1.	El Método de Transformación Inversa	657
B.3.2.	El Método de Aceptación-Rechazo	658
B.3.3.	Algunos Algoritmos de Generación para algunas Distribuciones	658
B.3.3.1.	Distribución Binomial	658
B.3.3.2.	Distribución Geométrica	659
B.3.3.3.	Distribución de Poisson	659
B.3.3.4.	Distribución Uniforme, $U(a, b)$	660
B.3.3.5.	Distribución Triangular	661
B.3.3.6.	Distribución Exponencial	661
B.3.3.7.	Distribución Gamma	661
B.3.3.8.	Distribución Beta	662
B.3.3.9.	Distribución Normal	663
B.3.3.10.	Otras Distribuciones Univariadas	665

B.3.3.11. Algunas Distribuciones Bivariadas	666
Bibliografía	667
Índice Alfabético	703