

INVESTIGACIÓN EN HIDROLOGÍA

GENERAL, ISOTÓPICA Y APLICADA

Jesús Ernesto Torres - Juan Antonio Aragón



**UNIVERSIDAD
LIBRE®**
Vigilada Mineducación



Jesús Ernesto Torres

Ingeniero Civil, Magíster en Recursos Hidráulicos, Especializado en Hidrología, 39 años de experiencia profesional con énfasis en Acueductos, Alcantarillados, plantas de tratamiento, hidrología, energías Alternativas, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Riesgos Ambientales y Obras Ambientales, 33 años de experiencia docente y de investigación. Coordinador del Grupo de Investigación TECNOAMBIENTAL desde el año 2002 - 2017, clasificación B en Colciencias, autor de varios libros entre ellos Guía De Diseño De Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, INEA, 1997 y 2 Libros de Técnicas nucleares y convencionales en agua superficial y subterránea Universidad Libre, 2006.



UNIVERSIDAD LIBRE®
Vigilada Mineducación

DIRECTIVAS

JORGE ALARCÓN NIÑO
PRESIDENTE

JORGE GAVIRIA LIÉVANO
VICEPRESIDENTE

FERNANDO ENRIQUE DEJANÓN RODRÍGUEZ
RECTOR NACIONAL

FLORO HERMES GÓMEZ PINEDA
SECRETARIO GENERAL

RICARDO ZOPÓ MÉNDEZ
CENSOR NACIONAL

ALEJANDRO MUÑOZ ARIZA
DIRECTOR NACIONAL DE PLANEACIÓN (E)

ELIZABETH VILLARREAL CORRCHA
DIRECTORA NACIONAL DE INVESTIGACIONES

JULIO ROBERTO GALINDO HOYOS
PRESIDENTE SECCIONAL

JESÚS HERNANDO ÁLVAREZ MORA
RECTOR SECCIONAL

MARTHA RUBIANO GRANADA
DECANA FACULTAD DE INGENIERÍA

SIBY INÉS GARCÉS POLO
DIRECTORA CENTRO DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA (CIFI)

OSCAR LEONARDO ORTIZ MEDINA
DIRECTOR PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Torres, Jesús Ernesto

Investigación en hidrología : general, isotópica y aplicada / Jesús Ernesto Torres, Juan Antonio Aragón. -- Bogotá : Universidad Libre, 2018.

357 p. : il., mapas ; 24 cm.

Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-5466-39-5

1. Hidrología - Investigaciones 2. Hidrometeorología - Investigaciones

I. Aragón, Juan Antonio

551.48

SCDD 21

Catalogación en la Fuente - Universidad Libre. Biblioteca.

Comentarios y sugerencias:

Correo e-de los autores:

Jesuse.torresq@unilibrebog.edu.co

juan.aragon@unilibrebog.edu.co

© Jesús Ernesto Torres Quintero, Juan Antonio Aragón Moreno, 2018

© Facultad de Ingeniería, 2018

© Universidad Libre Sede Principal, 2018

ISBN IMPRESO: 978-958-5466-39-5

ISBN DIGITAL: 978-958-5466-40-1

Queda hecho el depósito que ordena la ley.

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

Editorial: Universidad Libre

Coordinación de edición: Siby I. Garcés Polo

Correo-e: siby.garces@unilibre.edu.co

Coordinación de Publicaciones y Comunicaciones: Luz Bibiana Piragauta Correa

Correo-e: comunicaciones@unilibre.edu.co

Calle 8 No. 5-80, Tel.: 3821000, Bogotá D.C.

Corrección de estilo: Sandra Reyes

Correo-e: reyssandra7@gmail.com

Diseño y diagramación: AF&M Producción Gráfica S.A.S.

Esta obra está cofinanciada por el Fondo de Publicaciones de la Universidad Libre

Impreso en Colombia en los talleres gráficos

de AF&M Producción Gráfica S.A.S.

Carrera 68G No. 64A - 31

Tel.: +57(1) 250 1584

afmproducciongrafica@gmail.com

Bogotá D.C., Colombia, 2018

Printed in Colombia

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I	23
ASPECTOS FISIOGRAFICOS	23
1. Hidrología	27
1.1 Aplicaciones de la hidrología a los estudios hidrológicos	27
1.1.1 Proyectos que usan el agua	28
1.2 División de la hidrología	29
1.3 Ciclo hidrológico	30
1.3.1 Ciclo natural del agua	30
1.3.2 Etapas del ciclo hidrológico	31
1.3.2.1 Evaporación (E)	32
1.3.2.2 Evapotranspiración (E_r)	32
1.3.2.3 Condensación (C)	32
1.3.2.4 Precipitación (P)	32
1.3.2.5 Drenaje (D)	32
1.3.2.6 Infiltración/Percolación (I)	32
1.3.2.7 Agua subterránea (AS)	32
1.3.2.8 Acuífero (A)	32
1.3.2.9 Nivel freático (N.F)	32
1.4 Cuencas hidrográficas	33
1.4.1 Inventario nacional	34
1.4.2 Características de una cuenca	34
1.4.3 Aspectos fisiográficos de una cuenca	35
1.4.4 Partes de una cuenca	36
1.5 Investigación de los aspectos fisiográficos en algunas cuencas y ríos colombianos	43
1.5.1 Zona de estudio cuenca de río Frío (Cundinamarca)	43
1.5.2 Investigación de los aspectos fisiográficos en la subcuenca del río Teusacá (Cundinamarca)	50
1.5.3 Investigación en estudio hidrológico río Tunjuelito	57
CAPÍTULO II	65
NOCIONES BÁSICAS DE HIDROMETEOROLOGÍA	65

2.1	Presión	68
2.1.1	Presión atmosférica	68
2.1.2	Presión de aire seco	70
2.1.3	Presión de vapor	70
2.1.4	Presión de saturación	71
2.1.5	Presión atmosférica en Colombia	72
2.2	Temperatura	73
2.2.1	Temperatura de bulbo seco (ta)	73
2.2.2	Temperatura de bulbo húmedo (tw)	73
2.2.3	Punto de rocío	74
2.2.3.1	Temperatura de punto de rocío (tw)	74
2.3	Humedad	75
2.3.1	Cálculo de la humedad relativa, absoluta, específica y proporcional de mezcla	76
2.4	Procesos atmosféricos en el ciclo hidrológico	81
2.4.1	Balace de energía	81
2.4.2	Radiación neta	85
2.5	Transpiración	88
2.5.1	Medida de la transpiración	89
2.6	Evaporación	90
2.6.1	Evaporación real	90
2.6.2	Evaporación potencial	90
2.6.3	Medición directa	90
2.7	Evapotranspiración	94
2.7.1	Evapotranspiración real	94
2.8	Control de evaporación en embalses	98
2.9	Investigación zona de estudio subcuenca del río Frio	100

CAPÍTULO III

109

PRECIPITACIÓN	109	
3.1	Formas de precipitación	112
3.1.1	Lluvia	112
3.1.2	Nieve	113
3.1.3	Granizo	114
3.1.4	Tormenta	114
3.1.5	Niebla	115
3.2	Formación de la precipitación	116
3.2.1	Nubes	116
3.3	Aparatos de medida y registro	128
3.3.1	Estación pluviométrica	129
3.3.2	Estación pluviográfica	130
3.3.3	Estaciones hidrológicas	131
3.4	Análisis de lluvias sobre un área	133

3.4.1	Método Aritmético	133
3.4.2	Polígonos de Thiessen	134
3.4.3	Método de Isoyetas	136
3.5	Estimativo de datos faltantes de precipitación	137
3.5.1	Promedio aritmético	137
3.6	Variación temporal de la precipitación	140
3.6.1	Precipitación media diaria	142
3.6.2	Precipitación media mensual	143
3.6.3	Valor anual	144
3.6.4	Precipitación media anual (multianual)	144
3.6.5	Precipitación media normal	144
3.6.6	Coficiente pluviométrico	145
3.7	análisis de consistencia de la información registrada	145
3.7.1	Análisis de dobles masas	145
3.8	Red pluviográfica	153
3.8.1	Red hidrológica nacional	154

CAPÍTULO IV **177**

CAUDALES	177
4.1 Caudal	180
4.1.1 El caudal en la ingeniería agrícola e hidráulica	181
4.1.2 Tipos de caudal	181
4.1.3 Medición de caudal	183
4.1.4 Hidrogramas	192
4.2 Hidrograma Unitario	193
4.2.1 Hidrograma sintético	193
4.2.2 Determinación del hidrograma de descarga de una cuenca	193
4.3 Zona de estudio subcuenca del río Frío	193
4.3.1 Medición de caudal	194
4.3.2 Curva de duración o permanencia de caudales	199
4.3.3 Caudales máximos para la subcuenca del río Frío (Cundinamarca)	201
4.3.4 Análisis estadístico	203
4.3.4.1 Caudales máximos estación Santa Isabel del río Frío (Cundinamarca)	204
4.3.4.2 Caudales máximos estación puente La Virginia, río Frío (Cundinamarca)	204
4.3.4.3 Envoltentes regionales	205
4.3.4.4 Caudales mínimos	205
4.4 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA	207
4.4.1 Oferta hídrica	207
4.4.2 Demanda hídrica	207
4.4.3 Caudal Ecológico	209

“Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - sector Alicachin”	210
---	-----

CAPÍTULO V	223
BALANCE HÍDRICO	223
5.1 Balance hídrico	225
5.1.1 Balance hídrico de una cuenca hidrográfica.	227
5.1.2 Utilidad e importancia del balance hidrológico	228
5.2 Disponibilidad hídrica en la capa agrícola de suelo	228
5.2.1 Método de cálculo de la disponibilidad hídrica	229
5.2.1.1 Método de Thornthwaite	229
5.3 Ejemplos en otras cuencas de Colombia	233
5.4 Infiltración	235
5.4.1 Distribución de la precipitación en el suelo	236
5.4.2 Factores que afectan la capacidad de infiltración	237
5.5 Investigación estudio río Tunjuelito	240
5.5.1 Localización de estaciones de precipitación	240
5.5.2 Precipitación media con polígonos de Thiessen	242
5.5.3 Datos de precipitación media con isoyetas	243
5.5.4 Caudales medios	244
5.5.5 Evapotranspiración	245
5.5.6 Balance hidrico	247

CAPÍTULO VI	249
HIDROLOGÍA ISOTÓPICA	249
6.1 Hidrología isotópica	252
6.1.1 Isótopos estables del agua	253
6.1.1.1 Isótopos estables del agua	253
6.1.1.2 Variación de la composición isotópica a través del ciclo hidrológico	253
6.1.1.3 Relación entre el deuterio y el oxígeno - 18 en las precipitaciones	253
6.1.1.4 El tritio	254
6.1.2 Determinación del coeficiente de dispersión aplicado al estudio de la contaminación de ríos	255
6.1.2.1 Determinación del coeficiente de dispersión	256
6.1.3 Aplicación del método de inyección	257
6.1.3.1 Medición del caudal del río Magdalena	257
6.1.3.2 Método de Parker	262
6.1.3.3 Zona de estudio cuenca de río frío (Cundinamarca)	263
6.2 Sedimentos	266
6.2.1 Concentración	267
6.2.2 Transporte o carga de sedimentos	267

6.2.3	Clases de sedimentos	267
6.2.4	Medición del transporte de sedimentos	268
6.2.5	Utilización de sedimentos en ingeniería ambiental y civil	268
6.2.6	Proceso erosivo en las cuencas hidrográficas	269
6.2.6.1	Remoción en masa	269
6.2.7	Capacidad de las corrientes naturales para transportar sedimentos	271

CAPÍTULO VII

273

INVESTIGACION EMBALSES E HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA

		273
7.1	Embalses para riego	277
7.1.1	Clasificación	277
7.1.2	Embalse La Copa	277
7.1.3	Embalse El Juncal	278
7.1.4	Embalse Gachaneca	280
7.1.5	Embalse Bella Coyaima Indiana	281
7.1.6	Embalse Guacas	282
7.1.7	Embalse del Guájaro	284
7.1.8	Embalse El Hato	285
7.1.9	Embalses Matuya y Playón Distrito de riego de María La Baja	286
7.1.10	Represa del Ranchería	286
7.2.	Represas y/o Embalses	288
7.2.1	Embalse de La Regadera	289
7.2.2	Embalse del Neusa	291
7.2.3	Embalse del Sisga	294
7.2.4	Embalse de Chuza	297
7.2.5	Embalse de San Rafael (La Calera)	300
7.2.6	Presa La Fe	304
7.2.7	Embalse de Tominé	304
7.2.8	Embalse de Cantarrana	308
7.2.9	Embalse Teatinos	310
7.3	Centrales hidroeléctricas	310
7.3.1	La central hidroeléctrica Calderas	311
7.3.2	Central hidroeléctrica Embalse Peñol-Troneras	313
7.3.3	Central Hidroeléctrica Embalse Peñol-Guatapé	313
7.3.4	Central Hidroeléctrica Piedras Blancas	314
7.3.5	Central Hidroeléctrica Las Playas	314
7.3.6	Central Hidroeléctrica Presa de Punchiná	315
7.3.7	Central Hidroeléctrica Embalse de San Lorenzo	315
7.3.8	Central Hidroeléctrica Embalse de Porce II	316
7.3.9	Central Hidroeléctrica Guadalupe III	317
7.3.10	Central Hidroeléctrica Guadalupe IV	318

7.3.11 Central Hidroeléctrica Chivor	319
7.3.12 Central hidroeléctrica Embalse de Salvajina	320
7.3.13 Central hidroeléctrica de Urrá I	321
7.3.14 Central Hidroeléctrica Embalse del Guavio	323
7.3.15 Central Hidroeléctrica Embalse del Muña	324
7.3.16 Centrales Hidroeléctricas Paraíso y La Guaca	326
7.3.17 Central Hidroeléctrica Embalse de Betania	328
7.3.18 Central Hidroeléctrica Embalse de Prado	329
7.3.19 Central Hidroeléctrica Embalse de Anchicayá	330
7.3.20 Central Hidroeléctrica Calima	331
7.3.21 Central Hidroeléctrica Jaguas	333
7.3.22 Central Hidroeléctrica San Carlos	336
7.3.23 Central Hidroeléctrica Miel I	339
7.3.24 Proyecto Hidroeléctrico Río Grande	342
7.3.25 Central Hidroeléctrica La Tasajera	343
7.3.26 Central Hidroeléctrica Niquia	343
7.3.27 Central Hidroeléctrica Herradura	344
7.3.28 Central Hidroeléctrica La Vuelta	344
7.3.29 Central Hidroeléctrica La Ayura	345
7.4 Conclusiones	348
BIBLIOGRAFÍA	351

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Distribución del agua en la tierra	31
Tabla 2 Pendiente del cauce	46
Tabla 3 Cálculos curva hipsométrica subcuena del río Frio	48
Tabla 4 Parámetros físicos	50
Tabla 5 Lecturas planímetro placom kp-90-subcuena río Teusacá	51
Tabla 6 Pendiente de la subcuena del cauce del río Teusacá	53
Tabla 7 Parámetros físicos.	56
Tabla 8 Cálculos para determinar elevación media - cuenca hidrográfica río Tunjuelo	60
Tabla 9 Pendiente media de la cuenca hidrográfica	62
Tabla 10 Variación altitudinal del gradiente vertical de la presión atmosférica en colombia (elaborado por los autores a partir de Eslava (1995))	72
Tabla 11 Tabla psicrométrica	79
Tabla 12 Radiación solar total diaria en el límite de la	

	atmósfera en calorías/cm ² /día	86
Tabla 13	Longitud del día (hemisferio norte) horas	86
Tabla 14	Albedos de diferentes superficies.	87
Tabla 15	Valores de Δ en milibares por grado centígrado	92
Tabla 16	Factores de tanque	93
Tabla 17	Precipitación mensual (mm) para el año 1990, de la estación climatológica n° 2120559 guaymaral de la car	104
Tabla 18	Cálculo de la evaporación potencial y evapotranspiración real, en la cuenca del río Frío (Cundinamarca), durante el año 1990	105
Tabla 19	Temperatura media mensual (°C) para el año 1990, de la estación climatológica n° 2120559 Guaymaral de la CAR	106
Tabla 20	Índice calórico mensual para el año 1990, en la subcuenca del río Frío, Cundinamarca	107
Tabla 21	Cálculo de la evapotranspiración real y potencial por el método de Thornthwaite, para la subcuenca del río Frío (Cundinamarca), durante el año 1990	107
Tabla 22	Ejemplo de polígonos de thiessen	136
Tabla 23	Ejemplo del método de isoyetas	137
Tabla 24	Estaciones CAR en la cuenca del río Frío	140
Tabla 25	Valores totales mensuales de precipitación (mm) de la cuenca de río Frío, estación n° 2120026, Ventalarga (Cundinamarca)	140
Tabla 26	Ejemplo de precipitación media diaria	143
Tabla 27	Ejemplo de precipitación media mensual	144
Tabla 28	Ejemplo Dobles masas	146
Tabla 29	Ejemplo Dobles masas	146
Tabla 30	Valores totales mensuales de precipitación (mm), registrados en el mes de febrero de 2001, en las estaciones pluviométricas de la cuenca del río Frío	149
Tabla 31	Cálculo de la precipitación media por el método de Polígonos de Thiessen	150
Tabla 32	Cálculo de la precipitación media anual por el método de isoyetas	152
Tabla 33	Cálculo de la precipitación media ponderada	152
Tabla 34	Ventajas y desventajas de los métodos de variación espacial de la precipitación	153
Tabla 35	Densidad de la red de pluviómetros, recomendada por la O.M.M. (Pluviómetro por km ²)	153
Tabla 36	Red Hidrológica Nacional	154
Tabla 37	Valores de coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad - duración - frecuencia, IDF, para Colombia	157
Tabla 38	Coeficientes regionales zona Andina	158

Tabla 39	Precipitación máxima anual en 24 horas estación El Batán	159
Tabla 40	Cálculo de intensidad en función de la duración y período de retorno	160
Tabla 41	Estaciones utilizadas	161
Tabla 42	Análisis aforo puente el Darién, río Frío (Chía, Cundinamarca), año 2012	190
Tabla 43	Estaciones limnimétricas del río Frío	194
Tabla 44	Medición del caudal en la cuenca del río Bogotá (Estación la balsa), mediante el método aforo con flotador	194
Tabla 45	Aspectos de la cuenca del río Frío (Cundinamarca)	195
Tabla 46	Fuente diagnóstico y prospectiva de la cuenca del río Frío Cundinamarca.	197
Tabla 47	Valores de caudal medio en la cuenca del río Frío (Cundinamarca), para el año 2004	198
Tabla 48	Datos curva de duración de caudales	200
Tabla 49	Hidrológicos puente La Virginia (CAR)	201
Tabla 50	Caudales máximos en la subcuenca del río Frío (Cundinamarca), con un período de retorno a 100 años	204
Tabla 51	Período de retorno	204
Tabla 52	Valores de caudales para tener en cuenta en la ejecución de un proyecto	205
Tabla 53	Oferta hídrica	207
Tabla 54	Cálculo de la demanda	208
Tabla 55	Análisis de la demanda	208
Tabla 56	“Deterministic method’s calibration” Calibración del Modelo Determinístico	217
Tabla 57	Índice de Thornthwaite	230
Tabla 58	Fórmulas de índice de humedad, índice de aridez y factor de humedad	231
Tabla 59	Criterios y rangos del índice de escasez	232
Tabla 60	Balance de oferta para la subcuenca de río Frío (Cundinamarca)	238
Tabla 61	Índice de escasez subcuenca del río Frío (Cundinamarca)	239
Tabla 62	Estaciones de precipitación, cuenca río Tunjuelito	240
Tabla 63	Área por polígono de Thiessen	243
Tabla 64	Cálculos de precipitación media polígonos de Thiessen	244
Tabla 65	Distribución de caudales y su frecuencia, cuenca río Tunjuelito	245
Tabla 66	Evapotranspiración Potencial	246
Tabla 67	Balance hídrico estación Doña Juana	248
Tabla 68	Resultados de la variación del coeficiente de dispersión en el tiempo, en el río Magdalena	260
Tabla 69	Resumen de los parámetros morfométricos y factores climáticos de la cuenca abastecedora del embalse de San Rafael	303

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1	Agua en la Tierra	26
Figura 2	Etapas del ciclo hidrológico	31
Figura 3	Partes de una cuenca hidrográfica	35
Figura 4	Tipos de hoyas	36
Figura 5	Localización de la subcuenca río Frío	43
Figura 6	Perfil de río Frío	47
Figura 7	Curva hipsométrica río Frío (Cundinamarca)	48
Figura 8	Localización de la subcuenca del río Teusacá	51
Figura 9	Orden de corrientes de la subcuenca del río Teusacá	55
Figura 10	Cuenca hidrográfica río Tunjuelito	57
Figura 11	Partes de la cuenca hidrográfica río Tunjuelito	58
Figura 12A	Para determinar la Elevación Media y Elevación Mediana	61
Figura 12B	Perfil del río Tunjuelito	61
Figura 13	Mapa río Teusacá con curvas de nivel	62
Figura 14	El ciclo del agua	68
Figura 15	Presión atmosférica	69
Figura 16	Humedad absoluta	80
Figura 17	Isolíneas de la evaporación para la subcuenca de río Frío	100
Figura 18	Evapotranspiración real y potencial de la cuenca del río Frío (Cundinamarca)	104
Figura 19	Precipitación	112
Figura 20	Clasificación de las nubes	117
Figura 21	Precipitación orográfica	125
Figura 22	Precipitación convectiva	126
Figura 23	Precipitación por convergencia	126
Figura 24	Frente cálido	127
Figura 25	Frente frío	128
Figura 26	Estaciones pluviométricas dentro de una cuenca	133
Figura 27	Polígonos dentro de una cuenca	135
Figura 28	Método de isoyetas	136
Figura 29	Estimativo de datos faltantes de precipitación	138
Figura 30	Localización de las estaciones pluviométricas en la cuenca del río Frío (Cundinamarca)	139
Figura 31	Histograma de lluvias anuales (estación n° 2120176 Santa Isabel, Cundinamarca)	141
Figura 32	Histograma de lluvias mensuales multianuales (Estación n° 2120176 Santa Isabel, Cundinamarca)	142
Figura 33	Coefficiente pluviométrico	145
Figura 34	Homogeneidad datos pluviométricos estación Santa Isabel	147

Figura 35	Ajuste de los valores de precipitación mediante el análisis doblemente acumulativo	148
Figura 36	Homogeneidad de datos pluviométricos de la Estación Ventalarga	148
Figura 37	Aplicación del método de polígonos de Thiessen en la distribución de la precipitación en la cuenca del río Frío (Cundinamarca)	150
Figura 38	Plano de isoyetas para febrero de 2001 en la cuenca del río Frío (Cundinamarca)	151
Figura 39	Regiones de Colombia para la definición de los parámetros a, b, c y d	157
Figura 40	Localización estación El Batán	158
Figura 41	Curva intensidad frecuencia duración estación El Batán	160
Figura 42	Mapa de estaciones hidrometeorológicas	162
Figura 43	Curva de correlación Doña Juana La Picota	162
Figura 44	Precipitación anual para la estación Doña Juana	163
Figura 45	Mapa de Isoyetas	164
Figura 45A	Precipitación Media Anual	164
Figura 46	Mapa de Isotermas	165
Figura 47	Distribución temporal de la temperatura, estación Doña Juana	166
Figura 48	Distribución temporal de la temperatura, estación La Ramada	166
Figura 49	Curva IFD - 1991-2009 Cachipay	171
Figura 50	Curva IFD - Cachipay 1991-2014	171
Figura 51	Aumento de la intensidad- estación Cachipay	171
Figura 52	Curva IFD - Guamal 1991-2009	172
Figura 53	Curva IFD - Guamal 1991-2014	172
Figura 54	Curva IFD - Guamal 2010-2014 Metodología Estadística	173
Figura 55	Curva IFD - Guamal 2010-2014 Metodología Regional	173
Figura 56	Curva IFD - Delirio 2010-2014 Metodología Estadística	174
Figura 57	Curva IFD - Delirio 2010-2014 Metodología Regional	174
Figura 58	Variación del caudal máximo en la estación de Cachipay microcuenca quebrada La Honda	175
Figura 59	Tipos de vertedero	185
Figura 60	El canal de aforo Parshall	186
Figura 61	Molinete y pesa - Puente Vía Guaymaral - río Bogotá	187
Figura 62	Anchos de franja para el aforo del río Bogotá, método Molinete	187
Figura 63	Sección transversal del río Frío en el sector el Darién (Chía, Cundinamarca)	189
Figura 64	Hidrogramas	192
Figura 65	Red hidrográfica	195
Figura 66	Caudales medios en la cuenca del río Frío, durante el año 2004	198

Figura 67	Caudales medios diarios subcuenca del río Frío para el mes de agosto de 2001	199
Figura 68	Curva de duración de caudales de la subcuenca del río Frío (Cundinamarca)	201
Figura 69	Caudales máximos (1996-2004). Río Frío (Cundinamarca)	202
Figura 70	Análisis de frecuencias - caudales máximos	202
Figura 71	Análisis de frecuencias - caudales mínimos	206
Figura 72	Duración caudales mínimos mensuales	206
Figura 73	Esquema conceptual de la modelización propuesta, utilizando el modelo Hec-Ras 4.1.0	212
Figura 74	Cross sections - sección transversal típica	213
Figura 75	“Water Surface Profiles” perfil de la línea de Nivel o superficie de agua	214
Figura 76	“Flood Surface” superficie de inundación	215
Figura 77	Comportamiento de niveles diarios y pronósticos - estación Las Huertas	219
Figura 78	Balance hídrico	226
Figura 79	Ejemplo de balance hídrico	230
Figura 80	Hidrología para estudios de aprovechamiento	235
Figura 81	Mapa de localización de estaciones	241
Figura 82	Polígonos de Thiessen	242
Figura 83	Mapa de isoyetas anuales cuenca hidrográfica río Tunjuelito	243
Figura 84	Curva de duración de caudales de la estación Cantarrana	245
Figura 85	Relación oxígeno - deuterio	254
Figura 86	Concentración de tritio (UT) En la precipitación de Bogotá	255
Figura 87	Curva de paso del Bromo - 82 por la estación Nariño	258
Figura 88	Curva de paso del Bromo - 82 (estación Puerto Salgar)	259
Figura 89	Curvas de paso del trazador en el río Magdalena	261
Figura 90	Tiempos de tránsito, velocidad y dispersión del trazador en el río Magdalena	261
Figura 91	Mapa de inyección y detección río Frío (Cundinamarca)	263
Figura 92	Curva de paso punto 1 de detección (CPM)	264
Figura 93	Curva de paso punto 2 de detección	264
Figura 94	Porcentaje acumulado en CPM, con el 50% se determina el tiempo de tránsito	265
Figura 95	Embalse El Juncal	279
Figura 96	Localización geográfica proyecto	281
Figura 97	Ubicación de la represa Ranchería	287
Figura 98	Estructura de la represa Ranchería	288
Figura 99	Curva de área - capacidad, embalse del Neusa	293
Figura 100	Curva de área -capacidad, para el embalse del Sisga	296
Figura 101	Embalses del sistema del río Bogotá	327

LISTADO DE FOTOS

Foto 1	Río Teusacá - Cundinamarca	34
Foto 2	Gotas de Rocío	74
Foto 3	Psicrómetro	78
Foto 4	Heliógrafo de Campbell-Stokes	83
Foto 5	Piranómetro	83
Foto 6	Transpiración	88
Foto 7	Tanque Evaporímetro Clase A (U.S. Weather Bureau)	93
Foto 8	Lisímetro	95
Foto 9	Embalse del Neusa	99
Foto 10	Lluvia	113
Foto 11	Nieve	113
Foto 12	Granizo	114
Foto 13	Tormenta	115
Foto 14	Niebla	115
Foto 15	Nubes Cirros	118
Foto 16	Nubes Cirrocúmulos	119
Foto 17	Nubes Cirroestratos	119
Foto 18	Nubes Nimboestratos	120
Foto 19	Nubes Altocúmulos	121
Foto 20	Nubes Altoestratos	121
Foto 21	Nubes Estratos	122
Foto 22	Nubes Estratocúmulos	122
Foto 23	Nubes Cúmulos	123
Foto 24	Nubes Cúmulos Congestus	124
Foto 25	Nubes Cumulonimbos	124
Foto 26	Caseta Meteorológica	129
Foto 27A	Pluviómetro	130
Foto 27B	Pluviógrafo	131
Foto 28	Estación Limnimétrica LM	132
Foto 29	Estación Limnimétrica	132
Foto 30	Caudal salida embalse El Hato Cundinamarca	180
Foto 31		269
Foto 32	Panorámica del embalse La Copa	278
Foto 33	Panorámica Embalse Gachaneca	280
Foto 34	Panorámica Embalse Guacas	282
Foto 35	Embalse del Guájaro	284
Foto 36	Panorámica norte del Embalse El Hato	285
Foto 37	Embalses Matuya y playon Distrito de Riego María La Baja	286
Foto 38	Embalse La Regadera	289

Foto 39 y 40 Espaldón de la Presa y canal abierto para conducción, de La represa La Regadera	290
Foto 41 Panorámica embalse del Neusa	292
Foto 42 Panorámica embalse Sisga	294
Foto 43 Panorámica de la casa de máquinas del embalse del Sisga, con la válvula descargando 3.0 m ³ /s	295
Foto 44 Panorámica del embalse de Chuza	297
Foto 45 Panorámica embalse San Rafael	301
Foto 46 Estación de bombeo del embalse de San Rafael	303
Foto 47 Panorámica del embalse de Tominé	305
Foto 48 Represa Cantarrana	308
Foto 49 Central hidroeléctrica Calderas	312
Foto 50 Embalse Peñol-Troneras	313
Foto 51 Embalse San Lorenzo	316
Foto 52 Central hidroeléctrica Porce II	317
Foto 53 Central hidroeléctrica Guadalupe IV	318
Foto 54 Central hidroeléctrica Chivor	319
Foto 55 Central hidroeléctrica Salvajina	320
Foto 56 Central hidroeléctrica Urrá I	321
Foto 57 Central hidroeléctrica Guavio	323
Foto 58 Central hidroeléctrica del Muña	325
Foto 59 Central hidroeléctrica Betania	328
Foto 60 Central hidroeléctrica embalse de Prado	329
Foto 61 Central hidroeléctrica Alto y Bajo Anchicayá	331
Foto 62 Central hidroeléctrica Calima	332
Foto 63 Central hidroeléctrica Jaguas	333
Foto 64 Central hidroeléctrica San Carlos	337
Foto 65 Central hidroeléctrica La Miel I	340
Foto 66 Central hidroeléctrica La Herradura	344
Foto 67 Central hidroeléctrica La Vuelta	345
Foto 68 Central hidroeléctrica La Vuelta	346
Foto 69 Central hidroeléctrica Ituango	346
Foto 70 Central hidroeléctrica Sogamoso	347



INTRODUCCIÓN

Este libro de Investigación fue posible gracias al convenio vigente CAR-UNIVERSIDAD LIBRE, se encuentra en la línea de Investigación Recurso Hídrico y del Proyecto de Investigación Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Si bien los temas de las investigaciones que recoge esta publicación tienen un corte especialmente técnico, en su concepción y proyección, se enmarcan en lo que se ha venido denominando la “Inclusión de la Dimensión Ambiental”, una perspectiva desde la Educación Ambiental promovida y desarrollada por las Instituciones de Educación Superior. Es así como, los aportes de esta publicación, de forma particular los conducentes a estudiar el cambio climático y en ese marco la gestión del riesgo, buscan contribuir con “integrar al Sistema Nacional Ambiental (SINA) el sistema de ciencia y tecnología, el sistema de prevención y atención de desastres - riesgos y el sistema educativo”, y por esa vía, con un “desarrollo humano sostenible y sustentable” (Vallejo G. 2013. Pág. 141). El objetivo de este documento es aportar herramientas técnicas para la investigación en temas de hidrología y cambio climático, además de mostrar

resultados de algunos estudios de caso desarrollados por la Universidad Libre en estos temas. Para ello se presentan ejemplos de la aplicación de aspectos teóricos y prácticos de la hidrología en diferentes cuencas hidrográficas presentes en la jurisdicción de la CAR, así como los resultados de estudios que se llevaron a cabo en embalses de Colombia.

En el capítulo 1, se describe el ciclo hidrológico, el ciclo natural del agua, las cuencas hidrográficas, aspectos fisiográficos de una cuenca hidrográfica y se aplican estos conceptos a diferentes cuencas hidrográficas, teniendo en cuenta que son una herramienta útil en el estudio básico de hidrología.

En el capítulo 2 se presentan las nociones básicas de hidrometeorología, entre ellas humedad relativa, temperatura, radiación, equipos de medida, transpiración, evaporación, evapotranspiración, balance hídrico y su aplicación a cuencas hidrográficas de la sabana de Bogotá. En este capítulo se muestra la aplicación práctica de dichos conocimientos, con el ingeniero ambiental Juan Antonio Aragón.

En el capítulo 3 se explica el tema de precipitación, formas y formación de la precipitación, aparatos de medida y registro de la precipitación, estaciones hidrológicas, análisis de lluvias sobre un área, utilizando el método de polígonos de Thiessen e isoyetas, importantes para determinar la precipitación media de una cuenca hidrográfica. Posteriormente se presenta la aplicación práctica de las metodologías explicadas en las cuencas hidrográficas, que fueron objeto de estudio de esta investigación, adicionalmente se muestra el método de investigación aplicado para la elaboración de curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF.

En el capítulo 4 se trata el tema de caudales, tipos de caudales, diferentes métodos para medir el caudal, hidrogramas, hidrograma unitario, su aplicación práctica en la cuenca del río Frio, curva de duración de caudales, caudales máximos, caudales mínimos, oferta y demanda hídrica y caudal ecológico. Este estudio de caudales es fundamental en ingeniería, para determinar caudales medios de diseño de acueductos, distritos de riego, centrales hidroeléctricas, obras ambientales de protección de taludes, y caudales máximos para obras hidráulicas de vertederos y obras de excedencia. Adicionalmente se presenta el artículo de investigación, “TIEMPO DE TRANSITO DE CRECIENTE EN LA PARTE ALTA DEL RIO BOGOTA”.

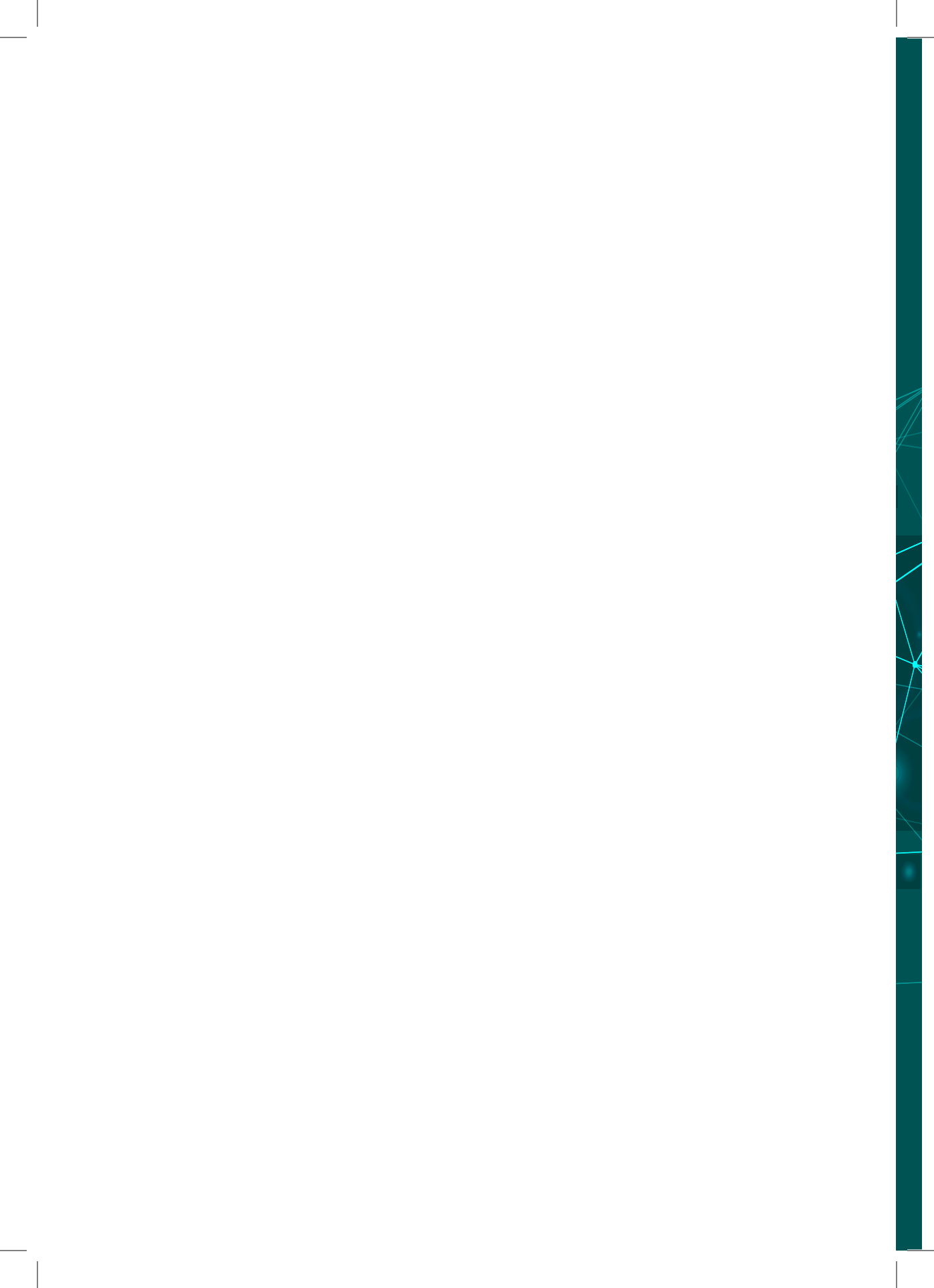
En el capítulo 5, se trata el tema de balance hídrico, que constituye una herramienta técnica para determinar la aptitud agrícola de una región, analizando índice de humedad, índice de escasez, aplicándola en cuencas hidrográficas.

En el capítulo 6 se explica el tema de hidrología isotópica, herramienta tecnológica y científica que se aplica tanto en hidrología subterránea como en hidrología superficial, áreas en las que el grupo TECNOAMBIENTAL ha realizado investigación y desarrollo. En el capítulo se tratan temas como: isótopos estables en agua, determinación del coeficiente de dispersión aplicado a la contaminación en ríos, tomando como ejemplo ríos como el Magdalena y el río Frio. También se explica la investigación realizada en el río Bogotá, en la cual se determinó el tiempo de tránsito, velocidad y caudal en el río Bogotá, adicionalmente se trata el tema de sedimentos, transporte y utilización de sedimentos en ingeniería.

En definitiva este libro de investigación servirá como texto de consulta para futuras investigaciones. Este resultado de investigación fue apoyado por investigaciones realizadas por estudiantes de semillero TECNOAMBIENTAL y auxiliares de investigación dirigidas por el Ingeniero Civil Jesús Ernesto Torres Quintero Magister en Recursos Hidráulicos, especializado en Hidrología Universidad Nacional y con más de 35 años de Experiencia en Consultoría y Construcción en Proyectos de hidrología y Recursos Hidráulicos.

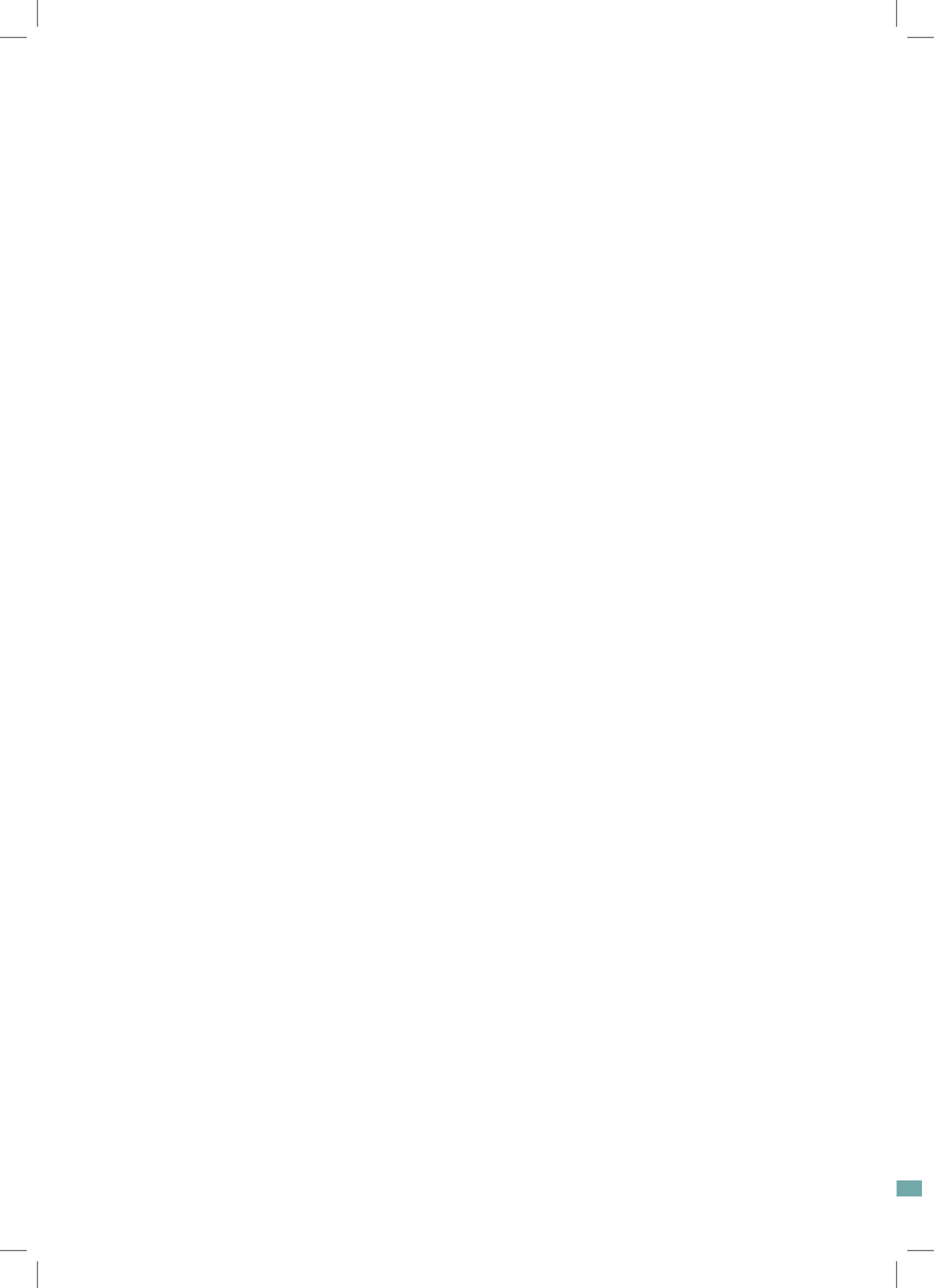
Teniendo en cuenta como ha sido expuesto, que los temas relacionados con el cambio climático y la gestión del riesgo, trascienden la esfera del conocimiento meramente científico a través del sistema educativo, en ese sentido, tanto los auxiliares de investigación adscritos al grupo TECNOAMBIENTAL como los investigadores mismos y los docentes, tendrán con este documento la oportunidad de compartir las experiencias y conocimientos “atendiendo a estrategias nacionales como la Apropiación Social del Conocimiento o de la CTI, la cual << busca promover una apropiación social del conocimiento, entendiendo por ésta un proceso de comprensión e intervención de las relaciones entre tecnociencia y sociedad, construido a partir de la participación activa de los diversos grupos sociales que generan conocimiento>> (Vallejo G.. Pág 42).

Los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), los Proyectos Ciudadanos de Educación Ambiental (PROCEDA), (...) y los Comités Interinstitucionales de Educación Ambiental (CIDEA), constituyen instrumentos de gestión, educación y capacitación” apropiados para tales fines. (Vallejo G. Pág. 151)





CAPÍTULO I
ASPECTOS FISIAGRÁFICOS



INTRODUCCIÓN

Durante su vida sobre la tierra el hombre ha sido testigo, muchas veces sin entenderlo, del desarrollo del ciclo del agua en la naturaleza. La distribución de los climas, formación de las nubes y su inestabilidad, la producción de lluvias, variación de los niveles de los ríos, así como el almacenamiento de agua en depósitos superficiales o subterráneos, son temas en cuyo estudio se ha venido profundizando a lo largo de los años, conformando una rama de la física que se conoce como Hidrología.

La hidrología en su definición más simple, es la ciencia que estudia la distribución, cuantificación y utilización de los recursos hídricos que están disponibles en la Tierra. Estos recursos se distribuyen en la atmósfera, la superficie terrestre y las capas del suelo. Como ha ocurrido con otras ciencias, a medida que los estudios hidrológicos se fueron desarrollando fue necesario dividir el tema general en una serie de temas especializados e interdisciplinarios, que se agruparon bajo el nombre de Planeamiento de los Recursos Hidráulicos. En el planeamiento se incluyen como temas principales la meteorología, la hidrología superficial y la hidrología del agua subterránea.

AGUA

El agua es el compuesto químico más abundante en nuestro planeta, donde resulta indispensable para el desarrollo de la vida. Dicho compuesto es incoloro, inodoro e insípido (en estado puro), su molécula está formada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, presenta elevada polaridad y alta constante dieléctrica, que explican su gran poder como disolvente, en especial de compuestos iónicos y sales covalentes polares. Este poder disolvente facilita un gran número de procesos químicos que únicamente pueden tener lugar en disolución.

Entre otras aplicaciones el agua se emplea en la fabricación de papel, en procesos textiles como: disolvente, refrigerante industrial, en procesos de hidrólisis, en sistemas hidráulicos como fuente de energía y como generadora de vapor, sin contar que el agua constituye entre el 60 y 70% del peso de cada organismo.

Figura 1. Agua en la Tierra.



Fuente: <http://zuleykamercado4681.files.wordpress.com/2007/11/tierra01.jpg>

La Tierra está conformada por masa líquida, principalmente océanos y mares, que cubren aproximadamente 360'650.000 km² de la superficie terrestre (casi las tres cuartas partes), constituyéndose así en la mayor reserva hídrica del globo, con un protagonismo fundamental en la alimentación del

vapor atmosférico, en la regulación térmica del planeta y en los procesos de intercambio de energía.

Las propiedades físicas del agua son: punto de fusión (100°C) y de solidificación (0°C), ambos a la presión de una atmósfera (atm).

Su densidad máxima (1 g/cc) se alcanza a la temperatura de 4°C. El agua es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza, donde existe en sus tres formas: sólido (formando hielo, nieve, escarcha, entre otros), líquida (mares, ríos, lagos y otros) y gaseosa (vapor de agua de la atmósfera).

1. HIDROLOGÍA

Éste término también se define como parte de las ciencias naturales que trata del estudio de las aguas continentales, su existencia, distribución, sus propiedades químicas y físicas, así como su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. Ésta se complementa con ciencias afines como la meteorología (estudio de la atmósfera), la hidrometeorología (estudio del agua en la atmósfera), la hidrogeología (estudio del agua en las rocas), la climatología, la hidráulica, la oceanografía, la estadística y el cálculo de probabilidades.

La hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los recursos hidráulicos y ha llegado a convertirse en parte fundamental de los proyectos de ingeniería que tienen que ver con suministro de agua, disposición de aguas servidas, drenaje, protección contra la acción de ríos y recreación. De otro lado, la integración de la hidrología con la ingeniería de sistemas ha conducido al uso imprescindible del computador en el procesamiento de información existente y en la simulación de ocurrencia de eventos futuros.

1.1 APLICACIONES DE LA HIDROLOGÍA A LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

En el diseño de obras hidráulicas se utilizan frecuentemente modelos matemáticos que representan el comportamiento de toda la cuenca sustentada por la obra en examen.

El correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de un río, arroyo o lago es fundamental para poder establecer las áreas vulnerables a los eventos hidrogeológicos extremos.

En Colombia existe el Instituto de Estudios de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) que hace el seguimiento del comportamiento hidrológico en los principales ríos del país, utilizando información horaria en tiempo real proveniente de las estaciones hidroclimatológicas automáticas, la cual es complementada con los datos suministrados por más de 40 estaciones hidrológicas que transmiten en las primeras horas cada mañana, los 365 días del año. Esta red hidrológica automática del IDEAM está diseñada básicamente para cubrir algunos de los grandes ríos del país, en especial en la cuenca Magdalena-Cauca, su objetivo es contar con los elementos técnicos que permitan alertar a las poblaciones ribereñas sobre la posibilidad de inundaciones.

Además en las cinco vertientes hidrográficas del territorio colombiano, el IDEAM tiene 834 estaciones hidrológicas (389 limnimétricas y 445 limnigráficas), para suministrar datos sobre el régimen hidrológico de los cauces y cuerpos de agua principales, que permiten hacer seguimiento al proceso de la escurrentía en el ciclo hidrológico y a los eventos extremos asociados. Algunos parámetros se observan dos veces al día, como el nivel del río y la concentración de sedimentos.¹

1.1.1 Proyectos que usan el agua

- Fuentes de abastecimiento de agua para uso doméstico o industrial
- Suministro de agua para acueductos.
- Estudio y construcción de obras hidráulicas
- Proyecto de presas.
- Fijación de dimensiones hidráulicas de obras de ingeniería, tales como: puentes y canales.
- Establecimiento de métodos de construcción.
- Drenaje
- Estudio de características del nivel freático.
- Examen de escurrimiento y alimentación natural del nivel freático: precipitación, nivel de agua de las corrientes.
- Irrigación
- Selección de agua necesaria.
- Estudio de evaporación e infiltración.
- Control de inundaciones
- Regulación de los cursos de agua.
- Estudio de las variaciones de caudal y previsión de crecientes máximas.
- Examen de las oscilaciones del nivel de agua y de las áreas de inundación.

1 Informe IDEAM año 2000

- Control de polución
- Análisis de la capacidad de recepción de los cuerpos receptores de afluentes de sistemas de aguas de desecho.
- Control de erosión
- Estudio de la acción erosiva de las aguas y los recursos de protección contra ésta.
- Análisis de intensidad y frecuencia de precipitaciones máximas.

1.2 DIVISIÓN DE LA HIDROLOGÍA

Teniendo en cuenta que cualquier método de clasificación tiene limitaciones, la hidrología puede clasificarse, de acuerdo con la forma de análisis utilizado, así como del uso de los resultados, en las siguientes áreas:

Hidrología cualitativa: cuyo énfasis está dado en la descripción de los procesos. Ejemplos de este tipo de hidrología son la determinación de las formas y causas que dan lugar a un banco de arena en un río, estudio asociado al transporte sólido de los cursos de agua, y también el análisis de la ocurrencia de condensaciones en determinados puntos de una carretera, que afectan la visibilidad y por lo tanto pueden determinar cambios en el trazado de la misma.

Hidrología hidrométrica: o hidrometría, se centra en la medición de las variables hidrológicas. Se basa en trabajos de campo, donde el uso adecuado de los instrumentos de medición, la selección adecuada de los locales en los cuales se hacen las medidas y la correcta interpretación de los resultados, son fundamentales para la calidad de la información recabada.

Hidrología cuantitativa: su énfasis está en el estudio de la distribución temporal de los recursos hídricos en una determinada cuenca. Los instrumentos más utilizados en esta rama de la hidrología son los instrumentos matemáticos, modelos estadísticos y modelos conceptuales.

Hidrología en tiempo real: es la rama más nueva de la hidrología, que se popularizó a partir de los años 1960-1970, con el auge de las redes telemétricas. Cuando se ubican sensores en varios puntos de una cuenca, transmiten en tiempo real los datos a una central operativa donde son analizados inmediatamente para utilizarlos en la toma de decisiones de carácter operativo, como la apertura o cierre de compuertas de una determinada obra hidráulica.

1.3 CICLO HIDROLÓGICO

El agua no es un elemento estático, ella participa de un ciclo permanente llamado ciclo hidrológico. El agua se evapora de la superficie de los océanos y de la tierra firme, se condensa en la atmósfera y cae de regreso al suelo. En tierra firme, una parte de esta precipitación regresa al mar a través de los ríos, parte se evapora nuevamente y el resto se filtra al subsuelo, fluyendo muy lentamente de regreso al mar.

1.3.1 Ciclo natural del agua

El movimiento continuo de agua entre la Tierra y la atmósfera se conoce como ciclo hidrológico. Se produce vapor de agua por evaporación en la superficie terrestre y en las masas de agua, y por transpiración de los seres vivos. Este vapor circula por la atmósfera y precipita en forma de lluvia o nieve.

Al llegar a la superficie terrestre, el agua sigue dos trayectorias, una parte del agua se vierte directamente en los riachuelos y arroyos, de donde pasa a los océanos y a las masas de agua continentales, el resto se infiltra en el suelo, en cantidades determinadas por la intensidad de la lluvia, así como por la porosidad, permeabilidad, grosor y humedad previa del suelo.

La porción de agua que supera las fuerzas de cohesión y adhesión del suelo, se filtra hacia abajo y se acumula en la llamada zona de saturación para formar un depósito de agua subterránea, cuya superficie se conoce como nivel freático. En condiciones normales, el nivel freático crece de forma intermitente según se va rellenando o recargando, y luego declina como consecuencia del drenaje continuo en desagües naturales como son los manantiales.

El volumen total de agua en el globo terrestre es de aproximadamente $1'350.000.000$ de km^3 , valor obtenido en estudios independientes realizados por Ackerman - Lof y R.L.

Dentro del agua dulce no utilizable se encuentran la contenida en glaciares, la humedad atmosférica y el agua contenida en animales, vegetales y minerales, ver tabla 1.

Tabla 1. Distribución del agua en La Tierra.

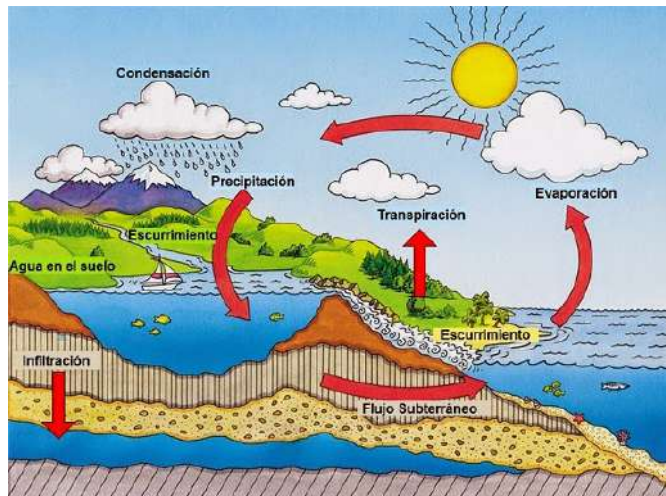
Distribución del agua en la Tierra Agua total en la Tierra (100%)	
Océanos	97.39%
Agua en los polos	0.915%
Agua subterránea <ul style="list-style-type: none"> • Agua dulce (50%) • Agua salina (50%) 	0.763%
Agua en nevados (Glaciares)	0.915%
Agua en lagos <ul style="list-style-type: none"> • Agua dulce (60%) • Agua salina (40%) 	0.0156%
Humedad en el suelo	0.00094%
Agua en la atmósfera	0.0011%
Agua en ríos	0.00002%

Fuente: Monsalve Germán Hidrología para Ingenieros.

1.3.2 Etapas de Ciclo Hidrológico

En la figura 2 se presenta el esquema del ciclo hidrológico, conformado por las siguientes etapas:

Figura 2. Etapas del Ciclo Hidrológico.



Fuente: <http://www.arablog.co/cual-es-el-ciclo-del-agua/>

1.3.2.1 Evaporación (E): las moléculas en la superficie de los cuerpos de agua, energizadas por los rayos solares, se escapan a la atmósfera en forma de vapor.

1.3.2.2 Evapotranspiración (E_T): a través de este proceso, las plantas eliminan su exceso de agua, liberándola en la atmósfera en forma de vapor.

1.3.2.3 Condensación (C): alcanzando las capas más altas y frías de la atmósfera, el vapor del agua se condensa, formando las nubes.

1.3.2.4 Precipitación (P): impulsadas por los vientos alrededor del mundo, las nubes llegan a un punto tal de saturación, que liberan el exceso de agua en forma de lluvia, nieve o granizo.

1.3.2.5 Drenaje (D): parte del agua de lluvia se evapora y regresa a la atmósfera, mientras que otra parte llega a la superficie (alimentando los arroyos y ríos), para finalmente regresar a los lagos y mares de donde se originaron, y participar de un nuevo ciclo.

1.3.2.6 Infiltración/Percolación (I): el agua que no se drenó en la superficie, se infiltra en el subsuelo, alimentando las raíces de las plantas (que la transpiran de regreso a la atmósfera), o se percola por gravedad a través de las fisuras y poros del suelo, y de las rocas con una velocidad de algunos centímetros por día. Eventualmente las capas impermeables forman barreras que impiden que el agua descienda más profundamente en el subsuelo acumulándose en las capas superiores.

1.3.2.7 Agua subterránea (AS): es el agua que llena los poros y las fracturas de las rocas del subsuelo. Se mueve únicamente por gravedad y puede ser captada a través de obras de ingeniería de pozos.

1.3.2.8 Acuífero (A): es un depósito geológico que almacena el agua subterránea. Dependiendo de la litología del acuífero, el agua puede fluir muy lentamente dentro de los poros, a razón de algunos metros por año, terminando finalmente en los ríos, lagos y mares. Un acuífero es llamado freático o libre, cuando la superficie superior de su zona saturada es sometida a la presión atmosférica. Al contrario, un acuífero artesiano no está en contacto con la presión atmosférica.

1.3.2.9 Nivel freático (N.F): es la altura del agua dentro de un acuífero freático y puede ser visto como el nivel hasta donde el agua puede subir dentro de un pozo en este tipo de acuífero.

Debido a la evaporación en el propio suelo y en la superficie de los océanos, lagos y ríos, así como a la transpiración de las plantas, el agua en forma de vapor se eleva en la atmósfera saturando el aire de humedad.

Los vientos desplazan el aire húmedo sobre los continentes, al enfriarse el vapor se condensa dando lugar a la formación de las nubes, la niebla y finalmente a la precipitación en forma de lluvia, nieve o granizo.

El viento es un factor muy influyente en varios procesos hidrometeorológicos, la humedad y el calor se transmiten con facilidad al aire, el cual los transporta y contribuye a adaptar las condiciones térmicas de las superficies con que se pone en contacto.

Del agua que cae sobre la tierra, parte se evapora directamente dependiendo de la temperatura producida por la intensidad de la radiación solar que entra a la superficie terrestre y que está en función de la posición del globo terrestre con respecto al sol, por esto se presentan las diferentes estaciones, los equinoccios y los solsticios.

Otra parte escurre sobre la superficie del terreno (agua superficial o escorrentía), y otra parte más o menos considerable percola en el suelo para convertirse en agua subterránea.

El objeto principal de esta unidad es dar a conocer cada una de las fases del ciclo hidrológico y de los fenómenos que en él intervienen, por lo que se hace necesario tratar los temas que se presentan en el capítulo dos: vientos, atmósfera, las estaciones, temperatura, entre otros.

1.4 CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Son aquellas áreas de la superficie terrestre drenada hacia un único sistema fluvial. Constituyen un colector natural encargado de evacuar el agua proveniente de la lluvia en forma de escurrimiento, aunque también se presentan pérdidas o desplazamientos fuera de la cuenca por causa de la infiltración y de la evapotranspiración. Sus límites están formados por las divisorias de aguas que la separan de zonas adyacentes pertenecientes a otras cuencas.

La cuenca se denomina también hoya hidrográfica, que se define como un área física debidamente delimitada, donde las aguas superficiales y subterráneas vierten a una red natural mediante uno o varios cauces de caudal continuo o intermitente, los cuales confluyen en un río principal, en un depósito natural

de aguas, o directamente al mar, lo cual puede considerarse como un sistema de drenaje, ver Foto 1.

Foto 1. Río Teusacá - Cundinamarca.



Fuente: Ingeniero Gustavo Silva Medina

1.4.1 Inventario Nacional

Con base en el inventario de cuencas hidrográficas, el país se ha dividido en 12 zonas con características hidrológicas representativas. Para cada una de ellas se cuantifican las cuencas de acuerdo con un orden de magnitud. Se consideran como micro cuencas todas aquéllas con una superficie inferior a 10 kilómetros cuadrados, puesto que de ellas depende más del 80 % del agua potable que consume el país, y porque de la disponibilidad del recurso en ellas, depende el desarrollo de la mayoría de los municipios. Se estima que las micro cuencas con extensión menor de 10 km² superan las 700.000, de las cuales el 72 % se encuentran en la vertiente del Amazonas, el 13 % en el Pacífico y en el Atrato, solamente el 15 % corresponde a la zona Andina, y menos del 0.5 % (3.750 micro cuencas) a la alta y media Guajira.²

1.4.2 Características de una cuenca

La delimitación de una cuenca se hace teniendo en cuenta principalmente condiciones de orden topográfico. Las divisorias de aguas que se observan

2 Tomado Informe, IDEAM, 1998

en los mapas permiten separar corrientes de drenaje y áreas aferentes, de tal manera que la cuenca de un río hasta un punto de investigación, está compuesta por la suma de las áreas que drenan hacia la corriente principal y sus tributarios, aguas arriba de la estación.

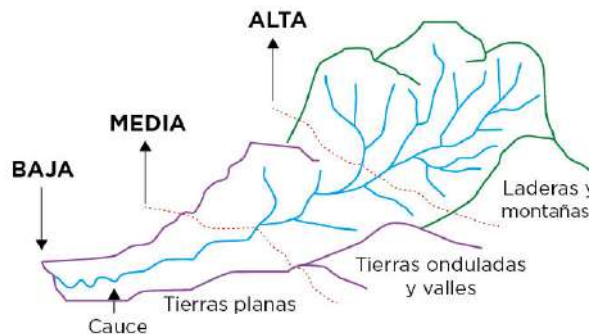
En algunos casos la divisoria topográfica no coincide con la divisoria freática. Ésta fija los contornos del área que contribuyen con agua subterránea en cada vertiente, por lo que se presentan “fugas” de una cuenca a otra.

Las características principales de una cuenca se refieren a aspectos morfológicos y fisiográficos, y a la capacidad de la cuenca para almacenar agua en forma superficial o subterránea (Silva Medina 1998)³.

1.4.3 Aspectos fisiográficos de una cuenca

La cuenca hidrográfica consta de las siguientes partes:

Figura 3. Partes de una cuenca hidrográfica.



Fuente: http://aquabook.agua.gob.ar/378_0

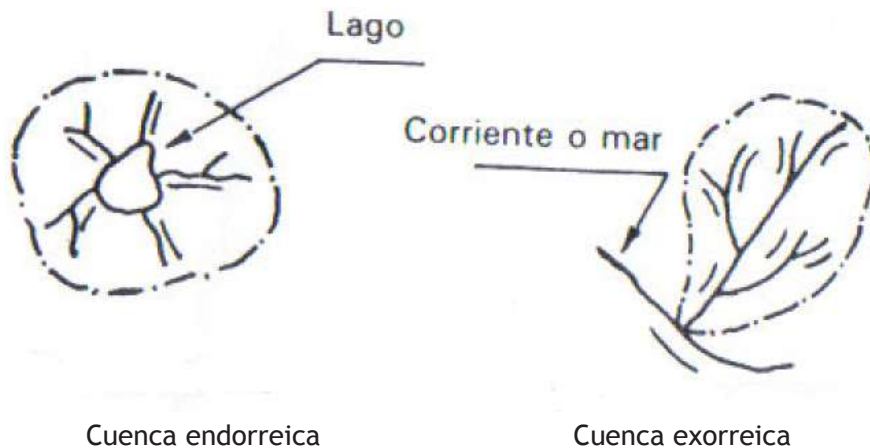
Área de vertimiento: conformada por las partes medias de las montañas, colinas o cerros. En esta zona se pueden apreciar las quebradas y arroyos.

Área de confluencia o zona receptora de agua: conformada por las partes bajas de las montañas. En este sector se unen las quebradas y arroyos en torno a un río principal.

El tamaño y forma de una cuenca viene determinado generalmente por las condiciones geológicas del terreno. El patrón y densidad de las corrientes que drenan este territorio no sólo dependen de su estructura geológica, sino también del relieve de la superficie terrestre, el clima, el tipo de suelo, la vegetación y cada vez en mayor medida, de las repercusiones de la acción humana, por ejemplo la construcción de obras hidráulicas. Desde el punto de vista de la salida del agua de la cuenca, existen fundamentalmente tres tipos de hoya (Figura 3):

- Endorreicas: el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente desembocan en lagos o lagunas.
- Exorreicas: el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar, ver figura 4.
- Arreica: en esta cuenca las aguas se evaporan o se filtran en el terreno. Generalmente no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico.

Figura 4. Tipos de hoyas.



Fuente: Monsalve Sáenz 1995)

1.4.4 Partes de una cuenca

Se pueden distinguir tres partes diferentes:

Recepción o parte alta: llamada también área de capacitación o zona productora de agua conformada por las partes altas de las montañas. En estas zonas es de vital importancia la conservación de los bosques, pues son éstos los reguladores del agua. derrumbes.

Garganta: o área de vertimiento conformada por las partes medias de las montañas, colinas o cerros. En esta zona se pueden apreciar las quebradas y arroyos. a los valles. Presenta el estrechamiento

Valle o lecho: área de confluencia, lecho o zona receptora de agua conformada por las partes bajas de las montañas. En este sector se unen las quebradas y arroyos en torno a un río principal.

La cuenca hidrográfica consta de las siguientes partes:

a. Divisorias de aguas

Son las líneas encargadas de marcar las fronteras de una hoya, a partir de las cuales el agua de escorrentía se encamina de las partes altas hasta los valles. La divisoria une los puntos de altura máxima entre cuencas, los cuales permiten separar corrientes de drenaje y áreas aferentes contiguas a una fuente principal.

Existen dos clases de divisorias:

- Divisoria topográfica: la cual define el área de drenaje de una cuenca y es a la que se hace referencia en esta unidad modular.
- Divisoria freática o subterránea: establece los límites de los embalses de agua subterránea y varía con la posición del nivel freático.

b. Área (A)

El área de una cuenca corresponde a la superficie encerrada por línea divisoria topográfica. Se debe medir con la mayor precisión posible, preferiblemente con planímetro. Sus unidades son kilómetros cuadrados, km².

Existen varios métodos para hallar el área de una cuenca:

b.1) Polígonos: este método consiste en tomar un mapa de la cuenca a una escala preferiblemente de 1:25000 para mayor exactitud.

Se procede luego a dividir en cuadros iguales toda el área de la cuenca y se enumeran los cuadros completos (puesto que la cuenca presenta una forma irregular y es normal que queden fracciones de algunos cuadrados). Posteriormente se unen los segmentos de cuadrados, de forma que se complete un cuadro y este último se agrega a la suma de los cuadros completos ya enumerados.

Para este método se utiliza la siguiente fórmula:

$$AT = \left(\frac{E}{100.000} \right)^2 * N^{\circ} \text{ cuadros} \quad (1.1)$$

Donde

At: Área total de la Cuenca

E: Escala de la cartografía

No. de polígonos formados

b.2) Planimétrico: este método permite hallar el área de la cuenca de forma más fácil que el anterior. En él se utiliza un planímetro digital, cuya lupa se ubica en un punto inicial cualquiera de la cuenca y con ella se recorre el contorno hasta llegar nuevamente al punto inicial. El planímetro se programa a la escala que se encuentra la cartografía y las unidades con las cuales se quiere trabajar.

b.3) Autocad: este método es el más utilizado hoy en día. Es un software que permite calcular el área de la cuenca por medio de coordenadas geográficas que arrojan inmediatamente el valor requerido, de manera más rápida y precisa, comparado con los métodos anteriores. El software de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS también es de amplia aplicación.

c. Perímetro (P)

Éste es la que permite que la precipitación que caiga dentro de ésta se dirija hacia la salida, mientras que cualquier precipitación que cae al exterior de este límite drena a una cuenca y salida diferentes. En algunos casos el límite de la cuenca no se puede determinar con facilidad, por ejemplo cuando la cabecera de la corriente principal está formada en un valle muy plano o muy pantanoso. El perímetro de la cuenca se mide con un curvómetro.

Existen métodos para hallar el perímetro de la Cuenca:

c.1) Por medio de un *curvómetro*, ya que este instrumento permite asemejar la forma de la cuenca, de acuerdo a la cantidad de curvas que ésta posee. De esta manera se va midiendo el perímetro, partiendo de un punto inicial y llegando nuevamente a éste.

d. Longitud de la cuenca (L)

La longitud de una cuenca se determina con la línea de la corriente principal desde el nacimiento del río hasta el punto donde se va a realizar el análisis del

punto a estudiar, teniendo en cuenta las irregularidades y curvas del río. Luego se abscisa de tal modo que la longitud total medida, represente de la mejor manera posible el desarrollo lineal de la corriente. La longitud se calcula con la expresión:

$$L = \frac{W}{A} \quad (1.2)$$

Donde:

W: es el ancho de la cuenca en km.

A: es el área de la cuenca en km²

L: es la longitud de la cuenca en km.

Aplicando los métodos señalados y teniendo en cuenta la escala de la cartografía, se puede hallar la longitud de la siguiente forma:

$$l = \left(\frac{l * EM}{100000} \right) * 1Km^2 \quad (1.3)$$

Donde:

l: longitud real del cauce medio.

EM: Escala de la cartografía.

100000 factores de conversión.

d.1) Forma (F): Representa la geometría de la cuenca, que puede ser redonda, irregular o alargada y es parecida a una hoja. Los siguientes son los factores más usados:

d.2) Factor de forma: Se define como la relación entre el ancho y la longitud de la cuenca.

Donde el factor de forma (F), es adimensional:

$$F = \frac{W}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (1.4)$$

d.3) Índice de compacidad (Kc) Compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia (cuyo círculo tiene la misma área de la hoya en estudio), se calcula con la expresión:

$$K_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\pi r} \quad (1.5)$$

Donde:

K_c : es el índice de compacidad, es adimensional.

P : es el perímetro de la cuenca en km.

P_c : es el perímetro de la circunferencia en km.

R : es el radio de la circunferencia en km que también puede ser expresada con la fórmula como:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1.6)$$

Donde:

r es el radio de la circunferencia en km.

A es el área de la cuenca en km^2 .

Reemplazando la expresión de r en la ecuación (1.5), el índice de compacidad será igual a:

$$K_c = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \Rightarrow K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1.7)$$

Otra opción para asumir el valor del índice de compacidad es según la forma que tiene la cuenca.

Cuencas alargadas: factor de forma (F) es menor que 1 y el índice de compacidad (K_c) es mayor que 1;

Cuencas aproximadamente circulares: factor de forma (F) y (K_c) son cada uno iguales a 1.

d.4) Pendiente del cauce (S) Se refiere a la pendiente de la corriente principal, partiendo de un perfil topográfico del río principal se puede estimar por la siguiente formula:

Por la expresión se tiene:

$$Cauce = \frac{(H_a - H_b)}{L} \quad (1.8)$$

Donde:

Ha = Altura máxima de la longitud del río.

Hb= Cota menos de la longitud del río

L= Longitud del río entre cotas

e. Altura media de la cuenca

Esta característica se determina a partir de la “curva hipsométrica”, que representa la distribución de zonas altas, medias y bajas en la cuenca. Usualmente se emplea en conjunto con los registros pluviométricos para sectorizar zonas de diferente pluviosidad y estimar las relaciones elevación vs pluviosidad en la cuenca. La elevación media de la cuenca corresponde a la cota fijada por la altura del rectángulo que tiene la misma base y la misma área que la curva hipsométrica (Silva Medina 1992).⁴

f. Tiempo de concentración (Tc)

Es el tiempo que demora una gota de lluvia desde la divisoria de aguas hasta la salida de la cuenca, por el camino más largo en forma de flujo superficial. En esta variable influye mucho el cambio de pendiente, pues a medida que ésta aumenta, el tiempo de concentración es menor.

Para estimar el tiempo de concentración en una cuenca los procedimientos más conocidos son:

1. Tomar como medida del tiempo de concentración, el tiempo de ascenso promedio de una serie de hidrogramas observados en la estación de salida. No es una medida muy buena porque su valor se ve afectado por la duración de lluvia en los hidrogramas observados.
2. Usar trazadores como sales, colorantes, radio isótopos, o confetti para medir sobre el terreno los tiempos de viaje desde diferentes sitios de la Cuenca.

4 Gustavo Silva Medina 1992, Hidrología básica.

3. Usar fórmulas empíricas, en cuencas pequeñas y de pendiente fuerte, ha dado buenos resultados y es la fórmula de Ramser Kirpich:

$$T_c = 0.0663 * \left\{ \frac{L}{\sqrt{S}} \right\}^{0.77} \quad (1.9)$$

Donde:

T_c: es el tiempo de concentración en horas.

L: es la longitud de la cuenca en Km. y S es la pendiente del cauce.

g. Orden de corrientes

Es la forma de clasificar los distintos cauces que toman un determinado valor en una hoya, de acuerdo al grado de bifurcación. Este método fue desarrollado a principios de la década de 1940 por el ingeniero hidráulico e hidrólogo americano Robert Horton, quien consideró las corrientes de primer orden como aquéllas que portan aguas de nacimientos y no tienen afluentes. Las de segundo orden son resultado de la unión de dos o más corrientes de primer orden y así sucesivamente.

h. Patrones de Drenaje

Cuando la escorrentía se concentra, la superficie terrestre se erosiona creando un canal. Los canales de drenaje forman una red que recoge las aguas de toda la cuenca y las vierten en un único río que se halla en la desembocadura de la cuenca. El clima y el relieve del suelo influyen en el patrón de la red, pero la estructura geológica subyacente suele ser el factor más relevante.

La clasificación de los principales patrones incluye las siguientes: redes: dendríticas (en forma de árbol), enrejadas, paralelas, rectangulares, radiales y anulares.

Las cuencas tienen diferentes características fisiográficas que afectan su respuesta.

1.5 INVESTIGACION DE LOS ASPECTOS FISIGRÁFICOS EN ALGUNAS CUENCAS Y RÍOS COLOMBIANOS

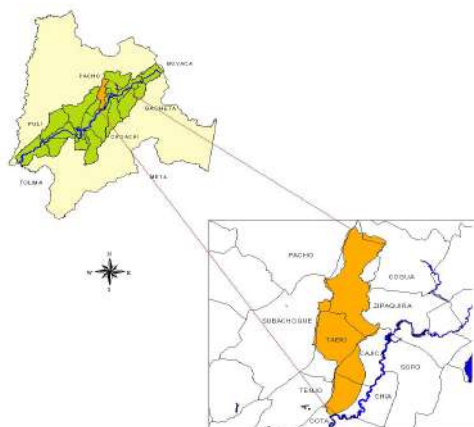
1.5.1 Zona de estudio cuenca de río Frío (Cundinamarca)

La subcuenca del río Frío pertenece a la cuenca alta del río Bogotá, se encuentra localizada en el centro oriente de la Sabana de Bogotá, dentro de los $4^{\circ} 50'$ y $5^{\circ} 10'$ de latitud Norte y $74^{\circ} 01'$ y $74^{\circ} 07'$ de longitud Oeste, entre 3700 y 2550 m de altitud. Presenta relieves montañosos, ondulados a fuertemente quebrados, con clima frío húmedo, temperatura promedio de 12°C , precipitación y evaporación media de 800 mm con una distribución de tipo bimodal.

El río Frío nace en Zipaquirá en el Cerro Carrasposo, en la región denominada “Páramo de Guerrero” y muere en el río Bogotá en el sitio denominado la Balsa, en jurisdicción del Municipio de Chía, luego de recorrer una longitud de 65 km. Limita al Oriente con la Cuchilla “Cerros de la Calera” cuya máxima altura es 3670 msnm y en donde se originan las quebradas Guerrero, El Alisal y la Tomita, tributarios del río Frío. Al Occidente limita con la cuchilla El Páramo o Torre de los Indios, en donde se originan las quebradas Rodamonte y Guamal, entre los tributarios más importantes del río Frío.

Comprende parcialmente los municipios de Tabio, Cajica, Zipaquirá y Chía y en menor proporción los municipios de Tenjo, Cogua, Pacho, Cota y Subachoque, albergando en todo su área a 78.710 habitantes. En la zona se presenta erosión de tipo antrópico debido a la deforestación, el uso del suelo para cultivos y las actividades mineras (ver figura 5).

Figura 5. Localización de la subcuenca río Frío.



Fuente: Autor

Para hacer los análisis de los parámetros físicos de la Subcuenca de río Frío, se trabajó con las cartas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi N° 228-1-A/78, 228-1-C/89, 227-11-B/78, 227-11-D/78, escala 1:250.000. A continuación se presentan los métodos utilizados para medir las diferentes variables analizadas.

a. Área

- Método de Polígonos

- Utilizando la ecuación 1.1

$$AT = \left(\frac{E}{100.000} \right)^2 * N^o \text{ cuadros} \quad (1.1)$$

Donde:

AT: Área total en km²

E: Escala de la carta (100000) de la cuenca de río Frío (Cundinamarca).

100.000: constante para expresar unidades en km²

No de cuadros= 197

$$AT = \left(\frac{100.000}{100.000} \right)^2 * 197$$

$$AT = 197 \text{ Km}^2$$

Con este método se encontró que el área de la cuenca es de 197 km², Método planimétrico

Se tomó cartografía del río Frío a escala 1:100.000 y se hicieron cuatro lecturas con el planímetro digital PLACOM KP-90, para determinar el promedio del área total de la subcuenca, resultados que se presentan en la tabla 2.

Por medio de este método se obtuvo un área total de 209 km².

b. Perímetro

Esta variable se calculó con los métodos expuestos en el punto 1.4.5 (métodos del curvímetro):

Longitud medida por el curvímeter (ecuación 1.2)

$$P = \left(\frac{97 \text{ cm} * 100000}{100000} \right) * 1 \text{ Km}$$

$$P = 97 \text{ km}$$

c. Longitud

Aplicando los métodos anteriormente nombrados, trabajando manualmente con la escala de la cartografía, se puede hallar longitud de la siguiente forma:

Utilizando la ecuación 1.3

$$l = \left(\frac{56 \text{ cm} * 100000}{100000} \right) * 1 \text{ Km}$$

$$l = 56 \text{ km}$$

d. Factor de forma

Utilizando la ecuación 1.4

$$F = \frac{202}{56^2}$$

$$F = 0.06$$

e. Índice de compacidad

Utilizando la ecuación 1.5

$$Kc = 0.28 \frac{95 \text{ km}}{\sqrt{202 \text{ km}^2}}$$

$$Kc = 1.83$$

Teniendo en cuenta que el factor de forma (F) es menor que 1 y el índice de compacidad (Kc) es mayor que 1, la subcuenca de río Frío es alargada.

f. Pendiente del cauce

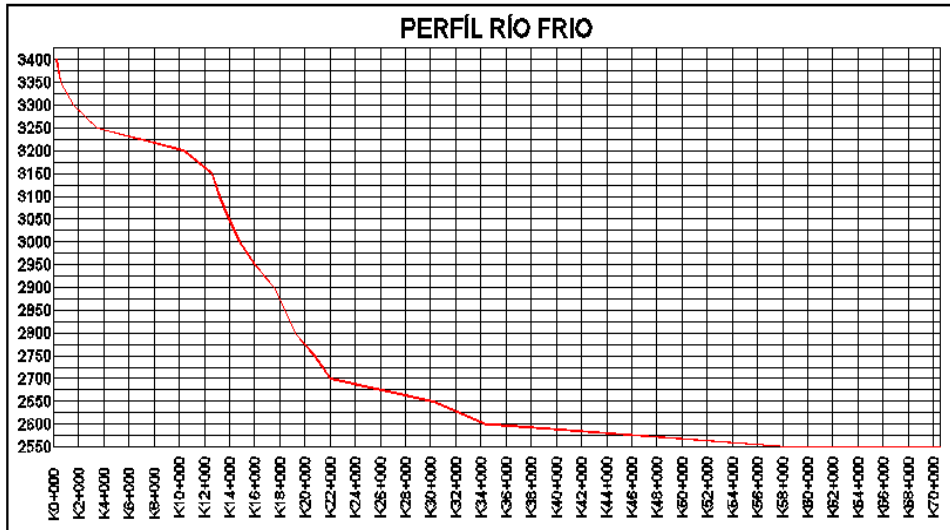
En la tabla 2 se presenta los cálculos para determinar la pendiente del cauce de la subcuenca del río Frío y perfil de la subcuenca del río Frío (ver figura 6).

Tabla 2. Pendiente del cauce.

Abcisas	Cota Inicial msnm	Cota Final msnm	Diferencia de nivel (m)	Longitud Parcial m	Pendientes parciales
K0+000	2.552,00	2.546,60	5,40	500,5418	0,01078831
K0+500	2.546,60	2.545,18	1,42	499,761	0,00284136
K1+000	2.545,18	2.545,23	-0,05	498,447	-0,00010031
K1+500	2.545,23	2.545,00	0,23	498,7364	0,00046117
K2+000	2.545,00	2.545,00	0,00	504,4123	0
K2+500	2.545,00	2.544,82	0,18	498,2627	0,00036126
K3+000	2.544,82	2.544,52	0,30	50,0565	0,00599323
K3+500	2.544,52	2.544,50	0,02	499,5312	4,0038E-05
K4+000	2.544,50	2.544,00	0,50	252,3652	0,00198126
K4+250	2.544,00	2.544,00	0,00	304,7535	0
K4+557,31	2.544,00	2.544,00	0,00		
PROMEDIO PENDIENTE					0,0223663
Pendiente Total Río					
Long río	4.557,31				
Cota Inicial	2.552,00				
Cota Final	2.544,00				
Pendiente Total Río	0,0175542 m/m				

Fuente: Autores.

Figura 6. Perfil de río Frío.



Fuente: Autores.

g. Pendiente de la cuenca

Se presentan dos zonas de relieve plano a ligeramente inclinado: la primera localizada en la parte norte de la subcuenca aledaña al cauce del río Frío y la segunda ubicada en la parte sur de la hacia la confluencia con el río Bogotá. Sobre esta última se ubica la zona urbana de la cabecera municipal de Chía.

Las zonas de relieve ondulado e inclinado constituyen el 13,1% del área y se localizan predominantemente en la parte central de la subcuenca sobre el piedemonte, en dirección nor-oriental, paralela a la dirección de drenaje del río Frío, en la tabla 3 se presenta el cálculo de la curva hipsométrica de la subcuenca del río Frío y en figura 7 se presenta la curva hipsométrica.

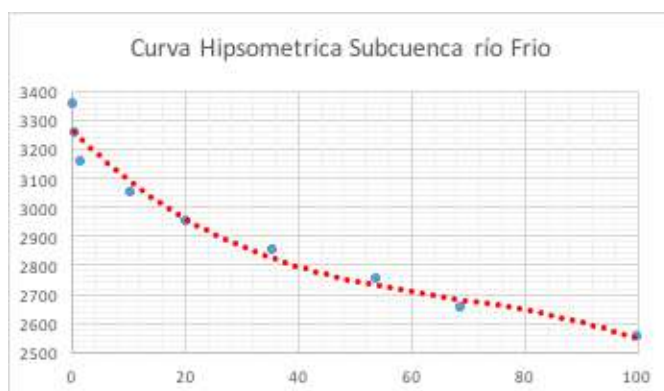
Tabla 3. Cálculos curva hipsométrica subcuenca del río Frio.

CURVA HIPSONOMETRICA						
“(1)”	“(2)”	“(3)”	“(4)”	“(5)”	“(6)”	“(7)”
Cotas intervalos de clases (msnm)	Cota media del intervalo (msnm)	A (km ²)	A acumulada (km ²)	Porcentaje de Área (%)	Porcentaje acumulado de A (%)	columna 2 X columna 3
3.400 - 3.300	3.350	0,5	0,5	0,23	0,23	1.675
3.300 - 3.200	3.250	1	1,5	0,45	0,68	3.250
3.200 - 3.100	3.150	2,5	4	1,13	1,81	7.875
3.100 - 3.000	3.050	19,25	23,25	8,67	10,48	5.8712,5
3.000 - 2.900	2.950	22	45,25	9,91	20,39	64.900
2.900 - 2.800	2.850	34	79,25	15,32	35,70	96.900
2.800 - 2.700	2.750	40,25	119,5	18,13	53,83	110.687,5
2.700 - 2.600	2.650	33,25	152,75	14,98	68,81	88.112,5
2.600 - 2.500	2.550	69,25	222	31,19	100,00	176.587,5
TOTAL	-	222	-	100,00		608.700

Fuente: Estudios hidrológicos y ambientales aplicables a la cuenca del río Frio y/o cuencas de interés en Colombia.

La curva hipsométrica, ver figura 7, se dibuja graficando la columna 2 y la columna 6, la elevación mediana es: 2740 msnm, entrando con el 50% del porcentaje acumulado del *área*.

Figura 7. Curva hipsométrica río Frio- Cundinamarca.



Fuente: Autores.

h. Tiempo de concentración

$$T_c = 0.0663 * \left\{ \frac{L}{\sqrt{S}} \right\}^{0.77} \quad (1.9)$$

$$T_c = 0.0663 * \left(\frac{56km}{0.017} \right)^{0.77}$$

$$T_c = 4.34hr$$

Es decir que una gota de agua tarda 4.34 horas en recorrer la longitud del cauce de la subcuenca de río Frío Cundinamarca.

i. Orden de corrientes

La subcuenca del río Frío presenta hasta el grado 4° la corriente más alta o de mayor caudal, justamente en la desembocadura sobre el río Bogotá.

j. Densidad de Drenaje

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (1.10)$$

$$Dd = \frac{35Km}{202Km^2}$$

$$Dd = 0.16km / km^2$$

Resultados

En la tabla 4 se presentan los principales resultados de la investigación en la subcuenca hidrográfica del río Frío.

Tabla 4. Parámetros físicos.

PARÁMETRO		UNIDAD
Área	202	km ²
Longitud del cauce	56	km
Perímetro de la cuenca	100	km
Pendiente media cauce	0.017	%
Pendiente de la Cuenca	0.02	%
Factor de forma (Kf)	0.35	
Tiempo de concentración	4.34	horas

Fuente: Proyecto de grado "Estudios hidrológicos y ambientales aplicables a la cuenca del río Frío y/o cuencas de interés en Colombia.

1.5.2 Investigación de los aspectos fisiográficos en la Subcuenca del río Teusacá (Cundinamarca)

La subcuenca del río Teusacá pertenece a la cuenca alta del río Bogotá, se encuentra localizada en el páramo del Verjón a 3.650 msnm y baja por el valle que lleva su nombre en dirección norte.

El comportamiento de la hidrología se encuentra determinado por el régimen de precipitación media de la subcuenca (917.58) y es de tipo bimodal (invierno-verano), caracterizado por dos períodos de lluvias, de marzo a junio y de octubre a diciembre.

Recoge las aguas de las quebradas Farías, La Esperanza, El Amoladero, El Verjón, Tembladores, Centella, Barro Blanco, Barritos, El Coral, El Juncal, El León, Santos, Las Lajitas, Laguna Seca, Gallinas, Los Montes, La Carolina y Raizal. Esta subcuenca es de vital importancia para los capitalinos pues alimenta al embalse de San Rafael.

En la Figura 8 se presenta la localización la subcuenca río Teusacá.

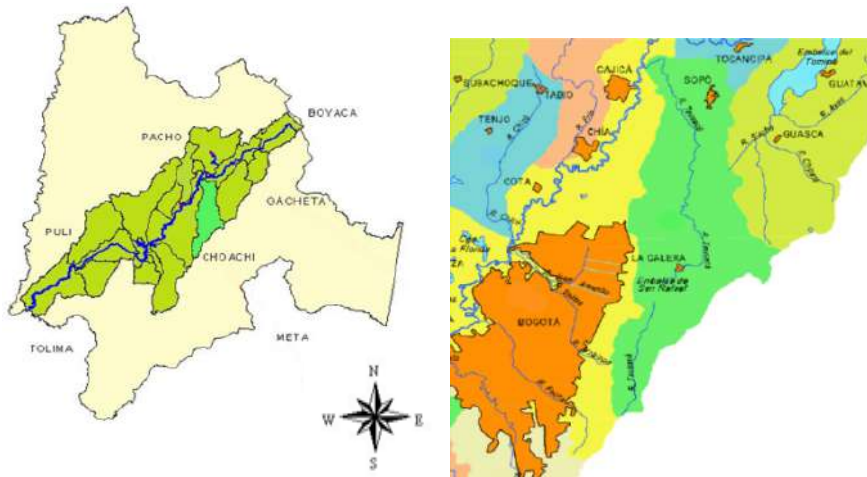
a. Área

- Método de Polígonos

$$AT = 351Km^2$$

Según el método por polígonos el área sería de 351 km², lo cual indica que este método no es de precisión pero sí se estima de una manera aproximada el área total de la subcuenca.

Figura 8. Localización de la subcuenca del río Teusacá.



Fuente: Elaboración propia.

- Método planímetro

Se tomó cartografía del río Teusacá, a escala 1:100.000 y se realizaron tres lecturas con el planímetro digital PLACOM KP-90, para determinar el promedio del área total de la subcuenca.

Tabla 5. Lecturas planímetro PLACOM KP-90-Subcuenca río Teusacá.

No. Lectura	Datos
1	359.4
2	357.6
3	360.8
Promedio	359.3

Fuente: Autores.

Por medio de este método se obtuvo un área promedio total de 359.3 km², ver tabla 5.

b. Perímetro

Se procede a realizar el mismo procedimiento para hallar el perímetro.

- Método del curvímetero
 - Longitud medida por el curvímetero: utilizando la ecuación 1.2

$$P = \left(\frac{115cm * 100000}{100000} \right) * 1 Km$$

$$P = 115 km$$

c. Longitud

Aplicando los métodos anteriormente nombrados, trabajando manualmente con la escala de la cartografía, se puede hallar la longitud como se muestra a continuación:

- Utilizando la ecuación 1.3

$$l = \left(\frac{72cm * 100000}{100000} \right) * 1 Km$$

$$l = 72 km$$

d. Factor de forma

- Utilizando la ecuación 1.4

$$F = \frac{W}{L} = \frac{A}{L^2}$$

$$F = \frac{356.18 km^2}{(72 km)^2}$$

$$F = 0.068$$

e. Índice de compacidad

- Utilizando la ecuación 1.5

$$K_c = 0.28 \frac{119.37 \text{ km}}{\sqrt{356.18 \text{ km}^2}}$$

$$K_c = 1.78$$

Los valores obtenidos para el factor forma ($F < 1$) y para el índice de compacidad ($K_c > 1$) indican que la subcuenca del río Teusacá es alargada.

f. Pendiente del cauce

En la Tabla 6 se presenta el cálculo de la pendiente del cauce del río Teusca

Tabla 6. Pendiente de la subcuenca del cauce del río Teusacá.

Pendiente Total Cauce (m)	
Longitud del cauce	7.200,00
Cota inicial	2.600,00
Cota final	2.480,00
Pendiente Total Río m/m	0,01666

Fuente: Autores.

g. Pendiente de la cuenca

En la cuenca del río Teusacá (oriente de los Cerros Orientales), se observa una concentración de zonas de estabilidad baja y muy baja, asociadas principalmente a la alta densidad de drenaje y a la presencia de rocas arenarcillosas.

Esta subcuenca se encuentra en el interior de elevaciones alargadas en sentido norte-sur, que hacen parte de la cuenca del río Bogotá.

Su relieve es muy variado, por lo tanto presenta pendientes de diferentes valores que indican relieves ligeramente inclinados y ondulados, ondulados e inclinados, fuertemente ondulados e inclinados y muy escarpados.

$$S = \frac{DL_L}{A} \quad (1.11)$$

S = Pendiente promedio de toda la cuenca, adimensional.

A = Área total de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

D = Diferencia de cotas promedio entre las curvas de nivel, en kilómetros.

L_L = Longitud total de todas las curvas de nivel en la cuenca, en kilómetros.

Es decir que, midiendo la longitud total de todas las curvas de nivel, el área de drenaje y la diferencia consecutiva de cota entre curvas de nivel se puede hallar la pendiente promedio ponderada de una cuenca determinada.

$$S = \frac{(0.100Km)(402.8Km)}{356.18Km^2} = 0.11 \cong 11\%$$

El resultado obtenido de la pendiente de la cuenca es de 11%.

h. Tiempo de concentración

- Utilizando la ecuación 1.9:

$$T_c = 0.0663 * \left\{ \frac{L}{\sqrt{S}} \right\}^{0.77} \quad (1.9)$$

$$T_c = 0.0663 * \left\{ \frac{72km}{\sqrt{0.016}} \right\}^{0.77}$$

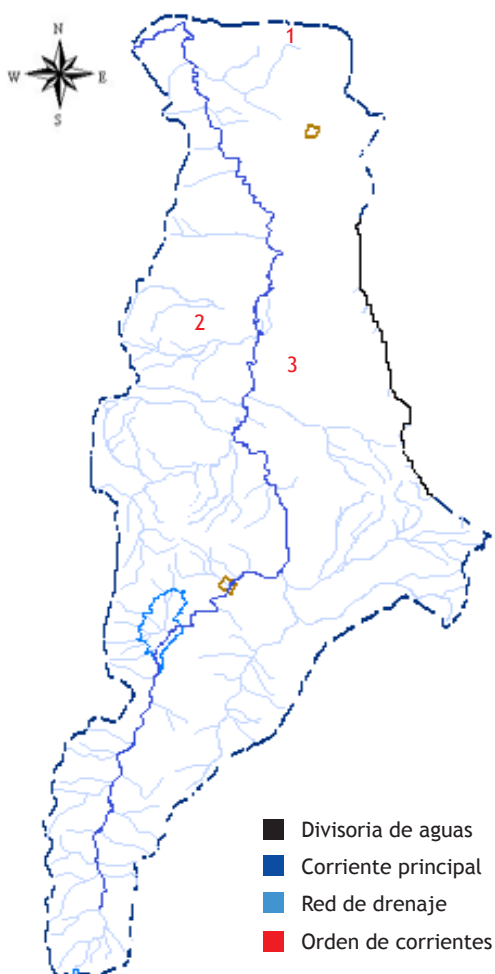
$$T_c = 8.77hr$$

Es decir que éste es el tiempo que toma una gota de agua en recorrer la longitud del cauce de la Subcuenca Teusacá.

i. Orden de corrientes

La Subcuenca del río Teusacá presenta un grado de ramificación en el cual se incluyen corrientes de primer, segundo y tercer orden respectivamente (ver figura 9).

Figura 9. Orden de corrientes de la subcuenca del río Teusacá.



Fuente: Autores.

j. Patrones de drenaje

- Densidad de drenaje

- Utilizando la ecuación 1.10

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (1.10)$$

$$Dd = \frac{329.54Km}{356.18Km^2}$$

$$Dd = 0.92km/km^2$$

Este resultado indica que la subcuenca del río Teusacá tiene un drenaje aceptable, debido a que está dentro del rango de 0.5 (cuencas con drenaje pobre) a 3,5 (cuencas bien drenadas) km/km², en la Tabla 7 se presentan resultados de investigación en relación a los parámetros físicos de la subcuenca del río Teusaca.

Tabla de resultados de la investigación:

Tabla 7. Parámetros físicos.

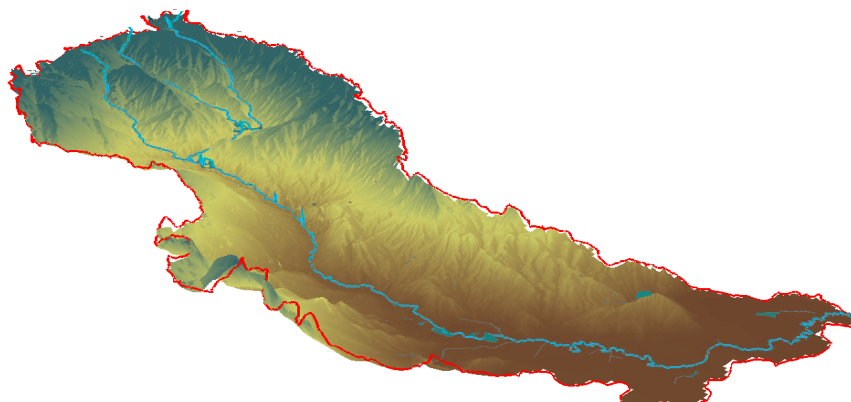
PARÁMETRO		UNIDAD
Área	356.18	km ²
Longitud del cauce	72	km
Perímetro de la cuenca	119.37	km
Pendiente media cauce	0.016	%
Pendiente de la Cuenca	0.11	%
Factor de forma (Kf)	0.068	
Tiempo de concentración	8.77	horas

Fuente: Autores.

1.5.4 Investigación en estudio hidrológico río Tunjuelito

Estudiantes: Lizeth Vanegas, Assiel Pérez Romo y Ernesto Torres Quintero

Figura 10. Cuenca hidrográfica río Tunjuelito.



Fuente: Lizeth Vanegas y Assiel Pérez Romo, editado autor.

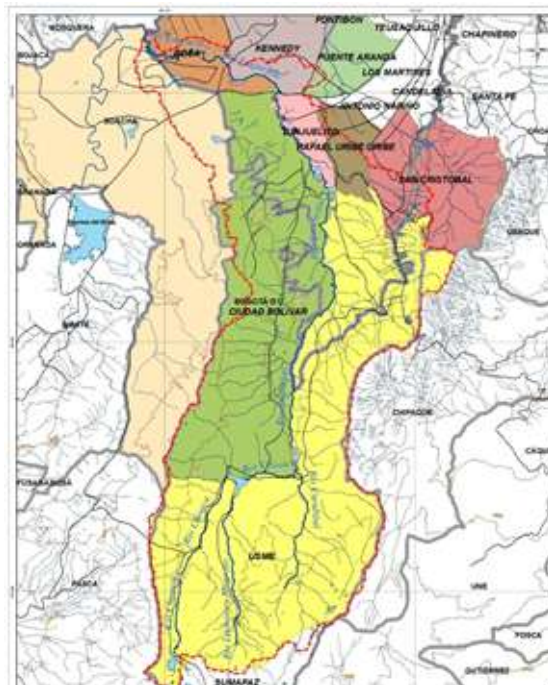
La cuenca del río Tunjuelito abarca las localidades de Usme, Tunjuelo, Ciudad Bolívar, San Cristóbal, Rafael Uribe, Bosa, Kennedy y Sumapaz. El cauce principal nace en la laguna de Los Tunjos o Chisacá, en el páramo de Sumapaz, está formado por los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital, y se conecta al río Bogotá, a una altitud de 2543 m. El área de la cuenca es de 409,9 km², su perímetro es de 129,65 km, la longitud del cauce principal es de 70.172 km, mientras que la longitud total de drenajes en la cuenca es de 1461,22 km, ver Figura 10.

a. División de la cuenca

La parte alta y media está formada por territorios rurales de páramo, ricos en agua y biodiversidad, por lo que constituyen una zona de preservación y protección ambiental. La cuenca baja está conformada por suelo urbano.

Cuenca alta: localizada entre la Laguna de los Tunjos y el Embalse la Regadera. En esta cuenca se encuentran los ríos Chisacá y Mugroso, que descienden de la Laguna de los Tunjos, en el Páramos de Sumapaz y alimentan el Embalse Chisacá la confluencia de los ríos forman el río Tunjuelo, ver Figura 11.

Figura 11. Partes de la cuenca hidrográfica río Tunjuelito.



Fuente: Elaboración propia.

- Cuenca media cuenca hidrográfica río Tunjuelito:

Hace parte del área rural del Distrito y va desde el embalse La Regadera hasta la zona de canteras donde se realiza extracción de arenas, gravas, areniscas y arcillas. En esta parte de la cuenca está ubicado el Relleno Sanitario Doña Juana en Ciudad Bolívar.

- Cuenca baja cuenca hidrográfica río Tunjuelito:

Comprendida entre la zona de canteras y la desembocadura del río Tunjuelo, en el río Bogotá. La mayor proporción de esta cuenca se encuentra poblada

b. Forma

- Factor de forma



Factor de Forma: 0.0083

$$k_f = \frac{A}{L^2} = 0.083 \quad \text{Muy Alargada} \quad (1.4)$$

- Factor de compacidad

$$k_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 1.60 \quad \text{Oval Oblonga a Rectangular} \quad (1.5)$$

c. Elevación media de la cuenca hidrográfica

Para determinar la pendiente media de la cuenca hidrográfica, se realiza la tabla 8 en donde se determina las áreas entre las curvas de nivel, la elevación media es el promedio de las curvas de nivel, posteriormente se determina la elevación media.

- Determinación de Elevación media:

$$E_m = \frac{\sum A_i * e_i}{A_{total}} = 3,138.64 \quad (1.12)$$

Tabla 8. Cálculos para determinar ELEVACIÓN MEDIA - Cuenca Hidrográfica río Tunjuelo.

Curvas de Nivel	ei Elevación promedio (m)	Ai Área entre curvas (km ²)	% de Área sobre la curva de nivel inferior	ei - Ai
2550 - 2600	2,575	50,48	100.00%	129,979.45
2600 - 2650	2,625	11,80	87.67%	29,669.40
2650 - 2700	2,675	11,79	84.91%	31,584.67
2700 - 2750	2,725	13,66	82.03%	37,220.47
2750 - 2800	2,775	12,27	78.69%	34,038.88
2800 - 2850	2,825	12,19	75.69%	34,449.61
2850 - 2900	2,875	13,16	72.71%	37,843.85
2900 - 2950	2,925	13,90	69.50%	40,658.83
2950 - 3000	2,975	14,49	66.10%	43,111.98
3000 - 3050	3,025	17,59	62.56%	53,215.31
3050 - 3100	3,075	16,89	58.26%	51,929.45
3100 - 3150	3,125	17,27	54.14%	53,989.51
3150 - 3200	3,175	17,29	49.92%	54,911.16
3200 - 3250	3,225	15,64	45.69%	50,424.12
3250 - 3300	3,275	17,37	41.87%	56,887.31
3300 - 3350	3,325	19,76	37.63%	65,685.64
3350 - 3400	3,375	18,19	32.80%	61,387.20
3400 - 3450	3,425	15,98	28.36%	54,743.36
3450 - 3500	3,475	14,56	24.46%	50,586.74
3500 - 3550	3,525	12,52	20.90%	44,137.41
3550 - 3600	3,575	13,27	17.84%	47,457.33
3600 - 3650	3,625	16,43	14.60%	59,543.49
3650 - 3700	3,675	15,71	10.58%	57,746.80
3700 - 3750	3,725	16,21	6.75%	60,390.25
3750 - 3800	3,775	8,06	2.79%	30,444.13
3800 - 3850	3,825	3,34	0.81%	12,756.64
	Σ	409,32		1,284,715.98

Fuente: Autor.

En la Figura 12 se presenta el perfil de la subcuenca del río Tunjuelito, donde se observan que varían entre la cota mayor 3850 msnm y la cota menor 2550 msnm, en el perfil se puede determinar tres pendientes del cauce, la

pendiente en la parte alta de la subcuenca m1, es de 0.464 m/m o 46.4%, la pendiente media m2 es de 0,275 m/m o 27.5% y la pendiente en la parte baja de la subcuenca hidrográfica del río Tunjuelito m3 es de 0.027 m/m o 2.7%.

Figura 12A. Para determinar la Elevación Media y Elevación Mediana.

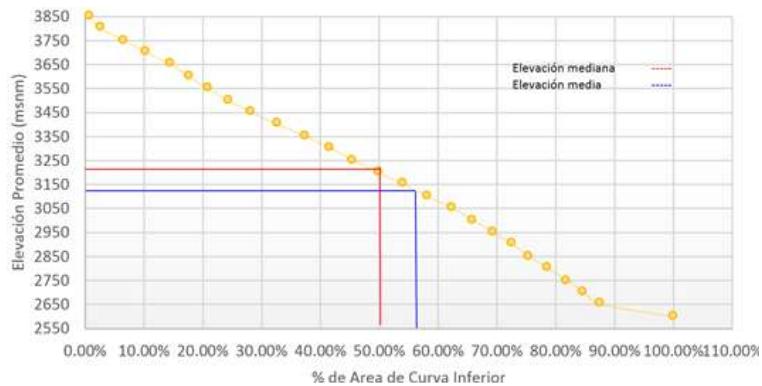
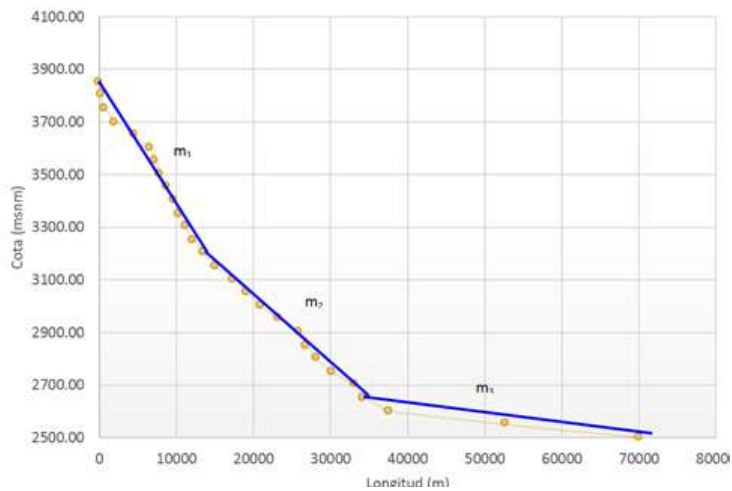


Figura 12B. Perfil del río Tunjuelito.

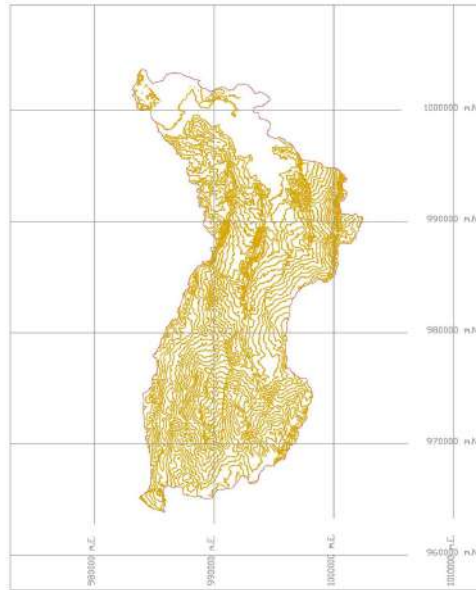


Fuente: Autor.

d. Pendiente media de la cuenca hidrográfica:

En el mapa (figura 13) se observan curvas de nivel y cuadrícula para determinar la pendiente media de la cuenca hidrográfica por el método de Horton.

Figura 13. Mapa río Teusacá con curvas de nivel.



Fuente: Autor.

En la tabla 9 se presentan los cálculos de la pendiente media de cuenca hidrográfica de la subcuenca del río Tunjuelito por el método de Horton.

Tabla 9. Pendiente media de la cuenca hidrográfica.

Horizontales	Nx	Lx	Verticales	Ny	Ly
970000	41	8628.5964	990000	96	36330.1844
980000	33	13251.6826	1000000	28	9699.6897
990000	50	10093.5714			
1000000	7	12287.8117			

Fuente Autor

$$N = N_x + N_y \quad N = 255$$

$$L = L_x + L_y \quad L = 90291.54$$

$$S_m = \frac{N * D * \sec \Theta}{L} = 0.2217 \frac{m}{n} \quad (1.13)$$

e. Sistema de Drenaje

$$Dd = \frac{L}{A} = 3,57 \frac{km}{km^2}$$

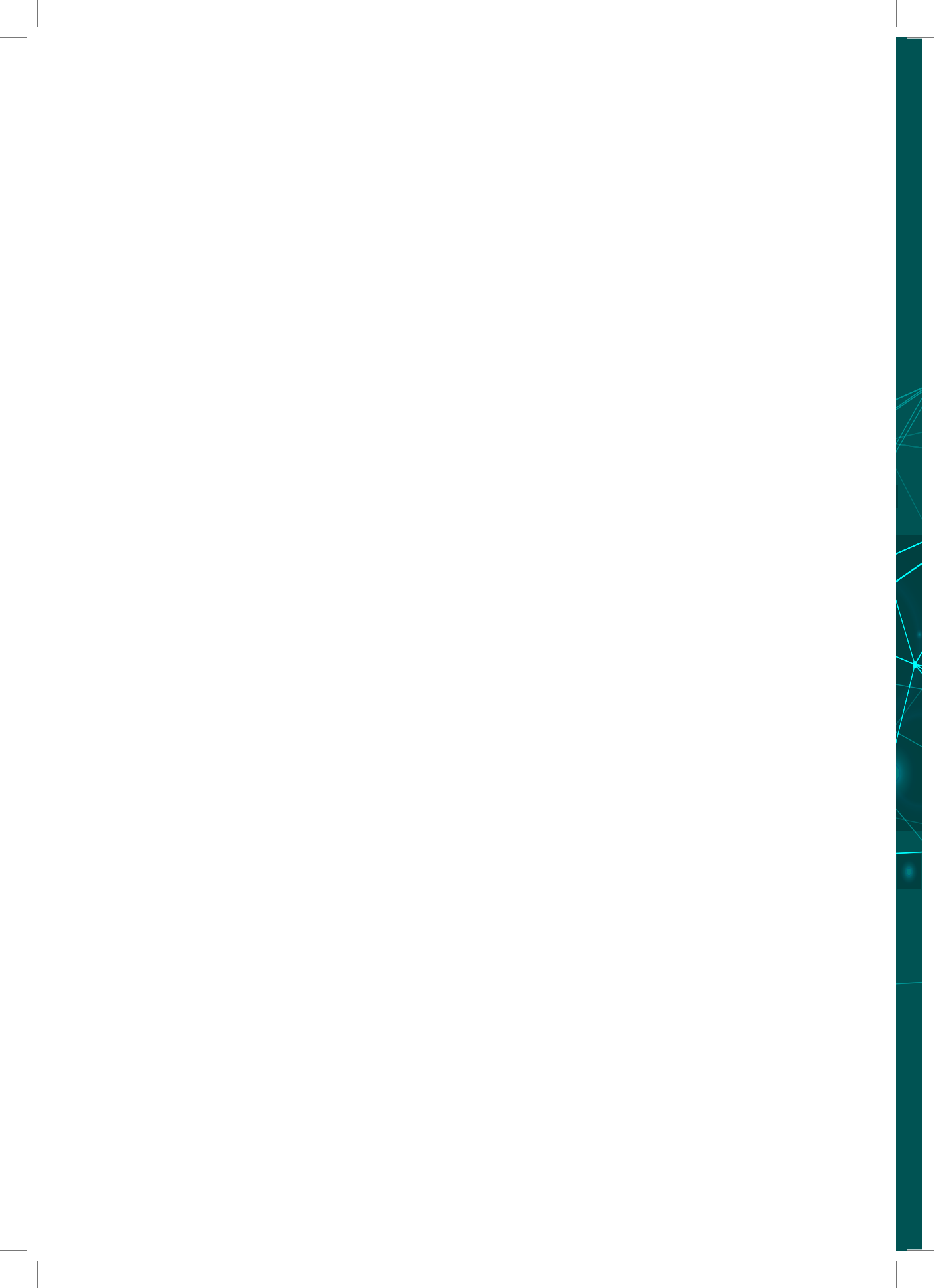
f. Tiempo de Concentración

- GUAIRE

$$T_c = 0.355 * \left(\frac{A}{\sqrt{S_m}} \right)^{0.695} = 3,55 \text{ horas}$$

- KIRPICH

$$T_c = 0.02 * \frac{L^{0.77}}{S_m^{0.385}} = 192.52 \text{ min} \longrightarrow 3.21 \text{ horas}$$



An abstract graphic consisting of a network of light blue lines and dots on a dark teal background. The lines connect various points, creating a complex, interconnected web that resembles a molecular structure or a data network. The dots are small and serve as nodes in the network.

CAPÍTULO II

NOCIONES BÁSICAS DE HIDROMETEOROLOGÍA



INTRODUCCIÓN

Este capítulo estudia la fase del ciclo hidrológico en la cual la precipitación que llega a la superficie de la Tierra, retorna a la atmósfera en forma de vapor. De la precipitación que cae, una parte se evapora antes de llegar al suelo. Sin embargo ya que el hidrólogo mide la precipitación a unos pocos metros de la superficie, la evaporación que tiene lugar a partir de las gotas de lluvia, no tiene importancia práctica, excepto en la interpretación de la reflectividad del radar, como medida de la precipitación.

De manera similar, la evaporación en océanos está por fuera de su campo de interés directo. La precipitación captada por la vegetación (intercepción), se evapora eventualmente, y la cantidad de agua que realmente llega a la superficie, se ve por lo tanto disminuida con respecto a la precipitación observada en una estación. Otros mecanismos de la evaporación que se considerarán en mayor detalle, son la transpiración por las plantas y la evaporación del suelo, nieve y superficies de agua (lagos, embalses, ríos y depresiones) (LINSLEY, KOHLER, & PAULUS, 1977).

En esta unidad modular se presenta el estudio de tratamiento de datos climatológicos, importante dentro de los proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos de una cuenca, entre ellos: obras de suministro de agua para acueductos, alcantarillados, riego, generación hidroeléctrica y construcción de embalses. Debido a que el volumen de agua evapotranspirada entra a formar parte de la humedad atmosférica como vapor y representa una pérdida de agua para el proyecto, este aspecto se debe incluir en el análisis de los términos del Balance Hidrológico, ver Figura 14.

Figura 14. El ciclo del agua.



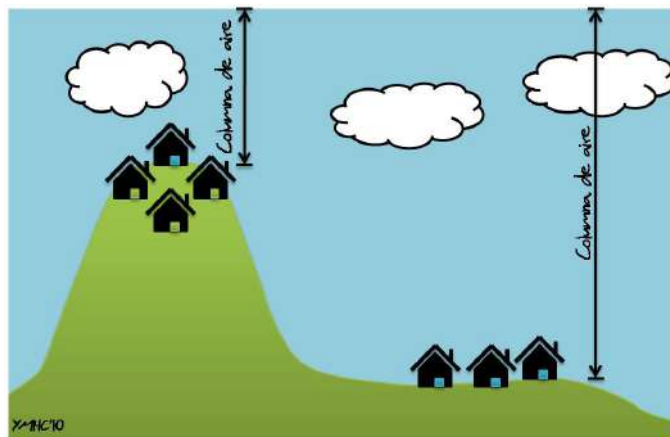
Fuente: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

2.1 PRESIÓN

2.1.1 Presión atmosférica

La presión atmosférica en una superficie dada es la fuerza por unidad de área, ejercida en virtud del peso de la atmósfera que se encuentra encima. La presión es entonces igual al peso de la columna de aire que se encuentra encima de una proyección horizontal de la superficie, extendiéndose hasta los límites de la atmósfera (WMO, 2008).

Figura 15. Presión atmosférica.



Fuente: <http://iqtermodinamica.blogspot.com.co/2010/08/la-presion-absoluta.html>

Además de la presión atmosférica, es necesario determinar su tendencia, que consiste en el carácter y la cantidad de cambios de dicha presión, en periodos de 3 horas, u otros que se especifiquen. La unidad básica de las mediciones de presión atmosférica es el pascal (Pa, o newton por metro cuadrado). En la práctica meteorológica, se acepta la adición del prefijo “hecto”, de manera que el hectopascal (100 Pa), es el término predominante, y es equivalente a un milibar (mba).

Algunos instrumentos de medición como los barómetros y los barógrafos, están graduados en milímetros (mmHg) o pulgadas (inHg) de mercurio. Teniendo en cuenta que la presión normal al nivel del mar es de 760 milímetros de altura, 76 centímetros, 29.92 pulgadas, equivalentes a una presión de 1013.2 milibares, o 1013.2 hPa (ROTH, 2010). Por tanto, se puede aplicar el siguiente factor de conversión:

$$1 \text{ hPa} = 0.750 \text{ 062 (mm Hg)}$$

$$1 \text{ (mm Hg)} = 1.333 \text{ 224 hPa}$$

Como la masa de aire atmosférico está compuesta de aire seco y vapor de agua, la presión atmosférica es la suma de las presiones individuales de sus componentes, Ley de Dalton:

$$P = P_{as} + P_w \quad (2.1)$$

Donde:

P = Presión atmosférica.

P_{as} = Presión ejercida por el aire seco.

P_w = Presión de vapor de agua.

2.1.2 Presión de aire seco

El aire seco se comporta como un gas perfecto y, por tanto puede calcularse con la ecuación de los gases perfectos (ecuación 2.2):

$$P_{as} = R_{as} * \rho_{as} * T_a \quad (2.2)$$

Donde:

P_{as} = Presión de aire seco en milibares.

R_{as} = Constante de aire seco, equivalente a 2.87 para este sistema de unidades.

ρ_{as} = Densidad de aire seco en Kg/m³.

T_{as} = Temperatura del aire en °k.

2.1.3 Presión de vapor

- Vapor de agua

La cantidad de vapor de agua en la atmósfera es variable, siendo mayor en las regiones marítimas, en promedio representa $\frac{1}{4}$ del 1% del volumen total de la atmósfera, depende de la evaporación y la evapotranspiración que se produce en la superficie de la Tierra, y por esta razón su concentración normalmente decrece rápidamente con la altitud, por lo que la mayor parte del vapor de agua de la atmósfera se encuentra en los 5 Km inferiores de la atmósfera y a pesar de encontrarse en pequeñas proporciones en la atmósfera, aportando el 4% de la masa atmosférica, este gas juega un papel muy importante en la formación de los fenómenos meteorológicos (AGUADO & BURT, 2015).

La parte de la presión atmosférica total debido al vapor de agua se refiere como presión de vapor, esta expresa la cantidad de vapor de agua presente en el aire y es ejercida cuando ambas fases (líquida y sólida) están en equilibrio dinámico.

La presión de vapor aumenta con la temperatura, aunque no de manera lineal, porque las moléculas del líquido caliente se mueven con más energía, prácticamente toda la vaporización tiene lugar en la superficie del líquido.

$$P_w = R_w * \rho_w * T_a \quad (2.3)$$

Donde:

P_w = Presión de vapor.

R_w = Constante auxiliar que equivale a $R_{as} / 0.622$.

ρ_w = Densidad de vapor.

T_s = Temperatura de aire en grados absolutos.

- Ecuación Hipsométrica

Esta expresión se utiliza para determinar la presión de vapor observado (e) en milibares:

$$e = e_w - 0.000659 P_a (t_a - t_w) \left(1 + \frac{t_w}{873} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

t_w = temperatura de bulbo húmedo en °C.

t_a = temperatura de bulbo seco en °C.

P_a = presión atmosférica local en mb.

e_w = presión de vapor de saturación a la temperatura t_w .

e = presión de vapor observada en mb.

2.1.4 Presión de saturación

“Es la mayor presión de vapor posible a la temperatura ambiente, es función de la temperatura” (Jiménez Escobar, 1992, p. 55).

Se puede calcular con la siguiente expresión:

$$e_s = 33.8639 [(0.00738 + 0.8072)^8 - 0.000019 |1.8T + 48| + 0.001316] \quad (2.5)$$

Donde:

T = grados centígrados.

e_s = milibares.

2.1.5 Presión Atmosférica en Colombia

La situación geográfica de Colombia, ubicada en el extremo noroccidental de Suramérica, aproximadamente entre 4° de latitud sur y 13° de latitud norte, hace que casi toda su extensión esté influenciada por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). En esta zona confluyen dos masas de aire con baja presión relativa, se sitúa aproximadamente paralela al Ecuador, entre dos núcleos de alta presión atmosférica. Tanto la ZCIT como las masas de aire que confluyen en ella, se desplazan con respecto al Ecuador siguiendo el movimiento aparente del sol, con un retraso de 5 a 6 semanas y una amplitud latitudinal de 20° en África, 30° en Asia y 10° en Suramérica (Eslava, 1993).

Tabla 10. Variación altitudinal del gradiente vertical de la presión atmosférica en Colombia (elaborado por los autores a partir de Eslava (1995)).

Altitud (m.s.n.m)	Gradiente de presión (hPa/100 m)
Desde el nivel del mar hasta 500 m	11.3
500 - 1000	10.7
1000 - 1500	10.1
1500 - 2000	9.6
2000 - 2500	9.0
2500 - 3000	8.5
3000 - 3500	8.0
3500 - 4000	7.6
4000 - 4500	7.1
4500 - 5000	6.8
5000 - 5500	6.4
5500 - 6000	6.0

A su vez en Colombia los rasgos característicos del campo bórico, están en función de los diferentes niveles altitudinales que existen en el territorio. Al respecto el profesor Eslava (1995) afirma que “el análisis de los diferentes gradientes verticales indica que, la disminución de la presión atmosférica con

la altitud es algo más rápida en la región Andina de las cuencas de los ríos Cauca (la más rápida) y Magdalena que en la región del Cataumbo, Orinoquía, Amazonía, y en las regiones del Pacífico y Caribe (la más lenta) y casi no cambia según la época del año. Lo anterior implica que, aunque pequeña, existe una disimetría bórica, entre las regiones intramontañosas y las vertientes exteriores del Pacífico, Orinoquía, Amazonia y región del Caribe”. Sin embargo en la tabla 10 se puede observar cómo varía el gradiente vertical en casi todo el país.

2.2 TEMPERATURA

Se define como una cantidad física, que caracteriza el movimiento aleatorio promedio de las moléculas, en un cuerpo físico. Representa el estado termodinámico de un cuerpo, y su valor está determinado por la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos. En este sistema, el cuerpo que cede su calor a otro tiene mayor temperatura. Sin embargo definir la magnitud de esta variable en función del “estado del cuerpo” es difícil, y tal vez por esta razón se adopta internacionalmente la escala basada en la congelación universal y los triple puntos (WMO, 1992).

La temperatura termodinámica (T), cuya unidad es el Kelvin (K), es la temperatura básica. Dicha unidad es la fracción de 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (Ibid). Sin embargo la temperatura (t), en grados Celsius es la más utilizada con fines meteorológicos, por lo cual a continuación se presenta la relación entre Kelvin y Celsius:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15 \quad (2.6)$$

2.2.1 Temperatura de Bulbo Seco (ta).

Es la medida de la temperatura ambiental registrada, con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco, la cual se considera idéntica a la del aire.

2.2.2 Temperatura de Bulbo Húmedo (tw).

Es la medida de la temperatura del aire saturado registrada por un termómetro de mercurio que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua, que se emplea para medir la temperatura húmeda del aire.

2.2.3 Punto de Rocío.

El aire en determinadas condiciones de temperatura y presión, es capaz de retener una concentración máxima de vapor de agua. Cuando se supera este límite, el exceso de vapor de agua se condensa formando agua líquida, momento en el cual el aire está “saturado”.

Si la humedad relativa llega al 100 % (generalmente porque baja la temperatura del ambiente), el aire está saturado de vapor de agua y se alcanza el llamado punto de rocío. En este punto el vapor de agua se licúa o condensa, bien sea cerca del suelo, formando el rocío, escarcha, niebla, neblina y bruma, o en capas más altas de la atmósfera, dando lugar a las nubes (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992).

Foto 2. Gotas de Rocío.



Fuente (https://www.google.com.co/search?q=gotas+de+rocio&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjepMSno7LXAhVFjZAKHQ6NBYEQ_AUICigB&biw=1242&bih=557#imgrc=jnvqzFMbbhRYuM).

La formación de rocío implica que se presente un elevado grado de humedad atmosférica y la temperatura nocturna experimente un descenso considerable, ver Foto 2.

Por otra parte, si sopla un ligero viento las gotitas de agua se mantienen en suspensión en el aire, dando lugar a nieblas bajas y densas, pero si la atmósfera se mantiene sin movimiento alguno, se produce la condensación en forma de rocío.

2.2.3.1 Temperatura de punto de rocío (tw): es la temperatura a la que el aire se satura de humedad, debido al enfriamiento del aire para que se condense la humedad que contiene, siempre y cuando la presión sea constante. En el momento que la temperatura ambiente llega a igualar la temperatura de

rocío, se forma neblina y es cuando el aire se encuentra saturado. El punto de rocío es usualmente menor a la temperatura del aire.

El punto de rocío está íntimamente relacionado con el concepto de humedad, aunque se expresa en unidades de temperatura. Si el aire se encuentra muy húmedo, habrá que enfriarlo menos para saturarlo; es decir, la temperatura de rocío es mayor.

Como en la superficie de la Tierra la presión varía relativamente poco, el punto de rocío resulta ser un buen indicador del contenido de humedad en el aire. A diferencia del punto de rocío, la humedad relativa no sólo depende del contenido de humedad, sino también de la temperatura del aire.

En un día soleado la humedad relativa puede disminuir hasta un 50% o más, simplemente por el aumento en la temperatura del aire, mientras que el punto de rocío se incrementaría junto con la temperatura, por lo que no alcanzaría la saturación necesaria para la formación de hidrometeoros, como la niebla.

NOTA: la razón por la cual la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío se designan como t_w , es porque ambas se refieren a la temperatura de saturación del aire.

2.3 HUMEDAD

Cantidad de vapor de agua contenido en el aire, la cual en un lugar e instante determinados, se expresa como humedad absoluta, específica, relativa o razón de mezcla. La humedad atmosférica expresada como valor absoluto (humedad absoluta), indica la masa de vapor de agua contenida en un litro de aire, pero es más significativo su valor relativo, ya que la cantidad máxima posible de vapor de agua presente en el aire (saturación), es variable y depende de la temperatura.

La humedad relativa se define como el porcentaje de vapor de agua presente en un momento dado, con respecto al total que podría haber a la misma temperatura. Cuando baja la temperatura, disminuye la cantidad posible de vapor en el aire, de manera que como cota inferior existe el punto de rocío, por debajo del cual el vapor se condensa en gotitas que dan lugar a precipitaciones (CHOW & MAIDMENT, 1994).

2.3.1 Cálculo de la humedad relativa, absoluta, específica y proporcional de mezcla

- Humedad relativa

Es la medida más familiar del contenido de vapor de agua en la atmosfera, y relaciona la cantidad de vapor de agua (determinada) con la máxima cantidad posible de saturación; es decir, el porcentaje de humedad presente en el aire, con respecto al total que puede albergar, en función de su temperatura y presión.

El aire se asemeja a una esponja puesto que tiene la capacidad de absorber un máximo de humedad en forma de vapor de agua antes de saturarse, después de lo cual se forma neblina. Pero la capacidad de absorción de esta esponja depende de la temperatura: a mayor temperatura, puede almacenar mayor cantidad de vapor de agua (SILVA MEDINA, 1998).

Para una medida complementaria de la humedad relativa en el ambiente, en función de la presión, la humedad relativa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$HR = \left(\frac{e}{e_s} \right) * (100) \quad (2.6)$$

Donde:

H_R = humedad relativa en porcentaje (%).

e = presión de vapor observada en milibares (mb).

e_s = presión de vapor de saturación a la temperatura t_a en milibares (mb).

La presión de vapor observada (e) se determina con la ecuación hipsométrica vista anteriormente, la presión de vapor de saturación (e_s) se calcula con la siguiente expresión:

$$e_s = 6,11 * 10^{\frac{a}{b+t}} \quad (2.8)$$

Donde:

e_s = presión de vapor de saturación en milibares (mb).

a = constante 7,5.

b = constante 237,3.

t = temperatura, en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$).

La presión de vapor e_s , a la temperatura t_a , es la presión de vapor e_a , entonces la expresión de humedad relativa es:

$$HR = \left(\frac{e}{e_a} \right) * (100) \quad (2.9)$$

- Ejemplo cálculo humedad relativa

Ejemplo

Calcular la humedad relativa con los siguientes datos obtenidos en la estación N° 2120559 Guaymaral:

$$t_a = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_w = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_a = 564 \text{ mm Hg}$$

$$a = 7.5$$

$$b = 273.3$$

$$HR = \left(\frac{e}{e_s} \right)_{Pa,at} * (100) \quad (2.9)$$

Donde:

H_R = humedad relativa en porcentaje (%).

e = presión de vapor observada en milibares (mb).

e_s = presión de vapor de saturación a la temperatura t_a en milibares (mb).

t_a = temperatura del aire.

P_a = presión atmosférica.

Solución:

$$P_a = 564 \text{ mmHg} \frac{1 \text{ mb}}{0.75 \text{ mmHg}} = 752 \text{ mb}$$

$$e = e_w - 0.000659 P_a (t_a - t_w) * \left(1 + \frac{t_w}{873} \right); e_w = 6.11 * 10^{\frac{at}{b+t}} \rightarrow e_w = 10.02 \text{ mb}$$

$$e = 10.02 - 0.000659 (752) (12-7) * \left(1 + \frac{t_w}{873}\right); \rightarrow e = 7.5 \text{ mb}$$

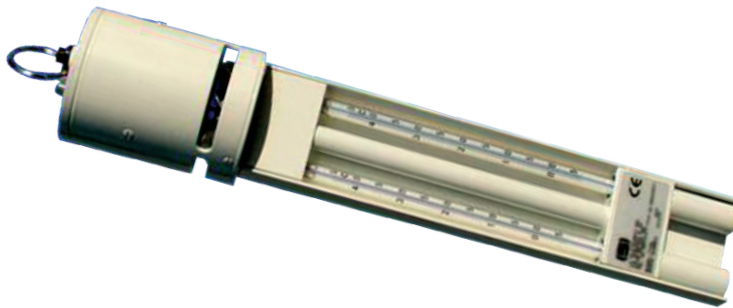
$$e_a = 6,11 * 10^{\frac{7.5*12}{237.3+12}}; e_a = 14.03 \text{ mb} \rightarrow HR = \frac{7.5}{14.03} * 100$$

$$HR = 53.46\%$$

- Psicrómetro

Instrumento utilizado en los centros meteorológicos para la determinación de la humedad relativa del aire. Consta de dos termómetros, un termómetro seco que mide la temperatura del aire, y de otro termómetro cuyo depósito está rodeado de una muselina empapada en agua (termómetro húmedo).

Foto 3. Psicrómetro.



Fuente https://www.google.com.co/search?q=psicrometro&dcr=0&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjw-evYq7LXAhWkHZAKHccUAZYQ_AUICigB&biw=1242&bih=557#imgrc=RG26eVXLmlyYgM:

En tiempo seco el termómetro húmedo marca una temperatura inferior al seco, debido a la evaporación y la diferencia entre ambos es una función de la humedad relativa, que se expresa en las tablas psicrométricas, ver tabla 11. Para mayor precisión el aire que rodea ambos depósitos, debe renovarse mediante una corriente de aire producida por un ventilador (aspiropsicrómetro) (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992).

Tabla 11. Tabla psicrométrica.

	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	
1°	90	81																			
2°	90	82	73	64																	
3°	90	82	74	66	50	60															
4°	91	83	75	67	60	52	44	36													
5°	91	84	76	69	61	53	46	39	32	26											
6°	92	86	77	70	63	60	48	42	35	29	22	16									
7°	92	85	78	71	64	57	50	44	38	31	26	19	13	7							
8°	92	86	78	72	66	69	52	46	40	34	28	23	17	11							
9°	93	88	79	73	67	61	54	48	42	36	31	26	20	14	9						
10°	94	87	80	74	68	62	56	50	44	39	34	28	23	17	12						
11°	94	87	81	76	69	63	57	51	46	41	36	30	25	20	15						
12°	94	88	82	76	70	66	59	54	48	43	38	33	29	23	18	14					
13°	94	88	82	77	71	66	60	55	50	45	40	35	31	26	21	17					
14°	94	88	83	76	72	67	67	67	50	47	42	37	33	28	23	19	14	9			
15°	94	88	83	79	73	65	63	55	53	46	43	39	33	30	25	21	16	12			
16°	95	88	84	80	74	69	64	59	55	50	46	41	37	32	27	23	19	16	11	7	
17°	95	90	85	80	75	70	65	60	55	52	48	43	38	33	27	26	22	17	13	10	
18°	96	90	85	80	75	70	65	61	57	53	49	44	40	36	32	28	24	20	16	13	
19°	95	90	85	80	76	71	66	62	58	54	50	46	42	36	34	31	27	23	19	16	
20°	95	90	85	81	76	72	66	64	60	56	52	48	44	40	36	33	29	25	22	19	
21°	95	90	85	82	77	73	69	66	61	57	53	49	46	41	38	34	31	27	24	21	
22°	95	90	86	83	77	73	69	66	61	58	54	50	47	43	40	36	32	29	26	23	
23°	96	91	87	83	78	74	70	67	62	59	55	52	48	44	41	37	34	31	28	26	

Fuente: www.aguacero.com.

Ejemplo:

Hallar la humedad relativa con los siguientes datos obtenidos en psicrómetro:

- Temperatura termómetro seco de 20°.
- Temperatura termómetro húmedo de 15°.

Solución:

El encuentro de coordenadas indica que la *Humedad Relativa* es de 56%, lo que significa una humedad media para esta zona, por lo tanto la probabilidad de precipitaciones es media.

- Humedad absoluta

La humedad absoluta se define como la razón entre la masa del vapor de agua y el volumen total del sistema, usualmente expresada en gramos por metro cúbico (g/m³), ver Figura 16.

Figura 16. Humedad absoluta.



Fuente: https://www.google.com.co/search?q=HUMEDAD+ABSOLUTA&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-2fv2qN3YAhVQ0FMKHeAMAt4Q_AUICigB&biw=1920&bih=974#imgrc=UOR3WDF102zEpM

Al suponer que el vapor de agua y el aire están separados (Figura 2.2), se tiene que la humedad absoluta es:

$$q_u = \left(\frac{m_v}{V_o} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

q_u = humedad absoluta en g/m³.

m_v = masa de vapor en g.
 V_o = volumen total en m^3 .

- Humedad específica

Se define como la relación entre el vapor de agua y el total de aire atmosférico. Su magnitud se determina con la expresión 2.10.

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_s} * 100 \quad (2.11)$$

Donde q está dada en porcentaje (%).

- Proporción de mezcla

Es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco. Se calcula mediante la ecuación 2.11

$$w = \frac{m_v}{m_s} * 100 \quad (2.12)$$

Donde w está dada en porcentaje (%).

2.4 PROCESOS ATMOSFÉRICOS EN EL CICLO HIDROLÓGICO

El movimiento del agua dentro de la atmósfera, como parte del ciclo hidrológico, ocurre principalmente en la troposfera y tiene lugar mediante procesos de evaporación, transpiración, transporte de humedad y precipitación. Estos procesos utilizan la radiación solar como fuente de energía (SILVA MEDINA, 1998).

2.4.1 Balance de energía

La radiación global es el total de radiación solar proveniente de las reacciones nucleares originadas dentro del Sol.

A su entrada a la atmósfera, la radiación global transporta una energía de **1,94 cal.g.cm².min**, cantidad denominada **constante solar**, la cual está sujeta a una oscilación anual de más o menos 7% según la distancia Tierra-Sol. Alcanza los 2.01 cal.g.cm².min alrededor del 3 de enero (perihelio) y 1.86 para el 4 de julio (afelio).

- La radiación global extraterrestre está compuesta por:
- 8% Rayo ultravioleta (0.15 - 0.40 micrones): es la radiación actínica.
- 40% Luz visible (0.40 - 0.72 micrones): es la radiación luminosa.
- 52% Rayos infrarrojos (0.72 - 4.00 micrones): es la radiación térmica.

Se puede establecer un balance de energía para la radiación solar, dado que durante largos períodos el total de energía entrante, debe igualar el total de energía saliente de la Tierra. Si esto no se cumpliera existirían dos posibilidades:

- Calentamiento progresivo del planeta que llevaría al desecamiento de los océanos y por consiguiente un rompimiento del ciclo hidrológico.
- Enfriamiento que llevaría al congelamiento inclusive de la región intertropical.

De la radiación total entrante:

- Una parte se utiliza y otra se refleja.
- 16% de energía solar, es captada por la atmósfera gracias al vapor de agua, bióxido de carbono, metano y otros compuestos, así como elementos que absorben la radiación infrarroja, entre ellos el oxígeno.

- Heliógrafo de Stokes

La insolación diaria es medida con el heliógrafo de Campbell - Stokes (TORRES RUIZ, 2006), el cual consiste en una esfera de vidrio que a modo de lente convergente, concentra los rayos solares sobre una cartulina en forma de semicilindro, por la parte exterior de dicha esfera. Esta disposición permite que la lente actúe como lupa en las horas en que el sol brilla, con lo cual se va registrando una zona quemada sobre la cartulina, cuya longitud y posición indica las horas de insolación correspondientes al período de medida. La cartulina lleva impresas líneas horarias, lo que permite leer directamente el número de horas en que hay insolación, ver Foto 4.

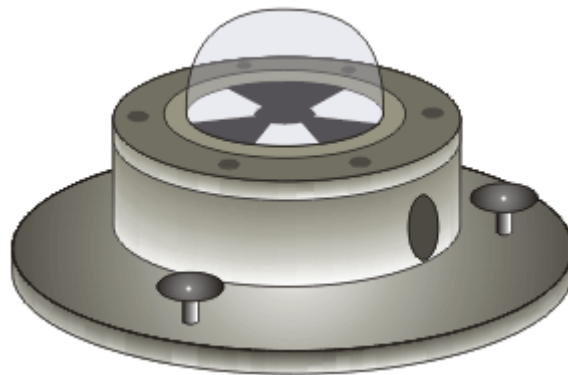
Foto 4. Heliógrafo de Campbell-Stokes.



Fuente: https://www.google.com.co/search?q=heli%C3%B3grafo+de+campbell-stokes&dcr=0&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwicytuBqblXAhVSOZAKHV0iDvYQ_AUICigB&biw=1242&bih=557#imgrc=1fgbt-PiODr8lM

- Medida de la radiación

Foto 5. Piranómetro.



Fuente: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/imagenes/fig5_6.gif

Es de gran importancia cuantificar la energía que llega del Sol en forma de radiación electromagnética. Esta se puede determinar directamente mediante el uso de aparatos que miden la intensidad de la radiación solar o **piranómetros**, cuya unidad es w/m^2 . Normalmente se dispone de dos equipos: uno recoge la radiación global y el otro la radiación difusa, para lo cual este último dispone

de un parasol (como el de la fotografía), impide la incidencia directa del sol en la célula captora, recibiendo sólo la radiación que entra por los lados. En el caso de las estaciones automáticas, el sistema está conectado a un data-logger que almacena los datos cada segundo, de manera que el programa genera archivos mensuales (WMO, 2008).

Ley de Stefan-Boltzmann

Según esta ley la energía emitida por un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

La ley de Stefan-Boltzmann permite calcular la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro, para ciertos casos el Sol radia casi como un cuerpo negro, absorbe y radia en casi todas las longitudes de onda (TORRES RUIZ, 2006). Como existe un intercambio de energía entre la proveniente del sol, y la saliente del planeta Tierra, y principalmente sucediendo en la atmósfera terrestre, hace que el valor de la energía dependa de las condiciones meteorológicas en la troposfera, el resultado se afecta con un coeficiente empírico que considera estas condiciones. La energía mencionada se designa como R_b = Energía que irradia la tierra o radiación de onda corta en Langley⁵ por día (Ly/día), cuyo valor se calcula mediante la expresión 2.13.

$$R_b = K\sigma T_a^4 \quad (2.13)$$

Donde:

K = coeficiente empírico, el cual se determina mediante la expresión 2.14.

$$K = (0.56 - 0.09\sqrt{e_d}) * (0.1 + 0.9 n/N) \quad (2.14)$$

Siendo: e_d la presión de vapor en la atmósfera (en mm Hg) y n/N , la insolación.
 σ = constante de Boltzman = $1,17 \times 10^{-7}$ Ly / °K⁴ x día.

T_a = temperatura de la masa de aire en contacto con la superficie de la Tierra, expresada en °K (recuerde que para convertir °C a °K es necesario sumarle 273).

5 Langley (Ly): Es una unidad de energía utilizada para la radiación, se expresa en cal/cm².

2.4.2 Radiación neta

En su recorrido a través del espacio y de las capas superiores de la atmósfera, parte de la energía solar es absorbida o reflejada, de tal manera que llega un porcentaje muy pequeño de energía solar al límite superior de la troposfera (del orden del 0,00005% del total), principalmente en ondas comprendidas en las bandas de luz y calor. (SILVA MEDINA, 1998).

Debido a la forma elíptica del globo terrestre y a los movimientos de rotación, translación, precesión y nutación, un punto situado en el límite superior de la troposfera no recibe la radiación solar con la misma intensidad durante las 24 horas del día. La intensidad depende de la latitud del lugar, la fecha y la hora, de modo que varía entre 0 y 2 calorías / cm² / minuto. Éste último valor se conoce como “constante solar” y equivale a 2 Langley / minuto. En la tabla 2.3 aparecen los totales diarios de la radiación solar que llega al límite superior de la troposfera, de acuerdo con la latitud y fecha. Las variables que intervienen en el cálculo de la radiación solar son las siguientes:

R_s = radiación solar que alcanza la superficie terrestre, después de atravesar la troposfera. (Ly/min).

R_a = energía radiante o solar o radiación de onda corta, que llega a la parte superior de la troposfera, denominada también “constante solar”.

Resumiendo, la radiación neta es una variable que está en función de la latitud del lugar y del mes, y su valor se puede calcular mediante la tabla 12. (Ly/día).

$a = 0.3$

$b = 0.5$

n = número de horas de brillo solar.

N = longitud del día en horas. Que se determina mediante la tabla 12.

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.15)$$

En un día particular la relación entre R_s y R_a , depende de las condiciones meteorológicas imperantes en la troposfera, principalmente de la humedad atmosférica, nubosidad y el contenido de anhídrido carbónico (CO₂). Tanto el vapor de agua como el CO₂ absorben energía en la banda de calor, mientras que las nubes actúan como superficies que reflejan. En la tabla 13 se muestra la forma como se reparte la energía solar, R_a , en su paso por la troposfera (SILVA MEDINA, 1998).

Tabla 12. Radiación solar total diaria en el límite de la atmósfera en calorías/cm²/día.

FECHA	LATITUD GRADOS										
	N					0	S				
	90	60	30	20	10		10	20	30	60	90
MAR 21		460	798	866	908	922	908	866	798	460	
ABR 13	436	654	891	921	924	899	849	773	674	277	
MAY 6	795	833	957	951	920	862	783	680	559	144	
MAY 29	1029	962	996	963	907	828	728	611	479	70	
JUN 22	1109	1008	1004	963	899	814	708	584	449	48	
JUL 15	1024	957	989	958	903	824	725	608	477	70	
AGO 8	788	825	949	943	913	855	776	674	554	143	
AGO 31	431	648	882	911	914	889	838	763	665	274	
SEP 23		455	788	856	897	912	897	856	788	455	
OCT 16		281	683	783	860	913	937	934	903	663	442
NOV 8		295	706	813	898	954	987	993	972	801	
NOV 30		210	646	770	877	956	1017	1051	1058	1023	
DIC 22		181	623	755	868	961	1029	1072	1091	1113	
ENE 13		211	649	775	881	964	1023	1056	1063	1028	
FEB 4		298	712	819	904	964	997	1002	982	809	
FEB 28		432	792	870	923	949	946	915	853	555	

Fuente: Silva Medina (1998).

Tabla 13. Longitud del día (Hemisferio Norte) Horas.

LATITUD (grados)	FECHA											
	JUL 17	AGO 19	SEP 17	OCT 18	NOV 17	DIC 6	ENE 13	FEB 11	MAR 13	ABR 12	MAY 13	JUN 14
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
10	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7
20	13.2	12.7	12.2	11.7	11.2	10.9	11.0	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3
30	13.9	13.1	12.3	11.4	10.6	10.2	10.4	11.0	11.9	12.8	13.6	14.1
60	18.0	15.3	12.7	10.0	7.4	5.9	6.6	8.7	11.5	14.3	17.0	18.7
90	24.0	24.0	24.0	0	0	0	0	0	0	24.0	24.0	24.0

Fuente: Silva Medina (1998).

Otra de las variables utilizadas es el albedo (r), el cual se define como la proporción de energía que refleja una superficie, cuyo valor varía entre 0

para un cuerpo negro o con absorción total y 1 para una superficie blanca con reflexión total.

La tabla 14 muestra los albedos de diferentes superficies, que se encuentran con frecuencia en estudios hidrológicos son los siguientes:

Tabla 14. Albedos de diferentes superficies.

Superficie	Albedo (r)
Agua (superficies abiertas)	0.06
Roca	0.12 - 0.15
Tierra vegetal seca	0.14
Tierra vegetal húmeda	0.08 - 0.09
Pasto	0.10 - 0.33
Nieve recién caída	0.90
Nieve vieja, limpia	0.40
Nieve sucia	0.10
Vegetación verde (promedio para selvas y pastos)	0.20
Pastos y cultivos	0.25

Fuente: Hidrología en la ingeniería, Germán Monsalve Sáenz

La radiación neta se calcula mediante la expresión 2.16.

$$R_n = R_s (1 - r) - R_b \quad (2.16)$$

Donde:

R_n = radiación neta (Ly/día).

R_s = radiación de onda corta que llega perpendicular a la superficie terrestre.

r = albedo.

R_b = energía que irradia la Tierra (Ly/día).

La evaporación haciendo uso del balance de energía se calcula con la ecuación 2.17:

$$E_o = \frac{R_n/L}{1 + \beta} \quad (2.17)$$

Donde:

E_o = evaporación en mm/día.

Rn = radiación neta en Ly/día.

L = 59 cal/cm³.

β = relación de Bowen (ver ecuación 2.17); en donde: γ es la constante psicrométrica cuyo valor es $6,11 \times 10^{-4} \times Pa$ (donde Pa es la presión atmosférica en mb) dada en mb/ °C; t_s es la temperatura del agua en °C; t_a es la temperatura del aire en °C; e_s presión de vapor a la temperatura t_s expresada en mb y e es la presión de vapor a la temperatura t_a y está dada en mb (SILVA MEDINA, 1998).

$$\beta = (\gamma) * \frac{t_s - t_a}{e_s - e} \quad (2.18)$$

2.5 TRANSPIRACIÓN

Foto 6. Transpiración.



Fuente: https://www.ecured.cu/Transpiraci%C3%B3n_en_las_plantas.

La Transpiración (Foto 6), es el fenómeno por medio del cual el agua que una planta toma del suelo a través de las raíces, es llevada por el tallo hasta las estomas de las hojas, desde donde se evapora. Este proceso constituye una parte importante del ciclo hidrológico, pues es el principal mecanismo de retorno a la atmósfera, de la precipitación que cae al suelo.

La transpiración se diferencia de la evaporación, únicamente en el origen del agua que utilizan: ésta última toma el agua superficial, mientras que la

transpiración extrae el agua almacenada en el suelo, por tanto, la transpiración depende de la velocidad de crecimiento de la planta.

Al hacer el balance hídrico no es práctico separar la evaporación de la transpiración debido a que su tratamiento se hace a nivel de laboratorio por consiguiente se tratan los dos factores como uno solo (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992).

La capacidad de transpiración de una planta, es decir el volumen de agua, que la planta transpira cuando el suministro hídrico a las raíces es óptimo, se denomina *transpiración potencial*. Esta capacidad depende de:

- a. El suelo.
- b. La planta.
- c. Las condiciones meteorológicas, como son el estado del tiempo y la radiación solar.

Tal como ocurre en la evaporación, la transpiración real es inferior a la transpiración potencial, en un período relativamente largo, por ejemplo, un mes (SILVA MEDINA, 1998).

2.5.1 Medida de la transpiración

Como no es posible medir en condiciones naturales, las pérdidas por transpiración para un área apreciable, como por ejemplo una cuenca hidrográfica, el análisis de dicho fenómeno está restringido a estudios de muestras pequeñas, en condiciones de laboratorio.

Un método consiste en colocar una o más plantas en materas dentro de un espacio confinado y calcular la transpiración como el aumento en el contenido de humedad de dicho espacio. La mayoría de las medidas se llevan a cabo en un fitómetro, un recipiente grande lleno de suelo en el cual se siembra una o más plantas.

La única pérdida de humedad es por transpiración, ya que la superficie del suelo se sella para impedir evaporación, y puede medirse pesando la planta y el recipiente que la contiene, en diferentes intervalos de tiempo. Al aportar aire y agua adicional, se puede hacer un estudio con el fitómetro durante todo el ciclo de vida de una planta. Como en la práctica es imposible simular condiciones naturales, los resultados de este tipo de observaciones, tienen interés principalmente académico para el hidrólogo, y representan algo más que un índice del uso del agua por una plantación en condiciones de campo (LINSLEY, KOHLER, & PAULUS, 1977).

2.6 EVAPORACIÓN

Es el proceso en el que las moléculas liberan el contenido líquido, es decir, el agua líquida superficial, pasa al estado de vapor por absorción de calor en condiciones naturales y se desprende de la superficie, para ser almacenado en la atmósfera como humedad (AGUADO & BURT, 2015). A mayor evaporación, la atmósfera estará más húmeda, llegando más rápido a un estado de saturación, lo que eleva la probabilidad de precipitaciones.

2.6.1 Evaporación real

Es la evaporación que ocurre en una zona y un período de tiempo determinados. A partir de la evaporación potencial se puede calcular la evaporación real, mediante la expresión 2.19:

$$E = K_l * E_0 \quad (2.19)$$

Donde:

E = Es la evaporación real.

E_0 = La evaporación potencial.

K_l = Es el coeficiente que depende de la distribución temporal de las lluvias en el mes y la capacidad del suelo para almacenar humedad. Oscila entre 0.6 y 1.0.

2.6.2 Evaporación Potencial

Es la capacidad máxima de evaporación de una superficie líquida o sólida saturada, expuesta directamente a condiciones meteorológicas específicas. Para calcularla se utilizan métodos como: medición directa, aplicación de fórmulas físicas y el evaporímetro.

2.6.3 Medición directa

Para esta medición se colocan muestras de suelo en lísímetros y se adiciona agua de forma constante, con el fin de reemplazar la que se pierde por evaporación. El volumen de agua que se añade a la muestra en un período dado es la evaporación potencial para las condiciones del ensayo; si la muestra contiene vegetación, lo que se mide es la evapotranspiración potencial.

Aunque este método presenta algunas ventajas en su ejecución en laboratorio, presenta muchas dificultades como método práctico en el estudio de cuencas extensas (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992).

Fórmulas Físicas

- Fórmula de Dalton

Ésta es la base de las ecuaciones experimentales que se han desarrollado para el cálculo de la evaporación potencial y se expresa mediante la ecuación 2.20.

$$E_0 = f(v)(e_s - e_d) \quad (2.20)$$

Donde:

E_0 = Evaporación potencial.

$f(v)$ = Es una función de la velocidad del aire que pasa por la superficie evaporante.

e_s, e_d Corresponden a la presión de vapor para la atmósfera saturada, a temperatura de la superficie y del punto de rocío del aire, respectivamente.

De las numerosas fórmulas que utilizan la ecuación de Dalton, es muy conocida la fórmula de Penman desarrollada en 1956, a partir de experiencias realizadas en el Lago Hefner de Oklahoma. El volumen de agua que el lago pierde por evaporación, se relaciona con variables propuestas por Dalton, de tal manera que se llega a la expresión de Penman.

- Fórmula de Penman

Fue desarrollada en Inglaterra y se basa en la correlación de diferentes fenómenos meteorológicos, considerando entre otros factores la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento (SILVA MEDINA, 1998).

$$E_0 = 0.35 \left(0.50 + \frac{V_2}{160} \right) (e_s - e) \quad (2.21)$$

Donde:

E_0 = evaporación en mm/día.

e_s = presión de vapor de saturación en mm Hg a la temperatura t_s .

e = presión de vapor observada en mm Hg.

V_2 = velocidad del viento a 2 m de altura en km/día se calcula así: $V_2/V_1 = (Z/Z_1)^{0.5}$

- Fórmula combinada de Penman

$$E_0 = \frac{\frac{Rn}{59} + \frac{\gamma}{\Delta} * E_a}{1 + \frac{\gamma}{\Delta}} \quad (2.22)$$

Donde:

E_0 = evaporación en *mm/día*.

Rn = radiación neta en *Ly/día*.

γ = constante psicrométrica = $6.11 \times 10^{-4} \times Pa$ en *mm/°C*.

$$\Delta = \frac{e_a(a)(b)}{e_a(b + ta)^2} * \ln 10 \quad ; \text{ en mb/°C} \quad (2.23)$$

E_a = se calcula a partir de:

$$E_0 = 0.35 \left(0.50 + \frac{V_2}{160} \right) (e_s - e) \quad ; \text{ en mm/día} \quad (2.24)$$

Tabla 15. Valores de Δ en milibares por grado centígrado.

TEMPERATURA DEL AIRE T_a °C	Δ mb / °C
0	0.41
5	0.61
10	0.80
15	1.15
20	1.46
25	1.85
30	2.44

Fuente: (SILVA MEDINA, 1998).

- Evaporímetros

Foto 7. Tanque evaporímetro clase A (U.S. Weather Bureau).



Fuente: <http://geofisica-guszav.blogspot.com.co/2014/04/tanques-evaporimetros.html>.

El evaporímetro es el instrumento utilizado para medir la evaporación del agua en la atmósfera. Consta de un recipiente en forma cilíndrica de tanque, de 1.22 m de diámetro y 25.4 cm de profundidad, su área aproximada es de 1.41 metros cuadrados. Debe estar colocado sobre una base que lo mantenga por encima del suelo, a una distancia mínima de 3 a 5 cm (Foto 7). La pérdida por evaporación en un período de tiempo se relaciona con la disminución de nivel de agua dentro del tanque (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992).

La estructura de la base debe permitir la libre circulación del viento. El tanque se llena de agua y se van tomando lecturas diarias del tirante de agua, por medio de un bernier llamado tornillo micrométrico.

Los evaporímetros se pueden instalar sobre la superficie o enterrados, de tal manera que la superficie evaporante coincida con el nivel del terreno, y flotantes en el caso de un lago, o cualquier cuerpo hídrico.

Tabla 16. Factores de tanque.

TIPO DE EVAPORÍMETRO	K
Clase A superficial	0.6 a 0.82
Colorado enterrado	0.75 a 0.86
U.S.G.S. Flotante	0.70 a 0.82
Evaporímetro de color negro	0.56

Fuente: (SILVA MEDINA, 1998).

El factor de tanque (K), se define como la relación entre la evaporación en un lago y la evaporación en un tanque adyacente por unidad de área, se calcula con la expresión 2.25:

$$K = \frac{E_0}{E_T} \quad (2.25)$$

Donde:

K = factor de tanque.

E_T = evaporación en el tanque en mm/día.

E_0 = evaporación en el lago en mm/día. Es igual a la evaporación potencial del lago.

2.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Es el proceso combinado de evaporación y transpiración en un suelo. Corresponde a la proporción de agua que regresa a la atmósfera desde las hojas de las plantas, cuando es transpirada y a la evaporada desde la superficie del suelo. En este proceso se evidencia de manera directa el efecto del intercambio de agua (respiración y transpiración) de los seres vivos, principalmente de las plantas, con el medio ambiente (JIMÉNEZ ESCOBAR, 1992). La evapotranspiración depende del gradiente de presión de vapor, no de la diferencia de humedad relativa; si tanto la hoja como el aire están saturados (100% HR), no hay difusión en igualdad de temperatura, pero si la hoja ha sido calentada por el Sol más por el aire, ocurrirá una pérdida de vapor de agua aun en la atmosfera saturada debido a las diferencias de presiones de vapor (TORRES RUIZ, 2006). Existiendo dos formas de evapotranspiración: Evapotranspiración potencial o máxima, y Evapotranspiración real:

2.7.1 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real es el volumen de agua líquida que se convierte en vapor, debido al efecto combinado de transpiración y evaporación, como se mencionó anteriormente, en una zona determinada y durante un determinado tiempo. Es, considerada también como, la cantidad de agua realmente consumida por un determinado cultivo durante el período de tiempo considerado en las condiciones limitadas del cultivo bajo riego (TORRES RUIZ, 2006).

Tanto en la evaporación como en la transpiración, el agua pasa del estado líquido al gaseoso, cambio que es favorecido cuando el aire está caliente,

seco o muy movido (viento). Por otro parte, la cantidad de agua perdida por evapotranspiración depende de la disponibilidad de agua en el suelo, así como de la capacidad de las plantas para absorberla y transpirarla.

La medida de la evapotranspiración se expresa en unidades como: mm/día, mm-mes y mm/año.

La evapotranspiración real se puede calcular empleando las siguientes técnicas:

- Medición directa

La medición directa de la evapotranspiración real en una zona requiere de la toma de varias muestras puntuales de suelo y cultivos, repartidas convenientemente sobre el área, y del empleo de lisímetros.

Un lisímetro simple consiste en una balanza sobre la cual se coloca un recipiente con la muestra, la pérdida de agua por evapotranspiración se refleja en la pérdida del peso de la muestra. También consta de un recipiente con fondo permeable o con un mecanismo para mantener una presión negativa en el fondo (Foto 8). Este instrumento permite calcular la evapotranspiración al mantener el balance de aguas en el recipiente.

Se entiende que las condiciones que rodean la muestra representan las condiciones reales del terreno y de su atmósfera adyacente, por lo cual es preferible instalar los lisímetros en el campo. El procedimiento, sin embargo, resulta poco práctico para parcelas mayores de una hectárea (SILVA MEDINA, 1998).

Foto 8. Lisímetro.



Fuente: <http://www.irrometer.com/images/pair.jpg?w=240>

- En función de la evaporación potencial

Es la cantidad de agua consumida durante un determinado período de tiempo, en un suelo cubierto por vegetación homogénea, densa, en plena actividad vegetativa y con buen suministro hídrico.

La evapotranspiración real se puede obtener con un evaporímetro. Un tanque evaporímetro puede ser como el estandarizado Clase A (ver foto 6). Los datos obtenidos mediante este instrumento, deben multiplicarse por el factor (*k*) del tanque, que considera las condiciones de exposición, y varía entre 0.55 para zonas frías y 0.85 en áreas calientes (MATERÓN MUÑOZ, 1992). De esta manera la evaporación potencial se calcula mediante la expresión 2.26.

$$E_0 = K * E_T \quad (2.26)$$

Donde:

E₀= evaporación potencial.

E_t= evaporación media en el tanque.

K= factor del tanque.

La evapotranspiración real (ETR) se calcula mediante siguiente expresión 2.27:

$$ETR = K2 * E_0 \quad (2.27)$$

K2: coeficiente para el período de análisis, incluye los efectos de intensidad y distribución de la lluvia, época del año, tipo de cultivo, capacidad del suelo para almacenar agua. Oscila entre 0.5 y 0.9.

- Uso de fórmulas empíricas

Existen innumerables fórmulas para calcular la evapotranspiración a partir de las variables atmosféricas, el tipo de cultivo, la radiación solar y la época del año. Cada fórmula es aplicable a la región para la cual fue deducida, pero su uso puede extenderse a otras regiones de características homólogas, siempre que se calibren convenientemente los coeficientes (TORRES RUIZ, 2006)

- Fórmula de Thornthwaite (1948).

$$ETP = 16 (10 * T/I) a \quad (2.28)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en mm/mes.

(Se asume 30 días al mes y período de 12 horas de sol al día).

T = Temperatura media del mes en $^{\circ}\text{C}$.

i = Índice de calor anual = sumatoria de los 12 índices de calor mensuales (i), para un año.

I = Índice de calor mensual = $(T/5)^{1.514}$

$a = 675 \times 10^{-10} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1.972 \times 10^{-5} I + 0.49239$

$a = 1.37241$

$$ETR = K2 * ETP \quad (2.26)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/mes.

$K2$ = coeficiente para ese período, oscila entre 0.5 y 0.9.

- Método de Turc (1961)

$$ETR = \frac{Pm}{\sqrt{0.9 + Pm^2 / L^2}} \quad (2.29)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración en mm/mes.

Pm = precipitación media de la zona, (mm).

$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$.

T = Temperatura media de la zona, ($^{\circ}\text{C}$).

- Balance Hidrológico

El estudio del balance hidrológico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad, ver ecuación 2.30, que relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico de una zona particular, durante un período determinado.

En forma general dicha ecuación se expresa así:

$$I = O + \Delta S \quad (2.30)$$

Donde:

I = volumen del agua que entra a la zona en el periodo.

ΔS = cambio en los almacenamientos superficiales y subterráneos.

O = volumen de agua que sale de la zona hacia la atmósfera o hacia zonas vecinas.

En una zona determinada la ecuación del balance toma la forma siguiente:

$$P + Q_a + G = E_t + Q + \Delta S \quad (2.31)$$

Donde:

P = volumen de agua que cae como lluvia sobre la zona.

Q_a = caudal superficial que llega a la zona desde zonas vecinas.

G = volumen neto del flujo de agua subterránea desde y hacia zonas vecinas.

E_t = evapotranspiración real.

Q = volumen de agua que sale de la zona como caudal superficial.

ΔS = cambio en el almacenamiento. Los almacenamientos superficiales corresponden a lagos, embalses y canales de drenaje, mientras que los subterráneos se refieren tanto a la humedad del suelo como a los acuíferos.

Estas mediciones presentan dificultades, especialmente el flujo neto de agua subterránea (G), el cual requiere la elaboración de estudios costosos que incluyen la perforación de pozos de investigación.

La ecuación se simplifica cuando se aplica a períodos de años húmedos, que son aquellos que comienzan y terminan en época lluviosa. En este caso los almacenamientos están llenos al comienzo y al final del período, y el término ΔS se aproxima a cero. Si además se dan las condiciones para que los términos Q_a y G resultan despreciables, la ecuación se reduce a la forma sencilla 2.32 (SILVA MEDINA, 1998):

$$E_t = P - Q \quad (2.32)$$

2.8 CONTROL DE EVAPORACIÓN EN EMBALSES

Para disminuir la evaporación potencial en el embalse se deben controlar las condiciones meteorológicas que intervienen en el proceso de evaporación, así como adoptar un apropiado dimensionamiento que reduzca el área superficial expuesta.

Según la ecuación de Penman (2.21), la evaporación potencial está en función de la radiación solar, el albedo, la velocidad del aire y el gradiente de presión ($e_s - e$).

Estas variables son las que se deben controlar para disminuir la evaporación (TORRES RUIZ, 2006).

Foto 9. Embalse del Neusa.



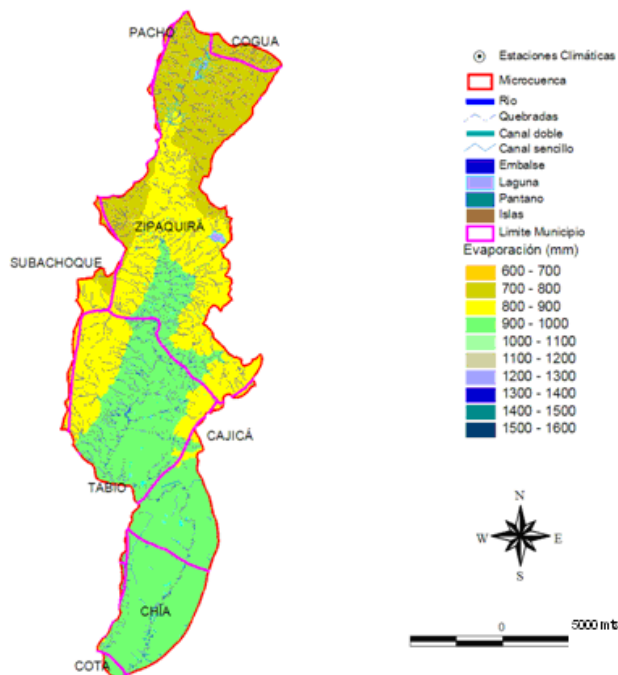
Fuente: http://www.car.gov.co/images/dinamicas/6_6_2007_5_02_36_PM_Emb_NeusaG.jpg.

A continuación, se plantean formas de controlar algunas de dichas variables:

- La radiación solar puede reducirse cubriendo la superficie del embalse con una sustancia de albedo alto (plástico blanco, vegetación o alcoholes).
- El control de la velocidad del aire se logra con la implementación de barreras vivas, mediante la siembra de árboles. La aplicación de esta medida depende tanto de la viabilidad en la construcción de la barrera como de la importancia que tenga la velocidad en los cálculos de la evaporación de cada caso particular.
- El gradiente de presión puede reducirse construyendo el embalse en zonas de alta humedad relativa, lo cual no siempre es posible porque los sitios para embalses se escogen de acuerdo con condiciones geotécnicas y topográficas, que son independientes de las condiciones meteorológicas.
- Por último, si la evaporación potencial es alta, lo recomendable es construir embalses de poca área superficial o almacenar el agua en depósitos subterráneos (SILVA MEDINA, 1998).

2.9 INVESTIGACIÓN ZONA DE ESTUDIO SUBCUENCA DEL RÍO FRÍO

Figura 17. Isolíneas de la evaporación para la Subcuenca de río Frío.



Fuente: Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del Río Frío en el municipio de Chía (PEREZ ROMO & VANEGAS SANDOVAL, 2016).

En el mapa de isolíneas de evaporación en la subcuenca (Figura 17) se observa que los valores más bajos de evaporación se presentan en la parte alta, en los municipios de Coque y Zipaquirá, con registros que fluctúan entre 700 y 800 mm. Luego disminuye hacia el sur observándose en la parte media, entre las cotas 2.800 y 3.200 msnm, valores más bajos con registros entre 800 y 900 mm, y finalmente en las partes más bajas, en los municipios de Chía y Cota, entre las cotas 2.500 y 2.800 msnm al sur de la subcuenca, registros entre 900 mm 1.000 mm.

De acuerdo con lo anterior se puede decir que la evaporación media en la subcuenca es de aproximadamente 800 mm siendo muy similar a la precipitación media (PEREZ ROMO & VANEGAS SANDOVAL, 2016).

- EVAPORACIÓN

Ejemplo:

Calcular la evaporación por los métodos:

1. Balance de energía.
2. Fórmula de Penman.
3. Fórmula combinada de Penman.

Datos:

$P_a = 800\text{mb}$; $t_a = 20^\circ\text{C}$; $t_s = 17^\circ\text{C}$; $H_R = 80\%$; $R_a = 550\text{Ly/día}$; $V_l = 250\text{ Km/día}$,
 $S = n/N = 40\%$; $Z = 2\text{m}$; $Z_l = 10\text{m}$.

1. Balance de energía:

Solución:

$$E_o = \frac{R_n/L}{1+\beta} \quad (2.17)$$

Donde:

E_o = evaporación en *mm/día*.

R_n = radiación neta en *Ly/día*.

L = 59 cal/cm^3 .

β = relación de Bowen.

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.14)$$

$$R_s = 550 (0.3 + 0.5 * 0.4) = 275 \text{ Ly/día}$$

$$R_b = K\sigma T_a^4 \quad (2.13)$$

$$K = (0.56 - 0.09\sqrt{e_d}) * (0.1 + 0.9 n/N) \quad (2.13)$$

$$e_a = 6,11 * 10^{\frac{7.5*20}{237.3+20}} = 23.39 \quad (2.7)$$

$$e = 0.80 * (23.39) = 18.71 \text{ mb} \frac{0.75 \text{ mmHg}}{1 \text{ mb}} = 64 \text{ mmHg} \quad (2.8)$$

$$K = (0.56 - 0.09\sqrt{(14.03)}) * (0.1 + 0.9 * 0.4) = 0.10$$

$$T_a = 20 + 273 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$R_b = 0.10 * (1.17 * 10^{-7}) * 293^4 = 86.23 \text{ Ly/día}$$

$$R_n = 275 * (1 - 0.05) - 86.23 = 175.02 \text{ Ly/día} \quad (2.15)$$

$$\beta = (\gamma) * \frac{t_s - t_a}{e_s - e} \quad (2.17)$$

$$\gamma = 6.11 * 10^{-4} * \text{Pa} \rightarrow \gamma = 6.11 * 10^{-4} * 800 = 0.49 \text{ mb/}^\circ\text{C}$$

$$e_s = 6.11 * 10^{\frac{7.5 * 17}{237.3 + 17}} = 19.38 \text{ mb}$$

$$\beta = 0.49 * \frac{175.02/59}{1 + 2.19} = 2.19$$

$$E_0 = \frac{175.02/59}{1 + 2.19} = 0.93 \text{ mm/día}$$

2. Fórmula de Penman


Solución:

$$E_0 = 0.35 \left(0.50 + \frac{V_2}{160} \right) (e_s - e) \quad (2.21)$$

$$V_2/V_1 = (Z/Z_1)^{0.5}$$

$$V_2 = 250 * (2/10)^{0.5} = 111.80 \text{ Km/día}$$

$$E_0 = 0.35 \left(0.50 + \frac{111.8}{160} \right) (19.38 - 18.71) * 0.75 = 0.21 \text{ mm/día}$$

Nota: 1mb = 0.75mmhg 

3. Fórmula combinada de Penman

Solución:

$$E_0 = \frac{\frac{R_n}{59} + \frac{\gamma}{\Delta} * E_a}{1 + \frac{\gamma}{\Delta}} \quad (2.22)$$

$$R_n = 175.02 \text{ Ly/día}$$

$$\gamma = 0.49 \text{ mb/°C}$$

$$\Delta = \frac{e_a(a)(b)}{e_a(b + ta)^2} * \ln 10 \quad (2.23)$$

$$\Delta = \frac{23.39 * 7.5 * 237.3}{(237.3 + 20)^2} * \ln 10 = 1.45 \text{ mb/°C}$$

$$E_a = 0.35 \left(0.50 + \frac{111.80}{160} \right) (23.39 - 18.71) * 0.75 = 1.47 \text{ mm/día} \quad (2.23)$$

$$E_a = \frac{\frac{175.02}{59} + \frac{0.49}{1.45} * 1.47}{1 + \frac{0.49}{1.45}} = 3,6 \text{ mm/día}$$

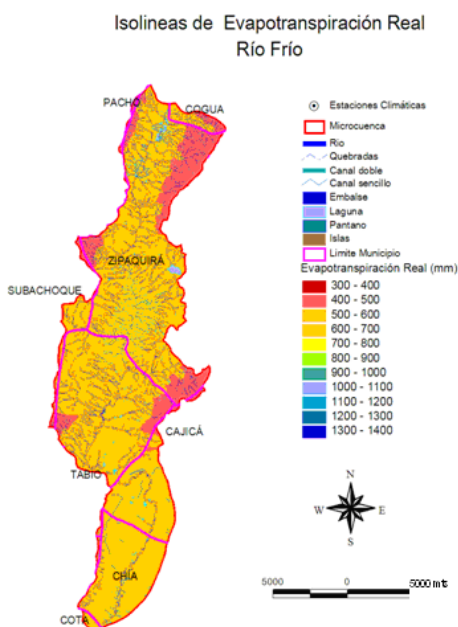
- Evapotranspiración real y potencial

Ejemplo:

Calcular la evapotranspiración real del año 1990 a partir del evaporímetro de la estación climatológica N° 2120559 Guaymaral de la CAR, ver tabla 16.

Datos mensuales de evaporación media en el tanque de 1990:

Figura 18. Evapotranspiración real y potencial de la cuenca del río Frío, Cundinamarca.



Fuente: Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del Río Frío en el municipio de Chía (PEREZ ROMO & VANEGAS SANDOVAL, 2016).

Tabla 17. Precipitación mensual (mm) para el año 1990, de la estación climatológica N° 2120559 Guaymaral de la CAR.

Ener	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1242	1142	1179	987	862	760	834	909	975	982	950	108

Fuente: Corporación autónoma regional (CAR).

Solución:

Se toman valores medios mensuales de la evaporación en el tanque de la estación climatológica. Para calcular la evaporación potencial se utiliza la ecuación:

$$E_0 = K * E_T \quad (2.26)$$

Donde:

E_0 = evaporación potencial.

E_T = evaporación media en el tanque.

Para este caso se tomó un valor de $k = 0.6$.

La evapotranspiración real (ETR) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$ETR = K2 * E_0 \quad (2.27)$$

Para este ejemplo se adaptó un $K2 = 0.6$

Tabla 18. Cálculo de la evaporación potencial y evapotranspiración real, en la cuenca del río Frío (Cundinamarca), durante el año 1990.

MES	ET	EO	ETR
Enero	124.2	74.5	44.7
Febrero	114.2	68.5	41.1
Marzo	117.9	70.7	42.4
Abril	98.7	59.2	35.5
Mayo	86.2	51.7	31.0
Junio	76.0	45.6	27.4
Julio	83.4	50.0	30.0
Agosto	90.9	54.5	32.7
Septiembre	97.5	58.5	35.1
Octubre	98.2	58.9	35.4
Noviembre	95.0	57.0	34.2
Diciembre	108.1	64.9	38.9
Valor Anual	1109.3	714.3	428.4

Fuente: Autores.

La evapotranspiración real calculada en el evaporímetro para el año 1990 fue de 428.4 mm/año, ver tabla 18, lo cual significa una evapotranspiración media alta para la subcuenca del río Frío, ya que la precipitación media es de 780 mm.

Ejemplo:

Calcular la evapotranspiración potencial y real por el método de Thornthwaite, con la temperatura media registrada en la estación de Guaymaral de la subcuenca del río Frío, ver tabla 19:

Tabla 19. Temperatura media mensual (°C) para el año 1990, de la estación climatológica N° 2120559 Guaymaral de la CAR.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12.8	13.2	13.6	13.3	13.1	12.3	11.9	12	12.4	13	13.1	12.7

Solución:

- Fórmula de Thornthwaite.

$$ETR = K2 * ETP \quad (2.27)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial en mm/mes (se asume 30 días al mes y Período de 12 horas de sol al día).

T = temperatura media del mes en °C.

i = índice de calor anual = sumatoria de los 12 índices de calor mensuales (*i*), para un año.

I = índice de calor mensual = $(T/5)^{1.514}$

$a = 675 \times 10^{-10} |^3 - 771 \times 10^{-7} |^2 + 1.972 \times 10^{-5} | + 0.49239;$

$a = 1.37241$

ETR = evapotranspiración real en mm/mes, mm/año.

$$ETR = K2 * ETP \quad (2.28)$$

Cálculo del índice del calor anual (*I*),

$$I = \text{índice de calor mensual} = (T/5)^{1.514} \xrightarrow{\text{enero}} (12.8/5)^{1.514} = 4.15$$

Tabla 20. Índice calórico mensual para el año 1990, en la subcuenca del río Frío, Cundinamarca.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL (I)
4.15	4.35	4.55	4.40	4.30	3.91	3.72	3.76	3.96	4.25	4.30	4.10	49.74

Fuente: Autores.

Tabla 21. Cálculo de la evapotranspiración real y potencial por el método de Thornthwaite, para la subcuenca del río Frío (Cundinamarca), durante el año 1990.

MES	T	I	ETP	ETR
ENERO	12.8	4.15	56.5	35.0
FEBRERO	13.2	4.35	58.3	32.6
MARZO	13.6	4.55	60.0	37.2
ABRIL	13.3	4.40	58.7	35.2
MAYO	13.1	4.30	57.8	35.9
JUNIO	12.3	3.91	54.3	32.6
JULIO	11.9	3.72	52.5	32.6
AGOSTO	12	3.76	53.0	32.8
SEPTIEMBRE	12.4	3.96	54.7	32.8
OCTUBRE	13	4.25	57.4	35.6
NOVIEMBRE	13.1	4.30	57.8	34.7
DICIEMBRE	12.7	4.10	56.1	34.8
VALOR ANUAL	12.8	49.74	677.3	411.9

Fuente: Autores.

- Método de Turc (1961)

Para el caso de la subcuenca del río Frío.

$$ETR = \frac{Pm}{\sqrt{0.9 + Pm^2 / L^2}} \quad (2.29)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración en mm/mes.

P_m = precipitación media de la zona, subcuenca del río Frío = 708.4 mm
 L = $300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$.
 T = temperatura media de la zona = 12.8°C.

$$ETR = \frac{708.4}{\sqrt{0.9 + 708.4^2 / 724.86^2}}$$

$$ETR = 520 \text{ mm/año}$$

Para estimar un valor promedio de la cuenca del río Frío, se toma el promedio de los tres valores obtenidos por los métodos de evaporímetro, Thornthwaite y Turc. Es necesario usar varios métodos de cálculo para determinar un valor que se acerque más a la realidad.

$$ETR = \frac{428.4 + 411.9 + 520}{3} = 453.4 \text{ mm/año}$$



CAPÍTULO III
PRECIPITACIÓN



INTRODUCCIÓN

Se entiende por precipitación la caída de partículas líquidas o sólidas de agua. La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, por lo que la evaluación de su distribución, tanto en tiempo como en espacio, son problemas básicos en hidrología, junto con otros aspectos.

En esta unidad modular se presenta la precipitación como un mecanismo de abastecimiento de agua en una región, a partir de la humedad almacenada en la atmósfera producto de la evapotranspiración. Para ello es necesario exponer algunos conceptos básicos y diferentes metodologías de análisis de esta variable hidrológica, ya que se debe tener en cuenta tanto su distribución por estaciones, como por zonas.

GENERALIDADES

La precipitación se refiere a la cantidad de agua caída en un área, proceso que requiere una serie de condiciones previas en la atmósfera, tales como la existencia de vapor de agua en grandes proporciones, el cual deber ascender y condensarse formando nubes. Al interior de estas también deben darse condiciones para que las pequeñísimas partículas de agua y hielo aumenten de tamaño y peso, lo suficiente para caer desde la nube y llegar al suelo.

La precipitación se puede presentar de las siguientes formas (ver figura 18): lluvia, nieve, granizo, tormenta y niebla. Su cantidad y distribución (espacial y temporal) son muy variables, razón por la cual ha sido objeto de estudio intenso por parte del hombre, en la determinación de los climas y el aprovechamiento de los recursos hídricos que ofrece la naturaleza.

La intensidad de las precipitaciones varía de un lugar a otro aunque no se encuentren a mucha distancia. A lo largo de un año también hay variaciones. Existen zonas en las que en un sólo día cae más lluvia que en otros, a lo largo de todo el año.

Las causas que influyen en la distribución de las precipitaciones en el planeta son: la proximidad al mar, que aumenta la humedad del aire, y las corrientes ascendentes de aire. Ejemplo de dichas corrientes son las que se generan por la presencia de las cordilleras, sobre las cuales la precipitación es más frecuente e intensa en la ladera en la que se enfrenta a más vientos, o barlovento.

Figura 19. Precipitación.



Fuente: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/1e01.html

3.1 FORMAS DE PRECIPITACIÓN

3.1.1 Lluvia

Precipitación de gotas líquidas de agua que tienen en general diámetros superiores a 0,5 mm y pueden llegar a unos 3 mm, caen con una velocidad que sobrepasa los 3 m/s. La formación de la lluvia a partir del vapor de agua

contenido en la atmósfera, se inicia con una fase de saturación, en la que el aire húmedo se enfría hasta la temperatura del punto de rocío.

Foto 10. Lluvia.



Fuente: http://www.curiosidadesenlared.com/que-es-la-lluvia-acida/lluvia_acida/

La precipitación de gotas menores, es llamada llovizna, suele limitar fuertemente la visibilidad, pero en general no produce acumulaciones significativas de agua. La cantidad o volumen de agua caída se expresa como la profundidad del agua que se recoge en una superficie plana, y se mide en un calibre hasta de 0,25 milímetros.

3.1.2 Nieve

Fenómeno de la atmósfera que consiste en la precipitación de agua helada en forma de cristales agrupados en copos blancos, que proviene de la congelación de vapor de agua atmosférico, ver Foto 11.

Foto. 11. Nieve.



Fuente: www.solophotoshop.com/.../phot-efecto-nieve.jpg.

3.1.3 Granizo

Nombre que recibe el agua congelada que se origina en los cumulonimbos, cae en forma de chubasco y constituye un fenómeno local y de corta duración.

Su formación es debida a fuertes corrientes de aire ascendentes y descendentes que arrastran los diminutos cristales de hielo, los cuales actúan como núcleos de condensación del vapor de agua, que se va condensando en capas de hielo hasta caer por su peso. Su tamaño oscila entre 0,5 y 2 cm de diámetro, ver Foto 12.

Foto 12. Granizo.



Fuente: <https://www.definicionabc.com/general/granizo.php>

3.1.4 Tormenta

Perturbación o tempestad de la atmósfera. Las perturbaciones tormentosas son violentas y van acompañadas de fuertes descargas eléctricas y de abundantes precipitaciones.

Se producen en todas las zonas de la Tierra relacionadas con nubes de desarrollo vertical denominadas cumulonimbos, incluso en la atmósfera ártica.

Se distinguen dos tipos principales de tormentas:

- Las de calor originadas por movimientos ascendentes de aire cálido y húmedo, típicas de los períodos de estiaje y que predominan en las regiones tropicales húmedas.
- Las de frente frío producidas generalmente durante el invierno a causa de la llegada de este tipo de frentes.

Foto 13. Tormenta.



Fuente: <http://www.portalciencia.net/images/tormenta.jpg>.

3.1.5 Niebla

Nube de características parecidas a los estratos, que se halla en contacto con la superficie terrestre.

Formada por numerosas gotitas microscópicas de agua, la niebla presenta un color blanquecino o gris claro y dificulta la visión, cuando es densa, incluso a corta distancia, ver Foto 14.

Por lo general las nieblas se forman en las zonas húmedas, por un proceso de irradiación, a causa del enfriamiento nocturno del aire en contacto con el suelo, que provoca una inversión de temperaturas.

Foto 14. Niebla.



Fuente: www.meteofrance.com

3.2 FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Para la formación de la precipitación se requiere de las siguientes condiciones:

- Humedad atmosférica.
- Radiación solar.
- Mecanismo de enfriamiento del aire húmedo
- Presencia de núcleos higroscópicos para que haya condensación.
- Mecanismo de crecimiento de las partículas.

El aire húmedo es calentado por la radiación solar y debido a esto asciende. Cuando esta masa atraviesa el nivel de condensación, la temperatura disminuye de acuerdo con un gradiente (1°C por cada 100 m de ascenso) y el vapor de agua pasa de su actual estado a líquido o sólido. Para este proceso es necesaria la presencia de núcleos higroscópicos (cuerpos que absorben o exhalan humedad), donde se adhieren las partículas de agua, de manera que las gotas se mantienen en suspensión hasta que crecen suficientemente, alcanzando el peso requerido para precipitar.

Como se trató en la definición de precipitación, las nubes son indispensables para este fenómeno atmosférico, por lo tanto, a continuación, se hace referencia a su formación y tipos:

3.2.1 Nubes

Forma condensada de humedad atmosférica compuesta de pequeñas gotas de agua o de diminutos cristales de hielo. Las nubes son el principal fenómeno atmosférico visible.

- Formación y efectos

En meteorología, la formación de nubes debido al enfriamiento del aire provoca la condensación de vapor de agua, invisible, en gotitas o partículas de hielo visibles. Las partículas que componen las nubes tienen un tamaño que varía entre 5 y 75 micras ($0,0005\text{ cm}$ y $0,008\text{ cm}$), son tan pequeñas que las sostienen en el aire corrientes verticales leves.

Las diferencias entre formaciones nubosas derivan en parte, de las variadas temperaturas de condensación. Cuando las nubes se producen a temperaturas inferiores a la de congelación, suelen componerse de cristales de hielo, pero si se forman en aire más cálido generalmente están compuestas de gotitas de agua. El movimiento de aire asociado al desarrollo de las nubes también afecta

su formación: si se crean cuando el aire está en reposo, tienden a aparecer en capas o estratos, mientras que, si se forman entre vientos o aire con fuertes corrientes verticales, presentan un gran desarrollo vertical.

Las nubes desempeñan una función muy importante, ya que modifican la distribución del calor solar sobre la superficie terrestre y en la atmósfera. En general, ya que la reflexión de la parte superior de las nubes es mayor que la de la superficie de la Tierra, la cantidad de energía solar reflejada al espacio es mayor en días nublados.

Aunque la mayor parte de la radiación solar es reflejada por las capas superiores de las nubes, una porción de ella penetra hasta la superficie terrestre, que la absorbe y la emite de nuevo.

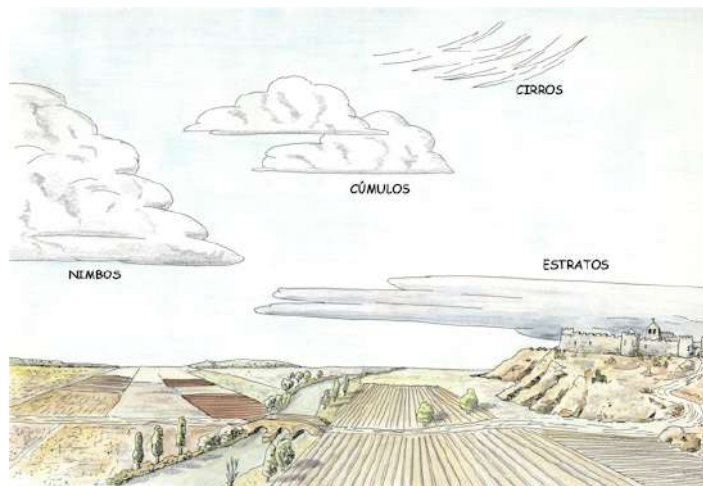
La parte inferior de las nubes es opaca para esta radiación terrestre de onda larga y la refleja de vuelta a la Tierra.

- Tipos de nubes

Más de 100 tipos de nubes rodean la superficie terrestre. Según se distribuya tanto la humedad como el calor solar, las nubes suelen clasificarse por su aspecto y altitud.

- Clasificación

Figura 20. Clasificación de las nubes.



Fuente: http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/profesor/galeria_imagenes/imagenes/nubes%20con%20letras.jpg.

Las nubes suelen dividirse en cuatro familias principales según su altura en que se encuentren ver Figura 20:

Nubes Altas (por encima 6000 metros de altura): cirros, cirrocúmulos, cirroestratos.

Nubes medias (de 2000 a 6000 metros de altura): nimboestratos, altocúmulos, altoestratos.

Las nubes bajas (de 0 a 2000 metros de altura): estratos, estratocúmulos, cúmulos.

Nubes de desarrollo vertical: cúmulos, congestus, cumulonimbos, las cuales se pueden extender a lo largo de todas las alturas.

a. Nubes altas (cirros)

Nube blanca y ligera, de aspecto fibroso o filamentoso, que se encuentra a altitudes comprendidas entre 6.000 y 10.000 m, y está formada por pequeños cristales de hielo muy dispersos, que permiten el paso de la luz solar.

- **Cirros:** son nubes de hielo, las que presentan mayor altura aparecen individualmente en cualquier época del año. Su aspecto puede ser fibroso y aparecen enmarañados de manera caprichosa o en forma de bandas anchas que aparentemente convergen hacia el horizonte. Los cirros proceden a menudo de la evolución de cirrocúmulos y de altocúmulos, o de la transformación de cirroestratos de espesor no uniforme, cuyas partes más delgadas se han evaporado, ver Foto 15.

Foto 15. Nubes cirros.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Cirrocúmulos:** normalmente tienen la apariencia de una capa de casi continua que forma ondas muy finas o puede tener contornos fibrosos. Suelen presentarse en bancos cuyos elementos tienen la forma de lenteja o pequeños glóbulos, pueden originarse tanto en una atmósfera limpia, como a partir de la transformación de cirros o cirroestratos. Son nubes que se ven con poca frecuencia.

Foto 16. Nubes cirrocúmulos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Cirroestratos:** normalmente se presentan como un velo nuboso muy tenue, transparente y blanquecino, de aspecto fibroso o liso, que cubre total o parcialmente el cielo, ya que tiene una gran extensión horizontal. Se producen cuando fenómenos de halo (producto de la refracción de la luz en los cristales de hielo que componen este tipo de nubes), se interponen a la luna o al sol.

Foto 17. Nubes cirroestratos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

La formación de los cirroestratos se debe al ascenso, hasta niveles suficientemente elevados, de capas de aire de gran extensión. También pueden provenir de la fusión de cirros o de los elementos de los *Cirrocúmulos*.

b. Nubes medias

Formación nubosa blanca o grisácea, de aspecto redondeado y tamaño variable. Se encuentra a alturas comprendidas entre 3.000 y 4.000 m y procede de la descomposición de los altoestratos.

- **Nimboestratos:** son nubes densas de color gris oscuro, sombrías, que producen precipitaciones continuas y persistentes de lluvia o nieve, que llegan al suelo en la mayoría de los casos. Su espesor es tan grande que ocultan completamente el Sol.

Los nimboestratos pueden proceder del engrosamiento de un altoestrato o por la estratificación de cumulonimbos.

Foto 18. Nubes nimboestratos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Altocúmulos:** se presentan en bancos de nubes pequeñas bien contorneadas ver Foto 19, con formas de losas o guijarros que semejan a un rebaño de borregos o a grupos de masas algodonosas. Son casi siempre pocos sombríos. Con frecuencia los mantos de altocúmulos se observan simultáneamente en dos o más niveles.

Estas nubes medias pueden proceder del incremento en las dimensiones de los cirrocúmulos, del aumento en el espesor de una capa de los mismos, o de la estratificación de cúmulos. Toman formas lenticulares en presencia de fuertes vientos y a sotavento de una montaña. (<http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>).

Foto 19. Nubes altocúmulos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Altoestratos:** se presentan en forma de capas de color grisáceo o azulado, de aspecto estriado, fibroso o uniforme, que cubren por entero o parcialmente el cielo, dando lugar al fenómeno de corona. A través de estas nubes es posible ver la luz de la luna o del sol, sin distinguir su entorno (<http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>, s.f.). Los altoestratos pueden proceder del aumento de espesor de un velo de cirroestratos o de una capa de altocúmulos.

Foto 20. Nubes altoestratos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

c. Nubes bajas

Cúmulo estratificado que da lugar a formaciones de nubes bajas en forma de losas o rodillos, de color gris oscuro y que normalmente no generan lluvia. Estas nubes se forman a alturas inferiores a 1,6 kilómetros.

- **Estratos:** son nubes de baja altura, de color gris y uniforme, que pueden originar llovizna, prismas de hielo o cinarra. En ocasiones tienen su origen

o dan lugar a nieblas densas que aparecen en la mañana y que al pasar por lugares más cálidos, se elevan y fraccionan hasta desaparecer. También pueden formarse a partir de estratocúmulos. Por lo general se desarrollan en ambiente estable o anticiclónico y son más frecuentes en el invierno (<http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>, s.f.).

Foto 21. Nubes estratos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Estratocúmulos:** generalmente tienen apariencia de manto o capa de nubes blanquecinas con partes oscuras. Ocasionalmente dan lugar a precipitaciones de intensidad débil, en forma de lluvia o nieve.

Estas nubes con frecuencia son el resultado de la estratificación de las partes altas o medias de cúmulos. Se desarrollan en ambiente atmosférico estable y son muy frecuentes en zonas de mar.

Foto 22. Nubes estratocúmulos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Cúmulos:** corresponden al tipo de nube más común y tienen su origen en corrientes ascendentes poco intensas, aunque también pueden provenir del descenso de altocúmulos o del fraccionamiento de estratocúmulos. Son nubes de pequeñas dimensiones, tanto verticales como horizontales, que aparecen en cualquier época del año. Presentan frecuentemente formas suaves, de tipo algodonoso y contornos bien definidos. A veces aparecen agrupados en líneas o calles que son perpendiculares a la dirección del viento y normalmente es fácil ver cómo se mueven con el viento (<http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>, s.f.), ver Foto 23.

Foto 23. Nubes cúmulos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

d. Nubes de desarrollo vertical

Las nubes de esta familia alcanzan altitudes que varían desde menos de 1,6 km hasta más de 13 km sobre la tierra.

Además de presentar desarrollo vertical, tienen la base plana y cima grande y redondeada. Los cúmulos son nubes convectivas que se originan de forma localizada por el aire ascendente, debido al calentamiento de la superficie terrestre por la radiación solar.

- **Cúmulos congestus:** son nubes de desarrollo vertical que se forman en ambientes con corrientes ascendentes (térmicas), normalmente a partir de cúmulos de menores dimensiones. Tienen el aspecto de grandes coliflores con la parte superior muy brillante y también del proceso de ebullición de un líquido calentado por debajo (convección). Dan lugar a precipitaciones de tipo chubasco, que tienen poca duración. Pueden llegar a convertirse en cumulonimbos si la inestabilidad atmosférica es suficiente (<http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>, s.f.).

Foto 24. Nubes cúmulos congestus.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

- **Cumulonimbos:** son nubes de mayor extensión vertical, de manera que llegan a elevarse hasta los 15 km de altura. La parte superior puede ser lisa o fibrosa y casi siempre aplastada, en forma de yunque. Se desarrollan en ambientes de gran inestabilidad atmosférica (aire frío en altura, aire cálido por debajo). Son los mayores productores de tiempo atmosférico y con frecuencia dan lugar a tormentas, chubascos de granizo o fuertes vientos.⁶

Foto 25. Nubes cumulonimbos.



Fuente: <http://www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html>.

3.2.2 Mecanismos de ascenso de las masas de aire

En general las nubes se forman por el enfriamiento del aire por debajo de su punto de saturación. Este enfriamiento puede tener lugar por varios procesos

⁶ www.fuenterrebollo.com/Nubes/atlas-nubes.html

que conducen al ascenso adiabático, con el consiguiente descenso de presión y descenso de temperatura. De estos procesos se derivan los diferentes **tipos de precipitación**, cuya intensidad y cantidad, dependerán del contenido de humedad del aire y de la velocidad vertical del mismo.

3.2.2.1 Precipitación orográfica: ocurre cuando vientos cálidos y húmedos procedentes del mar, entran al continente y se encuentran con una barrera montañosa, por la que obligatoriamente ascienden y se enfrían. Cuando se supera el punto de rocío, el vapor de agua se condensa en gotitas que aumentan de tamaño y caen a la superficie en forma de lluvia, si la temperatura de la nube sigue descendiendo. Cuando se supera la barrera montañosa, el aire está más frío y ha perdido gran parte de su humedad, descendiendo la humedad a niveles más bajos.

De nuevo en contacto con la superficie, la temperatura del aire se incrementa. Si no encuentra una nueva fuente de vapor, su humedad relativa desciende y en estas condiciones generalmente da lugar a zonas desérticas tras las cordilleras, que se denominan desiertos orográficos o desiertos de sombra de lluvia.⁷

Figura 21. Precipitación orográfica.

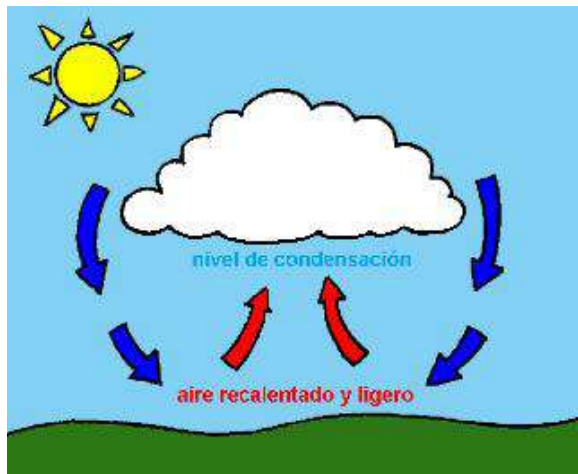


http://www.ambientum.com/enciclopedia/atmosfera/3.01.16.26_2r.html

- **Precipitación convectiva:** tiene lugar cuando aumenta la temperatura de la superficie terrestre, debido a la radiación solar, lo que genera el calentamiento de la masa de aire allí presente. Por la diferencia de densidades, la masa de aire en la parte superior que no se calentó, desplaza el aire cálido de la parte inferior, causando su ascenso, proceso que ocurre lentamente si las masas de aire están en calma y no hay turbulencia.

⁷ www.ambientum.com/enciclopedia/atmosfera/3.01.16.26_2r.html

Figura 22. Precipitación convectiva.

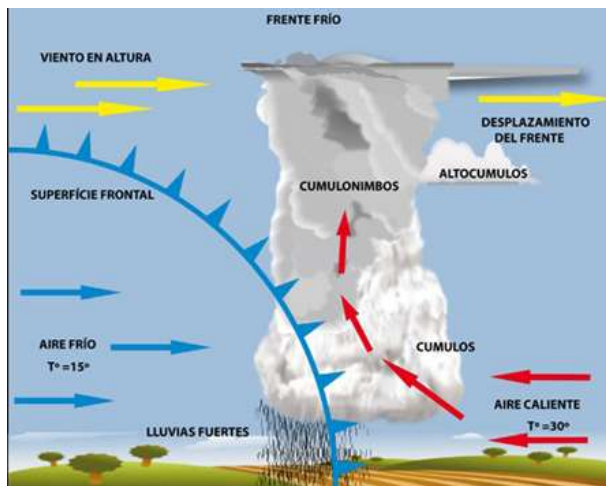


Fuente: <http://elmundodelrelieve.blogspot.com.co/2013/05/el-clima.html>

Cuando hay viento se presenta un ascenso brusco y violento del aire menos denso (cálido), generando precipitaciones de poca intensidad y larga duración, concentradas en grandes áreas, así como nubes de gran desarrollo vertical conocidas como “estratos” o “estratocúmulos”.

- Precipitación por convergencia

Figura 23. Precipitación por convergencia.



Fuente: <http://metargentina.blogspot.com.co/2014/11/la-lluvia.html>

Se presenta cuando dos masas de aire que tienen casi la misma temperatura, se mueven al mismo nivel en direcciones opuestas y chocan, produciéndose un calentamiento de las mismas, lo cual genera una disminución en su densidad y por lo tanto su ascenso.

- Precipitación ciclónica

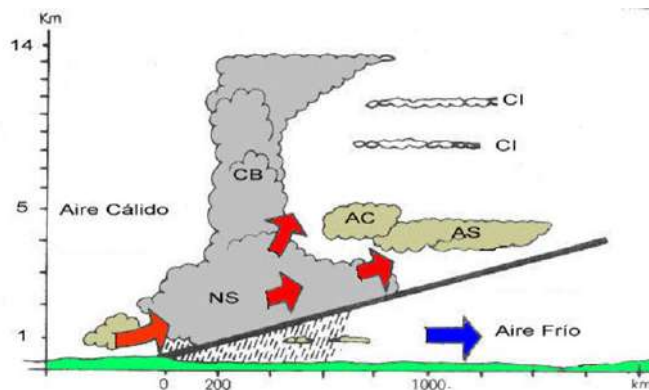
Existen dos formas de precipitación ciclónica: frontal y no frontal.

La precipitación frontal se asocia a un frente frío o a un frente cálido. Los frentes se asocian a zonas de baja presión y se producen cuando una masa de aire frío entra en contacto con otra de aire cálido. La circulación de la atmósfera terrestre hace que el aire frío se mueva hacia el Este y hacia el ecuador, mientras que el cálido se desplaza hacia el Este y hacia los polos formando una cuña llamada sector cálido. Este movimiento hace que el frente se curve: el frente cálido se desvía hacia el Este, donde el borde delantero del sector cálido está reemplazando al aire frío, y el frente frío se desvía hacia el Oeste.

Como el aire frío se mueve más deprisa que el cálido, el sector cálido se va comprimiendo y el frente se cierra y pierde fuerza.⁸

1. Un frente cálido, está formado por una masa de aire caliente que asciende por encima del aire más frío y origina la formación de nubes (cirros) a gran altura y estratos a baja altura (Figura 24), que provocan lluvias continuas, poco intensas, que cubren un área de gran extensión.

Figura 24. Frente cálido.

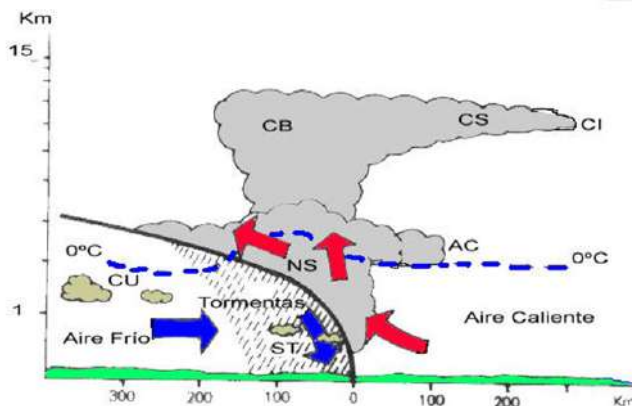


Fuente: <https://www.tutiempo.net/meteorologia/frentes.html>

8 www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Atmosphere/tstorm/cold_front.sp.html

- Un frente frío, constituido por una masa de aire frío que se introduce como una cuña por debajo del aire caliente y que lo hace ascender con rapidez, provoca la formación de nubes (cumulonimbos), chubascos (lluvias intensas y tormentas) (Figura 25), de corta duración, que cubren un área de poca extensión.

Figura 25. Frente frío.



Fuente: <https://www.tutiempo.net/meteorologia/frentes.html>

3.3 APARATOS DE MEDIDA Y REGISTRO

Los instrumentos para la medición y registro de elementos meteorológicos, en superficie y altura, se ubican en una estación climatológica, también denominada “caseta meteorológica” (Foto 26), donde es posible registrar las diferentes variables, para establecer el comportamiento atmosférico en distintas zonas del territorio nacional y fronterizo.

En estas estaciones se registran parámetros meteorológicos relacionados con la precipitación, evaporación, recorrido del viento, radiación solar, punto de rocío, cantidad de horas de sol, temperaturas sobre el suelo a 5 y 10 centímetros de altura, dirección y recorrido del viento, temperaturas del ambiente (máxima, mínima, seca y húmeda), además de la humedad relativa. Al respecto, en cada unidad modular se tratarán los equipos e instrumentos correspondientes a los diferentes parámetros.

Las observaciones se realizan diariamente a las 7:00, 13:00 y 19:00 horas.

Foto 26. Caseta meteorológica.



Fuente: http://acemu.org/wiki/doku.php/meteo:estacion_ema

La caseta meteorológica consta de paredes que están provistas de celosías, a manera de persianas, que permiten la libre circulación del aire a través de ellas. Así mismo, el fondo de la caseta está formado por tablillas traslapadas o un doble piso con agujeros desalineados, que impiden la transmisión del calor y la luz que se refleja del suelo hacia el interior. Los instrumentos y aparatos que van dentro de la caseta son:

- Termómetro de Máxima.
- Termómetro de Mínima.
- Higrómetro. Psicrómetro.

Para la medición de la precipitación se utilizan equipos normalizados denominados pluviómetros los cuales se clasifican en:

- Pluviómetros no registradores (pluviómetros).
- Pluviómetros registradores (fluviógrafos).

3.3.1 Estación pluviométrica

Mide el total de la precipitación atmosférica en un período de tiempo dado (24 horas), la observación se realiza en cualquier momento del día, pero para que los datos sean confiables, se debe hacer la lectura todos los días a la misma hora.

Foto 27A. Pluviómetro.



Fuente: <https://www.tutiempo.net/meteorologia/articulos/pluviometro-y-pluviografo.html>

El pluviómetro es el instrumento más utilizado para la medición de las precipitaciones, también se le llama pluviómetro no registrador por cuanto requiere de un observador que tome las lecturas, quien a su vez debe consignar en una hoja de datos el nombre de la estación, coordenadas, altura y el tipo de estación. Consta de un tanque cilíndrico que capta la lluvia que cae directamente sobre él, tiene un área de captación pequeña, los registros se consideran puntuales y expresan la precipitación recibida en litros o mm/m^2 .

La información que se obtiene es de lluvias de larga duración, cuya duración es mayor a 24 horas, sin tener conocimiento de su intensidad.

3.3.2 Estación pluviográfica

En esta estación se obtiene información de lluvias de corta duración, la cual varía entre 5 minutos (mínimo intervalo de tiempo en el que se puede medir) y 24 horas. La precipitación se registra de forma continua en una figura, por los cambios de peso del volumen de agua recolectada. Con estos datos es posible determinar la intensidad, duración y el total de lluvia que cae en un periodo de tiempo.

El análisis de los datos de precipitación obtenidos en cualquiera de las estaciones mencionadas, se realiza mediante la construcción de diagramas de

barras conocidos como histogramas⁹, los cuales pueden ser de lluvias mensuales o anuales, según el periodo de registro de la precipitación, ver Foto 27B.

Foto 27B. Pluviógrafo.



Fuente: <http://www.inia.uy/>

3.3.3 Estaciones hidrológicas

Son aquellos puestos de observación donde se encuentran instaladas miras hidrométricas o registradores de nivel, que permiten hacer observaciones hidrológicas o climatológicas. Se clasifican en:

- Limnimétricas

Disponen de reglas graduadas o limnímetros que sirven para determinar el nivel de un río o fuente de agua. Su lectura se hace diariamente por observación a las 6:00 a. m. y 6:00 p. m. Por lo general disponen de un sistema de paso de una orilla a la otra para medir mediante molinete (medidor de corriente), la velocidad y profundidad del cauce, con los cuales se determinan los caudales.

La estación que se muestra en la fotografía (Foto 28) corresponde a una estación tipo LM según el catálogo de estaciones de Colombia y se caracteriza

9 Histograma: diagrama de barras donde se registran los datos de lluvias acumuladas desde que se inició el aguacero.

por no tener instrumentos de registro o limnígrafo, por lo cual solamente permite medir el nivel de los ríos a la hora en la que se hace la lectura, de manera que el registro no es permanente.

Foto 28. Estación Limnimétrica LM.



Fuente: <http://ecgroup.com.co/services/>

- Limnigráficas

Foto 29. Estación Limnigráfica.



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4059085/>

Además de poseer los elementos medidores de una estación limnimétrica, tienen una estructura especial para el registro continuo de los niveles de los

cuerpos de agua. La foto 29 en la cual se obtienen datos del agua, en los ríos, lagos y embalses, de uno o varios de los elementos siguientes: niveles, flujo de las corrientes, transporte y depósito de sedimentos y propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua. (Glosario Hidrológico - Hidrometeorología de ETESA, www.hidromet.com.pa/educacion_hidrologico.php)

3.4 ANÁLISIS DE LLUVIAS SOBRE UN ÁREA

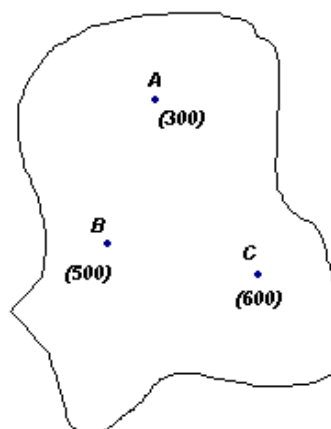
Los registros de una estación son puntuales, pero cuando las estaciones están repartidas convenientemente sobre un área, permiten calcular: aguaceros, lluvias diarias, lluvias mensuales y lluvias anuales en esa región particular. Cada estación utilizada tiene un radio de influencia relativo, de acuerdo con su ubicación.

Después de hacer un estudio preliminar de la variación espacial de la lluvia en un área, se define la distancia entre las estaciones pluviométricas. Esta variación depende de factores orográficos y geográficos, por lo cual se estima que en zonas montañosas existe mayor variabilidad espacial de las lluvias, que en las zonas planas, razón por la que en estas últimas, el área de influencia de una estación será mayor que en las primeras (Silva Medina 1998).

Los métodos más conocidos para calcular las lluvias sobre un área son los siguientes:

3.4.1 Método Aritmético

Figura 26. Estaciones pluviométricas dentro de una cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

El método aritmético es poco utilizado y consiste en sacar el promedio aritmético de las estaciones que están dentro de la cuenca.

Los valores entre paréntesis indican el valor de la precipitación en milímetros (mm).

Este método utiliza estaciones que están dentro de la cuenca y no se preocupa por las que están por fuera, además no tiene en cuenta la ubicación de las estaciones al interior de la cuenca, ni la topografía.

Provee datos confiables si los aparatos pluviométricos están uniformemente distribuidos, la variación entre las medidas es pequeña y el área de la cuenca es bastante plana.

La precipitación media de la cuenca se determina con la ecuación 3.1:

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (3.1)$$

Donde:

\bar{P} = precipitación media de la cuenca (mm).

P = precipitación registrada en el pluviómetro (mm).

n = número de estaciones.

Ejemplo:

Teniendo en cuenta los valores de precipitación de la figura 27, la precipitación media de la cuenca es:

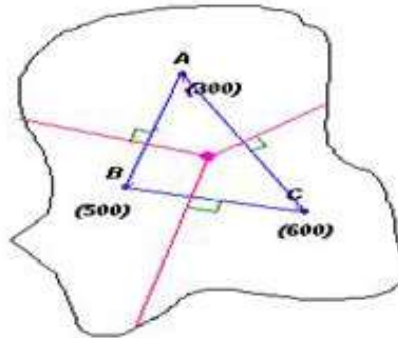
$$\bar{P} = \frac{300 + 500 + 600}{3} = 467 \text{ mm}$$

3.4.2 Polígonos de Thiessen

En este método el número de estaciones puede ser cualquiera, tiene en cuenta la ubicación de las estaciones incluso las que están por fuera de la cuenca, pero no tiene en cuenta la topografía. Se sigue el siguiente procedimiento (ver figura 27):

- Unir las estaciones más cercanas por medio de líneas rectas sin que éstas se crucen.

Figura 27. Polígonos dentro de una cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

- Después de trazadas las líneas, las figuras que deben quedar son triángulos.
- Luego se busca el centro geométrico de cada triángulo. Para ello se trazan perpendiculares por el punto medio de cada línea del triángulo y el punto resultado de la intersección de dichas perpendiculares, es el centro geométrico.
- Los lados de los polígonos son el límite de las áreas de influencia de cada estación.

Una vez dibujados los polígonos, se calcula el área de cada uno y la precipitación media de la cuenca se determina por la fórmula 3.2:

$$\bar{P} = \frac{(A_1 * P_1) + (A_2 * P_2) + \dots + (A_n * P_n)}{A} \quad (3.2)$$

Donde:

\bar{P} = precipitación media de la cuenca (mm).

P_n = precipitación media de cada estación (mm).

A_n = área de cada polígono (km²).

A = área total de la cuenca (km²).

Ejemplo: Al tomar los mismos datos del ejemplo anterior la precipitación será como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Ejemplo de Polígonos de Thiessen.

SUBÁREA	PORCENTAJE DEL ÁREA	PRECIPITACIÓN (P)	P PONDERADA
A	40	300	120
B	25	500	125
C	35	600	210
PRECIPITACIÓN MEDIA			455 mm

Fuente: Elaboración propia.

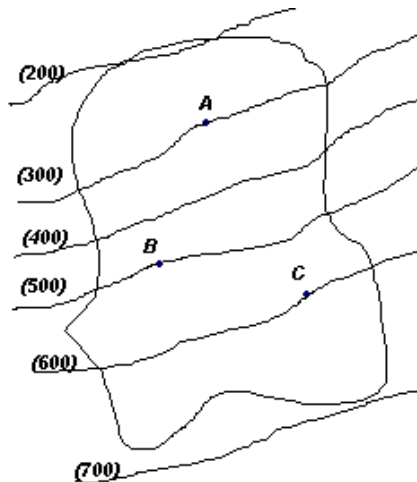
3.4.3 Método de Isoyetas

Las isoyetas son líneas que unen puntos de igual precipitación. Para el trazado de las isoyetas podemos utilizar un intervalo de 100 en 100 m, cuando hay precipitaciones bajas, se puede aumentar el intervalo, cuando las precipitaciones son mayores como en zonas montañosas, es posible hacer isoyetas mensuales, anuales o diarias.

El trazado de las isoyetas es parecido al de las curvas de nivel, donde la cota de agua precipitada, es reemplazada por la cota del terreno. Se debe tener en cuenta un rango de error de $\pm 10\%$ del valor de nivel de agua obtenido.

No es conveniente considerar datos aislados que no encajen con el plano general de la zona, aún en el caso que puedan ser reales, ya que su influencia en valores medios de precipitación en las cuencas, es muy pequeña.

Figura 28. Método de Isoyetas.



Fuente: Elaboración propia.

Si quedan muy próximas dos líneas del mismo valor es necesario hacer un empalme según se muestra en la figura 28.

Es importante tener en cuenta el relieve en el trazado de isoyetas, así como la dirección de los vientos.

Ejemplo: En la cuenca de la figura 28, la precipitación media se explica en la tabla 23 será:

Tabla 23. Ejemplo del método de isoyetas.

ISOYETAS	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)	PORCENTAJE DEL ÁREA (%)	P PONDERADA (mm)
200 - 300	250	22	55
300 - 400	350	17	59.5
400 - 500	450	18	81
500 - 600	550	20	110
600 - 700	680	23	156.4
PRECIPITACIÓN MEDIA			461.9 mm

Fuente: Elaboración propia.

La precipitación media de la cuenca es la sumatoria de las precipitaciones ponderadas:

$$P = 55 + 59.5 + 81 + 110 + 156.4$$

$$P = 461.9 \text{ mm}$$

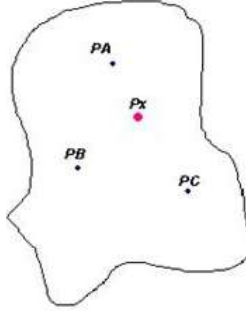
3.5 ESTIMATIVO DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACIÓN

Puede ocurrir que al recopilar los datos pluviométricos, la información esté incompleta, ya sea por una falla en el equipo o por falta de personal capacitado en la toma de los registros. A continuación se relacionan los métodos usados para estimar datos faltantes de precipitación ver figura 29:

3.5.1 Promedio aritmético

Se realiza el promedio aritmético de las lluvias de las estaciones A, B, C, para determinar la precipitación de X, cuando el promedio de la precipitación media anual no es mayor del 10% en cada una de las estaciones, comparada con la precipitación media anual en estudio (X).

Figura 29. Estimativo de datos faltantes de precipitación.



$$P_x = \frac{P_A + P_B + P_C}{3} \quad (3.1)$$

Si la diferencia es mayor del 10%, la precipitación de la estación X se calcula con la siguiente fórmula (fórmula 3.8):

$$P_x = \frac{N_x}{3} * \left(\frac{P_A}{N_A} + \frac{P_B}{N_B} + \frac{P_C}{N_C} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

P_x = precipitación de la estación X (mm).

N_x = precipitación media anual de la estación X (mm).

$P_{A, B, C}$ = precipitación de las estaciones A, B, C durante el tiempo por completar (mm).

$N_{A, B, C}$ = precipitación media anual de las estaciones A, B, C (mm).

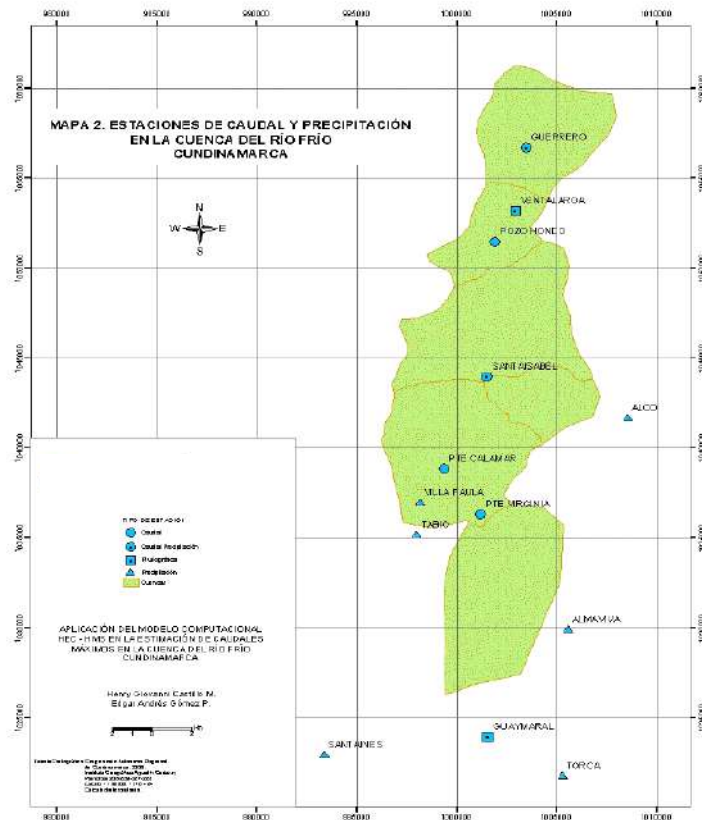
A este método se le conoce como **Proporción normal**

RÍO FRÍO

La precipitación es un factor climatológico de gran importancia en el ciclo hidrológico, por tratarse de la variable de entrada del modelo, a partir de la cual se generan los procesos de infiltración y escorrentía superficial, factores que son determinantes en la estimación de caudales en una cuenca hidrográfica. Para este estudio los registros de precipitación se obtuvieron de estaciones presentes en jurisdicción de la CAR (ver figura 30), ubicadas dentro del área de

la cuenca o muy cercanas a esta (ver tabla 24). Cada estación posee registros de precipitación media y máxima en 24 horas, durante el período en el que ha estado en servicio.

Figura 30. Localización de las estaciones pluviométricas en la Cuenca del río Frío (Cundinamarca).



El comportamiento de las lluvias en la región sigue el patrón de gran parte del país, es decir, la precipitación mensual a nivel multianual se caracterizan por dos períodos húmedos y dos períodos secos. En el caso de la cuenca, las lluvias comienzan en abril y van hasta mediados junio, aportando una lámina de aproximadamente 250 mm al territorio.

El segundo período comienza a mediados de septiembre y se extiende hasta noviembre, con promedios de 270 mm. En estas dos épocas lluviosas, cae en promedio el 60% de las lluvias totales del año.

Tabla 24. Estaciones CAR en la cuenca del río Frío.

ESTACIÓN	TIPO
Alco	Pluviográfica
Almaviva	Pluviométrica
Cidral	Pluviométrica
Guaymaral	Climatológica
Guerrero	Pluviométrica
Santa Inés	Pluviométrica
Santa Isabel	Pluviométrica
Tabio	Climatológica
Torca	Pluviométrica
Venta larga	Pluviográfica
Villa Paula	Pluviográfica

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, registros hidroclimatológicos 2008.

3.6 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

De acuerdo a las condiciones climatológicas, la precipitación presenta variaciones a lo largo del año. Las lluvias se representan mediante gráficas denominadas histogramas, de manera que con los registros pluviométricos de una estación es posible elaborar el histograma de lluvias anuales y de lluvias medias mensuales multianuales.

Ejemplo:

Grafique un histograma con los datos en la Tabla 25.

Tabla 25. Valores totales mensuales de precipitación (mm) de la cuenca de río Frío, Estación N° 2120026, Ventalarga (Cundinamarca).

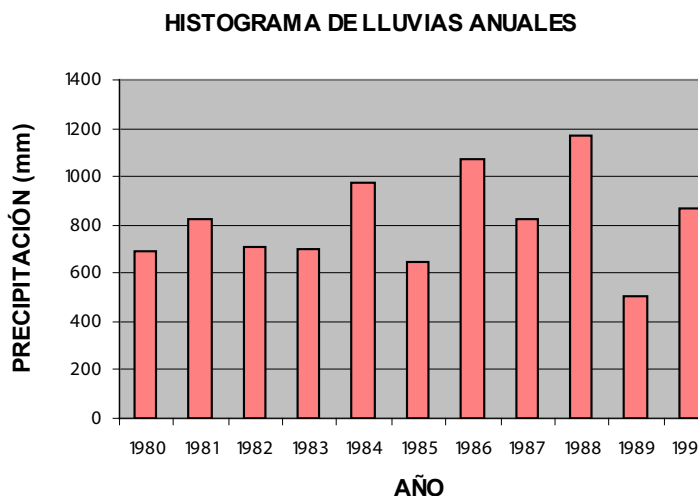
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1980	14,0	46,0	33,0	93,0	114,0	140,0	41,0	55,0	40,0	126,0	55,0	29,0	693
1981	10,0	17,0	56,0	174,0	218,0	76,0	60,0	75,0	52,0	117,0	110,0	33,0	824
1982	25,8	80,0	52,0	208,0	101,0	28,0	67,0	50,0	56,0	160,0	60,0	30,0	709,8
1983	12,0	58,0	140,0	201,0	92,0	69,0	77,0	28,0	23,0	123,0	37,0	39,0	698
1984	83,0	54,0	29,0	52,9	104,5	118,0	72,5	56,5	130,0	87,0	200,5	37,0	972
1985	21,0	0,0	54,0	41,0	133,0	67,3	66,0	51,5	119,5	60,0	64,0	14,0	650,3

1986	17,5	115,5	32,0	71,0	82,5	131,5	92,0	40,5	136,5	283,0	118,0	25,0	1074
1987	16,0	38,0	33,0	127,0	197,0	52,0	79,0	72,7	66,9	142,5	82,6	44,4	824,1
1988	14,9	46,7	21,6	143,7	77,9	173,7	127,0	157,5	119,0	227,8	185,8	13,4	1165,3
1989	1,3	37,2	29,0	53,6	165,1	69,3	89,6	39,4	15,0	7,2	16,7	35,8	505,6
1990	58,3	57,4	43,2	79,0	144,7	47,2	51,2	50,7	37,7	202,6	84,3	95,1	872,4
PROM	24,9	50,0	47,5	113,1	130,0	88,4	74,8	61,5	72,3	139,6	92,2	36,0	817,1

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, registros hidroclimatológicos 2000.

A continuación se presenta el histograma de lluvias anuales de la estación N° 2120026 (Ventallarga, Cundinamarca), en el cual se puede observar fácilmente el promedio multianual y la variación de los años húmedos y secos (Figura 31). En el histograma de lluvias mensuales multianuales, se muestran los períodos secos y lluviosos durante el año.

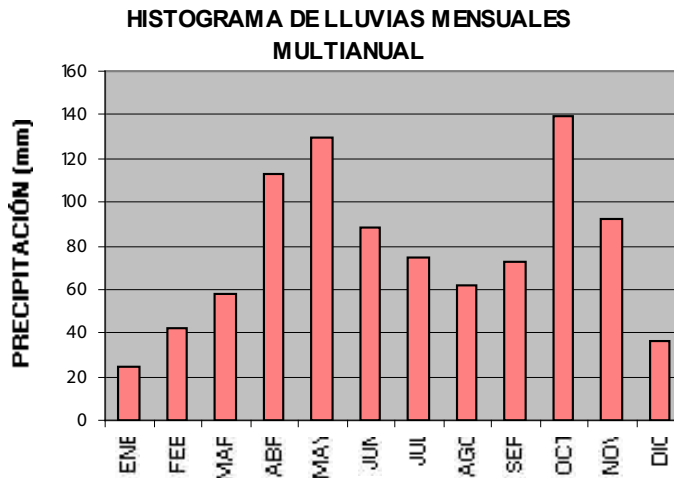
Figura 31. Histograma de lluvias anuales (estación N° 2120176 Santa Isabel, Cundinamarca).



Fuente: Autores.

La distribución a lo largo del año es de tipo bimodal (Figura 32) y se genera por el paso de la Zona de Confluencia Intertropical, tanto en el primer semestre del año, como en el segundo. El período húmedo en el primer semestre se presenta entre los meses de marzo, abril y mayo, siendo mayo el mes más húmedo, con un valor de 130 mm.

Figura 32. Histograma de lluvias mensuales multianuales (estación N° 2120176 Santa Isabel, Cundinamarca).



Fuente: Autores.

En el segundo semestre se presenta en los meses de octubre y noviembre, siendo octubre el mes más húmedo del año, con una precipitación cercana a los 140 mm. El período de estiaje se extiende de diciembre a febrero, durante el cual enero es el mes más seco, con un registro del orden de los 25 mm y a mediados del año entre los meses de junio a septiembre, se observa otra época seca, en la cual agosto es el más seco, con un registro de 61 mm. El valor total anual promedio es de 817 mm, con valores máximos que superan los 1.100 mm y mínimos con registros por debajo de los 700 mm.

A partir de los datos de lluvias obtenidos en las diferentes estaciones, es posible calcular:

3.6.1 Precipitación media diaria

Se define como la relación entre la sumatoria de los datos de precipitación diaria durante un mes dado y el número de días del mes (28, 29,30 o 31 según el mes que se está estudiando) (Fórmula 3.4), ver tabla 26.

$$\overline{Pd} = \frac{\sum Pd}{n} \quad (3.4)$$

Donde:

- $\overline{P_d}$ = Precipitación media diaria durante un mes.
- ΣP_d = Sumatoria de precipitaciones diarias durante un mes.
- n = Número de días durante un durante un mes.

Ejemplo:

Tabla 26. Ejemplo de precipitación media diaria.

Día	Lluvias diarias en mm		
	Meses		
	Enero	Febrero	Diciembre
1	14.4	...	17.4
2	26.6	...	60.1
...
...
...
31	25.3	...	65.2

Fuente: Elaboración propia

$$\overline{Pd}_{ENERO} = \frac{14.4 + 26.6 + \dots + 25.3}{31}$$

3.6.2 Precipitación media mensual

Se define como la relación entre la sumatoria de los datos de precipitación mensual de un mes dado, durante varios años y el número de años (Fórmula 3.5), ver tabla 27.

$$\overline{P} = \frac{\Sigma P_m}{n} \quad (3.5)$$

Donde:

- \overline{P} = Precipitación media mensual.
- ΣP_m = Sumatoria de precipitaciones mensuales de un mismo mes durante N años.
- N = Número de años.

Ejemplo:

Tabla 27. Ejemplo de precipitación media mensual.

Año	Lluvias mensuales en mm		
	Meses		
	Enero	...	Diciembre
1951	532.2	...	462.1
1952	521.6	...	246.2
...
...
...
2000	648.5	...	513.4

Fuente: Autores

$$\bar{P}_{ENERO} = \frac{532.2 + 521.6 + 648.5}{50}$$

3.6.3 Valor anual

Es el promedio de los valores de la precipitación diaria en los 365 días del año.

3.6.4 Precipitación media anual (multianual)

Se define como la relación entre la sumatoria de los valores anuales de una serie de años y el número de años (Fórmula 3.6).

$$\bar{P} = \frac{\sum P_A}{N} \quad (3.6)$$

Donde:

\bar{P}_A = Precipitación media anual o multianual.
 $\sum P_A$ = Sumatoria de valores anuales de N años.
N = Número de años.

3.6.5 Precipitación media normal

Se calcula como la precipitación media anual pero N tiene un valor de 30 años.

3.6.6 Coeficiente Pluviométrico

Se denomina coeficiente pluviométrico de una región al cociente entre lo que llovió en un día en el sitio y lo que debió llover ese día (Fórmula 3.7).

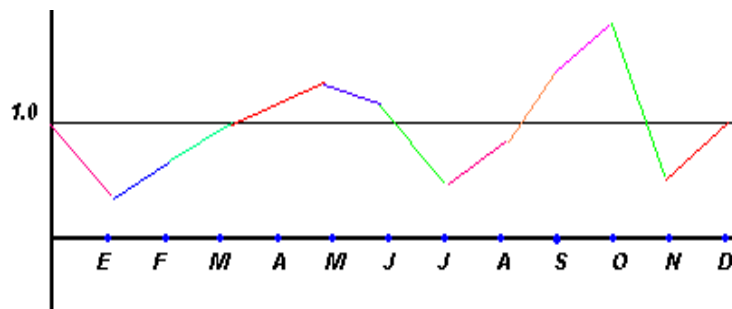
$$CP_m = \text{Lo que llovió} / \text{Lo que ha debido llover} \quad (3.7)$$

Si el coeficiente CP es mayor que 1, lo que llovió es mayor a lo que ha debido llover. Se da en épocas de invierno donde el clima es húmedo y se presentan lluvias.

Si el coeficiente CP es menor que 1, lo que llovió es menor a lo que ha debido llover. Se da en épocas de verano donde el clima es seco y se presenta estiaje.

Cuando el coeficiente CP es 1 o aproximadamente igual a 1, tendrá un comportamiento durante el año, como el que se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Coeficiente pluviométrico.



Fuente Autores.

3.7 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA INFORMACIÓN REGISTRADA

Es necesario verificar la consistencia de los datos de precipitación antes de utilizarlos, la inconsistencia puede ser causada entre otras por la acción del hombre.

3.7.1 Análisis de dobles masas

El método consiste en construir una curva doble acumulativa, en la cual se relacionan los totales anuales acumulados de precipitación, de un determinado

lugar y la media acumulada de los totales anuales, de todos los puestos de la región, considerada climatológicamente homogénea y por consiguiente homogénea desde el punto de vista de datos, ver tabla 28 y 29 (Monsalve 1995).

Tabla 28. Ejemplo Dobles masas.

AÑO	Estación 2120176 P1 Santa Isabel	Estación 2120565 P2 Tabio	Estación 2120026 P3 Ventalarga	PROMEDIO (mm)
1986	577,7	1021,3	1145,0	914,7
1987	460,0	458,0	951,1	623,0
1988	452,0	1054,9	1309,0	938,6
1989	762,3	762,3	559,2	694,6
1990	1132,0	725,3	951,4	936,2
1991	350,0	678,7	963,7	664,1
1992	193,8	534,8	541,0	423,2
1993	227,8	726,0	455,9	469,9
1994	246,6	859,0	740,0	615,2
1995	418,7	739,6	944,5	700,9
1996	384,1	987,7	1273,9	881,9

Fuente: Autores.

Tabla 29. Ejemplo Dobles masas.

AÑO	Est: Santa Isabel P1 Acumulado	Est: Tabio P2 Acumulado	Est: Ventalarga P3 Acumulado	TOTAL P Acumulado
1986	577,7	1021,3	1145,0	914,7
1987	1037,7	1479,3	2096,1	1537,7
1988	1489,7	2534,2	3405,1	2476,3
1989	2252,0	3296,5	3964,3	3170,9
1990	3384,0	4021,8	4915,7	4107,2
1991	3734,0	4700,5	5879,4	4771,3
1992	3927,8	5235,3	6420,4	5194,5
1993	4155,6	5961,3	6876,3	5664,4
1994	4402,2	6820,3	7616,3	6279,6
1995	4820,9	7559,9	8560,8	6980,5
1996	5205,0	8547,6	9834,7	7862,4

Fuente: Autores.

En la figura 34 se observa un cambio de homogeneidad en la pendiente, causado por múltiples factores como: un cambio en la localización del aparato, la construcción de obras civiles o el uso de unidades de medida diferentes. Por estas razones los datos deben ser corregidos con la fórmula 3.8, ver Figuras 34, 35 y 36.

$$P_A = \left(\frac{M_a}{M_o}\right) * P_o \quad (3.8)$$

Donde:

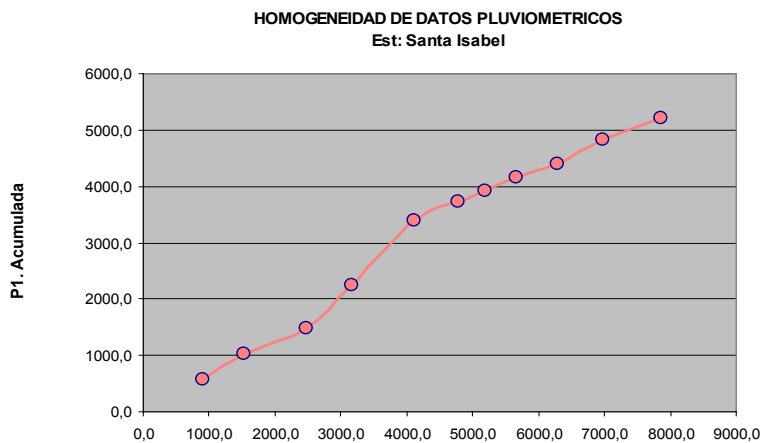
P_A = lluvia anual ajustada (mm).

M_a = pendiente de los datos de la estación X.

M_o = pendiente de los datos de las estaciones adyacentes.

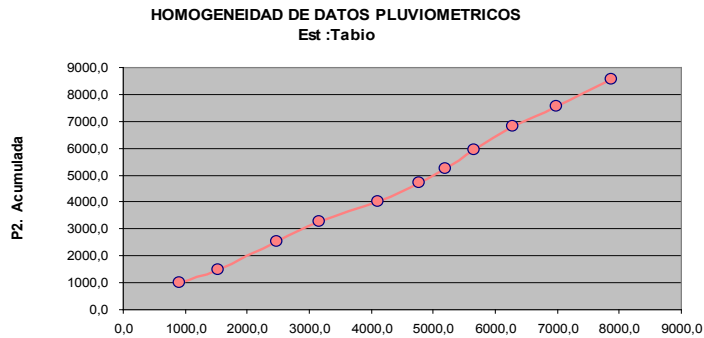
P_o = datos observados que deben ser corregidos.

Figura 34. Homogeneidad datos pluviométricos estación Santa Isabel.



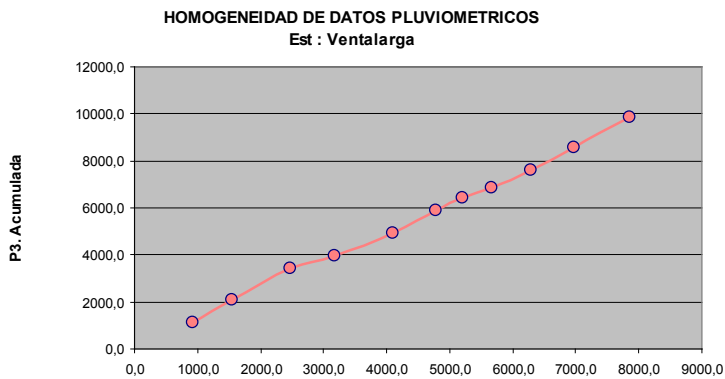
Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Ajuste de los valores de precipitación mediante el análisis doblemente acumulativo.



Fuente: Autores.

Figura 36. Homogeneidad de datos pluviométricos de la estación Ventalarga



Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo:

Tomado del texto Hidrología Básica I, Henry Jiménez Escobar, p. 140. Calcular la precipitación media que se presentó para el mes de febrero de 2001, en la cuenca del río Frío, empleando los métodos:

1. Promedio aritmético.
2. Polígonos de Thiessen.
3. Líneas Isoyetas.

Tabla 30. Valores totales mensuales de precipitación (mm), registrados en el mes de febrero de 2001, en las estaciones pluviométricas de la cuenca del río Frío.

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN (mm)
Ventalarga	49.6
Sta. Isabel	0.6
Alco	57
V. Paula	7.7
Tabio	5.3
Sta. Inés	23.5
Guaymaral	38.4
Torca	53.9

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de la CAR (2001).

Solución:

1. Método del Promedio Aritmético:

Tomando los valores de la precipitación del mes de febrero de 2001, de las ocho estaciones pluviométricas de la cuenca del río Frío, la precipitación media es:

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (3.1)$$

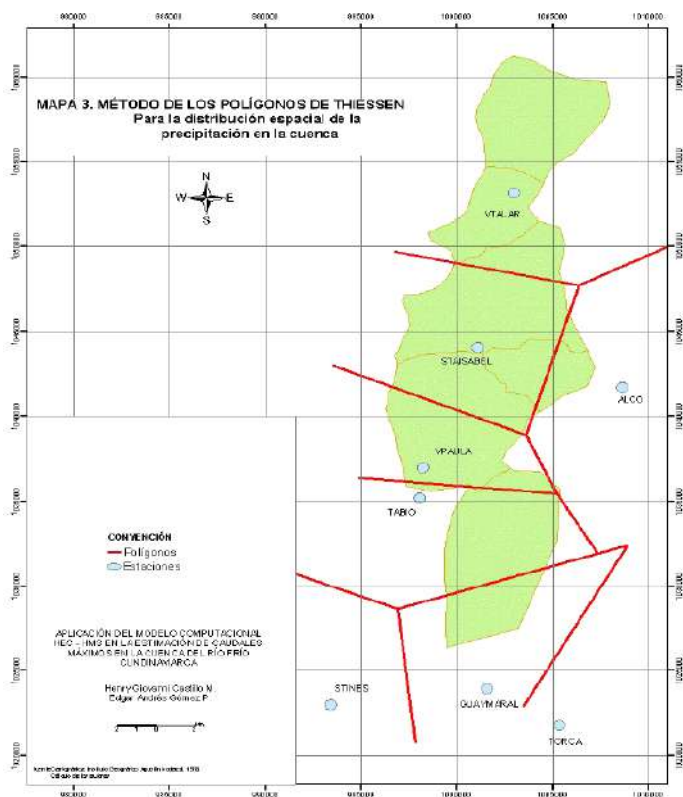
$$\bar{P} = \frac{49.6 + 0.6 + 57 + 7.7 + 5.3 + 23.5 + 38.4 + 53.9}{8} = 29.5 \text{ mm}$$

2. Método de los Polígonos de Thiessen:

Según la expresión general de este método se requiere calcular el área aferente de cada una de las estaciones, para lo cual se realiza la triangulación y a continuación se sigue la metodología explicada en el numeral 3.4.2.

En la Figura 37, se muestra el área de influencia (polígonos de Thiessen) de cada estación presentada en la Tabla 30.

Figura 37. Aplicación del método de Polígonos de Thiessen en la distribución de la precipitación en la Cuenca del río Frío (Cundinamarca).



Fuente: Elaboración propia datos de la CAR.

Tabla 31. Cálculo de la precipitación media por el método de Polígonos de Thiessen.

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN P_i (mm)	ÁREA POLÍGONO A_i (Km ²)	$P_i \times A_i$ (mm x Km ²)
Ventalarga	49.6	59.5	2.951,2
Sta. Isabel	0.6	65	39
Alco	57	8.5	484,5
V. Paula	7.7	28	215,6
Tabio	5.3	29	153,7
Guaymaral	38.4	12	460,8
TOTAL		202	4.304,8

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la ecuación 3.6 se tiene que la precipitación media de la cuenca es:

$$\bar{P} = \frac{(A_1 * P_1) + (A_2 * P_2) + \dots + (A_n * P_n)}{A} \quad (3.2)$$

$$= \frac{\sum P_i A_i}{A} = \frac{\sum P_i A_i}{A} = \frac{4.304,8 \text{ mm} * \text{Km}^2}{202 \text{ Km}^2} = 21.3 \text{ mm}$$

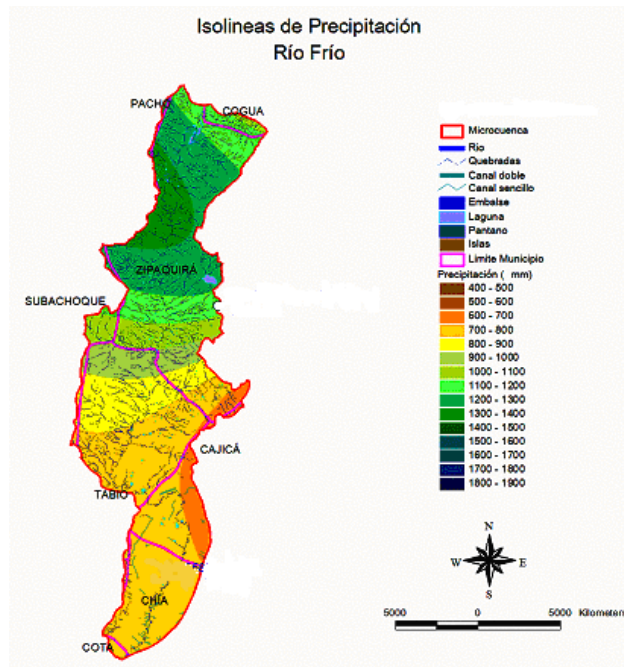
$$\bar{P} = 21.3 \text{ mm}$$

3. Método de las Isoyetas:

De acuerdo con el procedimiento explicado en el numeral 3.4.3, se procede a trazar las curvas de igual precipitación (isoyetas).

En la Figura 38, se presenta el plano de la cuenca del río Frío con las curvas isoyetas del mes de febrero de 2001.

Figura 38. Plano de isoyetas para febrero de 2001 en la cuenca del río Frío (Cundinamarca).



Fuente: Corporación Autónoma Regional-CAR.

La Tabla 32 presenta la relación de las áreas entre isoyetas consecutivas, precipitación promedio y el producto $P_1 \times A_1$, requeridos para determinar la precipitación media de la cuenca, la cual se presenta en la tabla 33.

Tabla 32. Cálculo de la precipitación media anual por el Método de Isoyetas.

ISOYETA	P. PROMEDIO	Á. Isoyetas (km ²)	Precipitación X Área
800	800	17,92	14336
800-900	850	88,33	75080,5
900-1000	950	13,01	12359,5
1000-1100	1050	9,12	9576
1100-1200	1150	1,58	1817
1200-1300	1250	0,8	1000
		130,76	114.169

Fuente: Autores.

Tabla 33. Cálculo de la precipitación media ponderada.

ISOYETA	P. PROMEDIO	% del área	Precipitación X %
760-800	780	11,1	86,6
800-900	850	26,3	223,6
900-1000	950	29,5	280,3
1000-1100	1050	18,8	197,4
1100-1200	1150	10,7	123,1
1200-1300	1250	3,6	45,0
		100	955,8

Fuente: Autores.

De acuerdo con la expresión general, la precipitación media de la cuenca es:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{(A_1 * P_1) + (A_2 * P_2) + \dots + (A_n * P_n)}{A} \\ &= \frac{\sum P_i A_i}{A} = \frac{112119 \text{ mm} * \text{Km}^2}{130.76 \text{ Km}^2} = 873.12 \text{ mm} \end{aligned}$$

Precipitación media ponderada 955,8 mm

En la Tabla 34 se presenta un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas que tiene cada método utilizado en el ejemplo:

Tabla 34. Ventajas y desventajas de los métodos de variación espacial de la precipitación.

MÉTODOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ARITMÉTICO	<ul style="list-style-type: none"> • Es simple. • Es rápido. • Es objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • No utiliza estaciones fuera de la cuenca. • No tiene en cuenta la topografía.
THIESSEN	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza estaciones fuera de la cuenca. • Es objetivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es lento. • No tiene en cuenta la topografía. • Asigna áreas fijas de influencia a cada estación.
ISOYETAS	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene en cuenta la topografía. • Permite visualizar la variación espacial de la precipitación. • Utiliza estaciones fuera de la cuenca. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es subjetivo. • Es lento. • Depende del número de estaciones.

Fuente: Autores.

3.8 RED PLUVIOGRÁFICA

“Con el fin de tener una medida confiable de la distribución espacial de la precipitación, la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.) recomienda la instalación de una red de pluviómetros” (Jiménez Escobar, 1992, p.125). En la tabla 35 se presenta una densidad de la red de pluviómetros recomendada.

Tabla 35. Densidad de la red de pluviómetros, recomendada por la O.M.M. (Pluviómetro por km²).

Tipo de Región	Red mínima	En condiciones difíciles
Regiones planas en zonas mediterráneas y tropicales	600 - 900	900 - 3000
Zonas montañosas de temperaturas mediterráneas y tropicales	100 - 250	250 - 1000 ⁽¹⁾
Pequeñas islas montañosas con precipitación muy irregular	25	
Zonas áridas y polares (sin incluir los grandes desiertos)	1500 - 10000	

(1) En condiciones de gran dificultad puede ampliarse hasta 2000 km².

Fuente: tomado de Jiménez Escobar (1992).

3.8.1 Red Hidrológica Nacional

La red hidrológica nacional consta de puestos de observación, donde se encuentran instaladas miras hidrométricas o registradores de nivel. Dichos puestos se denominan estaciones hidrológicas y pueden ser limnimétricas o limnigráficas.

A continuación se presenta la Tabla 36, que relaciona el número de estaciones hidrológicas existentes en Colombia, pertenecientes al IDEAM y demás entidades.

Tabla 36. Red Hidrológica Nacional.

DEPARTAMENTO	IDEAM			OTRAS ENTIDADES			TOTAL PAÍS
	EST. LGM	EST. LMN	TOTAL	EST. LGM	EST. LMN	TOTAL	
Amazonas	4	31	35	0	5	5	40
Antioquia	69	37	106	94	15	109	215
Arauca	3	15	18	0	0	0	18
Atlántico	1	5	6	1	0	1	7
Bogotá	1	0	1	9	51	60	61
Bolívar	13	43	56	0	8	8	64
Boyacá	30	36	66	2	46	48	114
Caldas	12	6	18	12	27	39	57
Caquetá	7	8	15	0	0	0	15
Casanare	9	13	22	0	6	6	28
Cauca	37	14	51	10	3	13	64
Cesar	12	16	28	0	0	0	28
Chocó	18	3	21	1	0	1	22
Córdoba	9	32	41	0	0	0	41
Cundinamarca	25	7	32	41	192	233	265
Guainía	3	5	8	1	1	2	10
Guaviare	2	4	6	0	0	0	6
Huila	30	20	50	1	0	1	51
Guajira	15	7	22	0	0	0	22
Magdalena	13	11	24	0	0	0	24

Huila	30	20	50	1	0	1	51
Guajira	15	7	22	0	0	0	22
Magdalena	13	11	24	0	0	0	24
Meta	11	26	37	0	9	9	46
Nariño	24	3	27	0	0	0	27
Norte de Santander	23	11	34	0	0	0	34
Putumayo	9	8	17	0	0	0	17
Quindío	0	0	0	0	0	0	0
Risaralda	4	9	13	0	8	8	21
San Andrés y Providencia	2	1	3	0	0	0	3
Santander	22	23	45	3	24	27	72
Sucre	1	9	10	0	0	0	10
Tolima	42	23	65	0	2	2	67
Valle del Cauca	12	7	19	37	19	56	75
Vaupés	1	6	7	0	1	1	8
Vichada	4	14	18	3	0	3	21
TOTAL	468	453	921	215	417	632	1553

Fuente: Autores, tomadas del IDEAM.

En el Anexo 1 se presenta investigación en ELABORACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA, IDF.

ANEXO 1

ELABORACION DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA, IDF CÁLCULO DE CURVAS IDF POR MÉTODO SIMPLIFICADO

La metodología simplificada de cálculo de las curvas intensidad - duración - frecuencia, se debe llevar a cabo siempre y cuando no se disponga de datos históricos de precipitación de corta duración (datos pluviográficos). Para Colombia se propone el método implicado presentado en el Manual de Drenaje para carreteras del INVIAS 2009. En este capítulo se dedujeron curvas intensidad-duración-frecuencia, por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación. La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, en una estación, y es la que se propone para los estudios de precipitación, además de que es la más sencilla de utilizar. La expresión resultante está dada por la siguiente expresión:

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c} \quad (3.9)$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, *b*, *c*, *d*: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la Figura 39, y sus valores se presentan en la tabla 37.

Tabla 37. Valores de coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad - duración - frecuencia, IDF, para Colombia.

Región	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: Manual de drenaje para carreteras INVIAS 2009.

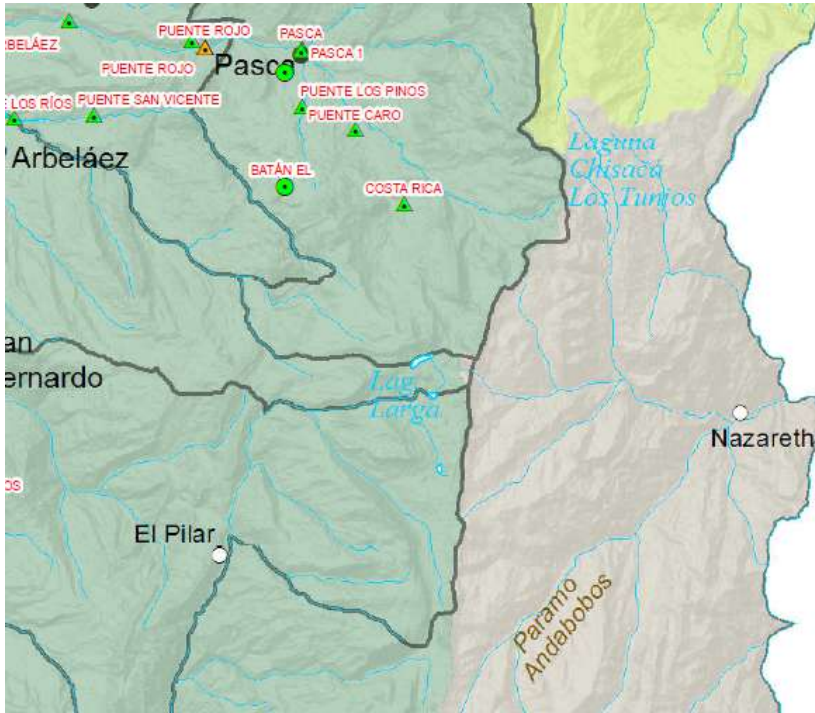
Para ejemplo de elaboración Curvas Intensidad Duración Frecuencia, se utilizarán los datos de Precipitación máxima en 24 horas de la estación BATAN EL, ver Figura 39, y valores de precipitación en la Tabla 37.

Figura 39. Regiones de Colombia para la definición de los parámetros a, b, c y d.



Fuente: Manual de Drenaje para Carreteras INVIAS 2009.

Figura 40. Localización estación El Batán.



Estaciones Convencionales



Fuente: Boletín hidroclimatológico CAR, año 2012.

En la Tabla 38 se observan valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF de la zona andina.

Los datos de precipitación máxima en 24 horas a nivel anual la estación BATAN se obtiene de la CAR en la Tabla 39.

Tabla 38. Coeficientes regionales Zona Andina.

Región	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83

Fuente: Manual de Drenaje para Carreteras INVIAS 2009.

Tabla 39. Precipitación máxima anual en 24 Horas estación El Batán.

Año	precipitación	Año	precipitación
1960	22,0	1992	24,1
1961	42,6	1993	29,4
1966	38,6	1994	24,7
1967	33,7	1995	23,4
1968	32,4	1996	31,4
1969	32,0	1997	20,0
1970	20,4	1998	34,5
1971	21,8	1999	26,6
1972	37,6	2000	41,1
1973	32,0	2001	25,3
1974	32,0	2002	39,7
1975	21,0	2003	35,0
1976	28,0	2004	39,0
1977	18,0	2005	42,0
1978	44,0	2006	38,0
1979	55,6	2007	32,0
1980	29,0	2008	39,0
1981	33,2	2009	21,6
1982	35,6	2010	38,0
1983	20,2	2011	37,1
1984	28,9	2012	44,2
1985	31,7	2013	39,0
1986	52,4	2014	39,0
1991	25,5	2015	31,0

Fuente: Adaptada por autores de datos recuperados de: www.car.gov.co.

Valor promedio de precipitación máxima en 24 Horas $M = 32,57$ mm

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c} \quad (3.9)$$

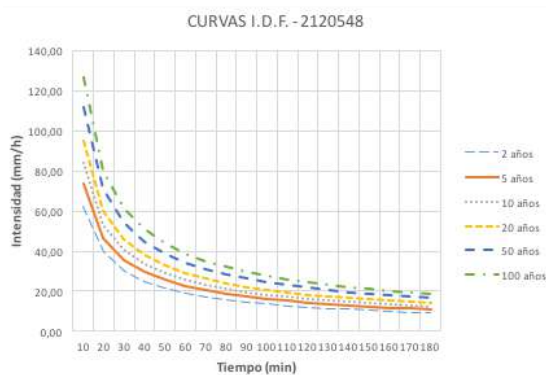
Con la ecuación se construye la Tabla 39 determinando la intensidad en función de la duración y el periodo de retorno.

Tabla 40. Cálculo de Intensidad en función de la duración y período de retorno.

TIEMPO (min)	periodo de retorno(años)					
	2	5	10	20	50	100
10	62,59	73,81	83,62	94,73	111,72	126,57
20	39,61	46,72	52,92	59,96	70,71	80,10
30	30,31	35,75	40,50	45,88	54,11	61,29
40	25,07	29,57	33,49	37,94	44,75	50,69
50	21,64	25,52	28,91	32,75	38,62	43,75
60	19,18	22,62	25,63	29,04	34,24	38,79
70	17,33	20,43	23,15	26,23	30,93	35,04
80	15,87	18,71	21,20	24,01	28,32	32,08
90	14,68	17,31	19,61	22,22	26,20	29,68
100	13,69	16,15	18,29	20,73	24,44	27,69
110	12,86	15,16	17,18	19,46	22,95	26,00
120	12,14	14,32	16,22	18,38	21,67	24,55
130	11,52	13,58	15,39	17,43	20,56	23,29
140	10,97	12,93	14,65	16,60	19,57	22,18
150	10,48	12,36	14,00	15,86	18,70	21,19
160	10,04	11,84	13,42	15,20	17,92	20,31
170	9,65	11,38	12,89	14,60	17,22	19,51
180	9,29	10,96	12,41	14,06	16,58	18,79

Fuente: Autores.

Figura 41. Curva intensidad frecuencia duración estación El Batán.



Fuente: Autores.

A partir de estos datos se obtienen las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia para diferentes periodos de retorno (ver Figura 41).

EJEMPLO 1

INVESTIGACIÓN INFORMACIÓN CLIMÁTICA PROYECTO ALTOS DE LA ESTANCIA BOGOTÁ

En el presente ejemplo se relaciona la información de climatología, en donde se estudia la distribución espacial y temporal de la precipitación, la distribución espacial y temporal de la temperatura, la distribución temporal de la humedad relativa, distribución del brillo solar, distribución temporal de la velocidad del viento, variables climáticas importantes para actualizar el Plan de Manejo Ambiental del Polígono denominado "Altos de la Estancia", localizado en Ciudad Bolívar, Bogotá.

Para la selección de las estaciones climatológicas a utilizar, se tuvo en cuenta que: fueran las más cercanas, fueran representativas, tuvieran condiciones similares en altitud, temperatura y contaran con registros continuos. La tabla 41 presenta dichas estaciones con sus datos de localización y años de registro. Sin embargo para el levantamiento de la información climática, de este estudio, se tomaron como base principal, los datos aportados por la estación Doña Juana, que es la más cercana a la zona de estudio y tiene 24 años de registro. Esta misma información fue utilizada para el documento "*Formulación participativa de un pacto de borde UPZ Ismael Perdomo y Plan de Manejo Ambiental sector Altos de la Estancia*", correspondiente al Contrato 7165-12/2004, el cual se está actualizando mediante el presente documento y que en adelante se denominará como PMA-2005.

Tabla 41. Estaciones utilizadas.

ESTACIÓN	CÓDIGO	LATITUD	LONG	ELEVACIÓN	AÑO INICIO	AÑO FIN
1. Doña Juana	2120630	0430N	7410W	2700	1989	2013
2. La Ramada	2120516	0443N	7411W	2545	1938	2013
3. Apostólica	2120051	0431N	7415W	2618	1956	2013
4. Fute	2120551	0436N	7417W	2607	1959	2013
5. La Picota	2120156	0434N	7408W	2580	1981	2013
6. Quiba		0432N	7411W	3000	1990	2013

Fuente: Autor.

La localización de estas estaciones se muestra en la Figura 42.

Figura 42. Mapa de Estaciones Hidrometeorológicas.

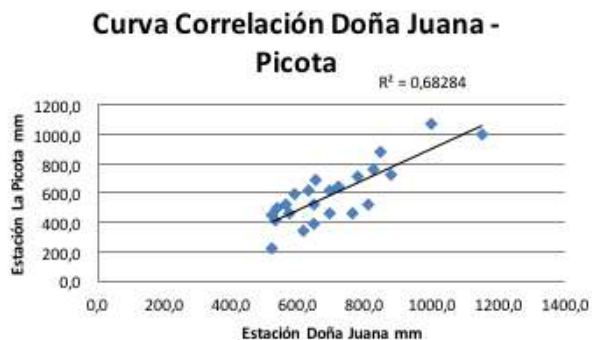


Fuente: Boletín 2012 de la CAR publicado en 2013.

Complementación Registro de climatología:

Para mejorar los datos de precipitación, se utilizó el método de homogeneidad entre estaciones y complementariedad de datos con estaciones vecinas. Adicionalmente el periodo de estudio fue desde 1989 2013, es decir 24 años, que corresponden a las seis estaciones seleccionadas. En la figura siguiente se presenta la correlación entre dos estaciones vecinas al sitio de estudio, las estaciones Doña Juana y la Picota, que presentan una aceptable correlación, desde el punto de vista climatológico, ver Figura 43.

Figura 43. Curva de Correlación Doña Juana la Picota.



Fuente: Autores.

Para hallar la correlación, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Px = 1/3 ((Nx/Na)*Pa) + ((Nx/Nb)*Pb) + ((Nx/Nc)*Pc), \text{ en donde } Px \text{ es dato faltante,}$$

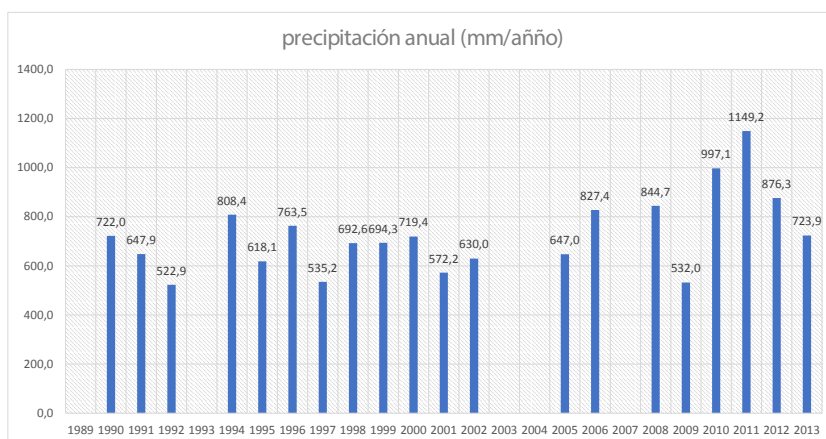
$Na, Nb \text{ y } Nc$ Precipitación Mensual Multianual

Nx = Precipitación anual multianual de la estación Faltante.

Distribución espacial y temporal de la precipitación

En la Figura 44 se presentan los datos de precipitación total anual para la estación Doña Juana, excluyendo los años en los cuales la información está incompleta. Se observa que el valor más bajo de precipitación se fue de 522.9 mm al año, en 1.992, con un promedio de 726.2 mm/año. Este nivel de precipitación corresponde a una precipitación promedio de 50 mm/mes, con variaciones que van desde los 25 mm/mes hasta los casi 90 mm/mes. Este dato promedio coincide con el dato presentado en el documento PMA-2005, en el que se indica que todas las precipitaciones promedio se encuentran por encima de los 40 mm/mes.

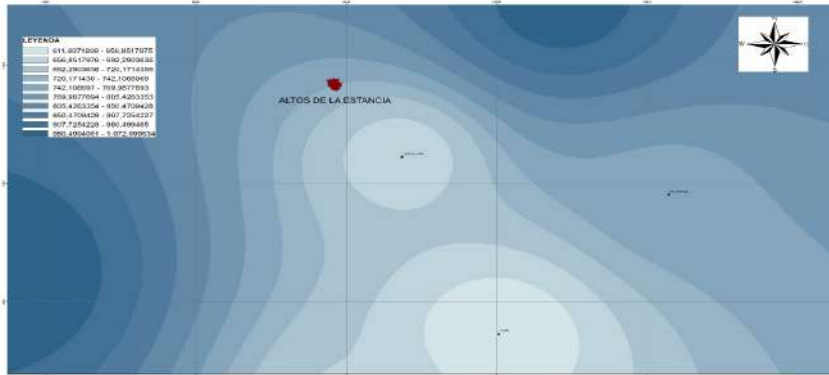
Figura 44. Precipitación Anual para la Estación Doña Juana.



Fuente: CAR Boletín Hidrometeorológico. Estación Doña Juana.

Para establecer los datos promedio del sector de Altos de la Estancia, se construye el mapa de Isoyetas, donde se representan las líneas curvas que corresponden con la misma precipitación promedio anual (Figura 45). En este mapa se observa que este sector se localiza en la zona que va desde los 700 hasta los 750 mm/año, en promedio.

Figura 45. Mapa de Isoyetas.

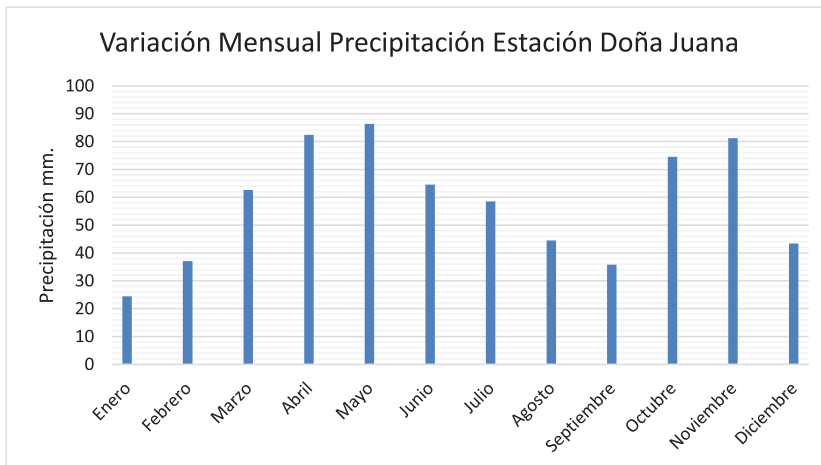


Fuente: CAR Boletín 2012 año publicación 2013.

Para hallar este resultado, se estudiaron las estaciones pluviométricas más cercanas al proyecto (ver Tabla 41).

Analizada la distribución temporal de la precipitación de la Figura 45A, se observa un régimen bimodal, donde los periodos lluviosos se presentan de abril a mayo y octubre a noviembre, mientras los periodos secos se dan de enero a febrero y de agosto a septiembre, teniendo como el mes más seco a enero y uno de los meses más lluviosos noviembre.

Figura 45A. Precipitación Media Anual.



Fuente: Autor.

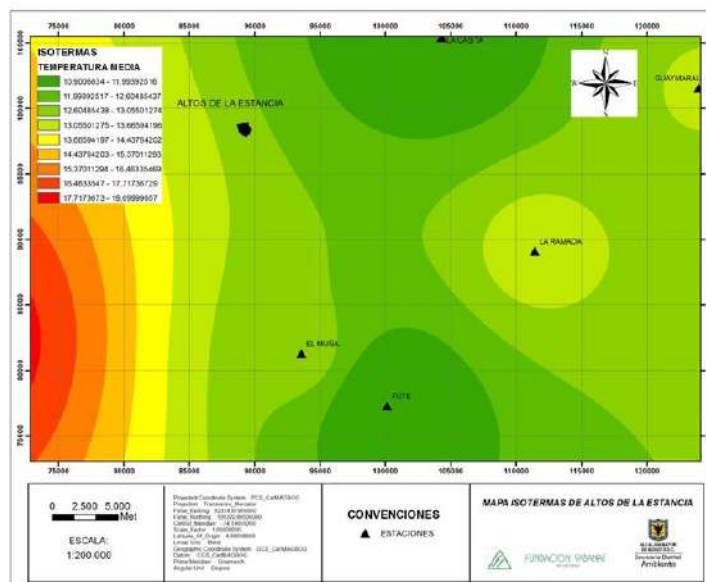
Adicionalmente se estudió la variación temporal de la precipitación anual. De acuerdo al registro de la precipitación anual de la estación Doña Juana, se observa que desde el año 1990 a 2013, se presentan años secos como 1993, 1997 y 2009 y años bastante húmedos como 1994, 2008 y los años 2010 y 2011, durante los que se presentaron inundaciones y deslizamientos. Se puede deducir que con un periodo de retorno de 25 años, los eventos de precipitación presentados en los años 2010 y 2011, podrían presentarse de nuevo, con precipitaciones del orden de 1.000 mm/año, como se observa en la Ilustración 4. Ésta información contrasta con la señalada en el PMA-2005, en donde se indicaba un máximo de 900 mm/año.

Distribución espacial y temporal de la temperatura

El mapa de isotermas muestra claramente la distribución espacial de la temperatura, analizando y estudiando estaciones que tienen valores medios de temperatura, como son las estaciones La Ramada, Fute y Doña Juana, cercanas al sitio del Proyecto.

Los resultados en referencia varían entre 12 y 13°C, valor estimado del plano de Isotermas de la Figura 46.

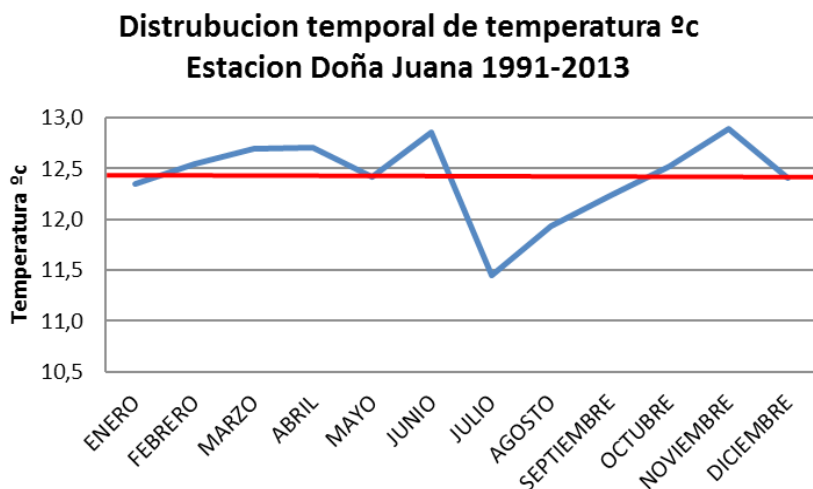
Figura 46. Mapa de Isotermas.



Fuente: Autores, CAR Boletín 2012 año publicación 2013.

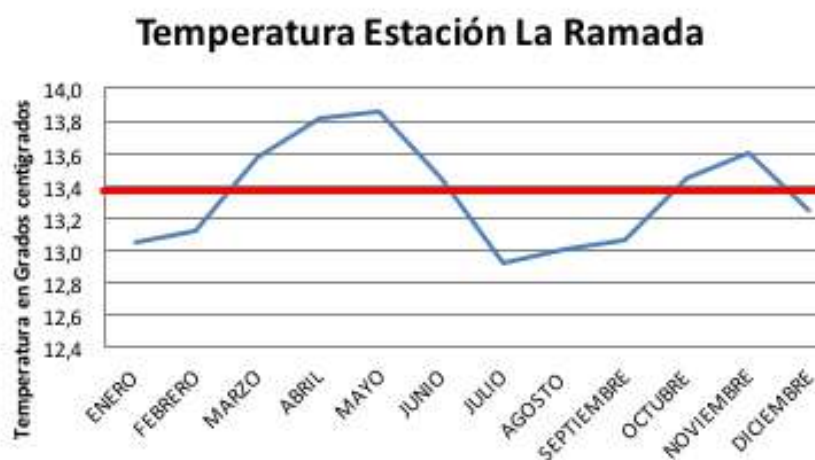
En la distribución temporal de la temperatura de la Estación Doña Juana, que es la estación más cercana al sitio de estudio, se observa en la Figura 47, que los meses que mayor temperatura presentan son: junio y noviembre y el mes de menor temperatura es julio; la temperatura media es de 12,4 °C.

Figura 47. Distribución temporal de la Temperatura, estación Doña Juana.



Fuente: Estación Doña Juana.

Figura 48. Distribución temporal de la temperatura, estación la Ramada.



Fuente: Estación La Ramada.

Al comparar la información de la estación Doña Juana con la información de la Estación La Ramada, figura 48, se observa que en la zona hay 2 épocas con mayor temperatura, que son: en los meses de abril- mayo y en el mes de noviembre.

A continuación se presenta artículo de investigación del semillero de investigación TECNOAMBIENTAL:

EJEMPLO 2

INVESTIGACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-FRECUENCIA-DURACIÓN A PARTIR DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS EN ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DE CUNDINAMARCA

Neila Fernanda Rivera Bravo, Laura Marcela Rivera Hernández, Jesús Ernesto Torres Quintero

¹ *Universidad Libre, Bogotá, Colombia. neilaf.riverab@unilibrebog.edu.co*

² *,Bogotá, Colombia. jesuse.torresq@unilibrebog.edu.co*

RESUMEN

El planeamiento y buen diseño de los sistemas de alcantarillado se hace indispensable para evitar problemáticas ambientales y la mala gestión del recurso hídrico.

Esta investigación permitió identificar la variación de intensidad de las precipitaciones máximas en estaciones pluviográficas de Cundinamarca, con relación al fenómeno de la niña ocurrido en (2010-2011) aplicando la “Metodología Estadística” y la “Metodología Regional”, para la construcción de las curvas IFD, además de la ecuación Racional para conocer el caudal máximo en relación a la intensidad encontrada en las curvas IFD y el área de la cuenca en estudio, la cual se seleccionó conforme a la estación con mayor variación de intensidad.

Lo anterior, brinda información actualizada permitiendo la construcción de obras hidráulicas con dimensionamientos adecuados y la buena gestión del recurso hídrico. Se concluye entonces que dicho fenómeno trajo consigo un aumento en la precipitación promedio generando un subdimensionamiento en las obras ambientales existentes.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país tropical donde los cambios de clima son constantes y sus precipitaciones son más intensas y duraderas, debido a esto, se hace indispensable realizar los estudios correspondientes antes de ejecutar cualquier proyecto hidráulico.

Debido al fuerte impacto que presentó el fenómeno de la niña durante los años 2010 y 2011 en Colombia, el cual alteró la precipitación promedio y donde se vio afectado el sector infraestructura por las fuertes inundaciones, se hace necesario actualizar la información existente relacionada con las curvas I-F-D a través de las cuales se permite calcular adecuadamente la intensidad de las precipitaciones, lo cual facilitará la construcción de un diseño óptimo de los sistemas de alcantarillado en las zonas de estudio, por medio de la obtención y análisis de los caudales de diseño, evitando de esta manera dichas inundaciones.[1]

En la actualidad las curvas I-F-D siguen siendo la herramienta más utilizada cuando de estimar caudales de diseño se trata, especialmente en obras hidráulicas, como el diseño de obras de drenaje de vías y alcantarillados pluviales, además de que estas curvas permiten estimar la variación de la intensidad de las precipitaciones con respecto al tiempo y con distintos periodos de excedencia o periodos de retorno. [2]

La presente investigación tiene como finalidad realizar una comparación de las curvas I-F-D antes del fenómeno de la niña ocurrido en el año 2010 y 2011 y después de éste, para ver en qué magnitud se alteró la variación de la intensidad de las precipitaciones y posteriormente identificar el caudal de diseño con la cuenca de la estación que arrojó una mayor variación en su intensidad, lo anterior, a partir de la observación directa de los datos pluviográficos de las estaciones en estudio ubicadas en el departamento de Cundinamarca, con el fin de gestionar una adecuada planeación del recurso hídrico.

METODOLOGÍA

La metodología que se aplicó para el desarrollo de la investigación es de tipo evaluativa, ya que se valoran los resultados en razón de los objetivos propuestos con el fin de tomar y proponer decisiones en un futuro.

El análisis y construcción de las curvas I-F-D, objetivo principal del presente estudio, se realizó a partir de los datos de cuatro estaciones pluviográficas Cachipay, Delirio, Universidad Militar, Guamal, a cargo de la Corporación

Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y ubicadas en los municipios de Cachipay, el colegio, Subachoque y Cajicá respectivamente. La selección de las mismas se realizó teniendo en cuenta la presencia de registros tanto horarios, como máximos anuales en 24 horas, de mínimo 5 años, donde se incluyera el fenómeno de la niña registrado en los años 2010-2011.

A partir de los datos presentes en cada una de las estaciones, se seleccionaron como años de estudio los periodos de 1991 al 2013 o 2014 según los registros, para precipitaciones máximas promedio en 24 horas, debido a que era la información común entre las estaciones convencionales y del 2010 al 2014 para datos de precipitaciones horarias, ya que son los registros de estaciones digitales que posee la CAR. Para la obtención de las curvas I-F-D se aplicaron dos metodologías la primera “Metodología Regional” y la segunda “Metodología Estadística”. Todas las curvas I-F-D fueron construidas para diferentes periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

La metodología Regional, es propuesta para su aplicación en Colombia, debido a que proporciona coeficientes específicos para la determinación de la intensidad según la región geográfica en la que se ubiquen las estaciones de estudio, ésta metodología se desarrolló a partir de los datos de precipitaciones máximas en 24 horas. A partir de los cuales se seleccionaron las precipitaciones máximas para cada hora y año de estudio (1991 al 2014) y los coeficientes correspondientes a la Región 1 (Región Andina) a: 0.94, b: 0.18, c: 0.66, d: 0.83 teniendo en cuenta que las estaciones de estudio se encuentran en el departamento de Cundinamarca, en seguida se definió la correlación estadística por medio del promedio anual en 24 horas a nivel multianual, para posteriormente determinar la intensidad para cada uno de los periodos de retorno establecidos anteriormente, y para duraciones de 10 a 180 min en intervalos de 10 min como lo establece el método.[3]

Se realizaron dos curvas I-F-D por estación de estudio y de esta manera lograr realizar la comparación entre los años en que se presentó el fenómeno de “La niña” (2010-2011) y los años en los que no se presentó, y así observar la influencia de éste, sobre la variación de la intensidad en las precipitaciones.

Para el desarrollo de la segunda metodología “Estadística”, se tomaron datos en formato horario desde los años 2010 a 2014. Fueron tomados de estaciones digitales ubicadas en los municipios de estudio anteriormente nombrados. [4]

Se realizó la selección de diez series máximas para cada año registrado (2010-2014), mediante la clasificación de los datos de manera descendente para duraciones de 1, 2 y 3 horas, se determinó de esta manera, para poder analizar a lo largo del método duraciones de 60, 120 y 180 minutos, adicional a esto, se establecieron periodos de retorno supuestos, teniendo en cuenta

el total de datos (10) y su orden jerárquico de ubicación, a partir de dichos períodos de retorno (años) y precipitaciones (mm), se procedió a ubicar cada uno de estos registros en papel logarítmico de Gumbel para realizar la distribución estadística y de esta manera se determinaron los periodos de retorno reales de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, a partir de estos, manualmente se establecieron las intensidades para duraciones de 60, 120 y 180 min y se procedió a la construcción de una curva I-F-D para cada estación de estudio a diferencia del método anterior que se construyeron dos. Lo anterior, se debe a que el principal objetivo de aplicar esta metodología es el de comparar resultados con la metodología Regional, anteriormente aplicada y de esta manera ver qué tanto difiere cada metodología en la variación de la intensidad.

Finalmente, se aplicó la metodología Racional para la determinación del caudal máximo de la microcuenca de la quebrada “La Honda” ubicada en el municipio de Tena- Cundinamarca y la cual se encuentra dentro del área de influencia de la estación Cachipay, ésta se seleccionó debido a que fue la estación que registró mayor variación en las intensidades en las curvas I-F-D. Para el desarrollo de esta metodología se tomaron coeficientes de escorrentía del RAS 2000 teniendo en cuenta el tipo de superficie de la zona (0,30 para zona de bosques y 0,60 para área rural, municipio de tena). [5]

El tiempo de concentración se estimó con los datos de longitud y pendiente calculados a partir de los planos cartográficos y la medición con curvímeter del cauce principal, al igual que para la determinación del área total para la cual se utilizó el planímetro. [6]

RESULTADOS

De acuerdo a los análisis realizados a las curvas de Intensidad- Frecuencia- Duración para las estaciones pluviográficas de Cachipay, Delirio, Guamal y Universidad Militar, en los periodos de estudio de 2010-2014 y de 1991 a 2014 según la metodología correspondiente y explicada anteriormente, se determinan los siguientes resultados.

Los resultados obtenidos para la estación Cachipay siguiendo la Metodología Regional (Figura 49 y 50) describen el comportamiento de la intensidad de la lluvia con respecto a la duración de la misma, teniendo en cuenta los diferentes periodos de retorno bajo los cuales, se determinan los eventos futuros de precipitaciones máximas y también bajo los cuales se construyen algunas obras hidráulicas, en esta estación se evidencia un incremento de la intensidad de las lluvias después del fenómeno de “La niña 2010-2011” para diferentes periodos de retorno (2-5-10 años) de acuerdo a las duraciones de 60 - 120 -180 minutos, con un promedio de aumento de la intensidad de 8.09%

(Figura 50). Por ser la figura de la estación que arroja mayor variación se considera la más representativa de las estudiadas.

Figura 49. Curva IFD - 1991-2009 Cachipay.

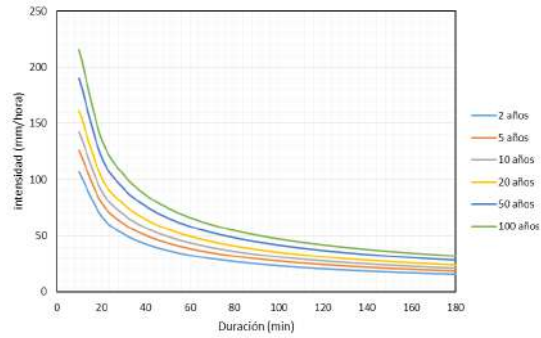


Figura 50. Curva IFD-Cachipay 1991-2014.

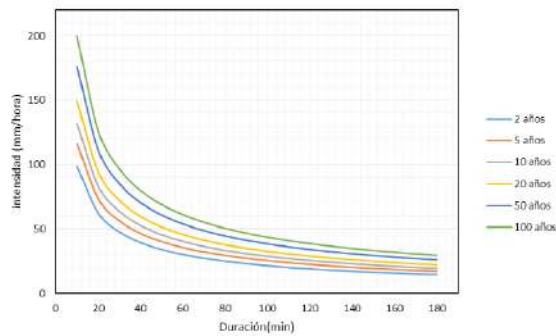
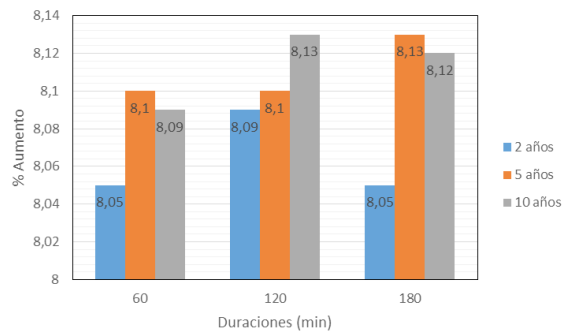


Figura 51. Aumento de la Intensidad- Estación Cachipay.



Siguiendo esta misma metodología Regional se obtuvo para la estación “Universidad Militar”, un incremento en los periodos de interés de 2-5-10 años, debido a su aporte a la construcción de alcantarillados y teniendo en cuenta la duración de 60-120 -180 min de las precipitaciones se determinó que el incremento porcentual de la intensidad durante el fenómeno de “La niña 2010-2011” fue de: 3.42%.

En la estación “Guamal” (Figura 52 y 53) por el contrario a las anteriores, describe un comportamiento en el cual, disminuyen las precipitaciones en los años donde se presentó el fenómeno de la niña, parte de esto se debe a su ubicación geográfica, ya que esta influye en la ocurrencia de precipitaciones. Teniendo en cuenta esto se obtuvo que el porcentaje promedio de aumento en las intensidades para cada periodo de retorno y duración de la figura donde no se incluye el fenómeno (1991-2009), con respecto a la figura de los años 1991 - 2014 en los cuales se presentó el fenómeno de “La niña” es de: 1.58%.

Figura 52. Curva IFD - Guamal 1991-2009.

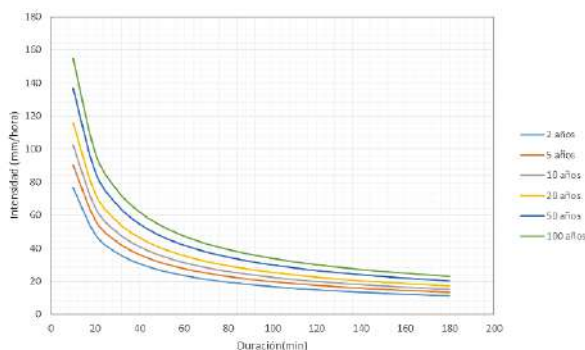
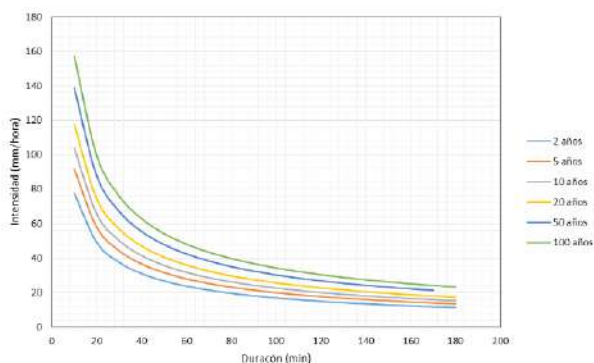


Figura 53. Curva IFD- Guamal 1991-2014.



Finalmente, en la estación “Delirio” al igual que en la anterior, las precipitaciones disminuyen con respecto a su duración, en los años donde se presentó el fenómeno de “La niña” 2010-2011 con un porcentaje promedio un poco más bajo con respecto al anterior de: 0.8%

Con respecto a los resultados obtenidos para la Metodología Estadística se tiene que: A través de este método se realizó una figura por cada estación de estudio, cada una desde el año 2010 al 2014. Ya que el objetivo de aplicar esta metodología, es comparar los resultados de las curvas en presencia del fenómeno de “La niña” 2010-2011 tanto de la metodología Estadística como de la Metodología Regional para de esta manera verificar cual arroja un resultado más exacto.

Se identificó que, para las estaciones Cachipay, Universidad Militar, y Guamal, presento una mayor variación en las intensidades aplicando la metodología Estadística para los diferentes periodos de retorno y duraciones, arrojando así, los siguientes porcentajes de incremento: 13.60% -18.21% - 28.85% para cada estación respectivamente, de esta manera la estación con mayor variación en su intensidad respecto a la otra metodología es la de “Guamal” (Figura 54 y 55).

Figura 54. Curva IFD Guamal 2010-2014 Metodología Estadística.

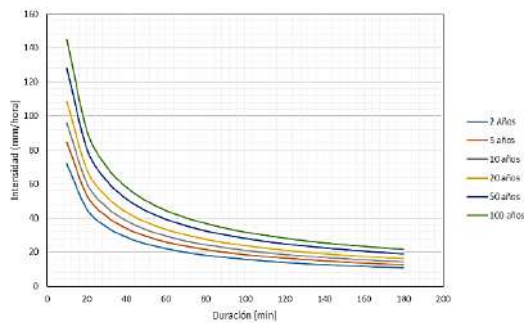
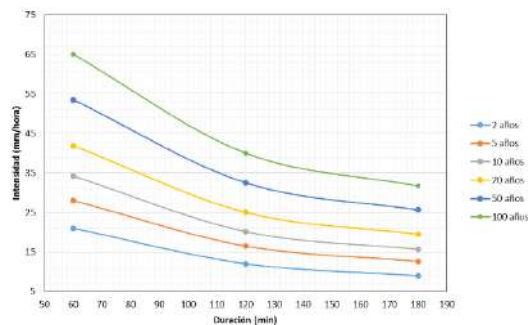


Figura 55. Curva IFD Guamal 2010-2014 Metodología Regional.



Por el contrario, la estación “Delirio” (Figura 56 y 57) presenta un incremento en sus intensidades aplicando la metodología Regional con un porcentaje del: 13,50%.

Figura 56. Curva IFD Delirio 2010-2014 Metodología Estadística.

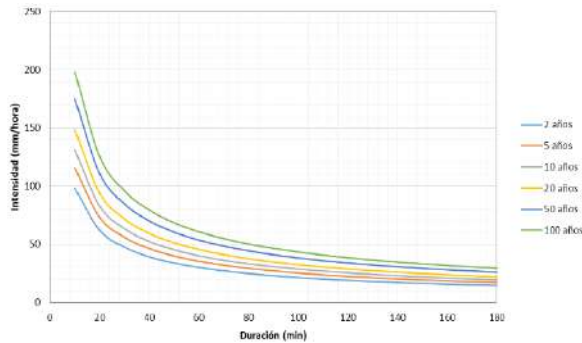
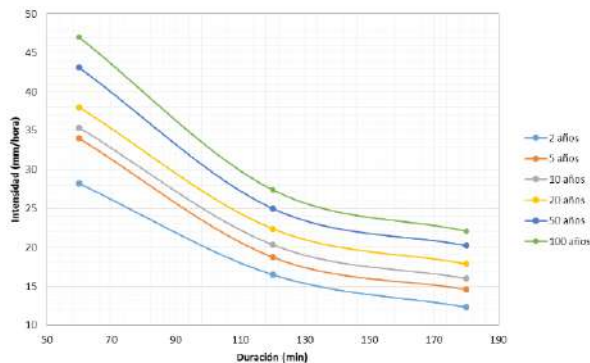


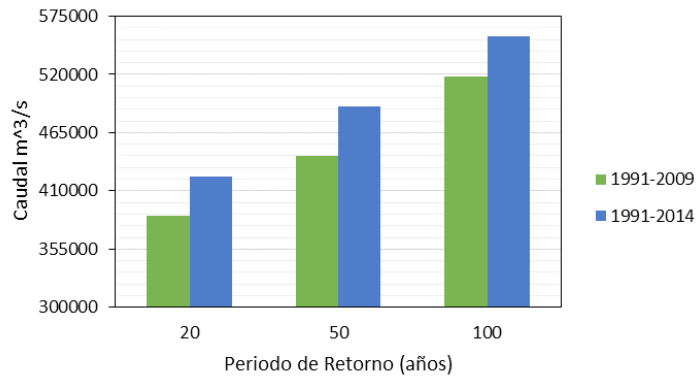
Figura 57. Curva IFD Delirio 2010-2014 Metodología Regional.

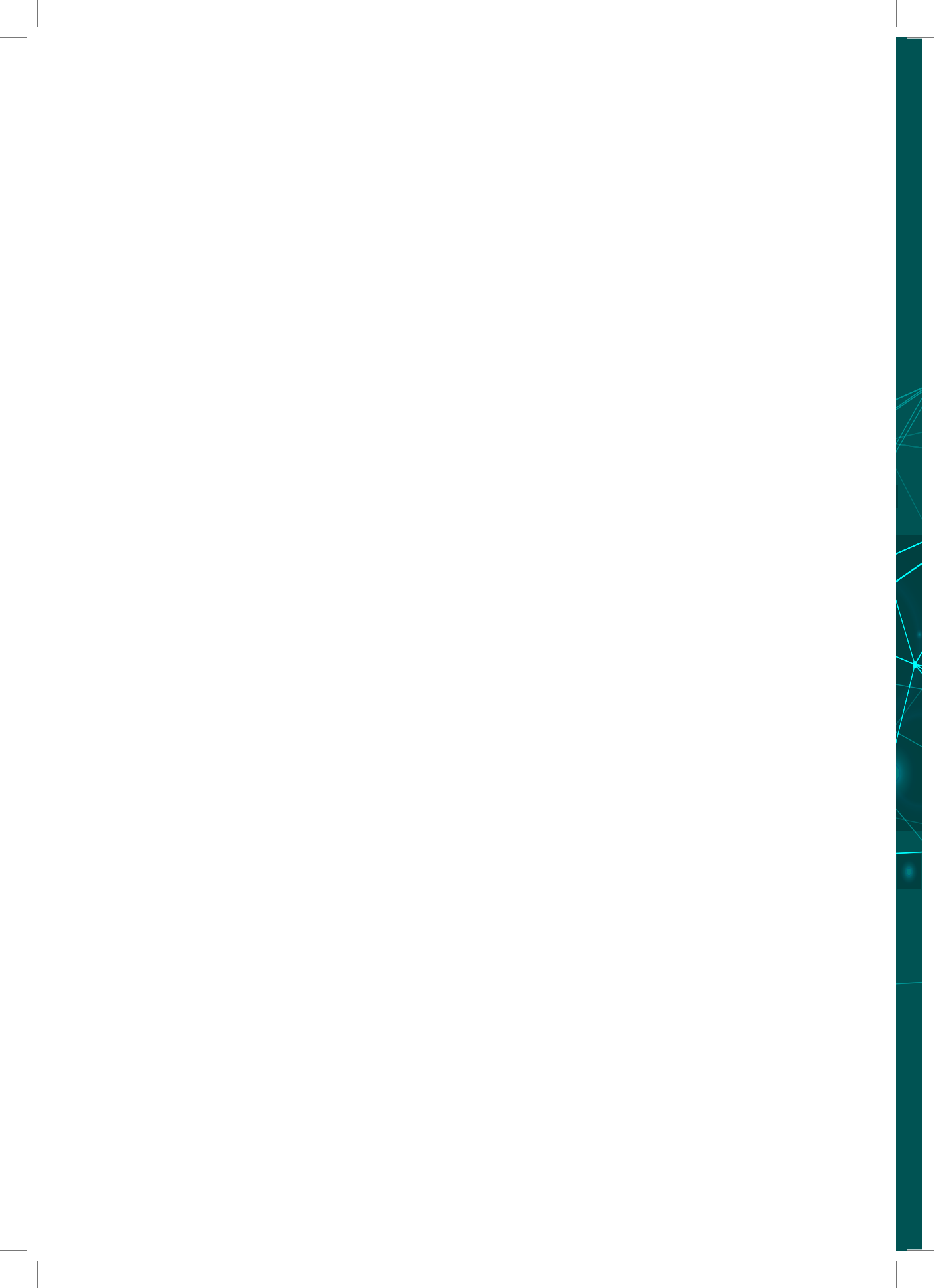


Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por la metodología Regional, en la cual se observó un aumento significativo de las intensidades en la estación Cachipay, se aplicó para esta estación la ecuación racional a partir de la cual se determinaron los caudales máximos para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años, de los periodos 1991-2009 y 1991-2014 (Figura 58).

Los promedios de aumento obtenidos son del 9.75% ,10.64% y 7.27% para los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años respectivamente. Conforme a esto se logra observar que el caudal máximo en la microcuenca quebrada La Honda tiene una variación promedio del 9% la cual también se evidencia y esta concorde en las curvas IFD del método regional, por lo que se puede evidenciar el posible subdimensionamiento de las obras ambientales.

Figura 58. Variación del caudal máximo en la estación de Cachipay microcuenca Quebrada La Honda.







CAPÍTULO IV

CAUDALES



INTRODUCCIÓN

En el contexto internacional, Colombia es considerada como un país privilegiado en cuanto a la oferta hídrica disponible, tomando en cuenta la precipitación media anual y los caudales promedios, superan ampliamente los estándares de Sudamérica y los mundiales.

No obstante, su distribución al interior de nuestro territorio es variable, debido a las particularidades hidrológicas, climatológicas, topográficas y de los patrones poblacionales en el país. En este sentido, las regiones Andina y Caribe, son las más propensas a presentar conflictos por disponibilidad y calidad del agua, como consecuencia de mayores demandas del recurso hídrico, para el desarrollo de actividades antrópicas. Esta situación se incrementa en la zona Andina donde se localiza aproximadamente el 70 % de la población nacional y las fuentes abastecedoras de agua corresponden en un 80 % a cuencas menores, con baja capacidad de almacenamiento y de auto depuración natural. En el otro extremo, las regiones Amazonia y Pacífica presentan exceso de oferta natural para las densidades poblacionales y las actividades económicas y productivas actuales.

Esta realidad es más evidente en épocas de sequía. Estudios desarrollados por los Institutos de Investigación adscritos al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, señalan que cerca del 50 % de la población de las áreas

urbanas presentan problemas de suministro de agua en condiciones normales, por insuficiente disponibilidad, baja regulación o presión sobre el recurso hídrico. Durante los años secos dicha proporción asciende al 80 %, siendo particularmente crítica la situación para aquellos acueductos municipales que son abastecidos por pequeñas fuentes altamente vulnerables y de poca regulación, lo cual pone en riesgo la continuidad del suministro.

Al mismo tiempo, la degradación de las cuencas ocasiona serios problemas de regulación hídrica, produciendo bajos caudales en épocas de verano o inundaciones en períodos de invierno.

Si se mantienen las tendencias actuales y la planificación y administración del recurso hídrico por parte de las autoridades competentes no mejora, esta situación se agravará toda vez que la oferta hídrica disponible se verá restringida por efectos de la contaminación, del aumento en la demanda asociado al crecimiento poblacional y económico, así como de la reducción en la capacidad de regulación de las cuencas hidrográficas.

4.1 CAUDAL

Es la cantidad de fluido que pasa por determinado elemento durante un tiempo definido. Dicha cantidad se identifica más comúnmente con el flujo volumétrico que pasa por un área dada, en una unidad de tiempo y con menos frecuencia, con el flujo másico.

Foto 30. Caudal salida embalse el Hato Cundinamarca.



Fuente: Autor.

En el caso de cuencas de ríos o arroyos, los caudales generalmente se expresan en metros cúbicos por segundo o miles de metros cúbicos por segundo. Son variables en tiempo y en el espacio y esta evolución se puede representar con los denominados hidrogramas.

4.1.1 El caudal en la Ingeniería Agrícola e Hidráulica

El caudal de un río es fundamental en el dimensionamiento de presas y obras de control de avenidas. Dependiendo del tipo de obra, se emplean los *caudales medios diarios*, con un determinado tiempo de recurrencia o tiempo de retorno, o los *caudales máximos instantáneos*. La forma de obtención de cada uno es diferente: para los primeros es posible tomar como base los valores de caudales registrados en una estación de medición, durante un número considerable de años, en cambio los *máximos instantáneos*, muy frecuentemente se deben calcular a través de modelos matemáticos.

La medición práctica del caudal líquido en las diversas obras hidráulicas, es de gran importancia puesto que de ella depende el buen funcionamiento del sistema hidráulico como un todo, y es fundamental para garantizar la seguridad de la estructura. Existen diversos procedimientos para la determinación del caudal máximo instantáneo, en el numeral “4.1.3 medición del caudal” del presente capítulo se presentan estos procedimientos.

4.1.2 Tipos de caudal

- Caudal medio diario

Es la media de los caudales instantáneos medidos a lo largo del día; esta medición debe realizarse en un tramo del río o estructura hidráulica donde el flujo del agua sea estable, a esto se le conoce como sección de control. Si la sección de control es del tipo limnimétrico, normalmente se hacen dos lecturas diarias de nivel, cada 12 horas.

$$Q_{md} = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (4.1)$$

Dónde:

Q_{md} = Caudal medio diario

Q = Caudal instantáneo

Si la sección es del tipo limnigráfico convencional, es decir que está equipada con un registrador sobre cinta de papel, el hidrólogo decide, con base en la velocidad de variación del nivel del agua, el número de observaciones que considerará en el día. Siendo n , el número de puntos considerado, la fórmula anterior se transformará en la siguiente:

$$Q_{md} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \quad (4.2)$$

Dónde:

Q_{md} = Caudal medio diario

Q = Caudal instantáneo

n = número de mediciones

Si la sección es del tipo telemétrico donde el registro del nivel del agua se hace a intervalos de tiempo determinado (dt , en segundos), el número diario de registros será de:

$$n = \frac{86400}{dt} \quad (4.3)$$

- Caudal medio mensual

Es la media de los caudales medios diarios, del mes en examen (M = número de días del mes: 28, 30 o 31, según corresponda). Se expresa en m^3/s .

$$Q_{md} = \frac{Q_{md1} + Q_{md2} + \dots + Q_{mdM}}{M} \quad (4.4)$$

- Caudales máximos

Los caudales máximos instantáneos son el valor máximo que se presenta durante un día, semana, mes o año en una corriente de agua, se obtienen directamente del hidrograma, cuando la estación hidrométrica está equipada con limnógrafo. En caso contrario, los niveles se miden en miras topográficas que se instalan en una de las orillas del río, es decir, una de las márgenes de la corriente. Estas medidas se complementan con elementos especiales

denominados “maxímetros”, los cuales cuentan con una señal que marca el nivel máximo alcanzado por el agua en un período dado, generalmente de 24 horas. Los niveles máximos se convierten en caudales máximos por medio de la curva de calibración. Una vez seleccionados los caudales máximos instantáneos, o picos de crecientes, se conforman las series históricas.

- Caudales mínimos

Son los caudales mínimos de una corriente, también llamados caudales de estiaje, estos se registran como caudales mínimos diarios. De acuerdo con las necesidades de cada proyecto, en ciertos casos se determinan los caudales mínimos medios de 10 días consecutivos, o los caudales mínimos mensuales. Para formar la serie de caudales mínimos diarios, se registra durante cada año o periodo de estudio los caudales que presente la corriente, se ordenan de menor a mayor y luego se procede a conformar una serie anual o una serie básica de mínimos.

Para la serie anual se toma el caudal mínimo diario de cada uno de los años de registro. De esta manera la serie tiene tantos valores como años de registro (Medina, 1998).

- Relación caudal pico/caudal diario

Para esta relación generalmente se toma un valor promedio de 1.6, puesto que numerosos estudios de crecidas extremas en el mundo, han arrojado valores entre 1,2 y 2,2 (en promedio 1,6), para dicho coeficiente, con una probabilidad de 90 %. Sin embargo en cuencas pequeñas puede ser mucho más elevado.

4.1.3 Medición de caudal

Para cuantificar el volumen de agua que pasa por una sección transversal de un conducto o canal, en la unidad de tiempo, se realizan aforos que no son más que mecanismos para determinar caudales.

- Aforo

Todos los mecanismos de aforo se basan generalmente en la ecuación de continuidad. La selección del método está en función de las necesidades técnicas y de la naturaleza de la corriente que se desea medir, de manera que cada procedimiento tendrá sus propios alcances y limitaciones, por lo cual el nivel de calidad en las observaciones realizadas variará (Muñoz, 1985).

- Aforo volumétrico

Este método se utiliza en corrientes de pequeños caudales y consiste en ubicar en el río un recipiente de volumen conocido para llenarlo en un período de tiempo reducido. El caudal se determina con la siguiente expresión (Fórmula 4.5):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.5)$$

Donde:

Q = caudal en m^3/s o l/s .

V = volumen captado en m^3 o litros.

t = tiempo empleado para captar el caudal (en segundos).

- Aforo con vertederos o canaletas

Se coloca una de estas estructuras en posición transversal a la corriente y el caudal se determina con la ecuación de patronamiento según sea el caso. Dicha expresión tiene la siguiente forma (Fórmula 4.6):

$$Q = K * H^n \quad (4.6)$$

Donde:

Q = caudal en m^3/s o l/s .

K y n = son coeficientes adimensionales que varían según la estructura a utilizar.

H = es un nivel característico, aguas arriba del medidor, en m.

A. Vertederos

Consiste en una abertura a través de la cual el agua fluye naturalmente, las formas más usuales se muestran en el gráfico 59.

La determinación del caudal dependerá de la forma del vertedero, de acuerdo con las siguientes expresiones (Fórmulas 4.7 y 4.8):

1. Rectangular

$$Q = C * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (4.7)$$

Donde:

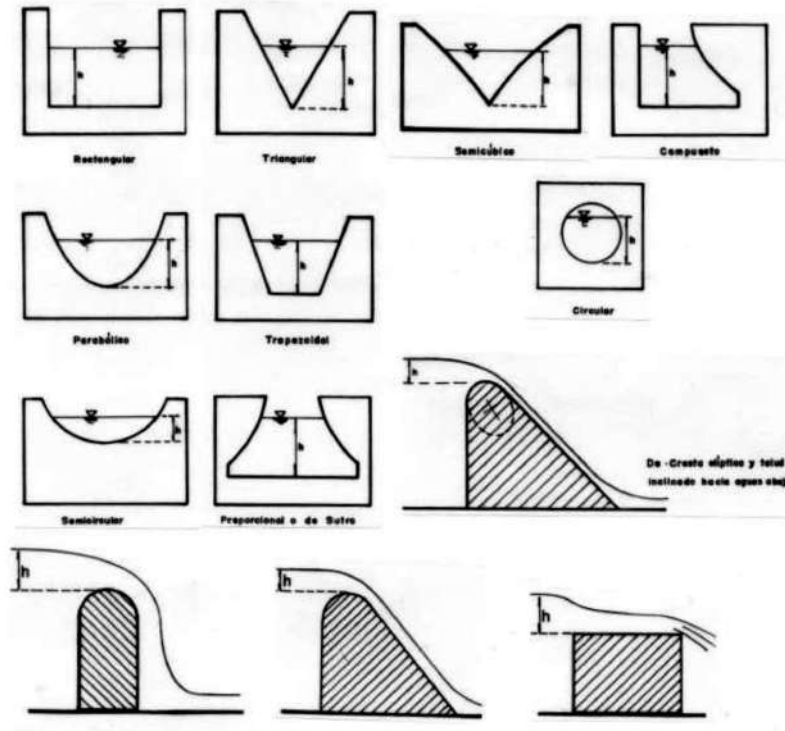
Q = caudal en m^3/s .

$C = 1.8$

L = longitud del vertedero en m.

H = altura de la lámina de agua en m.

Figura 59. Tipos de vertedero.



Fuente: Pérez y Vicente, (2005).

2. Triangular

$$Q = C * \tan \alpha * H^{\frac{5}{2}} \quad (4.8)$$

Donde:

Q = caudal en m^3/s .

$C = 1.4$

α = ángulo que forma un lado del vertedero con la vertical.

H = altura de la lámina de agua en m.

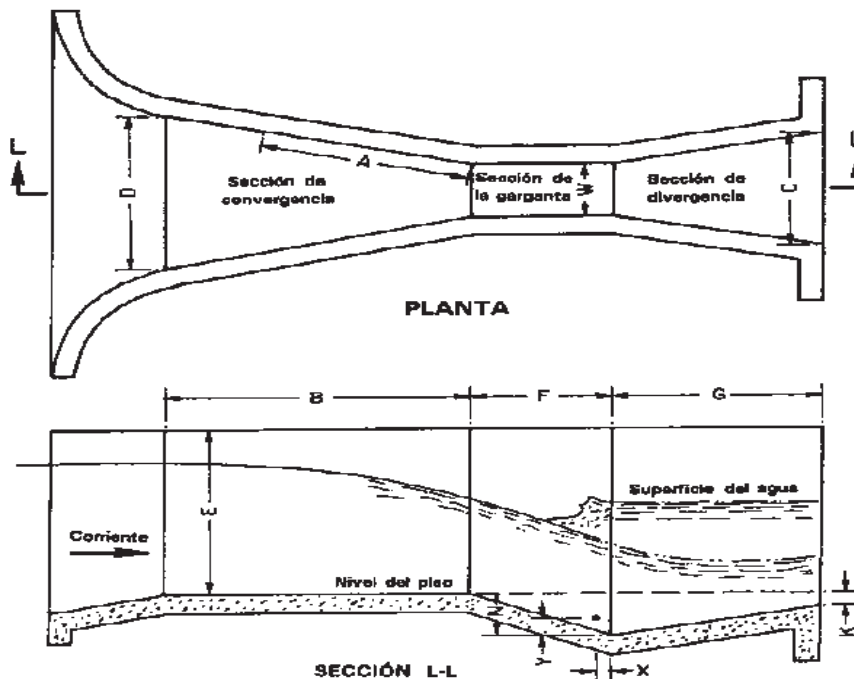
B. Canaletas

- El canal de aforo Parshall

Llamado así por el nombre del ingeniero de regadío estadounidense que lo concibió. Se describe técnicamente como un canal Venturi o de onda estacionaria o de un aforador de profundidad crítica. Sus principales ventajas son: i) se presenta sólo una pequeña pérdida de carga a través del aforador, ii) permite el paso natural de sedimentos o desechos, iii) no requiere condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación, y iv) tampoco necesita correcciones para una sumersión de hasta el 70 %. En consecuencia, es adecuado para la medición del caudal en los canales de riego o en las corrientes naturales con una pendiente suave.

El aforador está constituido por una sección de convergencia con un piso nivelado, una garganta con un piso en pendiente, en dirección aguas abajo y una sección de divergencia con un piso en pendiente en sentido aguas arriba (Figura 60). Gracias a esto el caudal avanza a una velocidad crítica a través de la garganta y con una onda estacionaria en la sección de divergencia.

Figura 60. El canal de aforo Parshall.



Fuente: USDA-SCS 1965.

- Aforo con molinete

Los correntómetros o molinetes son aparatos mecánicos que giran sobre un eje horizontal o vertical y miden la velocidad puntual de una corriente, en una sección determinada. La velocidad angular de estos equipos depende de la velocidad lineal del agua, en el punto donde se está midiendo.

Estos instrumentos se utilizan para corrientes de agua medianas y grandes, donde la instalación de vertederos no es práctica. En este método el cálculo de caudal se realiza con la velocidad de la corriente (Monsalve Sáenz, 1995).

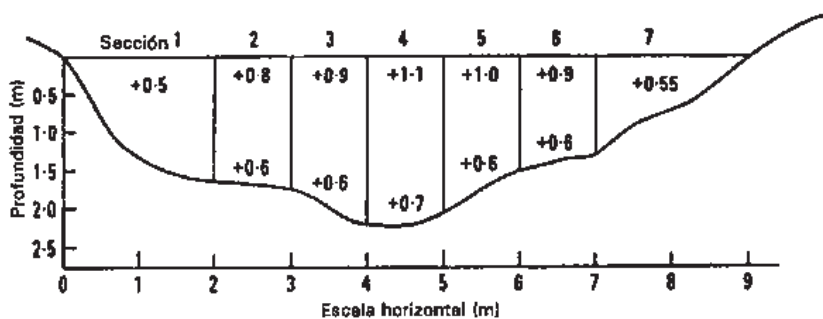
Figura 61. Molinete y pesa - Puente Vía Guaymaral - río Bogotá.



Para realizar un aforo con molinete se debe proceder así:

- Se divide la sección transversal del río en franjas verticales (f) como se muestra en la Figura 62.

Figura 62. Anchos de franja para el aforo del río Bogotá, método molinete.



Fuente: Autores.

- b. El total del caudal que pasa por la sección que se está aforando, es igual a la sumatoria de los caudales que pasan por cada franja vertical, como lo muestra la fórmula 4.9.

$$Qt = \sum_{i=1}^n q_i \quad (4.9)$$

Donde q_i representa el caudal que pasa por cada franja.

- c. A partir de la ecuación de continuidad se puede estimar el caudal parcial de cada franja, utilizando la ecuación 4.10:

$$q_i = v_i * a_i \quad (4.10)$$

Donde:

q_i = caudal que pasa por la franja en m^3/s .

v_i = velocidad promedio del agua en esa franja en m/s .

a_i = área de la franja en m^2 .

- d. La velocidad promedio del agua (v_i), en cada franja, se determina de la siguiente manera:

- En la franja se traza una vertical por el punto medio donde la profundidad es h_i .
- Si la profundidad es menor que 60 cm se debe colocar el molinete a $0.40h_i$ medido desde el fondo y se toma la velocidad, que corresponde a (v_i).
- Cuando la profundidad sea mayor a 60 cm, se toman dos puntos sobre la vertical donde es leída (v_i) a $0.2h_i$ y $0.8h_i$ y se aplica la ecuación 4.11:

$$v_i = \frac{1}{2} v_{0.2 h_i} + v_{0.8 h_i} \quad (4.11)$$

- e. La velocidad en cualquier punto de una vertical, se calcula mediante la ecuación 4.12:

$$v = a + b * N \quad (4.12)$$

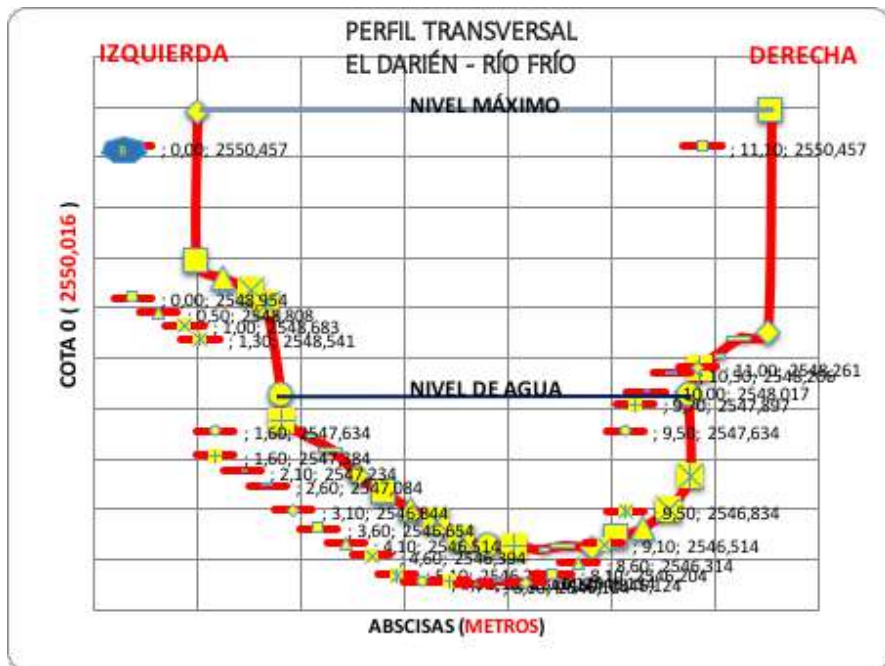
Donde:

V = velocidad media del agua en el punto de interés, obtenida con el molinete y expresada en m/s.

a y b = constantes propias del molinete suministradas por el fabricante, en donde (a) es el paso del molinete y (b) es la velocidad mínima para que pase el molinete.

A continuación se presenta el análisis (Tabla 42) y la figura (Figura 63) de un aforo realizado en febrero de 2012 en el río Frío, en el sitio conocido como puente el Darién.

Figura 63. Sección transversal del río Frío en el sector el Darién (Chía, Cundinamarca).



- Aforo con flotadores

Este método se emplea cuando la corriente es turbulenta y la medición no requiere de mucha precisión. Se usa en ocasiones para comprobar los valores obtenidos con otros procedimientos.

Para medir el caudal de un río el proceso es el siguiente:

- Se selecciona el tramo lo más recto y parejo posible.
- Se mide la longitud (L), se halla la sección transversal (A) y el perímetro mojado (P).
- Se prepara el flotador (botellas, balones, bolas de icopor, madera, entre otros).
- Se coloca el flotador algunos metros antes del tramo elegido y con un cronómetro se mide el tiempo que utiliza para atravesarlo.
- Se determina la velocidad superficial del flujo (V_s) con la siguiente relación (Ecuación 4.13):

$$V_s = L/t \quad (4.13)$$

Donde:

V_s = velocidad superficial del flujo en m/s.

L = longitud del tramo en m.

t = tiempo cronometrado para recorrer el tramo en segundos.

- Aforador con trazadores

Este método se refiere a la introducción de una concentración conocida de sales, isótopos radiactivos o colorantes, aguas arriba del sitio de aforo, donde se aplica un caudal constante (q) de la sustancia, utilizando una bomba de inyección y con una concentración C_1 , La concentración de la sustancia (C_2) se mide a una distancia mínima de su aplicación, provisionalmente se puede asumir 200 m aguas abajo del sitio en el que fue introducida.

El caudal se determina con la siguiente fórmula (Fórmula 4.14):

$$Q = (q) * \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \quad (4.14)$$

Donde:

Q = caudal que lleva la corriente en m^3/s .

q = caudal del trazador que inyecta la bomba en m^3/s .

C_1 = concentración del trazador inyectado a la fuente por la bomba en kg/s .

C_2 = concentración final del trazador aguas abajo de la fuente en kg/s .

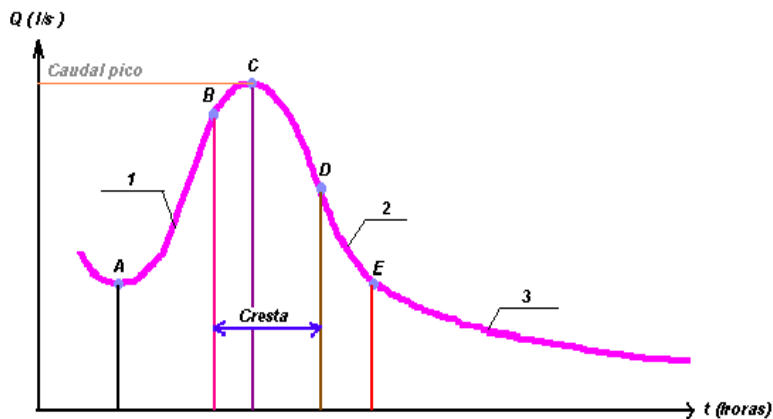
C_0 = concentración inicial de trazador que puede llevar la corriente de agua antes de la inyección en kg/s .

Para hallar la concentración del trazador, en el punto donde se hace el aforo, se recomienda aplicar una sustancia colorante, que permita definir el momento en que se pueden tomar las muestras de agua que deben ser llevadas al laboratorio.

4.1.4 Hidrogramas

Son gráficos que representan la variación del caudal respecto al tiempo, lo cual es equivalente a decir que son los gráficos de la descarga de un flujo, en función del tiempo ($L3/T$). En ellos se muestra el cambio de cualquier variable hidrológica en el tiempo (nivel de agua, caudal, carga de sedimentos). Se clasifican en hidrogramas de tormenta e hidrogramas anuales, los que a su vez se dividen en perennes e intermitentes, ver Figura 64.

Figura 64. Hidrogramas.



Fuente: Autores.

Donde:

D = Caudal medio.

B y C = Caudales máximos instantáneos

A y E = Caudales mínimos instantáneos

1 = Curva de concentración de caudal

2 = Curva de descenso de caudal

3 = Curva de agotamiento de caudal

Entre otras aplicaciones, los hidrogramas son útiles para comparar los tiempos de descarga y caudales pico, de varias corrientes o cuencas hidrográficas y de esta forma conocer las diferencias entre sus capacidades de respuesta frente a avenidas.

4.2 HIDROGRAMA UNITARIO

Curva que describe la forma en que una cuenca devuelve un ingreso de lluvia distribuido en el tiempo. Se basa en el principio de que la relación entrada-salida de precipitación es lineal, es decir, que pueden sumarse linealmente. Se elabora con base en un “Hidrograma en S”, que a su vez se construye desglosando varias tormentas y sus hidrogramas reales producidos.

4.2.1 Hidrograma sintético

Hidrograma unitario estimado con base en fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca en estudio, entre ellos: área, longitud del cauce principal, pendiente promedio y otros. Los más conocidos son el Triangular del USDA, el de Schneider y el de Clark.

4.2.2 Determinación del hidrograma de descarga de una cuenca

En algunos casos es necesario determinar el volumen total del escurrimiento superficial generado por una lluvia, en un tiempo determinado. Sin embargo es más frecuente el caso en que se requiere conocer el caudal máximo instantáneo, de una determinada avenida. Otras veces es necesario conocer el hidrograma en su totalidad, es decir la variación del caudal en el tiempo, en una determinada sección en la cual se pretende construir una obra hidráulica o proteger un bien existente.

Los métodos que se utilizan para estos cálculos son:

- El racional.
- Hidrograma unitario.
- Modelos matemáticos de cuencas hidrográficas.

4.3 ZONA DE ESTUDIO SUBCUENCA DEL RÍO FRÍO

Los estudios hidrológicos se llevan a cabo para determinar el régimen de caudal en una cuenca, estableciendo los valores medios mensuales a través de la distribución temporal de caudales medios. También se establecen los caudales máximos y mínimos por medio de la serie de valores extremos anuales, para determinar las probabilidades de ocurrencia de diferentes períodos de retorno, así como las curvas de duración de caudal medio y mínimo mensuales. Esta última curva es útil en la definición del Caudal Ecológico, al igual que en

la elaboración del Balance Hídrico en oferta y demanda, información básica para determinar la disponibilidad de agua de la cuenca.

Para obtener los datos analizados en este estudio, se recolectó información de las estaciones hidrológicas de la cuenca (Tabla 43).

Tabla 43. Estaciones limnimétricas del río Frío.

Cat	Estación	Corriente	Mpio	Lat.	Long	Elevación (msnm)
Lm	Pt. Calamar	Frio	Tabio	4° 58´ N	74°05´ W	2595
Lm	Pt. Cacique	Frio	Chía	4°52´ N	74°04´ W	2560
Lm	Pz. Hondo	Frio	Zipaquirá	5°04´ N	74°03´ W	2930
Lg	Pt .virginia	Frio	Tabio	4°55´ N	74°04´ W	2566
Lm	Santa Isabel	Frio	Tabio	4°59´ N	74°04´ W	2680
Lm	Pt. lata	Qbra. humillo	Zipaquirá	5°04´ N	74°03´ W	3050

Fuente: (CAR, 2011)

Con base en la información obtenida de las estaciones de la cuenca (Tabla 42), como caudales máximos, medio y mínimos diarios se procedió a calcular diferentes aspectos hidrométricos de la cuenca, entre ellos el caudal

4.3.1 Medición de caudal

Se realizó el aforo con el método de flotador para la cuenca del río Frío en el puente vía Guaymaral, ya que este afluente es una subcuenca de la cuenca del río Bogotá. Al hallar la velocidad superficial, se procede a calcular el caudal de la corriente, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 44.

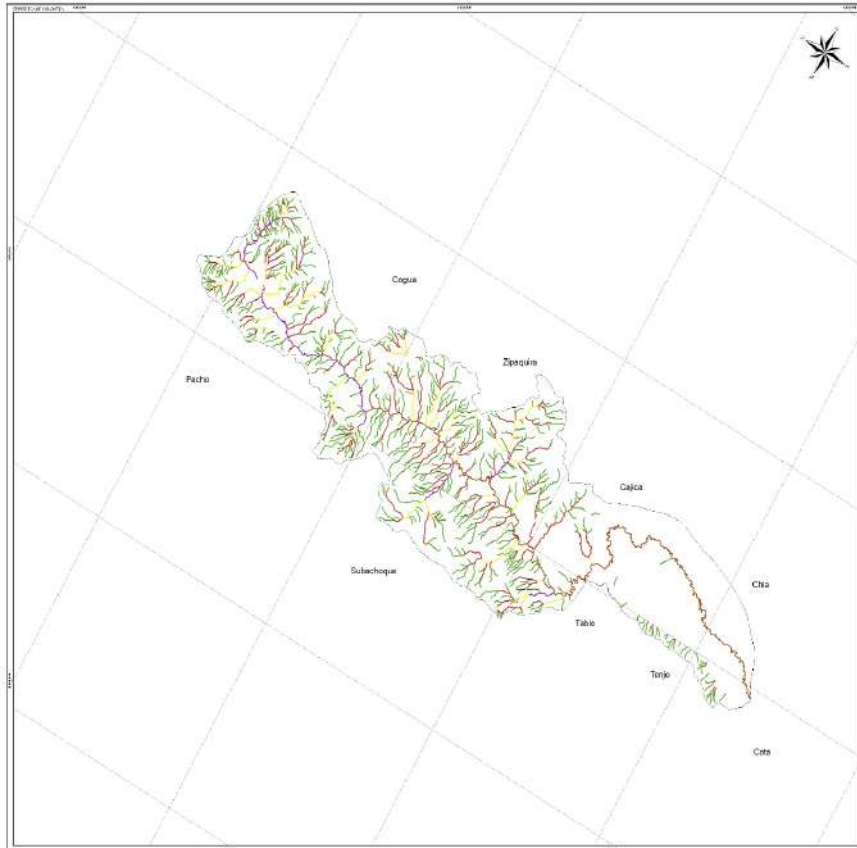
Tabla 44. Medición del caudal en la cuenca del río Bogotá (estación La Balsa), mediante el método aforo con flotador.

AFORO MÉTODO FLOTADOR					
RÍO: BOGOTÁ		FECHA: 08/09/06			
ESTACIÓN: LA Balsa		HORA: 9:15			
Distancia	Tiempo	Velocidad	Área Total	Caudal	
(m)	(s)	(m/s)	(m ²)	(m ³ /s)	
11,07	23,31	0,475	34,812	16,532	
	20,05	0,552		19,220	
	18	0,615		21,409	
	20,45	0,541		18,841	Promedio

Fuente: Autores.

- Cálculo del caudal para la subcuenca del río Frío

Figura 65. Red hidrográfica.



Fuente: (CAR, 2011).

Para calcular el caudal se tomaron los datos de la estación del puente La Virginia y por relación de áreas se encontró el caudal total de la cuenca hidrográfica del río Frío en Cundinamarca, como se indica a continuación:

Tabla 45. Aspectos de la cuenca del río Frío (Cundinamarca).

Área total de la Cuenca (At)	202 km ²
Área después de la Estación (Ad)	43 km ²
Área que produce el caudal	At - Ad

Fuente: Autores.

Aplicación:

$$At - Ad = (202 - 43)km^2 \quad (4.15)$$

$$A_Q = 159km^2$$

Según los datos de caudales de la estación Puento La Virginia entre (1947-2002), obtenidos por la CAR, el caudal promedio es de 1.721 m³/s; (promedio anual).

Por consiguiente el caudal total de la hoya será:

$$Q_t = \frac{202km^2 * 1.721 m^3 / s}{159km^2}$$

$$Q_t = 2.18m^3/s$$

Rendimiento:

Fórmula de rendimiento

$$R = \frac{Q \left(\frac{m^3}{s} \right)}{A(km^2)} \quad (4.16)$$

Datos requeridos:

$$Q = 2.18 m^3/s, \quad A = 202 km^2$$

$$R = \frac{2.18 \left(\frac{m^3}{s} \right)}{202(km^2)}$$

$$R = 0.1079 \frac{Q \left(\frac{m^3}{s} \right)}{A(km^2)}$$

$$R = \frac{0.1079 \left(\frac{m^3}{s} \right) + 1000 L}{(km^2) * m^3}$$

$$R = \frac{10.79 \left(\frac{L}{s} \right)}{km^2}$$

Contraste y complementación de series

Se analizaron los registros de caudales medios mensuales de las estaciones La Virginia y Santa Isabel, encontrándose una buena relación con una ecuación que tiene la siguiente correlación:

$$Q \text{ (Santa Isabel)} = 1.6895 (Q. \text{ Santa Isabel})^{0.961} \quad (4.17)$$

$R^2 = 0.997$ Coeficiente de Corrección.

Con estos datos se obtienen los siguientes resultados sobre rendimiento:

Tabla 46. Fuente diagnóstico y prospectiva de la Cuenca del río Frío Cundinamarca.

Estación	Hoya (Km ²)	Qmedio (m ³ /s)	Rendimiento (1/s-Km ²)
Santa Isabel	96.9	1.20	12.38
La Virginia	105.1	1.50	9.48

Fuente: Autores.

- Caudal medio mensual para la cuenca del río Frío (Cundinamarca)

El estudio de caudales medios en la cuenca del río Frío, se inició con una revisión de las curvas de calibración de las estaciones de aforo de Santa Isabel y Puente la Virginia, para luego proceder al contraste y corrección de datos incorrectos, así como a la complementación de registros y obtención de series completas.

Posteriormente, se analizaron las funciones de probabilidad de los caudales medios anuales y la distribución de probabilidad de los volúmenes de embalse requeridos para regular un caudal constante.

Estación Santa Isabel

La información de esta estación se toma como base para considerar los caudales. La distribución temporal de los caudales es de tipo bimodal, al igual que la precipitación, presentando valores máximos durante dos periodos en el año comprendidos de abril a junio y agosto a noviembre, registrando para mayo un valor máximo de 1.4 m³/s y para octubre y noviembre valores de 1.7m³/s.

En el primer período del año, se observa que entre los meses de enero a marzo, en febrero se presenta el menor registro con 0.5 m³/s. El valor promedio anual es de 1.1m³/s (CAR, 2011).

- Caudal medio anual

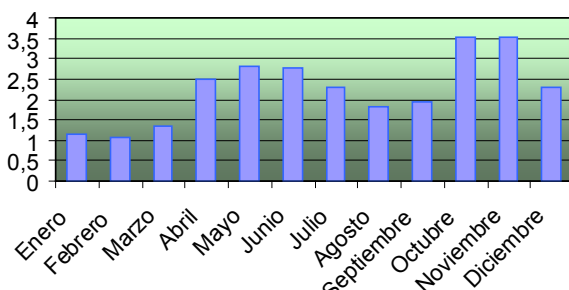
El caudal medio anual es la media de los caudales medios mensuales. Se expresa en m³/s.

Tabla 47. Valores de caudal medio en la cuenca del río Frío (Cundinamarca), para el año 2004.

MES	CAUDAL (m ³ /s)
Enero	1.16
Febrero	1.07
Marzo	1.33
Abril	2.48
Mayo	2.82
Junio	2.77
Julio	2.29
Agosto	1.82
Septiembre	1.96
Octubre	3.51
Noviembre	3.51
Diciembre	2.3
Anual	2.25

Fuente: (CAR).

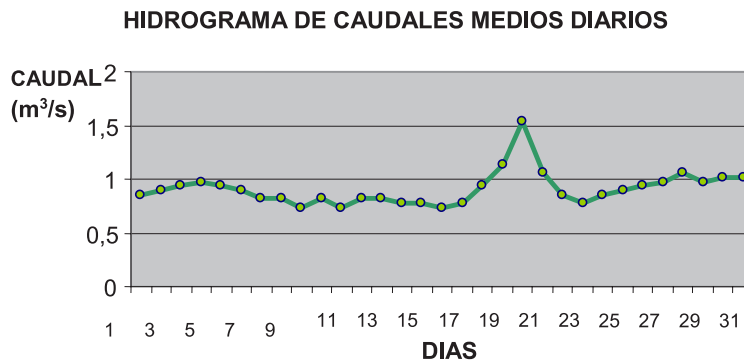
Figura 66. Caudales medios en la cuenca del río Frío, durante el año 2004.



Fuente: Autores.

- Hidrograma para caudales medios diarios de la cuenca del río Frío (Cundinamarca)

Figura 67. Caudales medios diarios subcuenca del río Frío para el mes de agosto de 2001.



Fuente: (CAR, 2011).

Según los datos suministrados por la CAR, el mes de agosto del año 2001 presentó registros altos de caudal, además presenta todos los registros necesarios para la elaboración del hidrograma, razones por las que se hizo el análisis con los datos de este mes. El hidrograma (Figura 67) muestra que por un evento desafortunado como el aguacero el día 20, se presenta una pronunciada curva de crecimiento es decir un aumento de caudal representativo (Anexo caudales medios diarios del río Frío).

4.3.2 Curva de duración o permanencia de caudales

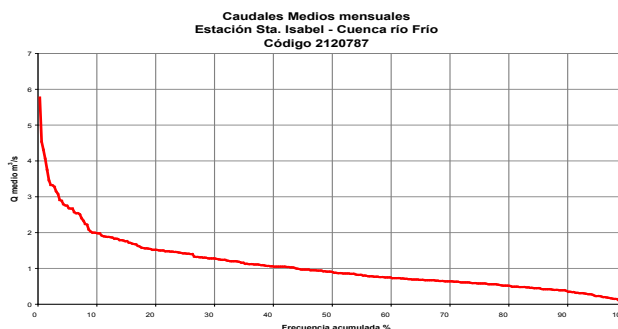
Se trabajó con los datos de caudales máximos de la estación pluviométrica Puente La Virginia, sobre el río Frío en Cundinamarca, propiedad de La CAR, obteniendo la tabla 48 Calculo de medición de caudales y posteriormente la Relación de caudal - Curva de duración de caudales de la subcuenca del río Frío, Cundinamarca.

Tabla 48. Datos curva de duración de caudales.

CÁLCULO DEL DIAGRAMA DE FRECUENCIAS DE CAUDAL					
I	Intervalo clase de caudales(1)	MARCA DE CLASE	Número de sucesos ni o frecuencia absoluta fi	Frecuencia (1) absoluta acumulada	FRECUENCIA RELATIVA (%)
1	0-4,8	2,4	283	590	100,00
2	4,8-9,6	7,2	152	307	52,03
3	9,6-14,4	12	51	155	26,27
4	14,4-19,2	16,8	47	104	17,63
5	19,2-24	21,6	22	57	9,66
6	24-28,8	26,4	19	35	5,93
7	28,8-33,6	31,2	8	16	2,71
8	33,6-38,4	36	3	8	1,36
9	38,4-43,2	40,8	0	5	0,85
10	43,2-48	45,6	1	5	0,85
11	48-52,8	50,4	1	4	0,68
12	52,8-57,6	55,2	3	3	0,51
	TOTAL		N=590		
CÁLCULO DE LA CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES					
12	Qmax=57,6	55,2	3	3	0,51
11	52,8	50,4	1	4	0,68
10	48	45,6	1	5	0,85
9	43,2	40,8	2	7	1,19
8	38,4	36	1	8	1,36
7	33,6	31,2	8	16	2,71
6	28,8	26,4	19	35	5,93
5	24	21,6	22	57	9,66
4	19,2	16,8	47	104	17,63
3	14,4	12	51	155	26,27
2	9,6	7,2	152	307	52,03
1	Qmin =4,8	2,4	283	590	100,00
	TOTAL		N=590		100,00

Fuente: Autores.

Figura 68. Curva de duración de caudales de la subcuenca del río Frío, Cundinamarca.



Fuente: Autores.

Se efectuó una revisión visual de las curvas proporcionadas por la CAR para ajustar los niveles y caudales aforados en la estación puente La Virginia, observándose un buen grado de ajuste entre los datos para niveles bajos y medios.

Para estados altos fue imposible obtener la curva convencional H vs Q y sus cálculos correspondientes, por lo cual no es posible adelantar ningún comentario sobre el particular.

4.3.3 Caudales máximos para la subcuenca del río Frío (Cundinamarca)

Con los datos de la tabla 49, se realizó la figura 67 donde se observa que los caudales máximos históricos se registraron en los años 1999 y 2000.

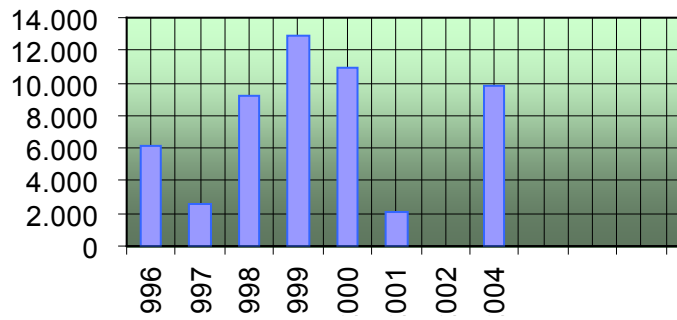
Tabla 49. Hidrológicos Puente La Virginia (CAR).

Año	Caudal (m ³ /s)
1996	6.079
1997	2.609
1998	9.235
1999	12.847
2000	10.952
2001	2.030
2002	0.206
2004	9.872

Fuente: Autores.

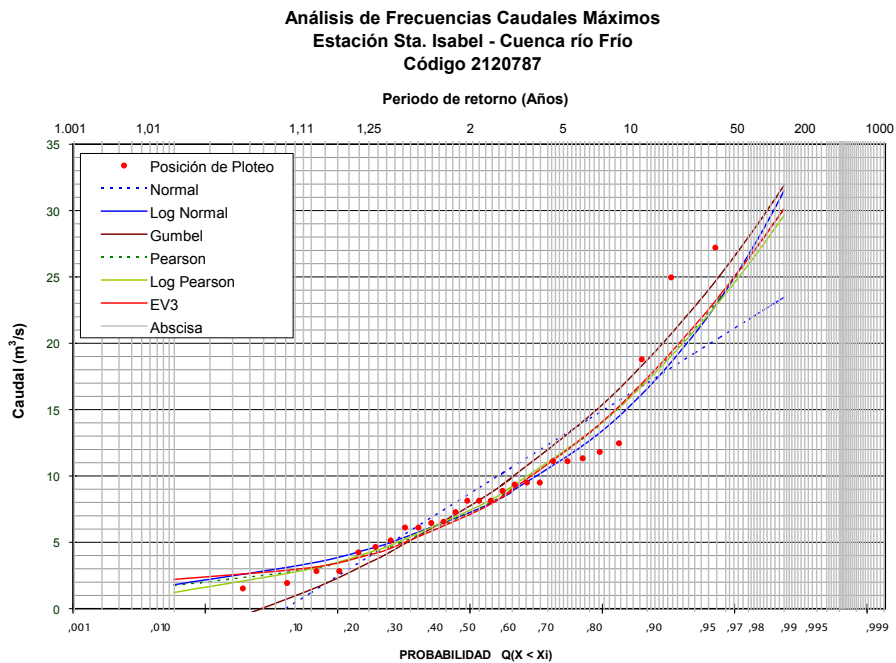
Figura 69. Caudales máximos (1996-2004). Río Frío (Cundinamarca).

CAUDALES MAXIMOS- RIO FRIO Serie Historica



Fuente: Autores.

Figura 70. Análisis de frecuencias - caudales máximos.



Fuente: (CAR, 2011).

La Figura 70 ilustra los diferentes métodos que se usan para hallar frecuencias de caudales máximos para la cuenca del río Frío. Por ejemplo para el caso de la subcuenca del río Frío en 10 años se presentaría un caudal de $18 \text{ m}^3 / \text{s}$, como se ilustra en la figura.

Así mismo se estudiaron los caudales puntuales máximos anuales de las estaciones de aforo, para establecer las envolventes regionales de la cuenca.

Posteriormente, para los sitios específicos del estudio, se evaluarán los caudales máximos para el diseño de una obra particular.

4.3.4 Análisis estadístico

Se pretende ajustar de acuerdo a la función de probabilidad de Gumbell a los datos registrados en las estaciones Santa Isabel y La Virginia, también con el programa HYFA, para el ordenamiento de los caudales máximos y la distribución Gumbell.

- Modelo Hidrológico HYFA

El modelo HYFA (Hydrological Frequency Analysis) es un software hidrológico que a partir de caudales o precipitaciones (máximos o mínimos), determina caudales o precipitaciones con diferentes periodos de retorno, con diferentes distribuciones de probabilidad (Gumbell, Pearson III, normal, entre otros).

- Modelo Hidrológico SMADA

Es un programa para hidrología producido por la Universidad Central de Florida, que incluye en forma separada varios archivos ejecutables. Es posible construir hidrogramas, diseño de embalses, análisis estadístico de la distribución de lluvias y cálculos de regresión entre otros

- Modelo HEC RAS

El HEC-RAS es un sistema integrado de software, diseñado para un uso interactivo en tareas múltiples, red de usos múltiples en diferentes ambientes. Está compuesto de una interface para el usuario (GUI), separando los componentes del análisis hidráulico, almacenamiento de datos y capacidad de administración de gráficas. También brinda facilidad en el manejo de la información.

Este sistema contiene fundamentalmente tres componentes de análisis hidráulico en canales o ríos unidimensionales, para: (1) Flujo permanente en

el cálculo del perfil de la superficie, (2) simulación de flujo no permanente, y (3) cálculo del transporte de sedimentos.

4.3.4.1 Caudales máximos estación Santa Isabel del río Frío (Cundinamarca)

Tabla 50. Caudales máximos en la subcuenca del río Frío (Cundinamarca), con un período de retorno a 100 años.

Período de Retorno	Caudales Máximos (m ³ /s)
2	8.2
5	13.7
10	17.4
20	20.9
25	22.1
50	25.5
100	28.9

Fuente. Autor, datos (CAR, 2011).

La estación Santa Isabel carece de limnígrafo, por lo cual los datos de caudal máximo publicados, corresponden a lecturas de mira y no al verdadero máximo instantáneo.

4.3.4.2 Caudales máximos estación puente La Virginia, río Frío Cundinamarca

Para la estación puente Virginia se utilizaron 50 años de registro en donde la Media está en 21.01 m³/s.

La distribución Gumbell Tipo I arrojó los resultados de la Tabla 51.

Tabla 51. Período de retorno.

Período de Retorno	Caudales Máximos (m ³ /s)
2	19.2
5	30.0
10	37.1
20	44.0
25	46.2
50	52.9
100	59.6

Fuente: Autores.

4.3.4.3 Envolvertes regionales

Con los valores obtenidos y ajustados de la estación La Virginia se calcularon las curvas de crecientes de la cuenca del río Frío, ajustada a una curva tipo Creager, para varios períodos de retorno. Los resultados obtenidos del estudio hidrológico, en caudales en m^3/s , se presentan en la Tabla 52.

Tabla 52. Valores de caudales para tener en cuenta en la ejecución de un proyecto.

Estación	Área Km ²	Curva de Duración Caudal			Q máx. Tr 100años
		Q Min	Q med	Q máx.	
Santa Isabel	96.9	0.10	1.20	5.75	29
La Virginia	105.1	0,20	1.50	12.75	61
Proyecto	197.5	0,20	1.86	15.83	76

Fuente: Autores.

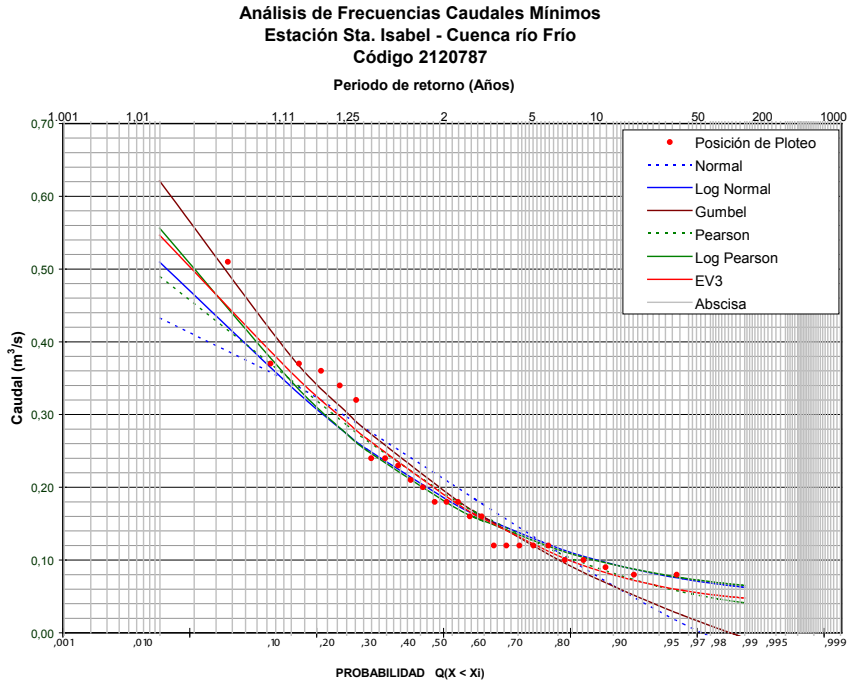
Como en el caso de precipitación se observa que el caudal específico o rendimiento hídrico es constante a lo largo de la hoya, pero se presenta un rendimiento mayor en la parte alta de la cuenca hidrográfica.

4.3.4.4 Caudales mínimos

En la estación de Santa Isabel, se desarrollaron los análisis de frecuencias y se ajustaron las series anuales a diferentes distribuciones de probabilidad, tales como: Gumbel Tipo I y Hyfa, para determinar la probabilidad de ocurrencia de los caudales mínimos en la subcuenca hasta el sitio de medición.

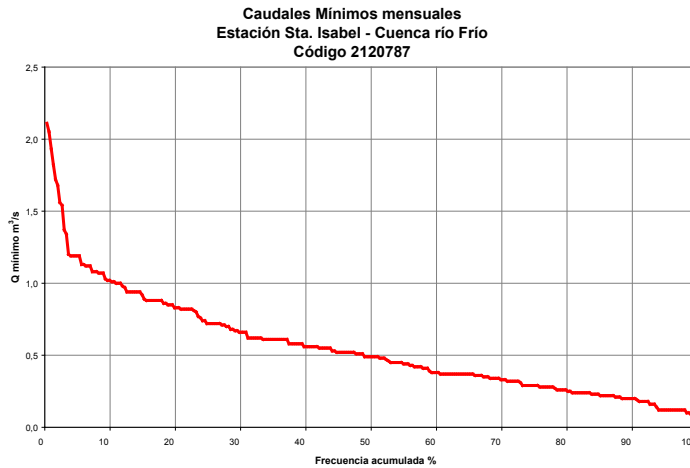
La Figura 69 ilustra los diferentes métodos utilizados para hallar frecuencias de caudales mínimos, para el caso de la subcuenca del río Frío en 10 años, se presentaría un caudal de $0.6 m^3 /s$. Teniendo una probabilidad del 50% de presentar un caudal mínimo de $0,5 L/s$, como se ve en la 70.

Figura 71. Análisis de frecuencias - caudales mínimos.



Fuente: Autores.

Figura 72. Duración caudales mínimos mensuales.



Fuente: Autores.

4.4 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA

4.4.1 Oferta hídrica

A partir del estado de los caudales medios mensuales apartados por la subcuenca, se define la oferta hídrica para dos extremos del ciclo hidrológico (meses secos, meses húmedos), con el fin de determinar posteriormente, el balance entre oferta y demanda, así como el índice de escasez de la misma, teniendo en cuenta las demandas sobre la cuenca.

El primero de los períodos contemplado y que se considera el crítico, es el periodo seco, definido como el promedio de los caudales durante los meses en los que la oferta está por debajo del valor medio anual, multianual y el segundo es el período húmedo que incluye los meses cuya oferta está por encima de la medida anual. Posteriormente se calculó el balance oferta-demanda y el índice de escasez, cuyo valor se registra en la Tabla 53.

Tabla 53. Oferta hídrica.

RÍO FRÍO	(Oferta m ³ /s)	
	Período Seco	Período Húmedo
	1.47	2.82

4.4.2 Demanda hídrica

Se obtiene por medio de un estimativo de la demanda actual sobre la subcuenca, a partir del mapa de uso del suelo, de los datos estimativos de población, tanto a nivel de las cabeceras municipales, como de las veredas y de las concesiones otorgadas por la CAR. Con esta información se determinan las demandas de agua considerando los usos domésticos, agropecuarios (riego), industriales y ecológicos.

- Doméstica

Se tomó como base la proyección de población de la subcuenca del año 2005, calculando la demanda en L/hab./día, a partir de módulos de consumo definidos en el Acuerdo del 31 de septiembre de 2005 por la Subdirección de Gestión Ambiental de la CAR, el cual cubre todos los acueductos municipales y veredales de la cuenca del río Frío. La definición de los módulos tiene en cuenta criterios como los pisos térmicos y la población (No. de habitantes). La Tabla 4.13 registra el consumo de agua estipulado acorde a los anteriores factores; para el caso de la subcuenca de estudio se presenta la demanda de la población en la Tabla 4.14.

Tabla 54. Cálculo de la demanda.

PISO TÉRMICO	TAMAÑO POBLACIÓN	Consumo (L/Hab/Día)	
		Urbano	Rural
FRÍO	< 5000	150	125
	5001 A 10000	165	125
	10001 A 20000	180	125
	> 20001	195	125
TEMPLADO	< 5000	165	135
	5001 A 10000	180	135
	10001 A 20000	190	135
	> 20001	200	135
CÁLIDO	< 5000	190	140
	5001 A 10000	200	140
	10001 A 20000	210	140
	> 20001	220	140

Fuente: Autores.

Tabla 55. Análisis de la demanda.

DEMANDA DOMÉSTICA	ANÁLISIS DE LA DEMANDA	
	Población	Demanda
URBANA	22.379	0.051
RURAL	13.283	0.019
TOTAL	35.663	0.070

Fuente: Autores.

- Industrial

Esta información se recopiló de acuerdo con las concesiones de agua otorgadas por la CAR y teniendo en cuenta las demandas estimadas en el estudio “Inventario y Diagnostico de los Recursos Naturales Renovables en el Área Jurisdiccional de la Car”, en el estudio de Ecoforest (1997). Pero teniendo en cuenta, que los valores de las concesiones eran sensiblemente más bajos que las proyecciones estimadas en el estudio, se tomaron estas últimas como valores reales, ya que no todos los usuarios del recurso lo utilizan legalmente por medio de concesiones.

Las proyecciones se establecieron con base en el estudio desarrollado por el IDEAM (2016), donde se determinó la demanda industrial a partir de los

consumos reales del sector en Bogotá, lo cual dio como resultado una demanda de $0.007 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.3 Caudal Ecológico

Se define como el caudal mínimo necesario, que debe permanecer en un determinado cauce, para garantizar la sobrevivencia de la comunidad biótica presente en la fuente de abastecimiento. En el caso de proyectos en los que se requiere derivar aguas de dicha fuente, este caudal se considera como la *demanda ecológica*.

Para estimar el caudal ecológico existen varios criterios que tradicionalmente se han venido empleando en el desarrollo de proyectos, que requieren de una reglamentación para establecer el uso adecuado del recurso hídrico. Entre las metodologías utilizadas para estimar este tipo de caudal se encuentra el análisis de frecuencias de las series de valores mínimo anuales, que permite determinar este parámetro como el caudal correspondiente a un período de retorno de n años, o como el caudal conveniente a un determinado porcentaje de excedencia. Dicho porcentaje se calcula a partir de la curva de duración de caudales, o simplemente, como un porcentaje de caudal medio.

Para el presente estudio se definió de acuerdo a la CAR el caudal mínimo registrado para la cuenca del río Frío un valor de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual fue utilizado para el cálculo de balance de oferta-demanda e índice de escasez.

“APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS PARA LA EMISIÓN DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS DE INUNDACIONES EN TIEMPO REAL, EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ - SECTOR ALICACHIN”

ERNESTO TORRES QUINTERO
Docente Investigador, Grupo TECNOAMBIENTAL,
Universidad Libre.

EULISES GONZÁLEZ NARANJO
Ingeniero Ambiental, Auxiliar de Investigación Grupo TECNOAMBIENTAL.

Resumen

La investigación realizada demuestra la importancia de aplicar el modelo de simulación hidráulica Hec-Ras, para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en el río Bogotá (Cuenca media y alta). La aplicación de dicho modelo permite determinar cada una de las etapas que ha originado la presencia de una onda de caudal en un canal natural, así como la respuesta del cauce del río ante la magnitud del volumen de agua en la parte media, sector Alicachin. El modelo se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas en la estructura del modelo de simulación hidráulica Hec-Ras, permiten pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación. Con este pronóstico se pueden definir las cotas de inundación a través de perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del recurso hídrico y del cauce, el cual presenta las siguientes características:

- secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce,
- ii) diferentes tipos de rugosidad para ciertas partes del perfil mojado,
- iii) distintas profundidades del agua, con caudal variable a lo largo del cauce en condiciones de régimen de flujo sub-crítico o súper-crítico, con efectos hidráulicos debido a obstáculos transversales naturales o artificiales en el cauce.

PALABRAS CLAVES: Hidrología, inundación, fenómenos hidrometeorológicos extremos, modelo de simulación hidráulica, modelo Hec-Ras, pronóstico hidrológico, río Bogotá.

Abstract

The research is aimed at showing how important is to apply the Hec-Ras hydraulic simulation model for the emission of hydrological forecasting of floods in real time in the middle and upper basin of the Bogotá river, so allowing to set everyone of the stages brought about originated by a ware flow in a natural cannel, as well as the answer of the dranaige system of the river to such water volume in the middle part of the river Alicachin sector. The model is based on deterministic equations which, when solved in the structure of model, allow to forecast the dynamics of the water surface elevations in flood extreme hydrometeorological events, so defining the floodway elevations by means of cross profiles, and stimulations aproximally the behavior of the dynamics of the water resource and of the drainage system with the following characteristics: unsteady flow flood sections at any geometric drainage system, different kind of roughness for specific parts of the flood profile, different depth water surfaces with unsteady flow along the drainage system under conditions of sub or supercritical flow regime with hydraulic effects due to natural or artificial cross obstacles on the drainage system.

KEY WORDS: Hydrology, flood, Hydrometeorological phenomenom extremes, hydraulic simulation model, Hec-Ras model, hydrological forecasting, Bogotá river.

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es el principal constituyente de todos los seres vivos y su dinámica se convierte en una fuerza importante que nos ofrece constantemente grandes beneficios. Sin embargo existen épocas y sitios en los cuales se pueden generar impactos adversos como las inundaciones que pueden ocasionar pérdidas económicas, ambientales y sociales en las poblaciones ubicadas próximas a los ríos.

Respecto al modelo utilizado en la investigación, éste corresponde al modelo matemático unidimensional Hec-Ras 4.1.0., software gratuito de origen estadounidense, desarrollado por parte del Cuerpo de Ingenieros de la Armada “US Army Corps of Engineering”, el cual posee varios programas de computación para la administración de recursos hídricos. El área de estudio comprende la cuenca hidrográfica del río Bogotá, parte media y alta entre el tramo Sector Alicachin, municipio de Sibaté y Soacha, hasta Villapinzón, municipio de Villapinzón, respectivamente Dicha área está ubicada en el centro del país y en el departamento de Cundinamarca, sobre la cordillera Oriental.

Finalmente el esquema de modelación del comportamiento de los Perfiles Hidráulicos, así como la obtención de Parámetros Hidráulicos, tienen su

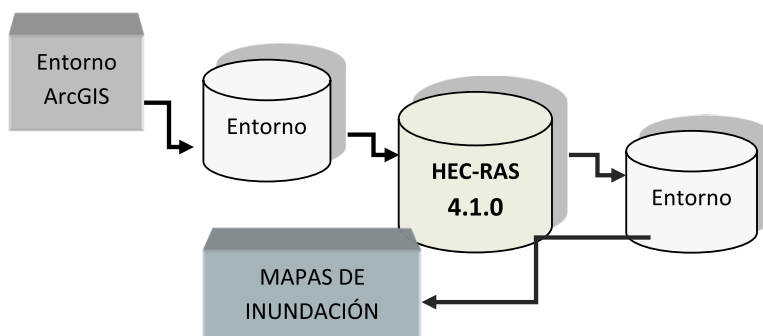
justificación en la importancia del sitio de estudio y en la posible ocurrencia de eventos hidrometeorológicos, que pueden impactar de forma catastrófica la región, lo que a su vez se relaciona con la necesidad de contar con pronósticos de inundaciones en tiempo real, además de pronósticos de la dinámica de los niveles de agua del río Bogotá, centrando la necesidad en la predicción del riesgo, asociada a la amenaza hidrológica.

METODOLOGÍA

La aplicación del modelo Hec-Ras, para efectos de la investigación consta de tres pasos fundamentales:

1. Paso: crear por medio de herramientas de SIG como *ArcGIS - ArcView* y la extensión *HEC-GeoRAS*, los modelos digitales de elevación - *DEM*, con un archivo de importación para HEC-RAS, que contenga información geométrica de las secciones transversales, del cauce y las llanuras de inundación del sistema hídrico del río Bogotá.
2. Paso: aplicar la modelización del flujo permanente con el modelo HEC-RAS 4.1.0, el cual genera un archivo de exportación para *ArcGIS - ArcView*.
3. Paso: generar los resultados de la mancha de agua: superficies de inundación y grids de profundidad.

Figura 73. Esquema conceptual de la modelización propuesta, utilizando el modelo Hec-Ras 4.1.0.



Fuente: Autores.

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

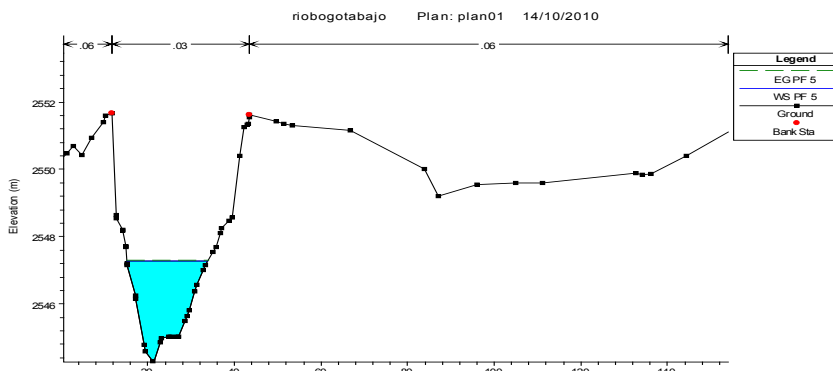
La modelización con el modelo HEC-RAS, permitió calcular valores simulados de niveles de agua, de profundidades de flujo y velocidades, entre otros variables, para las diferentes configuraciones de caudales en las secciones transversales a lo largo de los dos tramos estudiados del cauce del río Bogotá.

La simulación se realizó considerando el “tramo alto” desde la estación hidrológica de Villapinzón, Código 2120815, hasta la estación hidrológica Pte. Vargas, Código 2120734, el “tramo bajo” que comprende desde la estación Pte. Vargas hasta la estación de Las Huertas, código 2120806. Se dividió todo el tramo en estos dos sectores con el objetivo de facilitar la manipulación y la computación a través de la ejecución del modelo.

Por las características de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, respecto a la geología, geomorfología y cobertura vegetal, se seleccionaron coeficientes de rugosidad de Manning, que varían entre 0.03 - 0.06, bajo las condiciones particulares del sistema de drenaje. De igual forma se seleccionaron las pendientes consideradas en el estudio para el tramo del río Bogotá, desde Villapinzón hasta sector Alicachin, teniendo en cuenta que este es un río poco intervenido, cuyas pendientes son bajas, y varían entre 10^{-5} y 10^{-4} m/m.

Resultado de Curvas Generales del Sistema Hídrico

Figura 74. Cross Sections - Sección transversal típica.



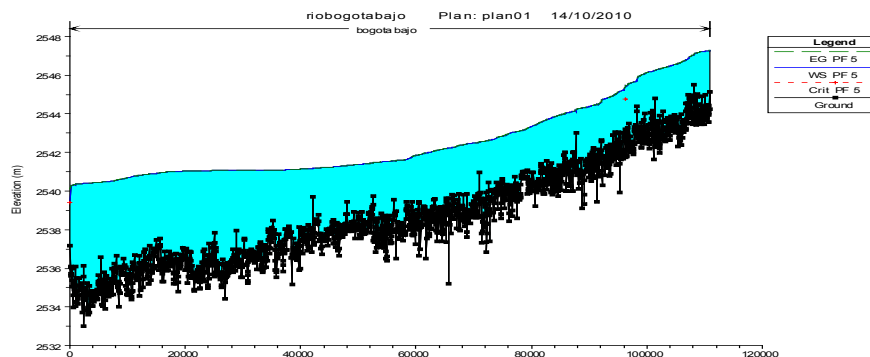
Fuente: Autores, Hec-Ras 4.1.0.

DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE INUNDACIÓN

A través de la aplicación de la herramienta computacional *Hec-GeoRAS* 4.2.93., extensión del *Hec-Ras*, se importan los datos resultados de la

modelización hidráulica desarrollada con el modelo *HEC-RAS 4.1.0*. Este proceso crea las zonas de inundación para cada perfil, es decir, para los caudales de cada periodo de retorno que representan cada mes.

Figura 75. “Water Surface Profiles” Perfil de la línea de Nivel o superficie de Agua.



Fuente: Autores, Hec-Ras 4.1.0. 2010.

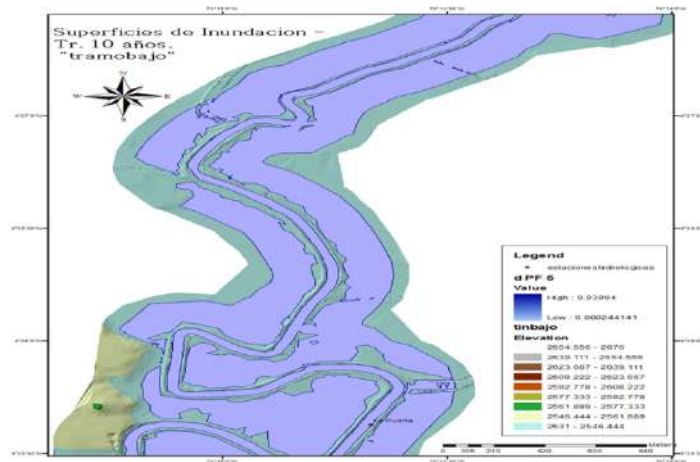
Esta herramienta *Hec-GeoRas 4.2.93*, genera los resultados finales en donde se visualiza la mancha de agua, las superficies de inundación para cada periodo de retorno establecido, los niveles de agua, grids de profundidad, entre otros aspectos, que se pueden representar en el *DEM*, haciendo posible determinar los límites de las áreas de inundación, calcular las áreas de inundaciones y de esta manera definir el cauce natural.

De acuerdo a cada periodo de retorno y considerando el mes más crítico correspondiente a mayo, en cuanto a mayores variaciones de niveles, es posible observar varias manchas de agua en el *DEM*. Representación de la superficie de inundación - Sector Alicachin.

En concordancia con los mapas de inundaciones generados por medio de la herramienta *ArcGIS* y la extensión *Hec-GeoRAS* con los modelos digitales de elevación (*DEM*) correspondientes a los “tramo bajo” y “tramo alto”, se establece la relación de los efectos que producen los diferentes caudales máximos mensuales, para las probabilidades de ocurrencia de eventos de inundaciones en periodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años.

En los mapas de inundación se observa una tendencia creciente de los caudales máximos mensuales, a medida que aumentan los años en los periodos de retorno, al mismo tiempo se evidencian desbordamientos y manchas de agua, como consecuencia del aumento progresivo de caudales.

Figura 76. “Flood Surface” Superficie de inundación.



Fuente: Autores., ArcGIS 9.3 - Hec-GeoRAS 4.2.93. 2010.

Respecto al “*tramo bajo*” se visualizan dos sectores con algunas manchas de agua, el primero parte aproximadamente de la sección transversal identificada con el número 110669.9 cerca a la estación hidrológica Pte. Vargas en dirección aguas abajo, hasta la sección 52624.01. En el siguiente sector aguas abajo de ese tramo, se evidencian manchas comprendidas entre las secciones identificadas con el número 39424.01 de la parte media del tramo y en sentido aguas abajo, hasta el sector Alicachin en la sección número 923.6097. A pesar de que la mancha de agua invade las llanuras de inundación caracterizadas por explanaciones de las márgenes, con lo que posiblemente se genere inundación en ese sector, no afecta importantes estructuras de edificación.

Igualmente ocurre en el “*tramo alto*”, el cual muestra manchas de agua en un orden mucho menor que el “*tramo bajo*”, en donde el río presenta desbordamientos. Teniendo en cuenta que, a diferencia del “*tramo bajo*”, el “*tramo alto*” se caracteriza por tener elevaciones propias del sistema orográfico en forma de cañón, las cuales inciden de manera directa en el comportamiento del río, posibilitando una menor cantidad de desbordamientos, el sector representativo del tramo que muestra algunas de las manchas, está entre las secciones identificadas con el número 53247.14, aproximadamente desde la estación hidrológica de Pte. Florencia, en dirección aguas abajo, hasta la sección identificada con el número 1201.068 cercana a la estación Pte. Vargas. Las manchas de este sector tampoco afectan importantes estructuras de edificación próximas a las llanuras de inundación.

Ecuación Diferencial Determinística (EDD).

De acuerdo a las características hidrológicas de la cuenca de estudio, se utilizan instrumentos matemáticos para simular el proceso natural de comportamiento de niveles. Estos corresponden a ecuaciones diferenciales determinísticas, que admiten desarrollar el modelo de pronóstico hidrológico de los niveles diarios del agua.

El modelo matemático determinístico se presenta a través de la Ecuación Diferencial Determinística lineal y ordinaria de la siguiente forma:

$$\frac{dH}{dt} = f(c\tau, k, \xi, H) \quad (4.18)$$

El modelo que simula la dinámica de los niveles del agua adquiere la siguiente expresión:

$$\frac{dH}{dt} = \gamma h \quad (4.19)$$

En donde, los parámetros representan las propiedades internas del sistema y la propiedad de inercia del mismo ante los factores externos, respectivamente. En este caso, una de estas propiedades se refleja mediante un valor constante, que varía entre $\gamma = -1$ y 1 , valor que se obtiene luego del proceso de calibración.

Para aplicar el modelo determinístico que simula la dinámica de los niveles del agua en el sector de la estación Las Huertas, se procede a solucionar numérica y analíticamente la ecuación diferencial determinística (EDD), de ahí que, cada solución permita obtener como resultado de su aplicación, un valor pronosticado concreto del nivel del agua en el sitio señalado.

- Solución Numérica

$$H_{i+1} = \bar{H}_{(H_{i-1} + H_i)} \pm \frac{H_{i-1} + H_i}{\varphi} \gamma \quad (4.20)$$

- Solución Analítica

$$h = h_0 e^{\gamma t} \quad (4.21)$$

Calibración del Modelo Determinístico

Este proceso permite analizar detalladamente el comportamiento del modelo frente a una variación en sus parámetros. El parámetro de calibración es el valor de gamma (γ). La calibración de los parámetros del modelo se realiza utilizando datos históricos de la estación Las Huertas, datos correspondientes a niveles diarios del periodo histórico desde el año 1991 al 2002.

Con los modelos se simula el comportamiento de los niveles diarios y se varía el parámetro de calibración de γ de la ecuación diferencial, que mejor se ajusta a los registros de la serie histórica, entre valores pertenecientes al rango de 1 a -1, hasta obtener una buena concordancia entre los valores observados y los valores que resultan de la simulación hidrológica, para finalmente seleccionar por recomendación de expertos de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el parámetro que menor porcentaje de error produjo, a partir de la aplicación de la ecuación:

$$\% P = \left\{ \frac{h_{medido} - h_{pronosticado}}{h_{medido}} \right\} * 100 \quad (4.22)$$

Tabla 56. “Deterministic method’s calibration” Calibración del Modelo Determinístico.

Fecha	Hi (m)	Pronóstico “Aprox. Analítica” <i>h</i>	Error Pronóstico “Aprox. Analítica” (%) <i>h</i>	Pronóstico “Aprox. Numérica” <i>H(i+1)</i>	Error Pronóstico “Aprox. Numérica” (%) <i>H(i+1)</i>
1/1/1991	1.03				
2/1/1991	1.407	0.932	33.761		
3/1/1991	1.394	1.273	8.672	1.097	21.331
4/1/1991	1.299	1.261	2.899	1.260	2.968
5/1/1991	1.357	1.175	13.384	1.212	10.696
6/1/1991	1.272	1.228	3.470	1.195	6.038
7/1/1991	1.349	1.151	14.681	1.183	12.302

Fuente: Autores.

Luego de realizar cálculos con cada valor del rango entre 1 y -1, los resultados del proceso de calibración del modelo determinístico mostraron diferentes porcentajes de error, siendo el valor correspondiente al parámetro $\gamma = -0.1$, el que mejores resultados aportó, con porcentajes de error menores de 16.8% y 18.4%, para la aproximación analítica y numérica respectivamente.

Evaluación del acierto de los pronósticos hidrológicos

La metodología elegida para evaluar el acierto de los pronósticos con resultados cuantitativos, pertenece a la evaluación porcentual del acierto de los pronósticos de los niveles del agua.

La metodología consiste en establecer de manera preliminar algunos “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, que deben cumplir la metodología de pronósticos.

Se considera que un pronóstico es acertado si se ubica en la categoría de muy buenos y buenos, es decir, es acertado el pronóstico siempre y cuando el margen de error no supere el 10%.

Esta metodología presenta la siguiente aproximación matemática [3]:

$$\% P = \left[\frac{h_{med} - h_{pr}}{h_{med}} \right] * 100 \quad (4.23)$$

La aceptabilidad de los aciertos cumplida por la metodología, determinó el acierto de los pronósticos cuantitativos de los niveles de agua, para la estación hidrológica Las Huertas, para lo cual el porcentaje de aceptabilidad en los modelos de “Pronóstico de Aproximación Analítica” y “Pronóstico de Aproximación Numérica”, en su gran mayoría se consideran pronósticos acertados de los 2556 pronósticos emitidos desde el 1 de enero del año 2003 al 31 de diciembre del año 2009, ya que se encuentran ubicados dentro del rango de “Muy Buenos” y “Buenos”, igualando un porcentaje del 53.6%, en donde no superan el margen de error del 10%.

En tal sentido, los valores de niveles diarios pronosticados ofrecieron una aceptabilidad de aciertos considerable, ya que en su gran mayoría se encuentran ubicados dentro del rango de “Muy Buenos” a “Satisfactorios”, con un porcentaje de aceptabilidad del 77.3% en el modelo de “Pronóstico de Aproximación Analítica”, el cual posee mayor grado de confiabilidad para la emisión del pronóstico hidrológico, demostrando cierto ajuste del modelo a las condiciones del área de estudio, a diferencia del modelo de “Pronóstico de Aproximación Numérica”, que muestra un porcentaje de aceptabilidad del 74.8%, teniendo en cuenta que se consideran pronósticos acertados, ya que igualan más del 50% de aciertos dentro de la categoría de “Muy Buenos” y “Buenos”. Esto se consolida en el siguiente gráfico:

Figura 77. Comportamiento de niveles diarios y pronósticos - Estación Las Huertas.



Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se desprenden de la aplicación del modelo de simulación hidráulica Hec-Ras 4.1.0., los resultados arrojados, la modelación hidrológica para pronósticos hidrológicos de inundaciones y de la experiencia adquirida en la investigación.

El modelo HEC-RAS posee todas las capacidades necesarias para realizar una simulación en las condiciones previstas en el estudio, tiene una de las mejores funciones de pre y post procesamiento. Los datos presentan la disposición de editar, modificar y visualizarse en pantalla. De igual forma, tiene la capacidad para interactuar con modelos digitales de terreno (*DEM*) mediante entorno de sistemas de información geográfica - *GIS* (*ArCInfo*, *ArcView* o *ArcGIS*), aumentando la eficacia del análisis relativo a parámetros topográficos. Asimismo la aplicación de la extensión *HEC-GeoRAS* que trabaja en ese mismo entorno, proporciona resultados de alta calidad en cuanto a mapas de inundaciones con gran facilidad.

La modelización del sistema hidrológico del río Bogotá con el modelo hidráulico unidimensional Hec-Ras, mostró suficiente aptitud para simular satisfactoriamente el comportamiento hidrológico del río, mostrando resultados con gran aceptabilidad en condiciones de flujo permanente, acordes con la información hidráulica y geométrica ingresada en el modelo. También permitió describir cualitativa y cuantitativamente la respuesta del sistema hídrico ante un evento extremo de inundación, evaluando las áreas en determinadas secciones transversales de los dos tramos de estudio que son más susceptibles

a ser afectadas por desbordamientos e inundaciones. Dicha evaluación se hizo mediante la configuración de los perfiles hidráulicos, reproduciendo para los diferentes periodos de retorno la magnitud de los niveles.

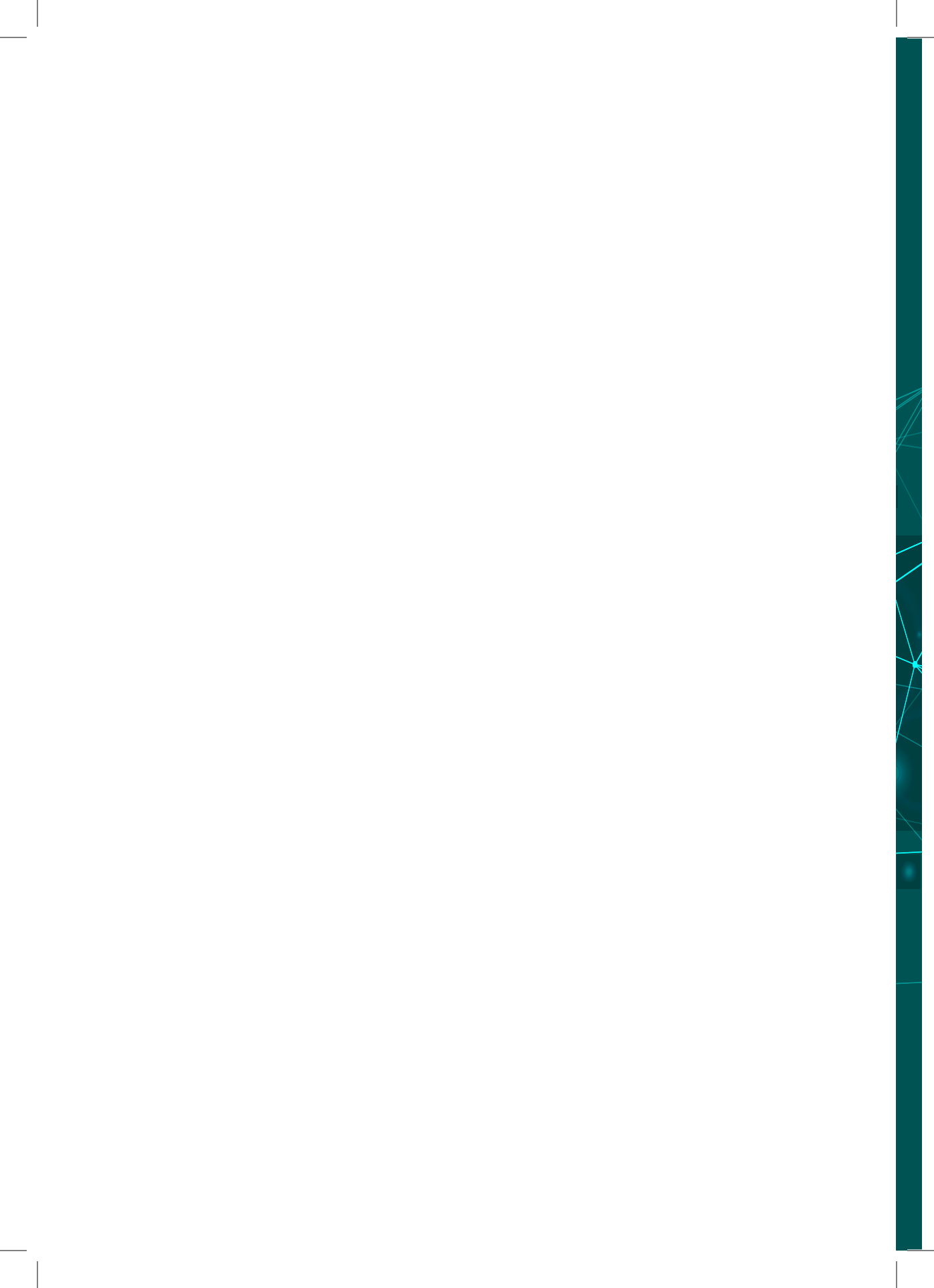
La modelación hidrológica para pronóstico de inundaciones, se diseñó especialmente como orientación para la toma de decisiones en cuanto a medidas preventivas de la presencia de un evento extraordinario, que indique la probabilidad de amenaza inminente, con efectos adversos para el normal desarrollo de las actividades de la población asentada en las áreas aledañas a las llanuras de inundación del sector Alicachin, en la cuenca media del río Bogotá.

La aplicación de la ecuación diferencial determinística (*EDD*) en sus dos soluciones, dio a conocer resultados aceptables en razón a la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en la cuenca media del río Bogotá (Sector Alicachin), herramienta que sirve de soporte en la toma de decisiones para la prevención de eventos de inundación en esa área de estudio.

Uno de los aspectos más importantes de la elaboración del modelo determinista para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundación, radica en la aceptabilidad de los aciertos, desarrollada por la metodología de evaluación porcentual. Esta última, arrojó resultados para los niveles pronosticados de la aproximación analítica y numérica, alrededor de los criterios de Muy Buenos y Buenos, referente al 53.6% de pronósticos emitidos por debajo del margen de error del 10%. De la misma manera, el porcentaje de aciertos en el rango de “Muy Buenos” a “Satisfactorios” presentó un 77.3% en el modelo de “Pronóstico de Aproximación Analítica”, a diferencia del modelo de “Pronóstico de Aproximación Numérica”, en el que presentó el 74.8%, dando a entender el grado de aceptabilidad próximo al 80%, para el cual un pronóstico hidrológico se considera acertado dentro del rango de evaluación.

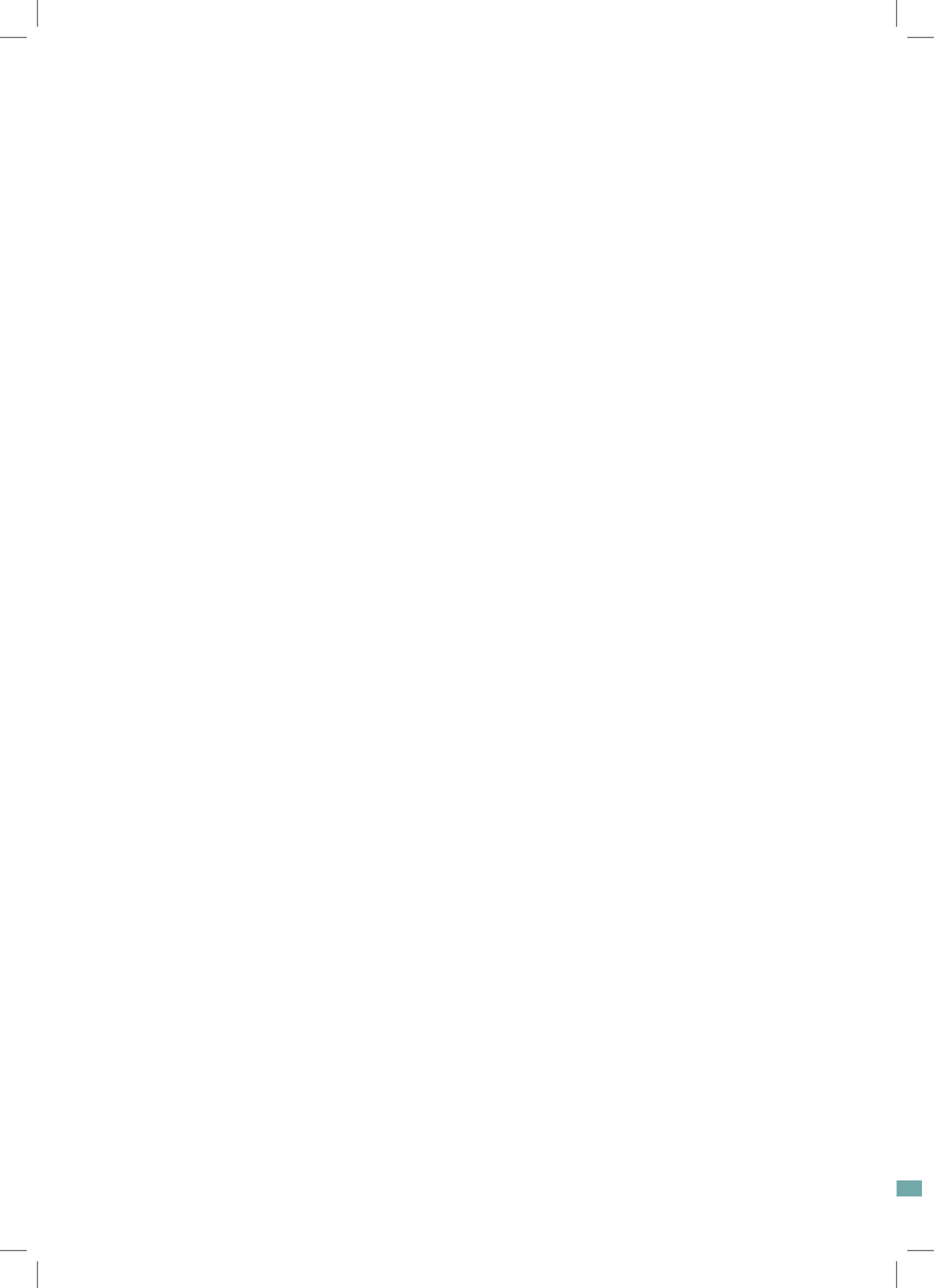
La modelización del sector Alicachin a través de la aplicación del modelo de simulación hidráulica Hec-Ras, suministró resultados del comportamiento hidrológico de niveles, bastante aproximados a la realidad de las condiciones naturales del sistema hidrológico en el sector, teniendo en cuenta la coherencia con la información hidráulica y geométrica proporcionada para su adecuada ejecución, la corrida del modelo dio a conocer la dinámica del sistema de drenaje, ante la probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación, representados por la variación de niveles diarios máximos. En este aspecto, no se presentaron desbordamientos en ninguna sección transversal, coincidiendo normalmente con el comportamiento natural del río, ya que en su gran mayoría tiene diques longitudinales con alturas importantes que en efecto, impiden que el río supere las cotas de inundación

En términos generales para el río Bogotá y en especial el sector Alicachin se observa que el promedio de los niveles máximos, permanecen en su gran mayoría dentro del cauce principal de este cuerpo de agua. Lo mismo sucede en la cuenca media y alta, debido al sistema de regulación de niveles a través de la operación diaria de los Embalses de Sisga, Neusa y Tominé, por parte de entidades como la CAR, la E.A.A.B y la Empresa de Generación Eléctrica (EMGESA), ya que a su vez, este sistema cumple la función de abastecimiento y control de inundaciones, por la buena capacidad para amortiguar crecientes.





CAPÍTULO V
BALANCE HÍDRICO



INTRODUCCIÓN

La obtención del balance hídrico de una región se constituye en una de las herramientas para determinar la aptitud de un área agrícola (determinación de la época de siembra, cosecha, prácticas culturales, entre otros). La caracterización de la cuenca objeto de estudio, permite conocer su importancia estratégica y disponibilidad de recursos, aspectos a tener en cuenta en la planificación.

5.1 BALANCE HÍDRICO

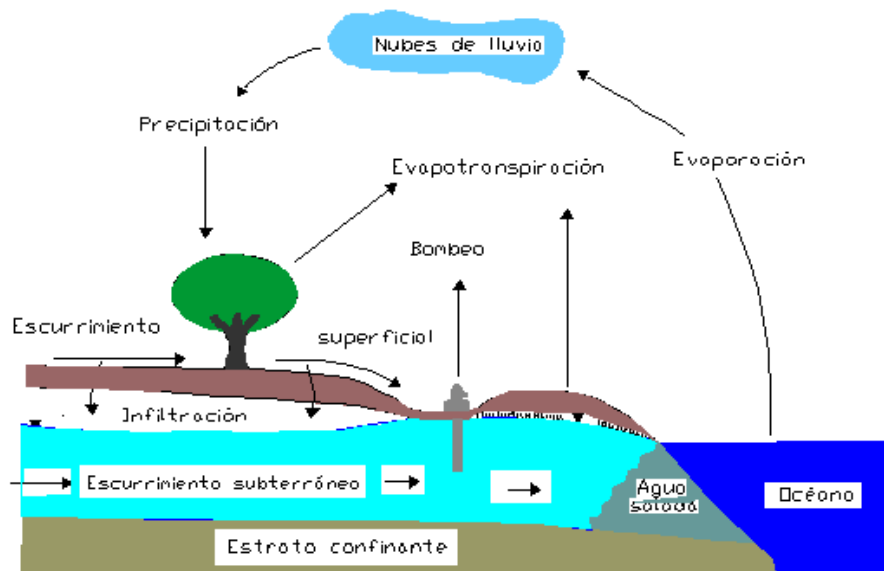
El balance hídrico se establece para un lugar y un período dados, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese período. Se tienen también en cuenta la constitución de reservas y las extracciones ulteriores sobre esas reservas. Las aportaciones de agua se efectúan gracias a las precipitaciones. Las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término evapotranspiración. Las dos magnitudes se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie, pero se traducen generalmente en alturas de agua, siendo la unidad más utilizada el milímetro.

En el estudio de los balances hídricos, es común comparar las precipitaciones (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), lo cual permite distinguir situaciones diferentes en función de umbrales que son directamente significativos para un lugar o un período dado, ver figura 76:

- Si $P < ETP$, la evaporación real será igual a P
Habrá deducción sobre las reservas, ausencia de escurrimiento; el período se denominará deficitario.
- Si $P > ETP$, la evaporación real será igual al ETP
Habrá escurrimiento y constitución de reservas; el período se llamará excedente.

Los problemas prácticos relativos a las mediciones, a los órdenes de magnitud considerados, imponen variaciones en los métodos de estudio y de presentación de los balances hídricos. Las precipitaciones son en general medidas por una densa red de estaciones de observación antiguas, bastante confiables y comparables. Las medidas de evapotranspiración potencial son posibles con aparatos como el evaporímetro de Piche (al abrigo) o el barco Colorado.

Figura 78. Balance hídrico.



Fuente: <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/lvega/ARCHIVOS/BALANCE.htm>

Sin embargo, la red de observación no muestra las mismas características de densidad, de comparabilidad y de fiabilidad propias de las precipitaciones, de manera que para el cálculo de balances con frecuencia se recurre a evaluaciones de la evapotranspiración potencial, que se hacen a partir de factores relativamente bien conocidos de dicha evapotranspiración.

El factor más importante a tener en cuenta en el cálculo de la evapotranspiración es la temperatura, luego si existe información de estos, se incluyen factores como humedad relativa, velocidad del viento, la radiación solar y horas reales de sol.

5.1.1 Balance hídrico de una cuenca hidrográfica

El estado inicial (en el instante t) de la cuenca o parte de ésta, para efecto del balance hídrico, puede definirse como la disponibilidad actual de agua en los diferentes lugares donde se puede encontrar, como por ejemplo: volumen de agua circulando en los ríos, arroyos y canales, volumen de agua almacenado en lagos naturales y artificiales, en pantanos, humedad del suelo; todo lo cual puede definirse también como la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Las **entradas de agua** a la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas:

- Precipitaciones: lluvia, nieve, granizo, condensaciones.
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas,
- Transvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a:
 - Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se ubica en otra cuenca, esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos y se construyen presas en varios de ellos, de manera que se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica.
 - Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial, se encuentra fuera de la cuenca. Esta situación es cada vez más frecuente, ya que el agua limpia se encuentra en áreas cada vez más lejanas, con mucha frecuencia en otras cuencas. como consecuencia del crecimiento de las ciudades, Un ejemplo muy significativo de esta situación es la conurbación de São Pablo, en el Brasil.

Las **salidas de agua** pueden darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego.

- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques y pantanos.
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para consumo humano y en la industria.
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.
- El establecimiento del balance hídrico completo de una cuenca hidrográfica es un problema muy complejo, que involucra muchas mediciones de campo. Para fines prácticos, con frecuencia se separa el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.

5.1.2 Utilidad e importancia del balance hidrológico

La información obtenida en la determinación del balance hídrico tiene aplicación en muchos campos de la investigación. Por ejemplo, el conocimiento del déficit de humedad es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en cualquier época del año y entrega un valor importante sobre la sequedad.

De igual forma, la información sobre los excedentes de agua y los niveles de precipitación que exceden las necesidades de humedad, cuando el suelo está en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico.

5.2 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CAPA AGRÍCOLA DE SUELO

Una de las características más importantes que estudia la *meteorología agrícola* es la cantidad de agua contenida en la capa superficial de suelo, en la cual la mayoría de raíces crecen y se desarrollan. Esta capa generalmente tiene una profundidad menor a un metro para la mayoría de cultivos perennes y un poco más en algunos cultivos de ciclo anual.

El conocimiento de la disponibilidad hídrica en el suelo y su distribución en el tiempo permite establecer las necesidades de riego y drenaje, ocasionadas por la componente climatológica. También hace posible establecer las fechas de siembra y las épocas más apropiadas para la realización de labores de campo. De otra parte, es una información útil para la implementación de nuevos cultivos. Por estas razones constituye una información invaluable para el planificador, así como para el agricultor raso.

5.2.1 Método de cálculo de la disponibilidad hídrica

La forma de conocer la disponibilidad hídrica es generalmente mediante el cálculo de un balance hídrico, el cual tiene como información inicial tres parámetros fundamentales: la precipitación media, la evapotranspiración potencial y el almacenamiento en función de la textura y la profundidad medias del suelo.

5.2.1.1 Método de Thornthwaite. El método más utilizado para el cálculo del balance hídrico es el de **Thornthwaite**. Éste supone que el agua que llega al suelo bien sea por precipitación, por escorrentía o por aportes subterráneos, es evapotranspirada de acuerdo con las condiciones medias climáticas o actuales de la atmósfera.

Para su aplicación se utiliza un tanque enterrado, cuya superficie y área adyacente esta empradizada. El tanque se llena en el fondo con una capa de grava de 10 cm y encima con suelo de la región tamizado, según los perfiles originales del terreno. En la superficie del terreno se siembra el tipo de vegetación o cosecha que se desee investigar.

Del fondo del tanque sale una tubería que termina en la parte subterránea, donde se vierte la medida del agua drenada a través de un vaso graduado. El mínimo recomendado es de 3 unidades de evapotranspirómetros, para así obtener una medida ideal del valor que se va a medir (Monsalve 1995).

Si la diferencia (Precipitación - ETP) >0 , es posible un aporte al suelo, en caso de que éste tenga capacidad de almacenamiento, de lo contrario el aporte extra se cuantifica como “escorrentía”.

Si la diferencia (Precipitación - ETP) <0 , el suelo perderá este mismo volumen de agua de acuerdo con la reserva acumulada en el período anterior, hasta cuando termine su reserva momento en el cual el volumen no satisfecho se denominará “déficit”.

Con fines de análisis de las variables Fh y AN, en el cual aparece el rango del índice de Thornthwaite con el valor de AN correspondiente a sus necesidades potenciales de riego o drenaje.

De esta forma se ha establecido la clasificación que se muestra en la tabla 57.

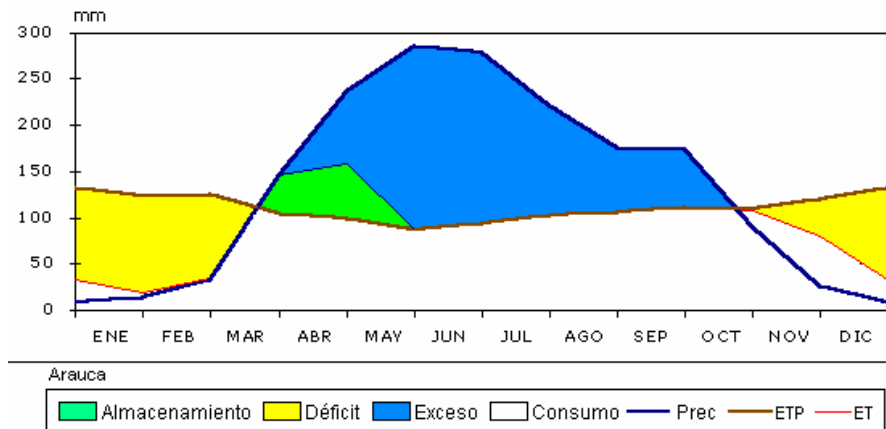
De otra parte, es importante tener en cuenta el volumen de agua realmente evapotranspirada, el cual es igual al potencial, cuando el suelo está a plena capacidad de almacenamiento y menor, a medida que el suelo disminuye su reserva. A este volumen se le denomina “evapotranspiración real”.

Tabla 57. Índice de Thornthwaite.

Árido:	Déficit mayor a 500 mm/año
Semiárido:	Déficit de 250 a 500 mm/año
Seco:	Déficit de 0 a 250 mm/año
Adecuado:	Exceso de 250 a 500 mm/año
Ligeramente húmedo:	Exceso de 500 a 1000 mm/año
Moderadamente húmedo:	Exceso de 1000 a 1500 mm/año
Muy húmedo:	Exceso de 1500 a 2000 mm/año
Súper húmedo:	Exceso mayor a 2000 mm/año

Fuente: Autores.

Figura 79. Ejemplo de balance hídrico.



Fuente: www.ideam.gov.co

En la Figura 79 se presenta un ejemplo de balance hídrico. El concepto del balance hídrico del suelo, que ilustra las áreas en las cuales la precipitación supera a la ETP, es el exceso, mientras que el caso contrario es el déficit. El período durante el cual se está consumiendo agua sin aportes adicionales, se denomina consumo y el período en que se está aportando agua se denomina almacenamiento.

Con fines de caracterización climática de la disponibilidad hídrica en el suelo, los resultados de cada balance hídrico se pueden expresar en índices, tales como el denominado índice de humedad de Thornthwaite. Este índice es

una combinación del índice de humedad y del índice de aridez, calculados de acuerdo con las siguientes expresiones:

- Índice de humedad de Thornthwaite

Tabla 58. Fórmulas de Índice humedad, índice de Aridez y Factor de humedad.

<p>Índice de humedad</p> $Ih = \left(\frac{Exc}{Etp} \right) * 100 \quad (5.1)$
<p>Índice de aridez</p> $Ia = \left(\frac{def}{Etp} \right) * 100 \quad (5.2)$
<p>Factor de humedad</p> $FH = ih - 0.6 ia = \left(\frac{100ex - 60 * D}{Etp} \right) \quad (5.3)$

Fh > 150 Superhúmedo

En donde:

Etp Evapotranspiración potencial en mm.

Exc Exceso en mm.

Def Déficit en mm.

A partir del balance hídrico se ha cuantificado además el valor de los excesos y deficiencias hídricas totales durante el año, y a partir de estos valores, el agua neta disponible en el suelo. Es decir, en un determinado punto los excesos suman una cantidad E (mm), acumulados generalmente durante las temporadas lluviosas, y las deficiencias de agua una cantidad D (mm), durante los períodos secos. El agua neta será entonces:

$$AN \text{ (mm)} = E \text{ (mm)} - D \text{ (mm)} \quad (5.4)$$

El valor así obtenido es un indicativo de la cantidad de agua que es necesario regar (si es negativo) o drenar (si es positivo), para el establecimiento de cultivos en épocas secas o lluviosas respectivamente. Naturalmente estas

cifras deben ser interpretadas a macro escala y reflejan la aptitud hídrica predominante en una región. Para cálculos de riego deberán tenerse en cuenta factores adicionales de tipo agronómico (tipo de cultivo, época de siembra), o de tipo edáfico (propiedades físicas del suelo).

- Índice de escasez

Es un valor cualitativo que representa la demanda de agua que ejercen los diferentes usos en una determinada cuenca o región, frente a la oferta hídrica disponible. Se calcula como la relación porcentual entre la demanda (industrial, acueductos, agropecuaria y ecológica), y la oferta.

El valor de la oferta se puede determinar para las condiciones húmedas de una cuenca, sin embargo, daría lugar a interpretaciones erróneas, entre ellas que cuando la subcuenca no está regulada, tiene disponibilidad suficiente de agua para cubrir todas las demandas. También es posible determinar este valor para condiciones de caudales mínimos, lo cual parece más razonable, puesto que en los períodos de estiaje es cuando se presentan los conflictos de uso del agua.

El índice se clasifica de acuerdo con los criterios y rangos establecidos por el IDEAM, los cuales se presentan en la Tabla 59, así como el respectivo índice estimado para la subcuenca, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_e = D_H / O_H \quad (5.5)$$

Donde:

I_e Índice de escasez (%)
 D_H Demanda hídrica (m³/s)
 O_H Oferta hídrica (m³/s)

Tabla 59. Criterios y rangos del índice de escasez.

Rango	Criterio
≥ 50	Alto
21 - 50	Mediano
11 - 20	Medio
1 - 10	Mínimo
≤1	No significativo

5.3 EJEMPLOS EN OTRAS CUENCAS DE COLOMBIA

La mayor parte de las áreas localizadas en la región Caribe presentan deficiencias de precipitación durante el año, equivalentes a más de 500 mm/año. Otras regiones con deficiencias apreciables se localizan a lo largo del valle del alto Magdalena, en la Sabana de Bogotá, en sectores de la cuenca alta del río Sogamoso y en el valle geográfico del alto Cauca (Ugarte, 2007).

Por el contrario, las regiones que presentan excesos importantes de más de 1.500 mm/año, están concentradas sobre la cuenca media de los ríos Magdalena y Cauca y hacia el Nechí. También en sectores de Santander, y al occidente de Boyacá y Cundinamarca.

Por último, se aprecia que los rangos más adecuados para el crecimiento y desarrollo de cultivos por no registrar excesos ni deficiencias severas se encuentran generalmente sobre las franjas medias de las cordilleras, especialmente en las cuencas altas de los ríos Magdalena y Cauca.

La Amazonia, Orinoquia y Región Pacífica, presentan abundante oferta del recurso hídrico y como resultado, los excesos suman más de 1.000 mm en total durante el año. Las deficiencias son poco significativas y se concentran en unos pocos meses o semanas.

Distribución temporal de la disponibilidad hídrica en el suelo

Según Ugarte (2007) a través del año cada localidad presenta sus características propias, las cuales dependen del régimen climático que predomina en la zona y de las propiedades físicas de sus suelos; como se describe a continuación por cada región:

- Región Caribe

Es predominantemente deficitaria durante la mayor parte del año. En el norte de la región, la situación es crítica todos los meses, aun cuando el déficit se modera levemente durante el segundo semestre, de manera que, en el litoral, incluso es posible encontrar algunos excesos hacia finales del mes de septiembre y comienzos de octubre. En dirección sur, las condiciones van siendo paulatinamente más favorables, evidenciándose un aumento de humedad durante el primer semestre y condiciones de satisfacción hídrica durante la mayor parte del segundo semestre. En Montería, por ejemplo, existen almacenamientos desde el mes de abril con algunos excesos durante los meses de septiembre y octubre.

- Región Andina

Existe gran variabilidad en toda la región. La cuenca del medio río Cauca registra un período de abundante abastecimiento hídrico en cada semestre de manera que el déficit es bajo. En la parte alta del río, por el contrario, se presentan ciclos de déficit especialmente a mitad de año, a pesar de que en cada semestre existen meses en los cuales es posible encontrar disponibilidad hídrica aceptable para cultivos que tienen baja demanda de agua.

En la cuenca del río Magdalena, la situación es moderada por la disponibilidad hídrica durante los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre y se observa gran déficit durante el resto del año. Sin embargo, en las estribaciones de las cordilleras, en general las condiciones son mucho más favorables, ya que se incrementan los volúmenes de agua almacenados y en exceso.

- Región de la Orinoquia

El régimen monomodal de las lluvias, característico de la región, condiciona el balance hídrico. Al extremo norte se presenta un largo período de abundante disponibilidad hídrica, el cual se prolonga de marzo a octubre. Por el contrario, desde noviembre a febrero, el déficit es intenso y el consumo agota rápidamente las reservas logradas durante el período de abundantes lluvias. Hacia el piedemonte y también al centro y oriente de la región, los excesos tienden a ser mayores y la época de déficit es menos prolongada.

- Región de la Amazonia

El extremo sur presenta excesos hídricos durante todo el año, especialmente en el primer trimestre. Solamente en los meses de junio, julio y agosto se registra reducción de dichos excesos. (IDEAM, 2011) Hacia el piedemonte amazónico, en los departamentos de Caquetá y Putumayo, y en general al norte de la latitud 2° sur, el régimen es de elevados índices de exceso durante la mayor parte del año, siendo mucho mayores a mitad de año. Por otra parte, aunque en diciembre, enero y febrero, los excesos son escasos en magnitud, en ningún momento del año se presentan deficiencias hídricas en el suelo.

- Región Pacífica

Al norte y centro de esta región los excesos son altos durante todo el año. En dirección sur la magnitud de estos índices disminuye considerablemente, durante el primer semestre. Sin embargo, con un adecuado manejo, es posible la explotación agrícola, especialmente de cultivos anuales con altos requerimientos de agua. (Ugarte, 2007).

5.4 INFILTRACIÓN

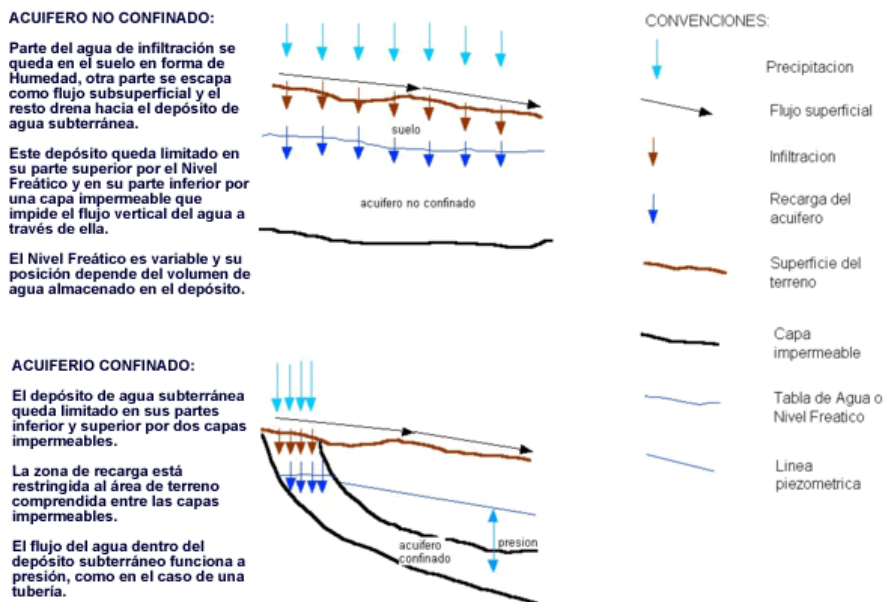
Se define como el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra y queda retenida o llega hasta las capas inferiores, donde alcanza un nivel acuífero, incrementando el volumen acumulado anteriormente.

Hidrología para estudios de aprovechamiento de aguas subterráneas.

Dentro de los estudios de exploración que se realizan cuando se quiere evaluar la posibilidad de extraer aguas subterráneas, de manera permanente y segura en una zona determinada, resulta indispensable analizar la relación entre la *precipitación*, el *caudal superficial* y la *infiltración*.

Una parte del agua de infiltración, ver Figura 78, conocida como *caudal de recarga*, llega hasta los depósitos de *aguas subterráneas* de una zona determinada y los alimenta. Otra parte es atrapada por el suelo y la proporción restante drena en forma subsuperficial o se escapa como percolación profunda (Chow y Maidment 1994).

Figura 80. Hidrología para estudios de aprovechamiento.



Fuente: Medina, 1992.

5.4.1 Distribución de la precipitación en el suelo

La capacidad de infiltración es influenciada por diversos factores, a continuación se mencionan los más importantes:

- a. **Intercepción:** se refiere al volumen de agua lluvia que no alcanza a llegar a la superficie terrestre, porque cae sobre edificaciones, plantas, entre otros, y de allí se evapora.
 - b. **Retención superficial:** es la parte del volumen de agua lluvia que se almacena en depresiones del terreno y luego se evapora.
 - c. **Infiltración:** como se definió es el proceso por el cual el agua que se mueve a través de la superficie del suelo percola hacia el interior de la tierra y recibe la influencia de tres factores; humedad del suelo, flujo subsuperficial y agua subterránea.
1. **Humedad del suelo:** comprende el volumen de agua que se infiltra y es removida por las raíces de las plantas o por evaporación, antes de alcanzar el nivel freático. Su movimiento dentro del medio poroso ocurre principalmente en dos direcciones:
 - Paralelo a la superficie, en forma sub superficial.
 - Vertical hasta encontrar una capa con baja permeabilidad o un depósito subterráneo de agua.

El suelo tiene la propiedad de almacenar el agua en forma capilar y pelicular, a medida que se presenta la percolación, de manera que las capas de suelo se van saturando por diferentes formas de humedad como:

- **Humedad higroscópica:** es aquella que se adhiere firmemente a la superficie de las partículas de suelo, formando una película delgada.
- **Humedad capilar:** es una porción pequeña de agua que sube de la zona saturada por capilaridad, a través de los poros.
- **Humedad gravitacional:** constituye el agua que se mueve en forma vertical desde la superficie hasta la zona saturada por acción de la gravedad y permanece un tiempo corto en el suelo.

En función de la ubicación que tenga el agua en el terreno, se definen en éste distintas zonas que pueden clasificarse así:

- **Zona de Aireación:** esta zona no está saturada y sus poros pueden estar llenos de aire y agua. En ella se distinguen tres franjas:

- Área de evapotranspiración: ubicada en la parte superior, en esta se originan alteraciones de las características del terreno, como consecuencia de la pérdida de humedad.
- Área de retención: el agua que existe en esta área es de retención y está aislada de la de las zonas inferiores.
- **Franja capilar:** donde el grado de saturación disminuye en forma continua de abajo hacia arriba.
- **Zona de saturación:** área totalmente saturada de agua de gravedad, que es retenida por una capa de terreno impermeable ubicada debajo de ella. Su parte superior, a presión atmosférica, recibe el nombre de nivel freático.

2. Flujo Subsuperficial (FSS): es aquel volumen de agua percolada que no es retenida por el suelo, pero fluye por el medio poroso casi en forma paralela a la superficie del terreno.

3. Agua subterránea: es el volumen de agua que alimenta un depósito subterráneo, ubicado en una capa impermeable y separada del suelo por el nivel freático.

5.4.2 Factores que afectan la capacidad de infiltración

- Topografía del terreno.
- Tipo de suelo (permeabilidad).
- Contenido de humedad.
- Cobertura vegetal.
- Temperatura del suelo y condiciones del contorno.
- Contenido de materia orgánica.
- Características del fluido

Determinación de los Índices Regionales de Infiltración

La capacidad potencial del suelo para absorber agua lluvia se llama “capacidad de infiltración”, se expresa en las mismas unidades de intensidad de la lluvia (mm/hora) y se designa por la letra *f*. Su magnitud se puede determinar de diversas formas:

- Utilizando curvas de infiltración, las cuales se obtienen de ensayos de campo realizados con los infiltrómetros.
- A través de los índices de infiltración, que se determinan con base en el hidrograma, de la siguiente forma:

- Se selecciona el período de pérdida inicial teniendo en cuenta las características de la cuenca y las lluvias caídas en días anteriores.
- El hietograma¹⁰ de la hoya es dividido con la recta BB de tal forma que el área por encima de dicha línea corresponda a la ESD (calculada por el método de separación de las componentes del hidrograma).

Zona de estudio: subcuenca del río Frío (Cundinamarca)

a. Oferta - Demanda

El balance de aguas para la subcuenca se estableció teniendo en cuenta los valores de la oferta hídrica y demanda hídrica estimada durante los períodos secos y húmedos. Para los primeros se utilizó el promedio de caudal en los meses que están por debajo del valor medio anual y para los segundos el promedio de los meses cuyo valor está por encima de la media anual. De esta forma se obtuvieron resultados del balance para cada período, asumiendo los valores de caudal ecológico como el caudal mínimo registrado.

De acuerdo con lo anterior se puede decir que la condición crítica se presenta en los meses secos y dentro de ellos, en el mes de febrero se registra el menor caudal (1.07 m³/s), lo cual concuerda con el análisis del índice de escasez, desarrollado en el siguiente punto, donde se obtiene un índice alto para la cuenca. Se presentan los resultados en la Tabla 60 Balance de oferta para la subcuenca del río Frío, Cundinamarca.

Tabla 60. Balance de oferta para la subcuenca de río Frío Cundinamarca.

Código	Cuenca	Demanda (m ³ /s)					Oferta (m ³ /s)		Balance (m ³ /s)	
		Agropecuaria	Industrial	Doméstica	Q ecológico	Total Demanda	Periodo seco	Periodo húmedo	Periodo seco	Periodo húmedo
21 20-12	Río Frío	1,076	0,007	0,073	0,17	1,32	1,47	2,82	0,15	1,50

Fuente: Car, 2011.

b. Índice de escasez

Para este índice se tomó como oferta durante el período seco el caudal promedio de los meses secos, y como oferta en el período húmedo, el caudal promedio de los meses húmedos. Se encontró que la demanda hídrica es 1.32

¹⁰ Hietograma: gráfico que expresa precipitación en función del tiempo (Aranda, 1984)

m³/s y la oferta hídrica es de 1.42 m³/s. El valor del índice de escasez se presenta en la Tabla 61 y se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:

$$I_e = D_H / O_H \quad (5.5)$$

Donde:

I_e Índice de escasez (%)
 DH Demanda hídrica (m³/s)
 OH Oferta hídrica (m³/s)

$$I_e = \frac{1.32 \text{ m}^3/\text{s}}{1.47 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$I_e = 0.89$$

Tabla 61. Índice de Escasez Subcuenca de río Frío Cundinamarca.

Código	Cuenca	Periodo Seco		Periodo Húmedo	
		Relación demanda oferta (%)	Índice de escasez	Relación demanda oferta (%)	Índice de escasez
21 20-12	Río Frío	88,4	Alto	46,0	Medio alto

Fuente: Car, 2011.

Finalmente, el balance hídrico se calculó utilizando la fórmula 5.6:

$$P = Ed + EVR + I \quad (5.6)$$

Donde:

P = Precipitación media de la cuenca
 ETR = Evapotranspiración real
 Ed = Escurrimiento directo
 I = Infiltración

En este caso, la infiltración se calculó utilizando la ecuación 5.4, utilizando los siguientes valores para las demás variables:

P = 852.12 mm/año
 ETR = 428.4
 Ed = 340.3

$$I = P - Ed - EVR \quad (5.7)$$

$$I = 852.12 - 340.3 - 428.4$$

$$I = 83.3$$

El cálculo de estos índices y la determinación del balance hídrico permite conocer la reducción de la humedad en el suelo y la capacidad de campo, también aporta herramientas de análisis para determinar el agotamiento total de las reservas de agua subterránea, en épocas de sequía prolongada, durante las cuales se presenta el secado de pozos.

5.5 INVESTIGACIÓN ESTUDIO RÍO TUNJUELITO

A partir de los datos recolectados de las estaciones mencionadas en la tabla 5.5 mediante el CAR (2011) y EAAB (2016), se realizaron isoyetas de precipitación media, se calculo la evapotrasnpiración para finalmente realizar el balance hidrico de la cuenca y conocer el estado actual de esta.

5.5.1 Localización de estaciones de precipitación

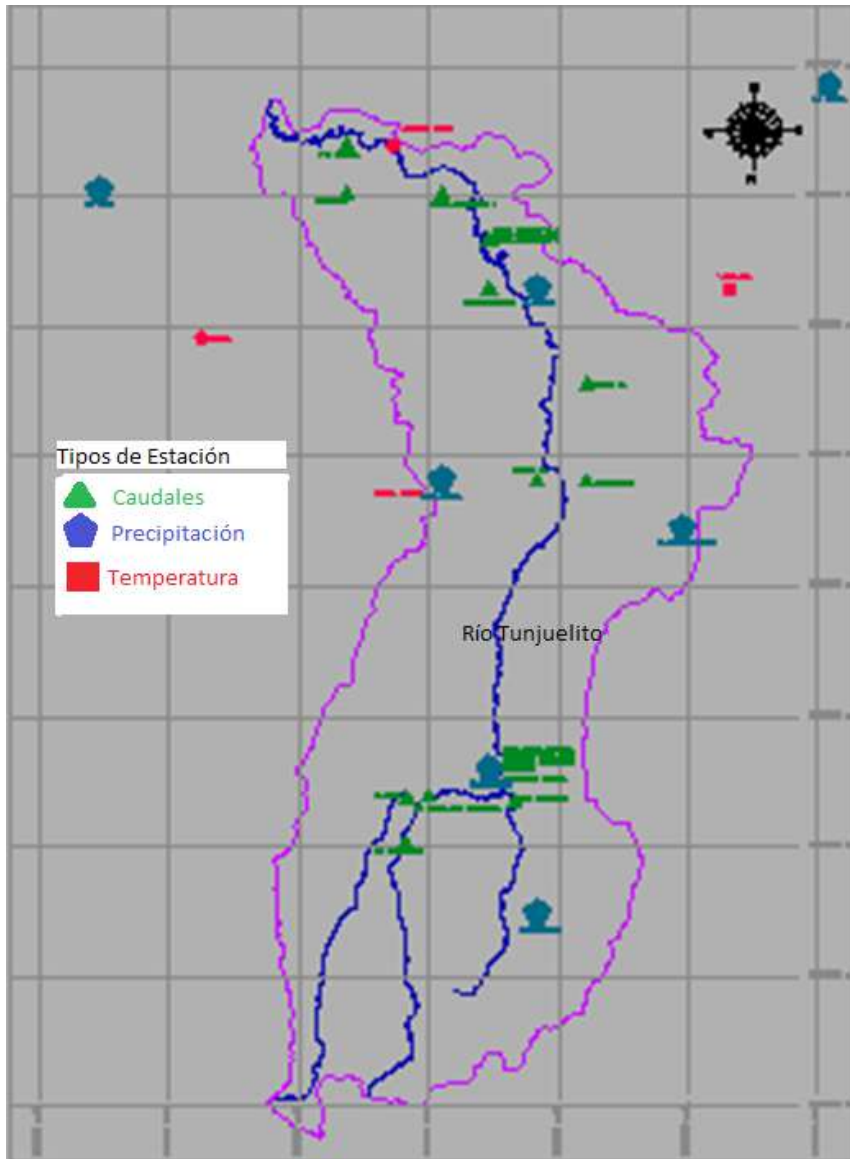
Se localizaron un total de ocho estaciones meteorológicas a partir de la información registrada por el IDEAM y el acueducto de Bogotá (EAAB); estas registran datos de precipitación y temperatura y se distribuyen a lo largo de la cuenca como se observa en la tabla 62 y Figura 81.

Tabla 62. Estaciones de precipitación, cuenca río Tunjuelito.

Código	Nombre	Tipo	Coordenadas		Elevación (msnm)	Fecha de instalación	Entidad
			Y	X			
2120034	PM	Regadera N 2 LA	977902	992324	3056	1948	EAAB
2120059	PM	Tunal El Calendaria	996422	992324	2599	1957	EAAB
2120085	PG	Cisaca	987162	999732	2880	1962	CAR
2120156	PG	Picota La	996422	994176	2580	1980	CAR
2130509	CO	Regadera N 1	977902	992324	3050	1941	EAAB
2120534	CO	ACDTO Bosa	1001958	988620	2585	1961	EAAB
2120630	CP	Doña Juana	989014	990472	2700	1989	CAR
2120536	CO	Bocagrande	972346	994176	3455	1951	EAAB

Fuente: CAR, 2011.

Figura 81. Mapa de localización de estaciones.



Fuente: Autores.

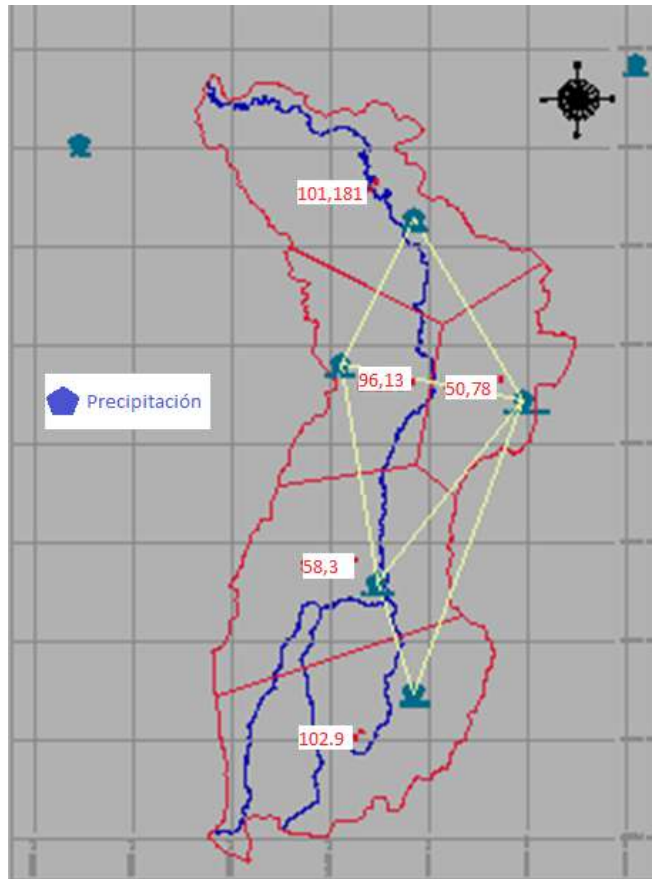
- P. Precipitación
- ETPaj. Evapotranspiración Potencial Ajustada
- Δ Diferencia entre precipitación y evotranspiración
- Alm. Almacenaje de Agua Útil
- Def. Déficit

- Δ Alm. Variación de Almacenaje de Agua Útil
- ETR. Evapotranspiración Real

5.5.2 Precipitación media con polígonos de Thiessen:

Con la ubicación de las estaciones meteorológicas (Figura 80) se procede a formar los polígonos de Thiessen, que son una red poligonal que se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones, debido a que cada estación es representativa del área del polígono que encierra, indicando que el valor de precipitación en la estación es el mismo que del área que cubre. Esta distribución se presenta en la figura 82 y la Tabla 63 (Maderrey, 2005)

Figura 82. Polígonos de Thiessen.



Fuente: Autores.

Tabla 63. Área por polígono de Thiessen.

POLÍGONOS DE THIESEN		
Nº	ÁREA (km ²)	ESTACIÓN
1	101,181	La Picota
2	58,3	Doña Juana
3	50,78	El Bosque Cicasia
4	96,13	La Regadera
5	102,93	Bocagrande

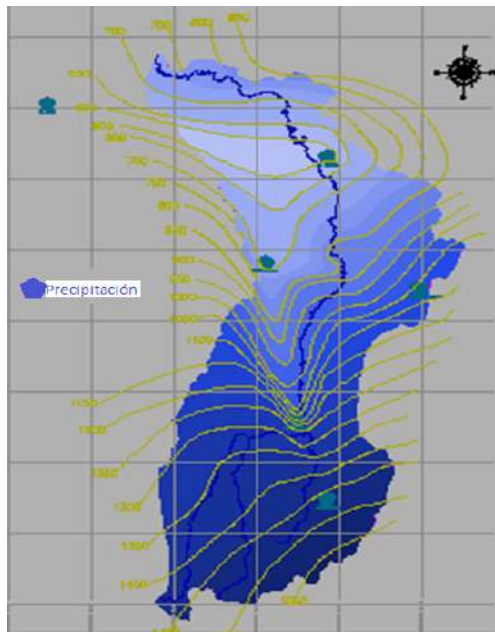
Fuente: Autores

$$Pm = 982.80 \text{ mm/año}$$

5.5.3 Datos de precipitación media con Isoyetas

Una vez se tiene los polígonos de Thiessen que indican la cantidad de precipitación por área se trazan líneas que unan los puntos de igual valor, creando así las isoyetas para toda el área de la cuenca como se ve en la Figura 81.

Figura 83. Mapa de Isoyetas anuales cuenca hidrográfica río Tunjuelito.



Fuente: Autores

Tabla 64. Cálculos de precipitación media polígonos de Thiessen.

ISOYETAS		(2) PROMEDIO PRECIPITACIÓN	(3) AREA (km ²)	(2) x (3)
600	600	600	18,00	10.800,00
600	650	625	21,99	13.743,75
650	700	675	36,69	24.765,75
700	750	725	25,31	18.349,75
750	800	775	19,86	15.391,50
800	850	825	13,54	11.170,50
850	900	875	17,76	15.540,00
900	950	925	17,12	15.836,00
950	1.000	975	20,11	19.607,25
1.000	1.050	1.025	15,73	16.123,25
1.050	1.100	1.075	15,57	16.737,75
1.100	1.150	1.125	13,31	14.973,75
1.150	1.200	1.175	11,25	13.218,75
1.200	1.250	1.225	11,94	14.626,50
1.250	1.300	1.275	15,49	19.749,75
1.300	1.350	1.325	27,11	35.920,75
1.350	1.400	1.375	33,43	45.966,25
1.400	1.450	1.425	28,80	41.040,00
1.450	1.500	1.475	27,50	40.562,50
1.500	1.550	1.525	16,12	24.583,00
1.550	1.600	1.575	2,69	4.236,75
		Σ	409,32	432.943,50

Fuente: Autores.

5.5.4 Caudales Medios

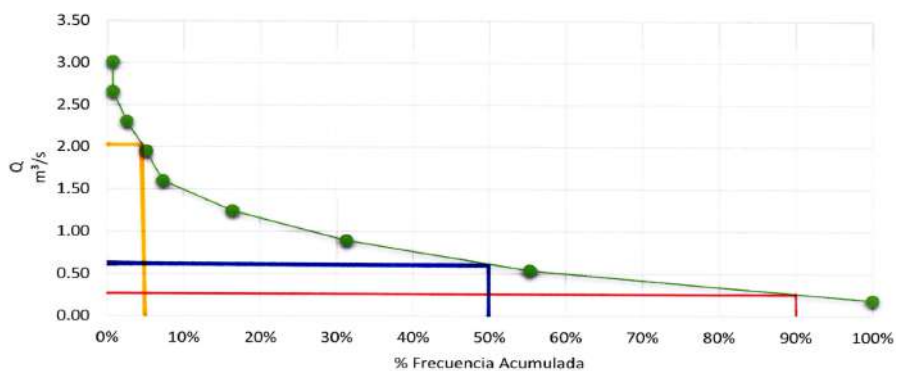
Se realizó el estudio de la curva de duración de caudales con datos de la estación Cantarrana, puesto es en esta que se encuentran registros de caudales, los resultados se presentan en la tabla 65. con los que se procede a construir una curva de duración de caudales (Figura 84) que indica que hay una probabilidad del 50% de que el caudal del río permanezca a lo largo del tiempo en 0,6 m³/s.

Tabla 65. Distribución de Caudales y su frecuencia, cuenca río Tunjuelito.

Rango de caudales	Q	Frecuencia	Frecuencia relativa	Sumatoria frecuencia cota menor
0.01 - 0.36	0.19	123	44.73%	100.00%
0.36 - 0.72	0.54	66	24.00%	55.27%
0.72 - 1.07	0.89	41	14.91%	31.27%
1.07 - 1.42	1.25	25	9.09%	16.36%
1.42 - 1.78	1.60	6	2.18%	7.27%
1.78 - 2.13	1.95	7	2.55%	5.09%
2.13 - 2.48	2.31	5	1.82%	2.55%
2.48 - 2.84	2.66	0	0.00%	0.73%
2.84 - 3.19	3.01	2	0.73%	0.73%

Fuente: Autores.

Figura 84. Curva de duración de caudales de la estación Cantarrana.



Fuente: Autores.

5.5.5 Evapotranspiración

Una vez calculada la precipitación, se calcula la evapotranspiración; para este caso se realizó por medio de dos métodos:

Fórmula de Thornthwaite

$$E_j = 16 \left(\frac{10t_j}{I} \right) \quad (5.8)$$

Donde:

E_j = evapotranspiración en mm

I = índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i , donde i es función de la temperatura media normal mensual [$i = (t/5)1,514$].

t = temperatura media mensual (no normal) en °C

El valor índice calórico mensual se determina con la siguiente fórmula:

$$ij = \left(\frac{t_j}{5}\right)^{1.514} \quad (5.9)$$

Tabla 66. Evapotranspiración potencial.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
T	12.3	12.5	12.7	12.7	12.5	12.8	11.4	11.7	12.1	12.3	12.5	12.3	12.3
P	24.4	38.6	64.1	87.9	89.1	60.1	59.1	46.2	37.6	80.8	82.7	46.6	717.0
ij	3.9	4.0	4.1	4.1	4.0	4.2	3.5	3.6	3.8	3.9	4.0	3.9	47.1
Ej	120.7	21.3	39.7	58.4	59.4	36.6	35.9	26.5	20.6	52.7	54.3	26.8	

Fuente: Autores.

Se utilizan los valores de temperatura mensual, posteriormente también se toma la precipitación mensual, se determina el valor índice calórico mensual y el anual que es la suma de los valores calóricos mensuales, como registra la tabla 66 ETP Cuenca Río Tunjuelito

- Método de Turc

La fórmula de Turc da la evapotranspiración anual en mm y se expresa como:

$$\bar{E} = \frac{\bar{P}}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{\bar{P}}{[L(t)]^2}\right)}} \quad (2.29)$$

Donde

P es la precipitación media anual y L es una función de T , que a su vez es función de la temperatura (t), y la precipitación (P).

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

$$\bar{E} = \frac{717 \text{ mm}}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{717}{[758.79]^2}\right)}}$$

Para determinar $L(t)$:

$$L(t) = 300 + 25t + 0.05t^2$$

$$L(t) = 300 + 25 \times 12.3 + 0.05^2$$

$$L(t) = 300 + 25 \times 12.3 + 0.05 \times 12.3^2$$

$$L(t) = 758.79$$

El resultado es:

$$\bar{E} = 755.26 \text{ mm}$$

5.5.6 Balance hídrico

En la cuenca del río Tunjuelito, se realiza un balance hidrológico teniendo en cuenta los siguientes factores y cuyo resultado se observa en la Tabla 67.

- P. Precipitación
- ETP aj. Evapotranspiración Potencial Ajustada
- Δ . Diferencia entre precipitación y evapotranspiración.
- Alm. Almacenaje de Agua Útil
- Def. Déficit
- Ex. Exceso
- Δ Alm. Variación de Almacenaje de Agua Útil.
- ETR. Evapotranspiración Real

La Tabla 67 indica que para el mes de enero se presenta un déficit de agua, mientras que para el resto del año son mayores las entradas de agua que salidas ya que no se presentan déficits.

Tabla 67. Balance Hídrico Estación Doña Juana.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO (mm)
P (mm)	24.3	38.6	64.1	87.9	89.1	60.1	59.1	46.2	37.6	80.8	82.7	46.6	717.0
T (°C)	12.3	12.5	12.7	12.7	12.5	12.8	11.4	11.7	12.1	12.3	12.5	12.3	12.3
ETP Ajustada (mm)	125.5	20.0	41.2	59.0	61.8	37.0	37.3	27.6	20.8	54.8	54.8	27.8	
Δ	-101.0	18.6	22.9	28.8	27.3	23.1	21.8	18.6	16.8	26.0	27.9	18.7	
Alm	0.0	18.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Def	-101.0												101
Ex		18.6	22.9	28.8	27.3	23.1	21.8	18.6	16.8	26.0	27.9	18.7	250.5
Δ Alm	0.0	18.6	81.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ETR (mm)	24.4	20.0	41.2	59.0	61.8	37.0	37.3	27.6	20.8	54.8	54.8	27.8	466.6

Fuente: Autores.



CAPÍTULO VI
HIDROLOGÍA ISOTÓPICA



INTRODUCCIÓN

Del total de los recursos hídricos de la Tierra, sólo el 2,5% es agua dulce, la proporción restante es salada. La mayor parte del agua dulce se encuentra en los hielos polares, como humedad del suelo, o a profundidades inaccesibles en acuíferos subterráneos, con lo cual queda menos del 1% disponible para su utilización. Esta situación implica retos importantes si se tiene en cuenta que el desarrollo humano sostenible depende de la disponibilidad de agua. Por otra parte se calcula que más de un tercio de la producción mundial de alimentos se basa en el riego, del cual una proporción importante puede depender de recursos no sostenibles de aguas subterráneas.

Para el año 2025 dos tercios de la población mundial podrían estar viviendo en países con escasez de agua moderada o grave. El reto es cómo gestionar este recurso finito, en la actualidad y en el futuro. Por el hecho de que los recursos de agua dulce con gran frecuencia son compartidos por más de un país dentro de una región, se necesitarán acciones nacionales e internacionales para mejorar el acceso en las regiones que carecen del recurso y así como su uso eficiente donde actualmente está disponible, de modo que pueda mantenerse para las futuras generaciones.

La hidrología isotópica es hoy una disciplina científica que se aplica a un amplio espectro de problemas hidrológicos, relacionados tanto con aguas superficiales como subterráneas, así como a estudios ambientales en sistemas hidroecológicos.

En atención a los avances logrados en la utilización de la hidrología isotópica, la Agencia Internacional de Energía Atómica y la UNESCO, han emprendido actividades conjuntas para divulgar y alentar la utilización de los isótopos naturales en la hidrología, en todo el campo de los recursos hídricos y en los estudios ambientales relacionados.¹¹

6.1 HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

La *hidrología isotópica* es una técnica nuclear que utiliza tanto isótopos estables como radiactivos, para seguir los movimientos del agua en el ciclo hidrológico. Los isótopos pueden utilizarse para investigar las fuentes de aguas subterráneas y determinar su origen, forma de recarga, si existe riesgo de intrusión o contaminación por agua salada y si es posible utilizarlas de manera sostenible. En las fases de evaporación y condensación, la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en una molécula de agua sufre pequeños cambios. Como resultado de ello, en diferentes etapas del ciclo hidrológico el agua queda marcada de manera natural, con huellas isotópicas que varían en función del historial de una masa de agua en particular y de su recorrido por el ciclo hidrológico.

Los isótopos corresponden a los átomos de un elemento que son químicamente idénticos y físicamente diferentes. Las ciencias nucleares pueden distinguir entre ellos valiéndose de la espectrometría de masas para “pesarlos”. Tanto el hidrógeno como el oxígeno, que son los elementos constitutivos del agua, contienen principalmente isótopos ligeros.

Cuando el agua de los océanos se evapora, los isótopos más pesados se condensan primero y caen en forma de lluvia antes que los más ligeros. Es en los océanos donde se genera la mayor parte del vapor de agua de la atmósfera. Por consiguiente mientras más alejada de la costa sea la precipitación, menor será la cantidad de isótopos pesados que contenga.

En cada etapa del ciclo hidrológico, se registra un pequeño cambio en la concentración de isótopos de oxígeno e hidrógeno en el agua, que es tan singular como una huella dactilar. Por otra parte, los isótopos de los contaminantes,

11 www.cathalac.org

como trazas metálicas o compuestos químicos disueltos en agua, también ofrecen pistas sobre sus orígenes

6.1.2 Isótopos estables del agua

Los isótopos estables son una herramienta útil en estudios hidrológicos, para obtener información acerca del origen y comportamiento del agua. Esto se debe a que los procesos físicos y meteorológicos que producen el transporte del agua en el ciclo hidrológico, están marcados isotópicamente, pues la composición del agua varía en cada uno de los procesos de dicho ciclo, al cambiar la estructura de los elementos que conforman la molécula de agua, como se verá más adelante.

6.1.2.1 Isótopos estables del agua. En la molécula de agua los isótopos estables para el hidrógeno son: H-1 y H-2 (deuterio) y para el oxígeno O -16, O - 17 y O - 18. La unidad con la que se expresan tanto el H - 2 (deuterio) como el O - 18, que son los isótopos estables del agua que más se emplean es tanto por mil (δ ‰). El valor de referencia más utilizado mundialmente es el SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), que fue preparado mezclando 19 muestras de diferentes océanos y por definición tiene un valor de $\delta = 0$ ‰. Por otra parte, tanto el deuterio como el oxígeno -16 se determinan en el espectrómetro de masas.

6.1.2.2 Variación de la composición isotópica a través del ciclo hidrológico. La composición isotópica de cualquier muestra de agua depende de su movimiento, que comienza cuando sale del mar por evaporación y forman nubes que son isotópicamente más ligeras, debido al fraccionamiento producido en el cambio de estado.

En las precipitaciones se tiene en cuenta el efecto de continentalidad, según el cual las masas nubosas que tienen un mismo origen, presentan lluvias más ligeras, cuanto mayor es la distancia al mar (el contenido de deuterio y oxígeno-18 es más negativo). El valor más aproximado de oxígeno - 18 en el mar, es más alejado de 0‰, por ejemplo en el agua de precipitación varía entre (-8‰ hasta -12‰).

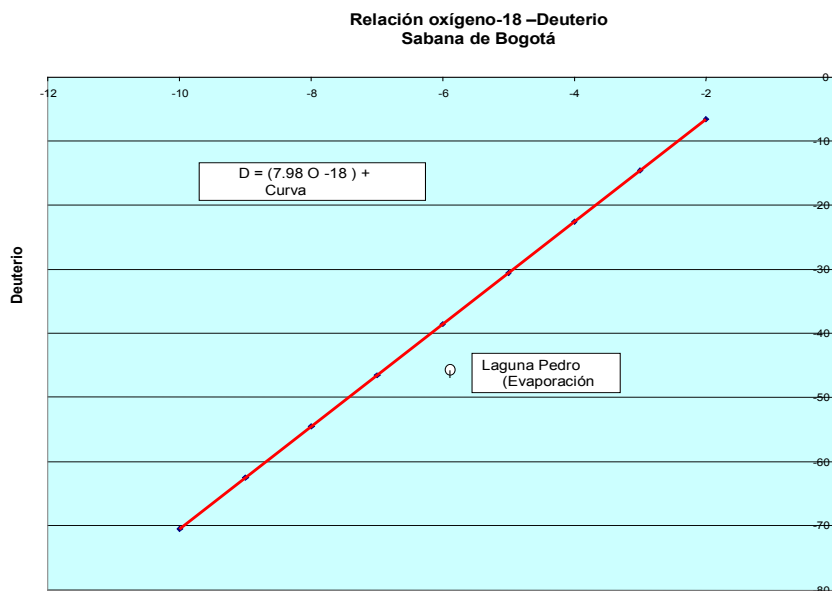
6.1.2.3 Relación entre el deuterio y el oxígeno - 18 en las precipitaciones. En la mayor parte de las precipitaciones del globo terrestre, esta relación obedece a la siguiente ecuación general:

$$\delta \text{ Deuterio} = 8 \delta \text{ Oxígeno} - 18 + 10 \quad (6.1)$$

Sin embargo en casos aislados es posible observar valores fuera de estas rectas, debido a fenómenos de evaporación. En la figura 85 se muestra las

líneas de precipitación y evaporación, así como la curva de relación entre el δ oxígeno 18 y el δ deuterio, para las estaciones de precipitación de la sabana de Bogotá. Esta curva se utiliza para análisis de las aguas subterráneas y superficiales, con el fin de conocer su procedencia y origen.

Figura 85. Relación oxígeno- deuterio.



Fuente: Autores.

Grafica 1. Relación oxígeno 18 - deuterio, Sabana de Bogotá¹²

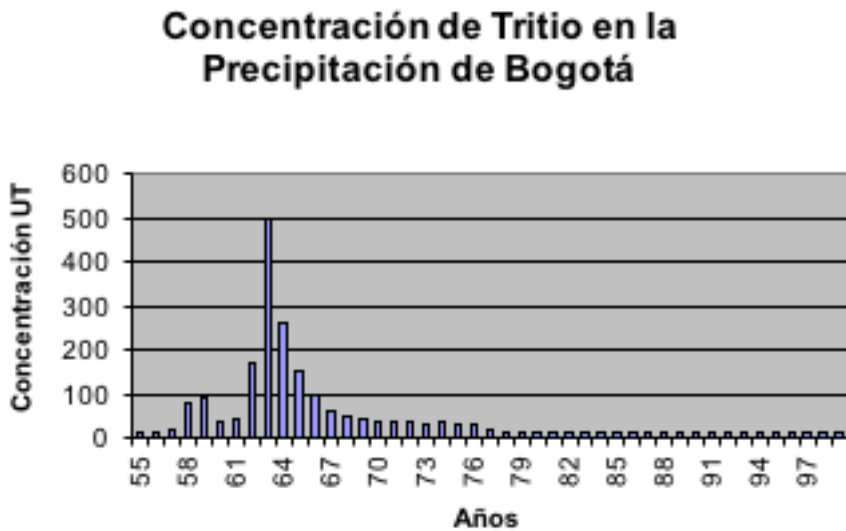
6.1.2.4 El tritio. Éste es el único isótopo radioactivo del hidrógeno de masa atómica 3, que posee 2 neutrones y 1 protón en el núcleo. Tiene un período de desintegración de 12.26 años y emite una energía de radiaciones beta de 0.018 Mev. Su presencia en las precipitaciones se debe a las siguientes causas:

1. Reacciones termonucleares originadas por los rayos cósmicos con los gases de la atmósfera.
2. Explosiones termonucleares (bomba de hidrógeno), llevadas a cabo en 1952. Estas explosiones han liberado en la atmósfera cantidades de tritio, aumentando su concentración aproximadamente 1.000 veces, en la

12 Conceptos de hidrología isotópica y aplicaciones en la ingeniería, Ernesto Torres, 1992

precipitación del hemisferio norte. En la figura 86 se presenta la variación de la concentración de tritio en la precipitación en Bogotá.

Figura 86. Concentración de Tritio (UT) en la precipitación de Bogotá.



Fuente: Autores.

Aplicaciones en Colombia. En el país, el tritio se ha utilizado en dos formas:

- a. **Tritio artificial:** usado como trazador en los siguientes trabajos de hidrología:
 - Determinación de parámetros hidráulicos del río Magdalena y su cuenca. Esta investigación se realizó en noviembre de 1989 (para el caudal alto) y abril de 1990 (para el caudal bajo), consistió en la inyección del tritio en *Giradot* y su detección en diferentes estaciones hasta Barranquilla, para determinar caudal, velocidad, tiempo de tránsito y coeficiente de dispersión.
 - Determinación de factores de conversión de las unidades de generación, en las plantas hidroeléctricas de la Empresa de Energía de Bogotá, en 1991. En este trabajo se utilizó el tritio para determinar el caudal en cada unidad de generación, a diferentes potencias.

- b. **Tritio natural.** En diferentes lugares de Colombia se han realizado estudios sobre evaluación de las aguas subterráneas utilizando este isótopo, con en la Sabana de Bogotá y el acuífero del Valle del Cauca.

Con la estadística de la concentración de tritio en el agua de precipitación, ríos, manantiales, aljibes (tanques) y pozos profundos, se ha podido determinar el tiempo de tránsito, la edad y el comportamiento general de los acuíferos en proyectos que realizó el Área de Hidrología del Instituto de Asuntos Nucleares y Energías Alternativas, INEA, en el Atlántico, Bolívar, Sabana Bogotá, Tunja y Cali.

6.1.3 Determinación del coeficiente de dispersión aplicado al estudio de la contaminación de ríos

El principal interés del estudio de la dispersión en ríos o canales, se enfoca en la contaminación por residuos industriales o domésticos. La mayor parte de estos residuos, pueden clasificarse dentro del grupo de agentes contaminantes solubles o miscibles en agua, por lo que su comportamiento viene determinado por parámetros característicos de la corriente.

La posibilidad de utilización del agua, después que cae en ella un contaminante, está relacionada directamente con los siguientes parámetros: caudal, coeficiente de dispersión y difusión, distancia al punto de vertido, velocidad lineal del flujo y algunos otros de menor importancia.

De estos parámetros, el más difícil de obtener es el coeficiente de dispersión. En esta sección se explicará la metodología para calcular el coeficiente de dispersión en tramos de ríos o canales, utilizando trazadores radiactivos o químicos. La técnica experimental se resume de la siguiente forma:

- En un punto determinado del río o corriente se aplica un trazador de forma instantánea.
- Aguas abajo se determinan las curvas de paso en diferentes puntos o estaciones, utilizando escalímetro o detectores para determinar las curvas de concentración en función del tiempo.
- El estudio de estas curvas permite determinar los coeficientes de dispersión, para los diferentes tramos de la corriente.
- Si se utilizan diferentes equipos de detección, deben estar calibrados tanto para determinar la actividad del trazador, como para tener parámetros iguales de comparación.

6.1.3.1 Determinación del coeficiente de dispersión. El coeficiente de dispersión es análogo al coeficiente de difusión molecular y turbulenta de cualquier sustancia en un tramo de un río, bajo el supuesto de que en dicho tramo se presenta un caudal y velocidad constantes.

Existen ecuaciones empíricas con las cuales se simulan diferentes procesos de los contaminantes que circulan en los cuerpos de agua. En dichos estudios se han realizado simulaciones de la curva de paso de trazadores y diferentes valores de concentración de los mismos, aguas abajo. Para ello se partió de ecuaciones en las que se tenía conocimiento del valor de la distancia X , del coeficiente de dispersión, el caudal, la velocidad media y cambiaban los valores de la variable t .

Estas ecuaciones nos permiten teóricamente calcular la cantidad de trazador a inyectar y los tiempos en los cuales debemos tener los equipos de medida en un punto aguas abajo, para determinar las curvas de paso.

Por último, con los valores de t y de la concentración simulada, se procede a realizar la parte experimental, para determinar posteriormente el coeficiente de dispersión, con datos reales de estas variables.

La investigación desarrollada en el área de las técnicas nucleares, aplicadas al comportamiento de las aguas superficiales, es de gran interés en el campo teórico práctico y científico, como una alternativa para el estudio de variables como el tiempo de tránsito, caudal, velocidad y coeficiente de dispersión. En Colombia estas técnicas se han aplicado al análisis de la contaminación en la zona media de las cuencas de los ríos Magdalena, Frío y Bogotá, siendo de gran utilidad en eventos naturales o antrópicos como inundaciones, sequías, derrame de contaminantes, entre otros.

6.1.4 Aplicación del método de inyección

6.1.4.2 Medición del caudal del río Magdalena. Como un ejemplo de aplicación del método de inyección instantánea y detección continua, se explica la determinación del caudal en un tramo del río Magdalena. El material radioactivo se disolvió en 41,66 litros de agua y de aquí se tomó una fracción pequeña para calibrar el detector. En principio ésta se calibró con una solución de concentración relativa, contenida en una botella de 20,83 litros de volumen, de acuerdo con el siguiente proceso de dilución.

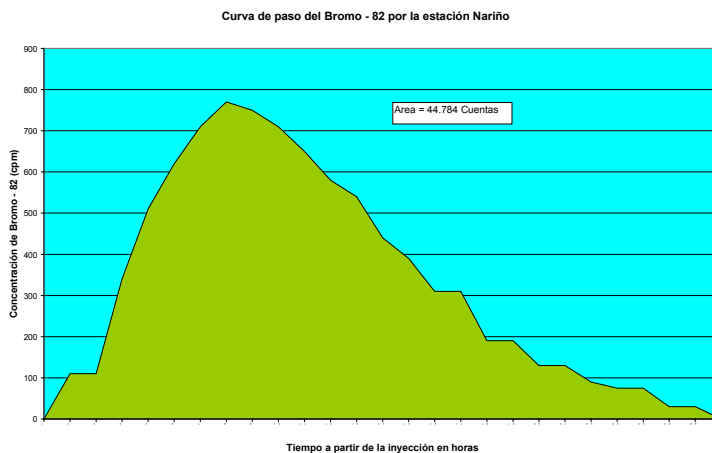
El último proceso, la muestra final de la botella de 20,83 litros dio un conteo de 94.309 cuentas por minuto, cpm una vez corregido por desintegración, referida al tiempo de la inyección. Después se determinó experimentalmente el factor de transformación de esta disposición geométrica de medida (botella de 20,83 litros) a la geometría del detector sumergido con volumen de saturación. Para ello se utilizó un gran depósito de 2.2 metros de diámetro y 1.5 metros de altura el cual se llenó con solución de bromo 82 y se efectuó el conteo. Con esta misma solución se cargó la botella y se efectuó otro conteo.

La relación entre ambos conteos fue de 9.816, el cual se toma como factor de transformación para pasar de la geometría de la botella de 20,83 litros a la geometría de saturación del río.

Las curvas de paso del bromo 82 se detectaron en las estaciones de Nariño y Puerto Salgar, dichas curvas se muestran en las gráficas 85 y 86. En el caso de la última estación, la cola de la curva no quedó bien definida debido a la gran dilución del trazador (pequeño conteo).

Los diferentes peldaños de las curvas corresponden a intervalos de conteo. Las cuentas por minuto, obtenidas para cada intervalo, fueron corregidas por desintegración radioactiva referidas al momento de la inyección del trazador.

Figura 87. Curva de paso del bromo - 82 por la estación Nariño.

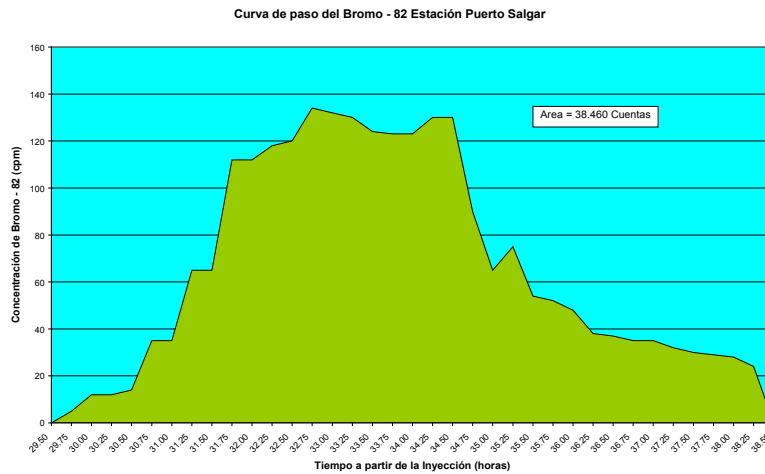


Las curvas de paso proporcionan información cuantitativa sobre los siguientes parámetros:

1. Tiempo de tránsito dado por la mediana de la curva o tiempo de paso del 50% del trazador.
2. Caudal del río obtenido a partir de la ecuación 6.2:

$$Q = \frac{I}{\int C dt} \quad (6.2)$$

Figura 88. Curva de paso del bromo - 82 (Estación Puerto Salgar).



Fuente: Autor.

Siendo (I) la actividad inyectada expresada en cuentas por minuto (cpm) y C la concentración dada en cpm/m^3 . El valor de A se obtiene a través de las medidas de calibrado y del proceso de dilución indicado anteriormente, con el siguiente resultado (ecuación 6.3):

$$I = 94.309 * 9.816 * \frac{41.66 * 10^3}{5} * \frac{100}{5} = 1.5426 * 10^{11} \text{ cpm} \quad (6.3)$$

La expresión $\int Cdt$ se obtiene por integración de las curvas 6.3 y 6.4, con lo cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 68.

En las figuras 87 y 68 se presenta las curvas de paso en el río Magdalena y tiempos de transito.

Nariño

$$\int Cdt = \frac{44.784}{20.83} * 60 * 10^3 = 1.2890 * 10^8 \text{ cpm} * \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (6.4)$$

Donde se obtiene:

$$Q = \frac{1.5426 * 10^{11}}{1.289 * 10^8} = 1.197 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6.5)$$

Tabla 68. Resultados de la variación del coeficiente de dispersión en el tiempo, en el río Magdalena.

Exp.	Estación	X (Km)	Caudal IDEAM (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	Varianza (h ²)	C. Dispersión (m ² /s)
1	1	29,3	1070	1092	1,85	0,21	150
	3	196,0	1425	1385	1,61	4,15	250
	5	705,1	6600	5560	1,3	75,6	650
	6	915,7	9900	10379	1,16	656,9	-
	7	1083,1	10400	16990	0,92	12680	-
2	1	29,3	970	942	1,57	0,24	80
	2	96,0	1300	1367	1,24	1,48	120
	3	196,0	1380	1526	1,46	2,76	150
	4	452,6	2400	1883	1,27	44,2	500
	5	705,1	3060	2987	1,12	143,6	500
	6	915,7	3800	3283	1,08	307,6	
	7	1083,1	4900	4900	1,04	344,8	

Fuente: Autores.

Puerto Salgar

$$\int Cdt = \frac{38.460}{20.83} * 60 * 10^3 = 1.1078 * 10^8 \text{ cpm} * \frac{m^3}{s} \quad (6.4)$$

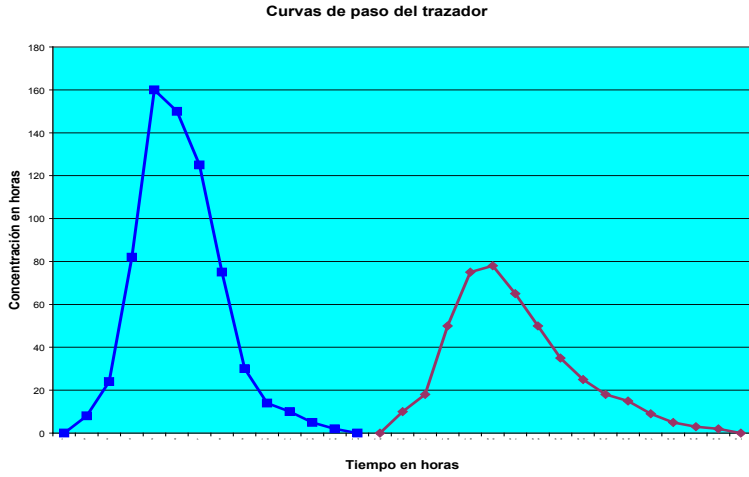
De donde se obtiene:

$$Q = \frac{1.5426 * 10^{11}}{1.1078 * 10^8} = 1.392 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6.5)$$

En la Figura 89, se observan dos distribuciones de la concentración del trazador. Ya que la curva del lado derecho (roja) está más abierta respecto al valor medio del tiempo, es posible afirmar que muestra una mejor disposición de concentración del trazador.

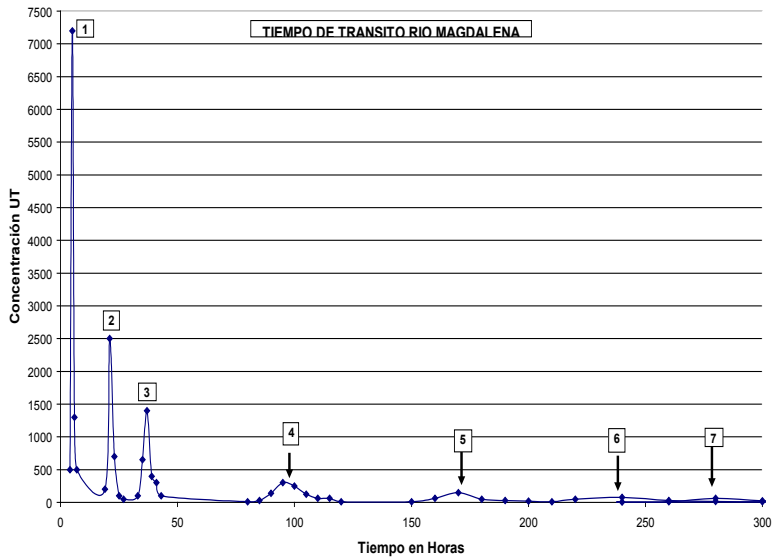
En la figura 90 se observan dos curvas de paso de trazador, obtenidas de la inyección de material radiactivo en un río determinado, el cual fue detectado en varias estaciones, iniciando en Girardot y terminando en Barranquilla. El coeficiente de dispersión se obtiene mediante las fórmulas 6.6 y 6.7.

Figura 89. Curvas de paso del trazador en el río Magdalena.



Fuente: Autores.

Figura 90. Tiempos de tránsito, velocidad y dispersión del trazador en el río Magdalena.



Fuente: Autores.

Inicialmente se determina el valor de la varianza (VAR_t^2), de cada curva con la siguiente expresión (6.6):

$$VAR_t^2 = \frac{C_1(t_1 - t_m)^2 + C_2(t_2 - t_m)^2 + \dots + C_n(t_n - t_m)^2}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (6.6)$$

Posteriormente el valor del coeficiente de dispersión se obtiene con la ecuación 6.7.

$$D = \frac{1}{2} v^2 \left[\frac{VAR_{t_2}^2 + VAR_{t_1}^2}{(tm)_2 + (tm)_1} \right] \quad (6.7)$$

Donde:

D = Coeficiente de dispersión.

v = Velocidad entre los puntos teniendo la distancia y el tiempo.

tm = Tiempo medio de cada curva.

VAR_t^2 = Varianza de cada curva.

Para determinar el coeficiente de dispersión en río se puede utilizar el método Parker.

6.1.4.1 Método de Parker

Nariño:

$$\text{Varianza de la curva 1: } VAR_t^2 = 0.2257 \text{ horas}^2 \quad (6.6)$$

$$D = 324.7 \text{ m}^2/\text{s}.$$

El coeficiente de Dispersión del río Magdalena inyectando el trazador en Girardot y detectándolo en Nariño fue de 324.7 m²/s.

Puerto Salgar:

$$\text{Varianza de la curva 2: } VAR_t^2 = 4.79 \text{ horas}^2 \quad (6.6)$$

$$D = 682.9 \text{ m}^2/\text{s}.$$

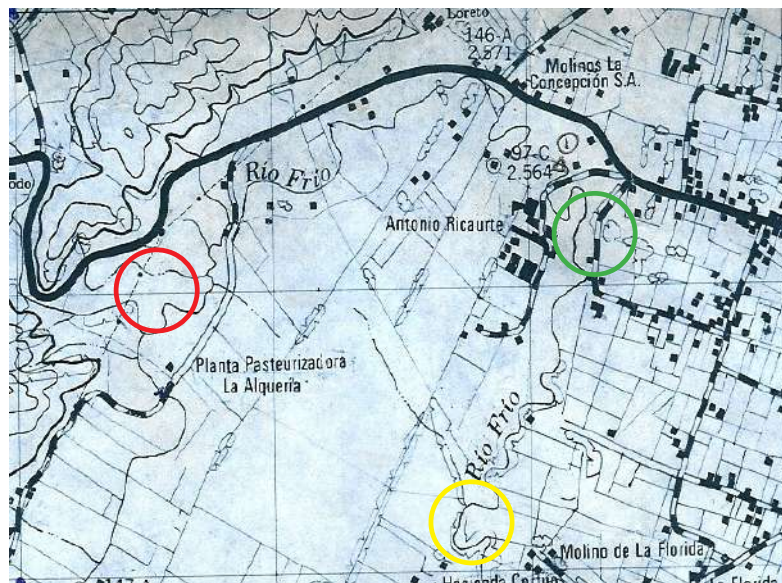
El coeficiente de Dispersión del río Magdalena inyectando el trazador en Girardot y detectándolo en Puerto Salgar fue de $682.9 \text{ m}^2/\text{s}$.

En el caso del río Frio se realizó experiencia de investigación el trazador Yodo -131 y detectándolo en 2 sitios aguas abajo como se explica en el apartado 6.1.4.2, en el mapa 6.1 se muestra en el sitio de inyección y los sitios de detección.

6.1.4.2 Zona de estudio cuenca de río frío (Cundinamarca)

Localización cartográfica de la zona de inyección y detección del trazador

Figura 91. Mapa de Inyección y Detección río Frio-Cundinamarca.



- Punto de inyección del trazador yodo 131
- Punto de detección segunda campaña
- Punto de detección primera campaña

Fuente: Cartografía Instituto Geográfico Agustín Codazzi Escala 1:25000

En la investigación realizada en el río frío, se determinó el caudal, la velocidad, el tiempo de detección, se determinaron las curvas de paso del trazador como se observa en las gráficas: 92 y 93, en ellas se presenta en la curva negra la representación teórica y la curva azul los datos experimentales.

1. Distancia entre el punto de inyección y detección

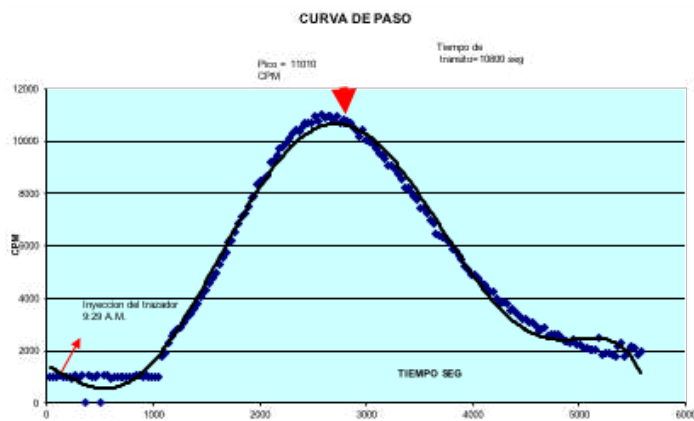
El primer punto de la investigación, estaba 1750 m y el segundo punto la distancia entre el punto de inyección y el punto de detección 3.250 m.

2. Cálculos de caudal y velocidad de Río Frío

Caudal

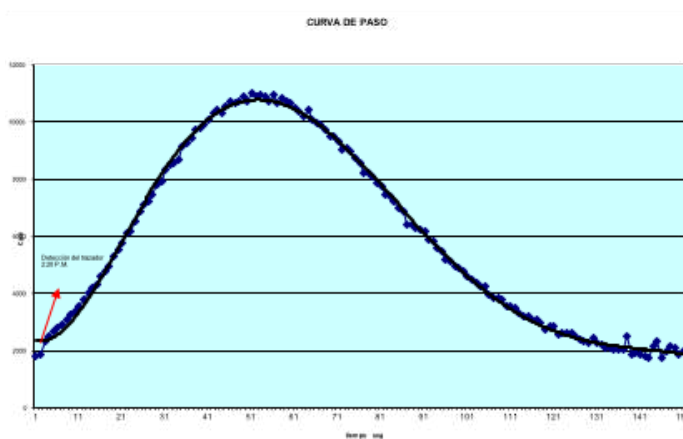
$$Q = 1.606 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Figura 92. Curva de paso punto 1 de detección (CPM).



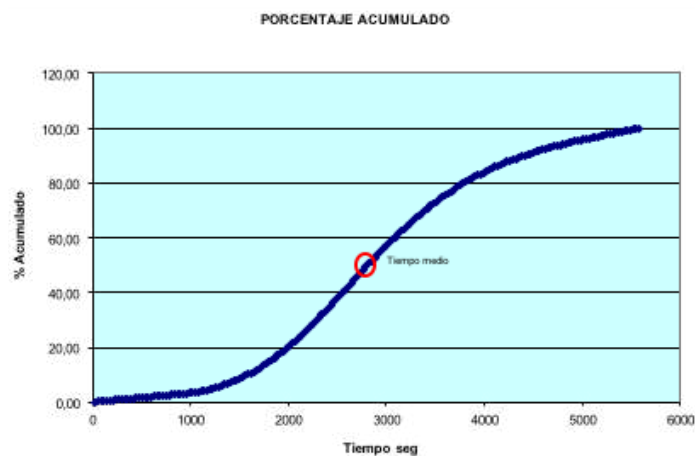
Fuente: Autores.

Figura 93. Curva de paso punto 2 de detección.



Fuente: Autores.

Figura 94. Porcentaje acumulado en CPM, con el 50% se determina el tiempo de tránsito.



Fuente: Autores.

6.1.4.3 Tiempo de tránsito, velocidad y caudal del río Bogotá. El Instituto de Ciencias Nucleares llevó a cabo un estudio en los ríos Bogotá, Teusacá, Neusa y Tunjuelo, para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, la Empresa de Energía de Bogotá y la CAR. Para todos los ríos se realizaron dos campañas: una en caudal bajo y otra en caudal alto, en las cuales se midieron parámetros básicos como caudal, tiempo de tránsito, coeficiente de dispersión y velocidad.

El trazador utilizado fue bromo - 82 y los resultados se presentan en la figura 92.

Es de anotar que con este proyecto fue posible entregar una herramienta de planificación hidráulica tanto ambiental como energética, a las instituciones para las que se desarrolló el estudio

Resultados y análisis de resultados de la investigación

Análisis de dispersión primera campaña (río Frío)

Caudal de la cuenca: 1.606 m³/seg.

Velocidad del río: 0.51 m/seg.

Lugar: Planta Pasteurizada La Alquería.

Área total: 3.124 m²

Tiempo de detección

Análisis de dispersión segunda campaña (río Frío).

Caudal de la cuenca: 1.606 m³/seg.

Velocidad del río: 0.51 m/seg.

Lugar: Planta Pasteurizadora La Alquería.

Área total: 3.124 m²

6.2 SEDIMENTOS

Los sedimentos se definen como los sólidos que se separan del líquido en el cual han estado en suspensión, proceso que ocurre por acción de la gravedad. Los sedimentos tienen su origen en la erosión que la lluvia causa sobre el terreno y por escurrimiento los transporta a las fuentes naturales de agua. De la misma forma la corriente de agua puede originar un volumen de sedimentos a causa de su acción erosiva sobre el cauce.

El suelo es removido constantemente de la superficie de la Tierra y transportado aguas abajo por los ríos, hasta que se deposita finalmente en los lagos, estuarios y océanos. Dado que el agua es uno de los principales agentes de erosión y el vehículo principal del transporte del material erodado, este proceso es importante en el desarrollo de aprovechamientos hidráulicos.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este tema es el diseño de estructuras de sedimentación para proyectos como: pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), bocatomas (estructura de toma de agua para acueductos), y presas, es imprescindible determinar adecuadamente las tasas de transporte y las tasas de deposición que soportará cada estructura, de manera que funcione eficientemente y con un período propicio de mantenimiento. En términos generales, sedimento es cualquier fragmento de material transportado, suspendido o depositado por el agua o por el aire.

La erosión empieza cuando las gotas de agua lluvia caen sobre la superficie del suelo y abren pequeños cráteres aflojando las partículas edáficas, las cuales empiezan a ser arrastradas por los diminutos hilos de agua, los arroyos y los ríos. Así lo que en un principio fueron pequeñas cantidades de microscópicos granos de material, al formarse los arroyos en los grandes ríos, se convierten en miles de m³ transportados diariamente.

La erosión depende de dos factores principales a saber:

1. Energía del agente erosivo (tamaño de las gotas de agua o granizo, velocidad de las corrientes).
2. Erodabilidad del suelo o susceptibilidad a los agentes de erosión.

La protección de la superficie erodable está dada especialmente por la cobertura vegetal. La erosión causa graves daños en los suelos agrícolas, en los cauces de los ríos donde las corrientes socavan, provocan deslizamiento de los taludes o bloquean los canales por la deposición de materiales.

La problemática generada por el transporte de sedimentos en las corrientes de agua, está relacionada con la planificación, diseño y operación de obras como puertos, canales para navegación, hidroeléctricas, acueductos y sistemas de riego. De allí la importancia que tiene determinar la cantidad de sólidos transportados por una corriente en un tiempo definido (ton/día, ton/año), mediante la obtención de muestras de sedimentos.

6.2.1 Concentración

En general se denomina concentración a la cantidad de sólidos que se encuentran en una unidad de solución (sólido + líquido). Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm) o en peso por unidad de volumen líquido (kg/m^3). La forma como varía la concentración en una vertical depende en gran parte de la turbulencia de la corriente.

6.2.2 Transporte o carga de sedimentos

El transporte total de sedimentos comprende tanto aquellos que se trasladan suspendido en la corriente, como los que viajan arrastrándose o rodando por el fondo, los cuales se miden directamente con muestreadores y comúnmente se expresan en $\text{m}^3/\text{día}$. Por otra parte el transporte de sedimentos en suspensión se refiere a la cantidad de sólidos o sedimentos flotantes que pasan por la sección de una corriente, en una unidad de tiempo y generalmente se expresa en $\text{t}/\text{día}$ o kg/s . Su valor numérico se obtiene al multiplicar la concentración media por el caudal líquido que pasa por una sección.

6.2.3 Clases de sedimentos

Los materiales erosionados que van a parar a las corrientes son transportados de varias formas, de acuerdo con las cuales puede establecerse la siguiente clasificación:

Sedimentos de fondo. Están compuestos por los materiales depositados por la corriente en el lecho del río. Forman depósitos que pueden alcanzar varios metros de espesor y reciben el nombre de depósitos aluviales.

Sedimento de arrastre de fondo. Son aquellos materiales que se deslizan o ruedan por el lecho de un río por la acción de la velocidad de la corriente. El tamaño de estas partículas varía de acuerdo con la energía que tenga la corriente para hacerlas mover como son en saltación y suspensión.

a. **Sedimentos en saltación.** Por lo general están conformados por arenas y otros materiales que provienen del fondo de la corriente, donde adquieren la energía suficiente para abandonar el lecho, mantenerse en suspensión y caer de nuevo (resuspensión).

En términos generales el sedimento en saltación puede considerarse una parte del transporte de arrastre, ya que es del mismo tipo y similar mecanismo de transporte.

b. **Sedimentos en suspensión.** Estos sedimentos se mueven a una velocidad más o menos igual a la de la corriente, la cual genera turbulencias que los mantienen en suspensión. En cambio, los sedimentos de arrastre o de acarreo, se desplazan a una velocidad inferior a la de la corriente en el fondo del lecho.

6.2.4 Medición del transporte de sedimentos

Existen instrumentos para medir la concentración de sedimentos tanto en suspensión como de fondo, este método utilizando fuentes radiactivas y deyector es práctico es el más usado en Colombia. Los valores obtenidos deben ser comparados con datos recopilados de otras cuencas con fisiografía similar, aunque cabe la posibilidad de que dicha comparación no pueda realizarse debido a la carencia de estaciones hidrométricas que provean dichos datos.

La concentración de sedimentos en suspensión se determina mediante el uso de un elemento aerodinámico que posee una botella de vidrio en su interior, en la cual se depositan las muestras de agua. Para ello, este instrumento tiene un conducto por donde sale el aire a medida que el agua entra a la botella a través de una boquilla, que controla la tasa de llenado.

La muestra de sedimento tomada en la botella se filtra y el sedimento se seca, de manera que la concentración de sedimentos será igual a la relación entre el peso seco de éstos y el peso total.

6.2.5 Utilización de sedimentos en ingeniería ambiental y civil

El estudio de sedimentos es muy importante para el diseño de todo tipo de obras en ingeniería civil, entre ellos desarenadores utilizados en centrales hidroeléctricas, acueductos, distritos de riego, tanques de carga, procesos de

socavación y depositación en ríos, hidráulica de ríos, diseño de espolones y espigones.

Foto 31.



Fuente: Autor.

6.2.6 Proceso Erosivo en las Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas contribuyen con sedimentos a la carga total de una corriente natural, a través de fenómenos de remoción en masa o mediante la erosión hídrica. A continuación se explican estos dos mecanismos brevemente.

6.2.6.1 Remoción en masa. Este fenómeno está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido, que se han concentrado en sitios inestables. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua lluvia en los suelos.

Las masas de material permanecen por algún tiempo en un equilibrio precario en los sitios inestables, pero basta la presencia de un factor detonante para que se produzca el deslizamiento. Este factor detonante puede ser un sismo, un período prolongado de lluvias intensas o la pérdida de soporte en la pata de un talud.

Cuando el deslizamiento se produce directamente sobre una de las márgenes de una corriente natural el material deslizado se deposita sobre el lecho obstruyendo el paso libre del agua, pero a medida que pasa el tiempo el mismo flujo de agua se encarga de transportar el material hacia aguas abajo, parte como carga de fondo y parte en suspensión (caso Armero).

Si los deslizamientos se producen lejos de las corrientes de agua, entonces solamente una parte del material puede llegar a las corrientes por erosión hídrica. Así las cosas, la remoción en masa constituye una variable determinante al momento de estudiar e implementar la Gestión del Riesgo por causas naturales, hoy por hoy un requisito indispensable para enfrentar las consecuencias del Cambio Climático.

- Erosión hídrica

Es la que se presenta cuando las gotas de lluvia que caen sobre un suelo tienen suficiente energía para remover partículas del mismo, dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje.

En la actualidad la magnitud de la erosión hídrica se mide por medio de la Pérdida de Suelo. Esta pérdida es un índice medio anual del potencial erosivo de la cuenca; se calcula por medio de fórmulas empíricas y se expresa en milímetros por año (mm/año).

Los estudios empíricos que existen sobre el tema consideran que solamente un pequeño porcentaje de la pérdida de suelo llega hasta la corriente de drenaje y puede entrar a formar parte de la carga en suspensión. Los factores que actúan en la generación de la pérdida de suelo en una cuenca son los siguientes:

- Lluvia

Es el agente que inicia el proceso erosivo. La magnitud de su efecto depende de su distribución temporal y espacial sobre la cuenca; para cuantificarla es indispensable analizar las intensidades de lluvias de corta duración, su frecuencia y el cubrimiento sobre el área de la cuenca.

Morfometría del área vertiente

Las características morfométricas de la zona potencialmente erosionable son el área, la longitud de recorrido de la escorrentía y la pendiente del terreno.

- Suelo

Es un factor que incluye la textura y la estructura que tiene suelo en el momento de comenzar las lluvias.

- Cobertura vegetal

Es un factor muy importante en la generación y transporte de la erosión pluvial, especialmente en el período inicial del aguacero. Depende del tipo de cultivo, el sistema de siembra y las prácticas de manejo.

La interacción entre las variables anteriormente mencionadas ha sido estudiada con métodos analíticos, modelos físicos y cuencas prototipo.

De estos estudios, han resultado criterios generales aplicables a la determinación de una pérdida media de suelo anual en función de la lluvia media anual y la cobertura vegetal, o fórmulas elaboradas entre las cuales la más conocida es la Fórmula Universal de Pérdida de Suelo, propuesta por Wischmeier & Smith en 1958 con base en experiencias realizadas en los Estados Unidos desde 1917.

6.2.7 Capacidad de las Corrientes Naturales para Transportar Sedimentos

Existen dos métodos para calcular el transporte de sedimentos; uno es el método analítico por medio de fórmulas empíricas y otro el de mediciones con aparatos normalizados.

Las fórmulas empíricas permiten calcular las capacidades máximas de transporte si las corrientes tuvieran suficientes sedimentos disponibles. Tienen muchas limitaciones porque por lo general las fórmulas son desarrolladas en condiciones de laboratorio. Desde el punto de vista analítico las fórmulas empíricas para cálculo de carga de fondo han tenido un desarrollo más completo que las de sedimentos en suspensión. Sin embargo, los resultados prácticos siguen siendo inciertos.

Los medidores normalizados de sedimentos en suspensión para realizar aforos sólidos son ampliamente utilizados en el mundo y su confiabilidad es adecuada para obtener información aceptable en estudios hidrométricos. No se ha tenido la misma fortuna con los medidores de carga de fondo y por esta razón es de uso corriente medir solamente los sedimentos en suspensión y asignar a la carga de fondo un porcentaje de lo que se obtuvo en suspensión.

Análisis de la Carga en Suspensión

La carga en suspensión es alimentada por la erosión pluvial en la cuenca, surge la dificultad de estimar qué volumen de sedimentos transporta realmente el río en suspensión, y qué ocurre con los sedimentos que el río no acarrea.

La capacidad de un río para transportar sedimentos en suspensión depende de las fuerzas de sustentación que se generan como componentes verticales de la velocidad del flujo. La magnitud de estas fuerzas de sustentación depende

de la magnitud de la velocidad de flujo y, por tanto, del caudal. Mientras la componente vertical que sostiene una partícula de sedimento sea mayor que el peso de ésta, la partícula se mantiene en suspensión; de esta forma, el caudal clasifica las partículas que el río puede transportar, tanto en tamaño como en número.



An abstract graphic consisting of a network of light blue lines and dots on a dark teal background. The lines connect various points, creating a complex, interconnected web that resembles a data network or a molecular structure. The dots are small and serve as nodes in the network.

CAPÍTULO VII

INVESTIGACIÓN EMBALSES E HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA



INTRODUCCIÓN

Una gran presa, según la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), es aquella que supera los 15 metros de altura o que, con más de 5 metros, tiene un volumen de embalse de más de 3 millones de m³.

En Colombia existen cerca de 36 embalses con volúmenes superiores a los mil millones de metros cúbicos, cuya finalidad, en la mayoría de los casos, es la generación de energía hidroeléctrica. Sus áreas varían entre 0.2 y 74 km², su ubicación entre los 70 y 3000 metros sobre el nivel del mar y su capacidad para generar energía está entre los 10 y 1000 MW. Una proporción importante de ellos se encuentra sobre las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca, y la altiplanicie de Cundinamarca-Boyacá.

Una gran presa, según la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), es aquella que supera los 15 metros de altura o que con más de 5 metros tiene un volumen de embalse de más de 3 millones de m³. (<http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>).

Las primeras presas se construyeron hace unos 5000 años. Sin embargo, el período de mayor actividad constructora de grandes presas se sitúa entre 1960 y 1980, especialmente en China, Estados Unidos, India y lo que fue la URSS. (<http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>).

Sus funciones son controlar las inundaciones, proporcionar energía hidráulica y suministrar agua para usos domésticos, industriales o regadíos. Proporcionan el 19% de la electricidad mundial total e irrigan el 40% de los territorios mundiales de agricultura de regadío. (<http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>)

Hacia el año 2000 existían en el mundo unas 300 presas de más de 60 metros de altura en construcción <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>.

Su construcción no está exenta de la polémica en todo el mundo entre los partidarios de estas obras, como generadoras de riqueza y desarrollo, y sus detractores, que no reconocen un balance positivo entre los beneficios y su riesgo potencial. (Hispagua Sistema Español de Información sobre el Agua): <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>.

En España, caracterizada por un régimen hidrológico de extraordinaria irregularidad (en continuo tránsito de la sequía a la inundación), se han construido numerosas presas para paliar las desastrosas consecuencias de estos fenómenos y que garanticen la disponibilidad de agua tanto para el abastecimiento como para las actividades económicas

Actualmente hay más de 1.200 grandes presas en España que aportan una capacidad de unos 56.000 hm³, más de 100 de las mismas ya existían en el año 1915 y unas 450 son anteriores a 1960. publicación (pág. 65): 2010. IGME (Instituto Minero y Geológico de España). Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante. Diputación Provincial de Alicante - Departamento de Ciclo Hídrico, Instituto Geológico y Minero de España. 393 p.

Este país es el quinto país del mundo después de China, Estados Unidos, India y Japón con mayor número embalses, sin embargo utiliza aproximadamente 100 veces su potencial comparando volumen embalsado contra área del territorio en km². Estas cifras indican que una parte importante de los esfuerzos debe centrarse en Colombia en diseño, construcción, conservación y reparación de embalses, manteniéndolas en unas condiciones óptimas de explotación, y seguridad.

Este capítulo tiene como objetivos realizar una caracterización básica de las represas, embalses e hidroeléctricas, además de hacer recomendaciones técnicas y científicas en materia de monitoreo hidrológico, que permitan mejorar la prevención de eventos hidrológicos extremos.

7.1 EMBALSES USO PRINCIPAL RIEGO

Son volúmenes de agua retenidos en un vaso topográfico natural o artificial gracias a la realización de obras hidráulicas.

7.1.1 Clasificación

La clasificación de los embalses se puede hacer de acuerdo con su función y tamaño de la siguiente manera:

Según su función:

- Embalses de acumulación: retienen excesos de agua en períodos de alto escurrimiento para ser usados en épocas de sequía.
- Embalses de distribución: no producen grandes almacenamientos pero permiten regular el funcionamiento de sistemas de suministro de agua para riego, plantas de tratamiento o estaciones de bombeo.
- Pondajes: pequeños almacenamientos para suplir consumos locales o demandas pico.

Según su tamaño:

La clasificación de los embalses de acuerdo al tamaño se hace más por razones de tipo estadístico que por interés desde el punto de vista técnico.

- Embalses gigantes $> 100,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses muy grandes $100,000 \text{ Mm}^3 > > 10,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses grandes $10,000 \text{ Mm}^3 > > 1,000 \text{ Mm}^3$
- Embalses medianos $1,000 \text{ Mm}^3 > > 1 \text{ Mm}^3$
- Embalses pequeños o pondajes $< 1 \text{ Mm}^3$: volumen del embalse Mm^3 : millones de metros cúbicos

7.1.2 Embalse La Copa

Se localiza en el departamento de Boyacá a una altitud de 3.670 msnm, tiene un área superficial de 770 hectáreas, profundidad máxima de 36,5 m y

volumen total de 70 Mm³, descarga 10 m³/s. Sus principales afluentes son: río Tuta, San Francisco y la Chorrera, mientras que los ríos efluentes son el río Grande y San Francisco.

Foto 32. Panorámica del embalse La Copa.



Fuente: www.toca-boyaca.gov.co.

Esta presa es de tipo enrocado con núcleo y presenta las siguientes obras anexas: rebosadero de 105 m en canal abierto en concreto reforzado, bocatoma, túnel de carga, tapones para cámaras de válvulas y montajes electromecánicos de compuertas. Como tal la presa tiene 36 m de altura y 200 m de longitud de cresta, la descarga de fondo tiene 200 m de longitud con un diámetro de 4 m. Su mayor afluente es el río Cormechoquem.

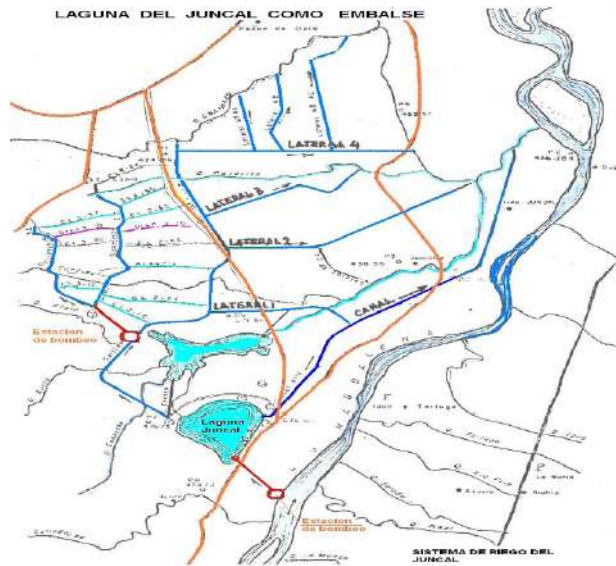
7.1.3 Embalse El Juncal

El área del embalse se ubica en la margen izquierda del río Magdalena a 16 kilómetros de Neiva en el departamento del Huila, municipio de Palermo, a una altitud de 475 m, tiene un área superficial de 172 hectáreas, profundidad máxima de 2,17 m y volumen total de 2,19 Mm³. En el Juncal desemboca la quebrada Manga y actualmente existe el proyecto de desvío de la quebrada Cerro Gordo hacia este mismo embalse. Para la evacuación de excesos el embalse tiene una acequia de conexión con el pondaje denominado Laguna Sucia.

El proyecto de construcción del embalse El Juncal fue desarrollado por la Compañía de Estudios e Interventorías CEI- en dos variantes: 1) Captando agua

del río Magdalena en las cercanías de la población de Betania, para llevarla por gravedad al área del embalse, y 2) Aprovechando la laguna del Juncal y el pondaje de La Sucia como almacenamientos de agua en la cabecera de los canales distribuidores principales, para llevarla mediante elevación mecánica (bombeo) al área del proyecto.

Figura 95. Embalse El Juncal.



Fuente: Oramas, G. Año. Embalses y lagos en Colombia, Popayán Colombia 120 pags, 1985.

Teniendo en cuenta que la primera alternativa planteada para el proyecto del embalse, implicaba altos costos de construcción y mantenimiento, se construyó la segunda variante.

Mediante la construcción de una pequeña presa de concreto sobre el cauce de la quebrada Sucia fue creado un pondaje que inundó 96 hectáreas, posteriormente reducidas a 80 ha. En éste desembocan las quebradas Campeche, Plata y Sucia. La estación principal de bombeo (1ra etapa) sobre la margen izquierda del río Magdalena, capta el 80 % del agua necesaria para el embalse, tiene 4 bombas centrífugas de eje vertical instaladas en cárcamos independientes con capacidad máxima de 1.5 m³/s, cada una accionada por motores eléctricos.

Las tuberías de impulsión en dos líneas son de asbesto cemento, con un diámetro de 28" y provistas con compuertas de charnela, por las cuales eleva

el agua a 32.9 m hasta una cámara de amortiguación de donde se entrega a un canal de aducción 1, de 860 m de longitud, el cual lleva el agua al embalse regulador El Juncal. La velocidad de paso por este canal es de 7.5 m³/s, tiene 3 m en la base, taludes 1.5: 1 y profundidad de 2.3 m, la mayor parte en terraplén revestido. Desde El Juncal se riega por gravedad el área entre las cotas 475 y 450. El sistema funciona con muy mal mantenimiento.

7.1.4 Embalse Gachaneca

Este embalse se construyó en dos etapas, las cuales presentan las siguientes características:

- Gachaneca I, cuya capacidad es de 4.700.000 m³,
- Gachaneca II, cuya capacidad es de 1.490.000 m³
- Afluente: el río Gachaneca parte de la represa Gachaneca I y recorre el valle de Samacá de sur a norte.
- Quebradas: la represa recibe aportes de las quebradas Tintoque, Cuchinillos, El Chulo, Agua Blanca, Los Cerritos, Quebrada Grande, El Pedregal, Alcalá, El Puerto, El Venado, Churuvita, Tres Chorros, Pataguy, El Ancón, Jachón, el Río, El Grande.

Foto 33. Panorámica embalse Gachaneca.



Fuente: <https://sites.google.com/site/lagunadegachaneca/>.

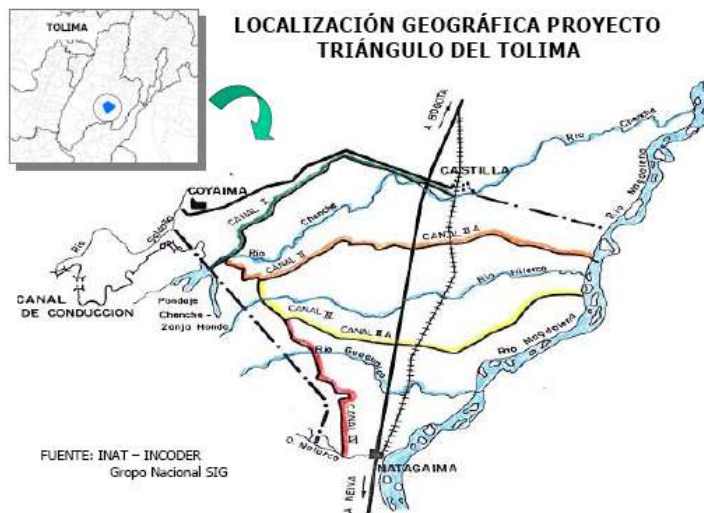
El embalse Gachaneca II fue construido en 1987 y está ubicado en el viejo distrito de riego Samacá, área de excelentes tierras, donde predominó el

minifundio durante 50 años, que antiguamente estuvo ocupada por un lago en cuyas orillas se encontraban las poblaciones de Samacá, Sora y Cucaita. Posee un área de 27 hectáreas en el Valle de Samacá y forma un embalse de 1 millón 200 mil m³ para manejar un caudal derivado de 1 m³/s. El proyecto de construcción del embalse tenía como objetivos: la regulación de inundaciones originadas por crecientes del río Gachaneca, el desbordamiento de los canales de drenaje, quebradas y vallados, el suministro de agua durante las prologadas sequías en los veranos (hasta casi 6 meses) y la necesaria ampliación del riego en el valle de Samacá.

7.1.5 Embalse Bella Coyaima Indiana

Ubicado en el departamento del Tolima, fue construido para suplir agua de riego en un territorio de zonas áridas, de 4 resguardos indígenas (Chenchas Amayarco, Balsillas, Zanja Honda y Tunarco), cubriendo hasta 24.600 hectáreas. Tiene 30 m de altura y 850 m de longitud, en este proyecto se tomarían aguas de la quebrada Chenche y desviarán aguas del río Saldaña (a razón de 16 m³/s), mediante un canal, con el fin de acumular 22 millones de metros cúbicos, inundando una superficie de 300 hectáreas, lo cual hasta 2006 no había ocurrido.

Figura 96. Localización geográfica proyecto.



Triángulo del Tolima. Fuente: INAT - INCODER, <https://es.slideshare.net/Alvaropuentesm/conpes-3357-jun2005>.

Las obras del proyecto de adecuación del embalse Bella Coyaima Indiana, se desarrollaron en las tierras Triángulo del Tolima. La primera fase del proyecto, que contempló la construcción de la bocatoma del río Saldaña y un tramo de 9.6 kilómetros de conducción de las aguas hasta la presa Zanja Honda, ubicada en el municipio de Coyaima, tuvo una duración de dos años.

En una segunda etapa se desarrollaron los trabajos de infraestructura en lo que tiene que ver con canales y otras adecuaciones en riego. Entre 1998 y 1999 se construyó una pequeña presa vertedora “Dulce Coyaima Indiana”, novedosa por ser la primera en concreto rodillado.

7.1.6 Embalse Guacas

Está ubicado en la vereda Guacas, al norte del Valle del Cauca donde reabastece de agua cruda a nueve poblaciones en siete municipios rurales, que albergan a 200.000 habitantes y fue construido con el fin de garantizar el suministro estable de este recurso hasta el año 2025. Ocupa un vaso topográfico que acumula 18 millones de m³, de los cuales son útiles entre 12 y 15 millones. El lago tiene una longitud de 3 km y 2.5 km de ancho, su nivel mínimo de operación está en la cota 1.392.50 e inunda un terreno de 115 hectáreas a la cota 1.408 m de altitud.

Foto 34. Panorámica embalse Guacas.



Fuente: www.ingetec.com.co.

En 1992 Acuavalle propuso la construcción de un micro embalse denominado Aldana, con capacidad de 3,8 Mm³, en una quebrada de la margen izquierda

del río Pescador. Posteriormente la CVC cambió la ubicación del proyecto a un nuevo sitio sobre el cauce del río Pescador, con 18,0 Mm³ de capacidad y lo denominó lago Guacas. En 1998 CVC-Acuavalle iniciaron el diseño, contratado con Hidrooccidente y la asesoría de Ingetec, quienes lo desarrollaron entre 1.998 y 2.000, con recursos de la venta de la hidroeléctrica Salvajina.

Información técnica del embalse Guacas

- Año de inicio de construcción del proyecto: 2001
- Año de terminación del proyecto : 2003
- Período de diseño : 25 años
- Población beneficiada al año 2025 : 100.000 habitantes
- Caudal máximo de diseño : 585 l/s
- Nivel máximo de operación : 1408 msnm
- Volumen total del embalse : 17.7 millones m³
- Capacidad útil del embalse : 12.0 millones m³
- Presa tipo enrocado con una cara en concreto altura total : 42.5 m
- Longitud total de la red de construcción : 87.380 m

La finalidad del embalse es múltiple puesto que cumple las siguientes funciones:

- Aporta agua cruda a plantas de tratamiento de nueve poblaciones con gasto de 600 - 700 l/s.
- Aporta agua de riego (hasta 300 l/s) para 500 ha, distribuidas en pequeñas áreas de la parte baja, a la salida del Valle del Cauca.
- Controla inundaciones en el área urbana de Bolívar y en zonas bajas de los corregimientos de Guare y San Fernando.
- Eco recreación y turismo en la zona del embalse.

Sin embargo la generación eléctrica se desechó como finalidad de esta obra, por no ser rentable para la Compañía Eléctrica de Tuluá.

La fuente hídrica el pequeño río Pescador recoge aguas en una cuenca de 100 kilómetros cuadrados (10.000 ha) de los ríos Calamar y Platanares, con caudal medio de 1.2 metros cúbicos por segundo, caudal medio de verano del orden de 0.2 - 0.4 m³/s. El caudal regulado es de 0.85 m³/s., entregarían 0.3 m³/s., para riego y 0.55 m³/s., para los acueductos. La creciente para el período de construcción se calculó en 30 m³/s., y la máxima probable de 72 m³/s.

El llenado comenzó oficialmente el 22 de mayo del 2002. En condiciones hidrológicas normales debería haberse llenado en un período de dos a ocho

meses, sin embargo al comenzar octubre del mismo año, apenas había acumulado un tercio de su volumen. En ese momento se calculó que para una vida útil de 50 años llegan al embalse 5.7 Mm³ de sedimentos.

7.1.7 Embalse del Guájaro

Este embalse se conformó a partir del uso de la ciénaga de Guájaro ubicada en el departamento del Atlántico. Entre 1955 y 1956 se construyó un dique de 70 km de longitud para control de inundaciones y se desecó parte de la ciénaga, manteniendo una superficie de agua de 16.000 hectáreas, la cual se denominó embalse de Guájaro. Su longitud N-S es de 22 km, tiene 8 km de ancho máximo y almacena aproximadamente 410 Mm³, de los cuales 294 son embalse útil, en la cota 4.80 msnm.

El embalse es producto de la modificación del área de plano inundable de la cuenca del río Magdalena, por medio de la construcción de un terraplén de 11 km de longitud en los cauces de pequeñas ciénagas como Ahuyamal (400 ha), Cocordo (140 ha), Cabildo (1025 ha), Quintanilla (35 ha), Zarzal (110 ha), Playón de Hacha (420 ha), Cortadera (35 ha), Limipia (1420 ha), Gallitos (225 ha), Puerco (190 ha), Manzanilla (40 ha), Verde (70 ha), Quemado (35 ha) y el Guájaro (4780 ha), que en total ocupaban un área de 8925 ha.

Foto 35. Embalse del Guájaro.



Fuente: Autor.

En épocas de inundaciones, estas ciénagas daban lugar a unas 10.000 ha aprovechables para la pesca, sin embargo con la construcción del embalse, esta función fue desplazada por la de suministro de agua a toda la zona comprendida

dentro del distrito de riego (cerca de 16.000 ha), actividad contradictoria en la mayoría de los casos con el desarrollo de la pesca.

Información técnica del embalse

- Ubicación: departamento del Atlántico, municipio de Repelón.
- Área de superficie: 16.000 ha.
- Volumen: 400 Mm³
- Volumen útil: 230 Mm³
- Temperatura en la superficie: 31 °C

Hacia el año 1965, el INCORA continuó con los programas de desecación de ciénagas y reforma agraria, adjudicando a cada familia entre 6 y 8 ha para riego en secano para la agricultura y desde 1967, se vienen adjudicando entre 12 y 15 hectáreas para la ganadería.

7.1.8 Embalse El Hato

Está ubicado en el municipio de Carmen de Carupa, a 20 km de Ubaté, vía Carmen de Carupa. Su capacidad de almacenamiento es de 13.2 Mm³. Fue construido por la CAR en el año de 1990, para el abastecimiento del acueducto del municipio de Carmen de Carupa.

Foto 36. Panorámica norte del embalse El Hato.



Fuente: CAR.

7.1.9 Embalses Matuya y Playon distrito de riego de María La Baja

Los embalses de Matuya 200 Mm³ de agua y un área inundable de 1500 ha y Playón o Arroyo Grande 700 ha , creados para surtir el distrito de riego de María la Baja, han sido utilizados históricamente por las comunidades campesinas y étnicas para el desarrollo de sus prácticas agrícolas y pesqueras, quienes no comprenden en qué momento y bajo qué medidas fueron adjudicadas estas tierras para uso privado. Fuente: <https://www.ayudaenaccion.org.co/2015/08/04/cuerpos-de-agua-maria-la-baja-en-emergencia-ambiental-por-cultivos-de-palma/>

Foto 37. Embalses Matuya y Playon Distrito de riego María La Baja.



Fuente: Autor.

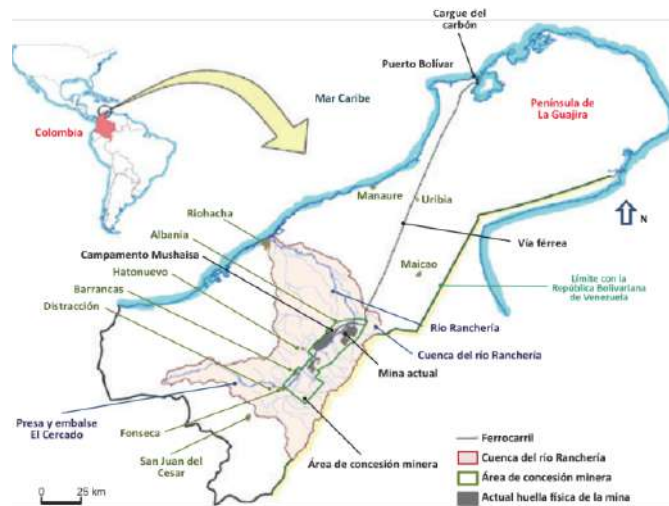
El distrito de riego tiene una superficie bruta de 19.100 ha, de las cuales potencialmente se pueden beneficiar con riego y drenaje 16.800 ha. Actualmente se benefician con riego a través de este embalse, 6.362 ha, en posesión de 1.529 usuarios.

7.1.10 Represa del Ranchería

Está ubicada en Riohacha y se abastece con aguas del río Ranchería, llamado ‘El Cercado’. Se forma a partir de una presa que funciona como una muralla, cuya altura es de 110 m y se levanta entre San Juan del Cesar y Distracción, ocupando 640 ha de terreno . El río corre por un túnel de 638 m, dejando seca la zona donde se encuentra una de pirámide invertida, que retiene el agua con la cual se llena el embalse y luego se dirige el líquido controladamente hacia una tubería que está construida en dos direcciones: una hacia San Juan del Cesar que irriga aproximadamente 3.500 ha y otra hacia el sector conocido como Ranchería. Desde estos puntos se lleva el líquido hacia Fonseca, Distracción,

Barrancas, Hatonuevo, Maicao, Albania, Uribia y Manaure, pueblos ubicados en pleno desierto guajiro.

Figura 97. Ubicación de la represa Ranchería.



Fuente: http://www.biodiversidadla.org/Portada_Principal/Documentos/Exterminio_en_Colombia_privatizan_un_rio_y_matan_de_hambre_a_14_mil_indigenas.

Todo el sistema de transporte de agua se realiza mediante tubería de 1.10 m de diámetro, resistente a la alta presión, ya que el líquido se moviliza de forma presurizada en su interior, hecho que garantiza un servicio adecuado para el riego de cultivos por el sistema de aspersión.

Características de la represa

Los componentes técnicos de la presa de embalse El Cercado, poseen una estructura que sirve para almacenar las aguas del río Ranchería y abastecer de agua a los distritos de riego y acueductos de nueve municipios durante las 24 horas del día. El embalse se construyó enrocado con cara de concreto, con las siguientes características:

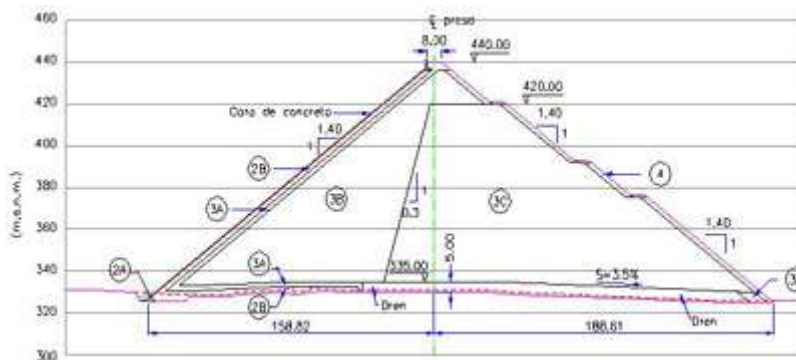
- Altura de la presa : 110 metros.
- Volumen total del embalse : 198 Mm³.
- Volumen útil del embalse : 194 Mm³
- Volumen del embalse muerto : 4 Mm³
- Cota de la cresta : 440 msnm

- Nivel máximo de operación : 435 msnm
- Nivel mínimo de operación : 360 msnm
- Longitud de la cresta : 370 m
- Ancho de la creta : 8 m
- Área inundada con nivel máximo normal : 638 ha
- Capacidad del rebosadero : 1.250 m³/s.

La presa enrocada con cara de concreto, es un terraplén de material granular protegido con una losa de concreto como elemento impermeable, ubicado en la cara del talud de aguas arriba.. La red de conducción al distrito de riego de Ranchería, toma el agua de la presa derivadora, del cauce del río Ranchería y se transporta mediante conducciones de canales de concreto reforzado, cuyo ancho varía entre 3.2 y 5.7 m y está conectada a una tubería de distribución de 2.2 m, con capacidad de 10.5 m³/s.

La conducción al distrito de riego de San Juan del Cesar toma el agua del tanque dissipador de presión de 2.8 m de ancho y 24 m de largo, que cuenta con una válvula reguladora conectada a una conducción de 2.2 m de diámetro para transportar 2.5 m³/s.

Figura 98. Estructura de la represa Ranchería.



Fuente: Incoder.

7.2. REPRESAS Y/O EMBALSES

Una represa es un lago artificial que se construye sobre el cauce de un río, mediante la conformación de una presa que detiene el agua con el fin depositarla para regadío, acueducto, generación de energía, pesca, navegación y recreación.

En nuestro país contamos con algunos lagos artificiales, comúnmente denominados represas o embalses, los cuales son construidos para diferentes propósitos, entre ellos la reserva de agua para una ciudad o región, como ocurre con el embalse de San Rafael, la represa de la Regadera y el embalse del Sisga, que surten de agua al acueducto de Bogotá. También existen represas construidas para la generación de energía o hidroeléctricas, como la represa de Betania en el Huila, Hidroprado en el Tolima, Riogrande y Guatapé o Peñol en Antioquia.

Otras además de ser reservas de agua, cumplen funciones de recreación y esparcimiento, como son la de Tominé en Cundinamarca y la de Calima en el Valle del Cauca.

7.2.1 Embalse de La Regadera

Localizado en el departamento de Cundinamarca, en la cuenca del río Chisacá a una altura de 3000 msnm, entre las coordenadas 963.600 N y 980.500 E. Se construyó entre 1935 y 1938, para resolver el creciente problema de falta de agua potable para la ciudad de Bogotá, principalmente en la época de verano. Su operación consiste en mantener suficiente agua para el tratamiento y potabilización.

Foto 38. Embalse La Regadera.



Fuente: Autor.

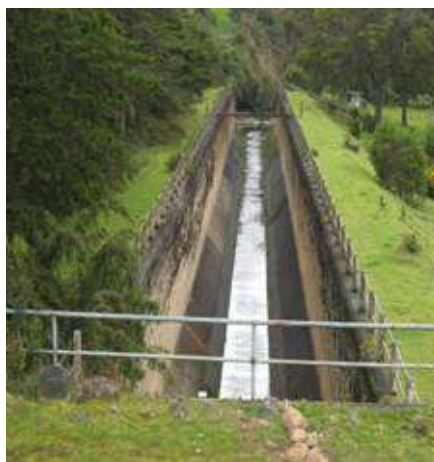
Información técnica del embalse

El embalse de la Regadera se construyó hace ya sesenta años para almacenar 4'070.000 m³ de agua. La batimetría de 1.995, la capacidad es de 3'787.846 m³, lo cual indica que la tasa de sedimentación por año es del orden de $282.154/60 = 4.700 \text{ m}^3/\text{año}$. Se utiliza para abastecimiento y regulación. Posee un túnel de salida de sección circular de 6 m de diámetro y 90 m de longitud, que descarga en un canal de sección mixta de 132 m de longitud, el cual se ensancha para llegar aguas abajo al río Tunjuelo. Desde su construcción, no se han hecho modificaciones de fondo.

Características

Presas de 34 m de altura, volumen embalsado 4,13 millones de m³, área embalsada 41 ha, con un área aproximada de 167 km². Esta cuenca hidrográfica que surte la represa La Regadera está compuesta por las subcuencas de los ríos Chisacá, Lechoso o Mugroso y Curubital, conformando la parte alta de la cuenca del río Tunjuelo.

Foto 39 y 40. Espaldón de la presa y canal abierto para conducción, de la represa La Regadera.



Fuente: Autor.

En 1996 se hizo un refuerzo estructural en la presa, para darle resistencia ante sismos fuertes por encima de 7.0 en la escala de Richter. Básicamente se incorporó un filtro sobre el espaldón de aguas abajo, que permite el drenaje controlado de filtraciones e impide la erosión del núcleo central en caso de agrietamientos.

El talud aguas arriba es enrocado y el espaldón está recubierto con concreto, presenta taludes separados por una corona de 12 metros de ancho. Aguas abajo de la presa se encuentra ubicada la casa de máquinas, en un sitio poco apropiado para ello, ya que representa un peligro para los operarios, cuando hay crecientes.

Rebosadero. Es una estructura *Morning Glory* de 13 m de diámetro y 30 m de altura, con 10 pilas sobre la cresta, cada una de 0.60 m. Su cota máxima está a 3.002 msnm.

Estructura de toma. Es una torre con cinco niveles de captación, formada por tuberías horizontales de 60 cm de diámetro y un colector vertical común de 85 cm de diámetro.

- **Área superior : 41 ha**
- Volumen total : 4´135.000 m³
- Volumen aprovechable : 4´000.000 m³
- Profundidad media : 26.24 m
- Temperatura promedio : 14° C
- Altura de la presa : 34 m
- Altitud cota cresta vertedero : 3002 msnm
- Caudal presa : 1.07 m³/s
- Caudal del río Curubital : 1.47 m³/s
- Caudal del río Chisacá : 1.5 m³/s

En la cuenca predomina un clima tropical frío lluvioso, que es modificado por la altura de las montañas. La pluviometría de la zona aumenta de noreste a sureste, con valores que oscilan entre 670 y 1.428 mm anuales, siendo enero el mes más seco y los meses de mayo, junio y julio los más lluviosos. La temperatura media anual de la zona es de 12°C, siendo julio el mes con el valor promedio más bajo (11°C) y octubre el mes con el valor más alto (12. 6°C).

El relieve que predomina en la cuenca es quebrado, con pendientes fuertes que van desde 25 a más del 50%, con laderas empinadas, zonas escarpadas y algunos afloramientos rocosos.

7.2.2 Embalse del Neusa

Ubicado en el departamento de Cundinamarca a una altitud de 3.269 m. Fue construido con el objetivo de regular el caudal del río Bogotá, para utilizar sus aguas en el acueducto de la planta de Tibitó y también ayudar a solucionar los problemas de energía en época de sequía, en la planta del Charquito.

La cuenca del embalse del Neusa, comprende un área de 13.500 ha, incluye los municipios de Tausa con 11.341 ha, Cogua con 2.209 ha y una extensión aproximada de 995 ha, con un volumen máximo a embalsar de 103 Mm³, provenientes de los principales ríos embalsados: Las Juntas, Cubillos y Siguateoque.

Foto 41. Panorámica embalse del Neusa.



Fuente: Autor.

Información técnica del embalse

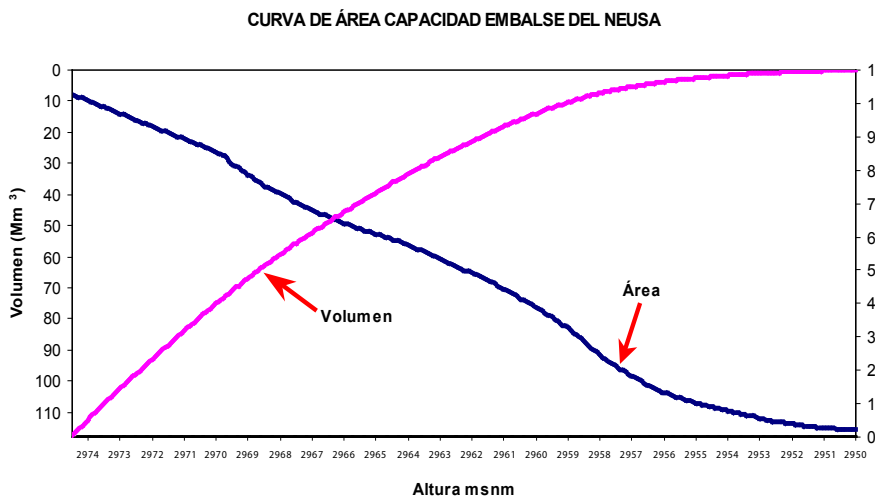
Presa. Tiene una altura de 46.5 metros, la cota de la corona se encuentra a 2977.5 msnm, su túnel de desviación tiene 3.380 m de longitud, con una sección de herradura de 5.25 m² y su capacidad de descarga máxima es de 16.1 m³/s. El vertedero es un canal abierto revestido en concreto de 200 m de longitud, con una capacidad de 133 m³/s, localizado en la margen derecha, sobre la cota 2.975 msnm y la descarga es controlada por tres compuertas de 2.5 metros de altura. Para el control filtraciones en la presa y sus estribos, se instalaron 15 piezómetros de tubo abierto, distribuidos en el área del rebosadero, la cresta y el espaldón de aguas abajo de la presa.

Datos básicos del embalse. La capacidad originalmente definida del embalse es de 102 millones de m³ a la cota máxima de aguas de 2,974.50 msnm. Tiene una longitud de 7.5 km y un ancho máximo de 1.8 km. La bocatoma de descarga es una torre de 41.5 metros de altura, además de sistema de operación mecánica y eléctrica, una de mariposa y otra de chorro.

Dentro de los datos hidrológicos para este embalse, vale anotar que el promedio de afluencia es de 1,73 m³/s con un rendimiento de toda la cuenca de captación de 12,6 lt/s/km² y el de descargas de 1,77 m³/s.

Con base en la nueva batimetría del embalse en el año 2004, se encontró un incremento del 14.1%, con respecto a los cálculos de su capacidad original. Este volumen se encuentra entre las cotas 2950 msnm (nivel de mínima operación) y 2974.5 msnm (nivel de máxima operación). Igualmente se encontró diferencia con el embalse muerto calculado originalmente por debajo de la cota de mínima operación, de manera que éste tuvo un valor de 0.70 millones de m³, en la batimetría de 2004. Esta diferencia obedece a probables errores por los métodos empleados hace 53 años, ver grafica 99.

Figura 99. Curva de área - capacidad, embalse del Neusa.



Fuente: Boletín Estadístico de hidrología y climatología CAR 2011.

Afluencias históricas. Las lluvias en la cuenca del embalse del Neusa, tienen un comportamiento bimodal y en coherencia con este régimen, las afluencias al embalse guardan la misma tendencia. Como en otros embalses, el cálculo de éstas se hace mediante el balance diario del volumen embalsado y la descarga. Es decir, la afluencia total es el resultado de sumar el incremento del volumen, que puede ser positivo o negativo, más la descarga del respectivo día.

El embalse hace parte del parque recreacional Embalse del Neusa que es administrado por la CAR. Entre las funciones que cumple se encuentran el suministro de agua para el acueducto, la regulación y control de la inundación aguas abajo, cría y pesca de la trucha y la práctica de deportes náuticos (CAR et al. 1997).

7.2.3 Embalse del Sisga

Este embalse se clasifica como de “servicio múltiple”, es decir que está diseñado y podrá ser operado para control de avenidas, regularización de caudales para irrigación y uso doméstico o producción de energía hidroeléctrica y atracción turística y pesca.

Se ubica en el municipio de Chocontá, departamento de Cundinamarca, a 2.774 m de altitud, en las coordenadas geográficas 05° 04' N y 73° 44' E. Su área es de 700.000 ha, su volumen de 14.9 millones de m³ y recibe aportes del río San Francisco y la quebrada Santa Marta, principalmente.

Se construyó con el objeto de almacenar aguas de invierno, para regular los caudales necesarios en la planta Tibitoc, que abastece cerca de un 40% de la demanda total de agua de Bogotá. También cumple la función de controlar las inundaciones en la Sabana de Bogotá, mediante la regulación de los caudales máximos en la cuenca del río Sisga.

Foto 42. Panorámica embalse Sisga.



Fuente: Autor.

Información técnica del embalse

Presas. Tiene 52 metros de altura, la cota de la corona se encuentra a 2674.5 m de altitud, el túnel de salida es de 346 m de longitud con sección de herradura de 8.5 m², que opera como descarga de fondo con una válvula Howell Burguer de 42” de diámetro (foto 42) y capacidad máxima de 15 m³/s. El vertedero es un canal abierto de 650 m de longitud, revestido en concreto, localizado en la margen derecha y tiene capacidad de 160 m³/ (para un nivel del agua de

2672.45 msnm). Para el control del comportamiento de las filtraciones en la presa y sus estribos se instalaron 14 piezómetros de tubo abierto, los cuales se monitorean diariamente.

Foto 43. Panorámica de la casa de máquinas del embalse del Sisga, con la válvula descargando 3.0 m³/s.



Fuente: Autor.

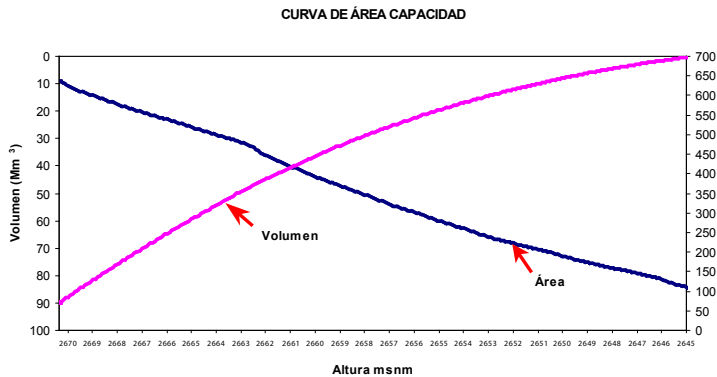
Capacidad del embalse. La capacidad inicial del embalse era de 101.2 millones de m³, a la cota máxima de 2670.35 msnm). Sin embargo en el año 2004 la CAR actualizó la batimetría del vaso y encontró una variación del 11%, con respecto a su capacidad original, esta diferencia es producto de la colmatación natural del embalse durante 53 años de funcionamiento y posiblemente también se debe al uso de métodos diferentes para el cálculo de su capacidad, en cada época.

- Cota máxima de operación : 2670.35 msnm
- Cota mínima de operación : 2648.90 msnm
- Cota para almacenamiento de crecientes : 2674.30 msnm
- Cota del rebosadero : 2674.50 msnm

Curva cota nivel y área capacidad. Teniendo en cuenta la batimetría realizada por la CAR en el año 2004 y las diferencias que se encontraron respecto a los valores de área y capacidad originales del embalse se ajustaron sus curvas de funcionamiento (Figura 100).

Entrada al túnel. La longitud del túnel de salida es de 346,27 m. A la entrada posee una compuerta deslizante controlada por malacate.

Figura 100. Curva de área -capacidad, para el embalse del Sisga.



Fuente: Boletín Estadístico de hidrología y climatología CAR 2011.

Tubería de descarga. Tiene un $\phi = 54'$ con espesor de $5/8''$ y una longitud aproximada de 212.46 m. Está provista de un tubo de Pitot que indica el nivel del agua en el embalse y para medir la descarga cuenta con un medidor Simplex tipo MOLA. De esta tubería se desprende otra de drenaje, controlada por una válvula de $8''$. En el extremo posee una válvula de anillo Howell-Bunger de $42''$ para control de descarga. Entre la toma y la descarga hay una diferencia de nivel de 6 m.

En el nivel máximo de agua del embalse, en la cota de la cresta del rebosadero 2.670 msnm, se obtiene una descarga de $\approx 15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Piezómetros de tubo abierto. En 1969 la presa comenzó a agrietarse en el estribo izquierdo, además de presentar filtraciones, debido a que el nivel del embalse superó el normal y llegó a la cota 2668.68 m. Fue necesario estudiar el problema y se contrató una firma mejicana para restaurar la presa. Dentro de este trabajo se instalaron catorce piezómetros de tubo abierto, localizados en los estribos cerca al contacto con la presa.

Esta instalación tuvo como propósito controlar el efecto que producen las filtraciones, lo cual se detecta por el aumento de los niveles piezométricos al aumentar el nivel freático.

Valores históricos del Sisga

La operación diaria del embalse está a cargo de la CAR, entidad que genera información relacionada con: cotas diarias del embalse, volúmenes diarios,

descargas diarias, lluvias diarias, filtraciones de la presa y evaporación del tanque.

Histograma de volúmenes. Para este embalse existe información de volúmenes diarios en medio digital desde 1987, la cual representa un soporte técnico de gran relevancia en cuanto a su evolución histórica que sirve como referencia para hacer análisis y proyecciones de su funcionamiento.

Afluencias históricas. Las lluvias en la cuenca receptora del embalse del Sisga, tienen un comportamiento unimodal y los afluentes que llegan al embalse, guardan esa misma tendencia.

7.2.4 Embalse de Chuza

Se encuentra en el departamento de Cundinamarca, en la vertiente de Chingaza, a una altura de 2.990 m, entre las coordenadas $4^{\circ}37'737$ N y $73^{\circ}44'118''$ O. Su propósito principal es la provisión de agua potable para el 80% de la población bogotana. Fue construida entre 1974 y 1978, la presa tiene 127 metros de altura, el área de la cuenca abastecedora es de 207 km² y las corrientes que fueron represadas para su construcción fueron las de los ríos Guatiquía y Chuza.

Foto 44. Panorámica del embalse de Chuza.



Fuente: Autor.

Información técnica del embalse

Cuenta con un volumen total de 250 Mm³ y un volumen útil de 225 Mm³. La curva de nivel guía para este embalse se proyectó de manera que permite mantener los niveles adecuados para recolectar los excedentes de precipitación de las temporadas de invierno en Chingaza y desembalsar en la temporada de sequía, lo cual garantiza la entrega de un caudal permanente. El embalse consta de las siguientes obras:

Dique auxiliar. Se localiza a un kilómetro aguas arriba de la presa principal, sobre la margen izquierda y su nivel se encuentra a 3002 msnm. Este dique cierra una depresión del embalse y está constituido por una presa de gravas con taludes simétricos 2:1, además de un núcleo impermeable de material arcilloso. La altura máxima es de 23 m y el terraplén forma un volumen de 120.000 m³.

Cuenta con 7 piezómetros de tubo abierto para medir el nivel del agua dentro del relleno y la fundación, medidor de caudal para filtraciones a través de los rellenos, platinas de asentamiento para detectar los asentamientos inducidos por el peso propio de los rellenos y por efecto del embalse, puntos y mojones superficiales para el seguimiento de movimientos en los espaldones del dique, mediante controles topográficos de precisión y pluviómetro.

Rebosadero. Se ubica cerca al dique auxiliar y está compuesto por un rebosadero propiamente dicho de 44 m de longitud, con una estructura de vertimiento en la cota 2990.6 msnm. El rebosadero es un vertedero de emergencia, cuya descarga conduce a un pequeño cauce localizado en la divisoria de la cuenca del río Negro, afluente del río Guavio. A continuación se dispone de un dique auxiliar que cuenta con cara impermeable y núcleo de arcilla, cuya cresta está en la cota 3002 msnm, con 175 m de longitud y 6 m de corona, con taludes simétricos 2:1.

Túnel de desviación. Para la construcción de la presa principal, se desvió el río Chuza por medio de un túnel que fue construido sobre la margen derecha del mismo, el cual tiene un diámetro de 5.8 m, así como una sección en herradura y fue diseñado con una capacidad de 220 m³/s y longitud de 752 m. El portal de entrada del túnel está situado en la cota 2881 msnm cerca de la desembocadura de la quebrada de Golillas, mientras que el portal de salida está en la cota 1873 msnm, en la margen derecha del río Chuza. En su interior cuenta con un tapón en concreto de 10 m y un sistema de válvulas tipo *Howel Bunger* para control de la descarga y aguas arriba una válvula de guarda tipo mariposa, con su respectivo *By-Pass*.

Infraestructura para instrumentación y control de la presa. La estabilidad de la presa está controlada mediante el monitoreo de movimientos del relleno y niveles de agua. Cuenta con 8 piezómetros de tubo abierto para medir el nivel de agua en el relleno y en la fundación, un medidor de caudal para el aforo de las filtraciones a través de los rellenos y los estribos, 39 indicadores hidráulicos para control de asentamientos internos de la presa, indicadores de movimiento horizontal y vertical para control superficial, piezómetros y vertederos en las galerías de inyección y drenaje de la presa, acelerógrafos, miras para el control del nivel del embalse y pluviómetro.

Pozo de compuertas. El pozo de compuertas de 65 m de altura está localizado aproximadamente a 180 m de la bocatoma del río Chuza, posee una cámara seca que aloja dos compuertas deslizantes de 1.6 x 2.5 m, por medio de las cuales se realiza el cierre total en la conducción cuando se requiere practicar alguna inspección del túnel de Palacio-Río Blanco. En la base del pozo se encuentra una tubería en 300 mm de diámetro con tres válvulas, dos de compuerta de guarda y una de mariposa de servicio. Durante las labores de reconstrucción del túnel desarrolladas en 1985, fue necesaria la excavación de un pozo auxiliar paralelo al existente. En el sitio de pozo de compuertas, se encuentran instaladas unas miras para la medición de los niveles del embalse.

Túnel Palacio - río Blanco. Con este túnel se inicia la conducción de agua del embalse de Chuza a la Planta Wiesner. La entrada de agua al túnel se controla por una estructura de toma, denominada Bocatoma de Chuza, cuya solera está en la cota 2930 msnm. La estructura forma una caja rectangular de 4 m de largo por 5 m de ancho y 6 m de alto, en la cual la apertura superior está protegida por una rejilla metálica. Desde la bocatoma del embalse de Chuza hasta el sitio de ventanas, tiene una longitud de 18385.26 m. En este sitio el túnel recibe la ventana de acceso del río Blanco y está ubicada la cámara de la válvula *Howell Bunger*.

El túnel está compuesto por varios tipos de secciones transversales: las del tipo herradura sin revestir, de 3.70 m de diámetro, las de herradura con concreto neumático, las de herradura con soportes de acero, las de herradura con revestimiento de concreto, la circular revestida de concreto de 3.20 m de diámetro y la circular blindada de 2.72 m de diámetro, en el sector de la cámara de la válvula *Howell Bunger*.

Otras características importantes del embalse son:

- La presa principal sobre el río Chuza, está a 7 km al norte de la laguna de Chingaza.
- La cresta de la cota 3025 msnm, tiene 125 m de altura y volumen de terraplén aproximado de 1'200.000 m³.

- La presa auxiliar está ubicada a 1 km de la presa municipal.
- Posee rebosadero de canal libre de flujo libre.
- El túnel de desviación de 560 m de longitud se usa como conducto permanente de desfogue.
- La capacidad neta es de 60´000.000 m³, con un nivel mínimo de 2950 y máximo de 3020.

Descripción de la cuenca

La hoya utilizable del río Guatiquía comprende un sector tributario situado sobre la cota 2900 msnm y se divide en las siguientes áreas:

Embalse de Chuza con un área de 106 km² (incluyendo el chorro de Leticia), laguna Chingaza que ocupa 82 km² y el área no regulada del río Guatiquia (19 km²), para un *área* total de 207 km². El caudal del río Guatiquía es conducido al embalse de Chuza.

7.2.5 Embalse de San Rafael (La Calera)

El embalse de San Rafael está ubicado en Cundinamarca, en el kilómetro 14 de la vía a la Calera a una altura de 2.772 msnm y es parte vital del proyecto Chingaza. Fue construido entre 1992 y 1995, con una presa de 60 metros de altura y el objetivo de embalsar un volumen de 75 millones de m³. El área embalsada es de 371 ha y está formada por cuatro tributarios principales: el río Chisacá, Mugroso, Curubital y la quebrada Piedra Gorda. También es alimentado por el agua excedente del sistema Chingaza, en la planta del Sapo y recoge las aguas del río Teusacá.

Información técnica del embalse

El embalse está formado por una presa de tierra de 2.75 Mm³ en su cuerpo y 60 metros de altura, 7 m a la cota 2.776.5, un rebosadero de 400 m de longitud, un túnel de descarga de 4 m de diámetro y 495 m de longitud, así como una galería de acceso a la cámara de válvulas, una galería de inyecciones, drenaje y la adecuación de obras aledañas. A la cota 2.772 correspondiente al nivel normal del embalse, se almacenan 75 millones de metros cúbicos..

En el embalse se ubicó una estación de bombeo sumergida con 5 grupos para impulsar hasta 21 m³/s, por una tubería de 2.5 m de diámetro y 789 m de largo, con alturas de elevación entre 33 y 61 m hasta la planta de tratamiento del Sapo. El edificio de la estación de bombeo es un pozo circular de 47 m de altura y diámetro de 28.8 m, está ubicado en una isla del embalse comunicada con la orilla mediante un dique de acceso de 324 m de longitud y altura máxima de

16 metros, el cual también permite la buena circulación del agua que alimenta el embalse y la operación de las tomas superior e inferior de agua.

Foto 45. Panorámica embalse San Rafael.



Fuente: Trabajo de grado batimetría embalse San Rafael sistema de reserva para Bogotá y municipios aledaños, Barriga 2008.

Diseño de la presa y el dique. Está conformada por rocas de la edad terciaria y del cretáceo superior, cubiertas en gran parte por depósitos cuaternarios de origen diverso. Para la protección de los taludes de la presa se tuvo previsto una copa de enrocado en el talud de aguas arriba y la empradización del talud de aguas abajo, cuyos materiales se obtuvieron de la ladera lateral del embalse (limolitas, arcillolitas, arenisca arcillosa) y se hizo una desviación provisional del río Teusacá, durante la construcción de la presa. Conformado por un túnel de 4 m de diámetro útil.

Descarga de fondo del embalse. Con el fin de controlar el nivel del embalse y descargar los caudales requeridos por usuarios de aguas abajo, se dispuso de un sistema de descarga de fondo, consistente en dos válvulas: una con toma en la zona muerta del embalse y la otra con toma en el embalse útil. Las válvulas de control son de tipo *Howell-Bunger*, de 0.80 m de diámetro y tienen una capacidad para descargar un caudal variable de 8 o 22 m³/s, es decir 100.000 t/año.

A continuación se presentan otras características del embalse:

- Área a la cota 2772 : 371 ha
- Longitud : 2.4 km
- Profundidad : 50 m
- Volumen muerto : 5 hm³ (entre cotas 2722 y 2744 msnm)
- Volumen útil : 70 hm³
- Capacidad para amortiguación de creciente máxima probable : 15 hm³

Niveles

- Fondo : 2.722 msnm
- Mínimo Normal : 2.744 msnm
- Máximo Normal : 2.772 msnm
- Máximo Probable : 2.776 msnm

Presa

- Localización : Sitio tambor
- Tipo : Tierra
- Nivel de la cresta : 2.776.5 msnm
- Nivel del lecho del río : 2.722 msnm
- Altura máxima : 59
- Longitud de la cresta : 620 m
- Aguas abajo : 2.5 H: 1.0 V

Dique

- Tipo : Tierra
- Nivel de la cresta : 2.776.5 msnm
- Altura máxima : 15.0 m
- Aguas abajo : 2.5 H : 1.0 V
- Aguas arriba : 2.5 H : 1.0 V
- Volumen del relleno : 62.500 m³

Rebosadero. El embalse dispone de un rebosadero con capacidad importante de amortiguación por encima del nivel máximo normal. Este es de tipo abierto sin compuertas, con estructura terminal de disipación. Sus niveles son:

- Cresta del vertedero : 2.772 msnm
- Estructura de entrega : 2.708 msnm
- Longitud : 390 m
- En la cresta : 8.5 m
- En el canal : 8.5 m
- Capacidad de descarga : 131 m³/s

Sistema de bombeo. Se presenta una estación de bombeo en pozo circular, con estructura de toma adyacente de niveles. La aducción a la toma superior se hace mediante un canal de sección trapezoidal y a la toma inferior, por un canal trapezoidal y una galería de sección en herradura. Cada toma está provista de una compuerta y una reja.

Foto 46. Estación de bombeo del embalse de San Rafael.



Fuente: Autor.

Tabla 69. Resumen de los parámetros morfométricos y factores climáticos de la cuenca abastecedora del embalse de San Rafael.

Parámetros morfométricos		Factores climáticos	
Área (km ²)	67.0 km ²	Temperatura media	13.8 °C
Longitud	19.4 km	Velocidad del viento	2.24 m/s
Ancho	3.45 km	Brillo solar	4.24 h/d
Pendiente media	17.9	ETP	73.7 mm
Elevación media	3070.1 msnm	Precipitación anual	906.70 mm
Perímetro	48 km	Humedad relativa	76.0%

Descripción de la cuenca

La hoya utilizable para el embalse San Rafael la conforman los ríos: Chuza con 106 km² y caudal aprovechable de 6.6 m³/s, Guatiquía con 103 km² y caudal

aprovechable de 5.9 m³/s, Blanco con 70 km² y caudal aprovechable 3.1 m³/s, Chuza Norte con 110 km² y caudal aprovechable 4.8 m³/s, Chingaza Sur con 53 km² y caudal aprovechable de 3.0 m³/s, Teusacá con caudal aprovechable de 0.9 m³/s, además del sitio de presa con 68 km² y caudal aprovechable de 1.1 m³/s. En la tabla 68 se resumen los parámetros morfométricos y algunos factores climáticos de la cuenca.

7.2.6 Presa La Fe

Esta presa es propiedad de las Empresas Públicas de Medellín, se encuentra en el departamento de Antioquia, aproximadamente a cinco km del municipio El Retiro, 100 m arriba del sitio La Fe, donde confluyen la quebrada Las Palmas y el río Pantanillo. Su llenado se realizó en 1973 y se incorporó al sistema en 1974, a 2155 m de altitud, entre las coordenadas geográficas 1° 165.000 N y 1° 170.000 E.

La zona de captación del embalse La Fe (anteriormente embalse Los Salados), cubre un área de 173 km², con alturas que oscilan entre 2175 y 3000 msnm. Se sitúa en su totalidad en la formación vegetal bosque muy húmedo montano bajo, caracterizada por una precipitación media anual entre 2000 y 4000 mm. Recibe aguas de las quebradas Las Palmas, Potreros, La Miel y Espíritu Santo por gravedad y de los ríos: Pantanillo, Piedras y Buey por bombeo.

Su vertedero puede descargar en condiciones normales 690 m³/s (Abuchaibe *et al.* 1988). Las aguas del río Pantanillo son tratadas en una planta de tratamiento secundario localizada en el municipio El Retiro, antes de ser bombeadas a la represa La Fe, lo que disminuye la entrada de material particulado, pero no la de material disuelto.

Del volumen total del embalse calculado en 15 Mm³, 12 Mm³ son utilizados para regular (junto con el bombeo del río Pantanillo), un caudal de 8.0 m³/s, destinado al acueducto metropolitano a través de la planta de tratamiento de la Ayurá, localizada en el municipio de Envigado (Abuchaibe *et al.* 1988). Sin embargo una parte del mismo está destinada a la recreación en el Parque Los Salados y ocasionalmente es utilizada para generación hidroeléctrica.

7.2.7 Embalse de Tominé

Se encuentra en el departamento de Cundinamarca, a una altitud de 2600 msnm. El área de la cuenca del embalse es de 372 km² y está enmarcada dentro de las siguientes coordenadas planas: X₁=1°130.300, Y₁=1°020.200; X₂=1°045.390, Y₂=1°025.390. Sus principales afluentes son los ríos: Bogotá, Aves y Siecha.

Este embalse es una obra de gran magnitud con capacidad para embalsar cerca de 700 millones de metros cúbicos de agua, inundando un área de aproximadamente 40 km².

Foto 47. Panorámica del embalse de Tominé.



Fuente: Corporación Autónoma Regional CAR.

Información técnica del embalse

El establecimiento de este embalse requirió de obras auxiliares como la reubicación del municipio Guatavita. Para la construcción de la presa y el dique auxiliar, se realizaron excavaciones a la capa de arcilla orgánica bajo agua con el uso de una draga, cuyo material de desecho se colocó aguas arriba de la presa, a fin de formar un manto impermeable. El material arcilloso se reemplazó por arena fina con un porcentaje de arcilla de 5 - 10% y se colocó dentro de la dársena, en relleno bajo el agua.

La obra consta de tres partes principales: 1. La presa de Sesquilé sobre el río Tominé, 2. La estructura de control de Achury sobre el río Bogotá y el canal de aducción a la estación de bombas, y 3. La estación de bombas de Sesquilé.

Para resolver el problema de permeabilidad, se construyó una cortina impermeable de concreto, fundida en el sitio por el sistema de paneles y pilotes secantes, y el uso de bentonita para sostener la excavación.

Por otra parte, con el fin de disipar las posibles presiones del agua embalsada, aguas abajo de la presa, se construyeron cinco pozos de alivio.

A continuación se presentan otras características del embalse:

Embalse

- Capacidad útil : 690'000.000 m³
- Embalse muerto : 15'000.000 m³
- Área inundada : 3830 ha
- Cota de inundación : 2605.50
- Cota mínima : 2571.75
- Cota cresta de rebosadero : 2603.50

Presa: presa de tierra con núcleo de arcilla inclinado y cortina impermeable. Está situada sobre un valle aluvial, con afloramientos de la formación Guadalupe Superior y suelos arcillosos de 6 - 8 m de espesor.

- Altura : 41.5 m
- Longitud de la cresta : 358 m
- Cota de cresta : 2607.0
- Talud : 2.5: 1

Cortina impermeable: muro de concreto continuo, fundido en sitio.

- Espesor : 0.55 m
- Profundidad máxima : 80 m
- Área total : 16.400 m²

Pozos de alivio.

- Cantidad : 5
- Diámetro : 4"
- Profundidad : 35 - 50 m

Rebosadero. Estructura de caída de concreto y canal de desagüe sin revestir, que tiene una capacidad de 50 m³/s.

Túnel. Circular con revestimiento de concreto reforzado. Atraviesa rocas areniscas, liditas y limolitas y en su centro se inyectó una cortina radial para reducir filtraciones. A la entrada del túnel se instaló una compuerta de 2.50 x 4.76 m, de 22.7 t, deslizante sobre plano inclinado, accionada por un malacate eléctrico. Antepuesta a la compuerta hay una reja coladera de 8.9 t de peso.

- Diámetro interior : 3.20 m
- Longitud : 193 m
- Espesor de revestimiento : 0.40 m

Dique auxiliar: terraplén compactado, con núcleo inclinado de arcilla.

- Altura : 31 m
- Longitud de la cresta : 585 m
- Cota de la cresta : 2607
- Talud : 2 : 1
- Excavación : 71.900 m³
- Terraplén compactado : 398.000 m³
- Zona de transición : 56.000 m³
- Núcleo de arcilla : 68.000 m³
- Volumen total del terraplén : 522.000 m³

Estación de bombas. Estructura en concreto reforzado, cubierta metálica y asbesto-cemento. Consta de dos turbo bombas semiaxiales, cada una con capacidad de 8 m³/s.

Canal de aducción y descarga. Con una longitud de 3.188 m, sección trapezoidal, ancho de fondo variable entre 2 y 6 m, y taludes 2:3 y 4:1

Dársena. Longitud de 120 m, sección trapezoidal, ancho de fondo variable entre 2 y 25 m, taludes: 3:1, cota mínima: 2563 m y cota máxima normal: 2565.45 m.

Control de Achury. Estructura en concreto con una compuerta radial principal y dos compuertas laterales deslizantes.

- Altura : 7.6 m
- Ancho : 7.7 m
- Longitud : 8.9 m
- Compuertas : Una radial de 3.05 m x 6.70 m
- Cota de solera : 2562.4
- Cota aguas máximas : 2565.45

Descripción de la cuenca. El área tributaria de la hoya del río Tominé en el sitio de la presa, es de 354 km². En la cuenca se presenta una precipitación media anual de 1.080 mm, el coeficiente de escorrentía es 34%, el caudal medio del río Bogotá (Achury) es de 10.0 m³/s y el del río Tominé es de 4.1 m³/s.

7.2.8 Embalse de Cantarrana

Está ubicado sobre el río Tunjuelito a la cota 2695 m de altitud y tiene una capacidad de almacenamiento de 50 Mm³. Las catastróficas inundaciones del barrio Tunjuelito, particularmente la de junio de 2002, pusieron bajo el agua 20 manzanas de viviendas, a profundidades de hasta 2.5 m. La inundación con aguas negras afectó a 3.000 personas, así como una parte del tramo Usme - Los Molinos del sistema de transporte Transmilenio, recién inaugurado, hechos reforzaron la necesidad de construir este embalse.

Foto 48. Represa Cantarrana.



Fuente: <http://www.silcarsa.com/wp-content/uploads/slider-007.jpg>.

Información técnica del embalse

La obra consiste en un canal excavado de 1200 m de longitud, con una pendiente aproximada de 0.16 % y 7.50 m de base. Su altura es de 3.8 m, con taludes indicados de 1.5 H y 1.0 V. Tiene capacidad para conducir 78 m³/s, caudal actualmente establecido como promedio para transporte a lo largo del corredor del río Tunjuelo. El canal debe ser complementado con un vertedero de excesos y una rápida o estructura escalonada, que permita manejar los caudales mayores que no transitarán por el canal temporal, sino por el vertedero, los cuales se embalsarán en Pozo Azul y Santa María.

La empresa de acueducto comenzó la construcción del “Sistema Cantarrana” en marzo de 2005, obra que incluyó el realce de diques, dragado del cauce en un tramo de 15 kilómetros, la construcción de interceptores y corrección de las quebradas del sector. En ese momento el sentido del embalse fue modificado y se le dio el nombre “seco”, ya que permanecerá vacío en verano. Fue ubicado a un kilómetro de la quebrada Yomasa en una superficie de 120 ha. El caudal de entrada durante la creciente se estimó en 170 m³/s, con un tiempo de llenado de 7 horas y un caudal de salida regulado de 70 m³/s, con un tiempo

de vaciado de 10 horas. Según lo planeado para la construcción y conformación del embalse, se realizarían obras adicionales de mejoramiento del entorno con vías peatonales, senderos y ciclo ruta de cuatro kilómetros con arborización e iluminación, jardines y miradores.

Capacidad de la represa. La capacidad de la represa es de 53.8 Mm^3 , para un nivel de aguas de 2705 m.

Presa. La presa es de tipo homogénea en tierra, de 38 m de altura, con núcleo impermeable y 600 m de longitud de cresta. Las obras del relleno de la presa incluyeron una ataguía y una contra-ataguía para la protección contra inundaciones durante la construcción. El volumen estimado de los rellenos fue 1.13 millones de metros cúbicos y la capacidad estimada para embalsar fue de aproximadamente 2.7 millones de m^3 de agua. El núcleo de la presa se construyó de arcilla arenosa y los espaldones de arena y grava, con algo de arcilla.

Características Básicas. Las características más relevantes de la estructura de control y sus obras anexas son las siguientes:

- Nivel de plaza de la zona de entrada de aducción: 2555 msnm
- Nivel de plaza de la zona de salida o descarga de la estructura: 2555 msnm
- Nivel de corona del jarillón izquierdo y derecho en la zona aguas arriba: 2562,60 msnm
- Nivel de corona del jarillón izquierdo en la zona aguas abajo: 2562 msnm
- Borde libre de los jarillones sobre nivel de agua de diseño: 1,0 m
- Ancho mínimo de corona de los jarillones de cierre. 3,50 m
- Ancho del vertedero de la estructura de control: 19,50 m
- Nivel del vertedero de la estructura de control: 2560,50 msnm
- Cuatro (4) tuberías de descarga de diámetro 2,75 m
- Longitud promedio de las tuberías de descarga: 22 m aproximadamente.
- Velocidad máxima de las tuberías de descarga: 4,20 m/s (carga de cresta).
- Caudal de descarga a la cota 2559: $80 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal de descarga cota 2560,50 = $98,8 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal de descarga cota 2561,50 = $145 \text{ m}^3/\text{s}$

Descripción de la cuenca. La hoya del río Tunjuelo hasta Cantarrana comprende la parte alta del río Tunjuelo, localizado al sur de Bogotá y dentro de la cual se encuentran la laguna Los Tunjos y los embalses Chisacá y La Regadera. El área de la hoya desde sus cabeceras hasta el sitio de presa en Cantarrana es de 272.7 km^2 y está formada por cuatro ríos tributarios principales: Chisacá, Mugroso, Curubital y quebrada Piedra Gorda.

7.2.9 Embalse Teatinos

Es una de las fuentes hídricas más importantes de la región de Boyacá, cuyo embalse es alimentado principalmente por el río Teatinos que nace en el alto del Santuario, a una altura de 3500 msnm. Tiene una extensión de 1250 fanegadas, se encuentra dentro de una zona de páramo con abundante vegetación, cuya temperatura aproximada es de 12 °C.

Fue construido con el objetivo de proporcionar agua suficiente a la ciudad de Tunja hasta el año 2010, con una capacidad original de 5.5 millones de metros cúbicos. Sin embargo su construcción fue defectuosa, hecho que sumado a la falta de agua, ha generado que el embalse se mantenga permanentemente en sus niveles más bajos. Actualmente almacena máximo 1,5 millones de metros cúbicos, aportando hasta 450 litros por segundo a la planta de tratamiento de agua potable y a una red de distribución obsoleta de 120 kilómetros.

7.3 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones industriales que permiten aprovechar la energía potencial de un salto de agua o la energía cinética del recurso hídrico, para convertirlo en energía eléctrica. Desde el punto de vista medioambiental, la electricidad de origen hidráulico se considera una alternativa no contaminante, aunque la construcción de cualquier central hidroeléctrica implica cierto impacto en el medio ambiente regional, por ejemplo el incremento de la humedad relativa del ambiente, como consecuencia de la evaporación del agua contenida en los embalses.

El costo de construcción de estas centrales es elevado, pero los gastos de explotación y mantenimiento son muy bajos, siendo una de las alternativas más rentables para la provisión de energía eléctrica. La selección del lugar para estas instalaciones, está condicionada por las características del terreno y generalmente se ubican lejos de los grandes centros urbanos.

Tipos de Centrales Hidroeléctricas

Existen diferentes tipos de centrales hidroeléctricas, de acuerdo a sus principios de funcionamiento y el servicio que presten a la red eléctrica a la cual abastecen. Es posible hacer la siguiente clasificación general de las mismas:

Central hidroeléctrica de paso. Es aquella en la que no existe un embalse “aguas arriba” de las turbinas, o este no produce una acumulación apreciable

de agua, sino que generalmente se aprovecha un estrechamiento del río y la casa de máquinas puede formar parte de la presa. El salto o diferencia de cota entre “aguas arriba” y “aguas abajo” de la central es reducido y al no disponer de un embalse, su capacidad de generación es fuertemente dependiente de las variaciones estacionales en el módulo del río.

Central hidroeléctrica con embalse de reserva. En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido “aguas arriba”, mediante la construcción de una o más presas para formar un lago artificial, el cual permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Así es posible producir energía eléctrica durante todo el año, independiente del régimen estacional de los ríos que alimentan al embalse.

La construcción de este tipo de centrales exige por lo general una inversión de mayor capital que las de paso, pero en la mayoría de los casos permiten mejor aprovechamiento de los recursos.

Centrales hidroeléctricas de bombeo. Son un tipo especial de aprovechamiento hidroeléctrico, que posibilita el uso más racional de los recursos energéticos de un país. Estas centrales permiten aplanar el diagrama de carga del sistema, incrementando la carga en las horas de valle y aportando energía en los horarios de pico.

Su infraestructura consta de dos embalses situados a diferente nivel, vinculados por un conducto hidráulico y la sala de máquinas. Cuando la demanda de energía eléctrica del sistema alcanza su máximo nivel (pico), las centrales de bombeo funcionan como centrales convencionales, generando energía y almacenando el agua utilizada en el embalse inferior. Durante las horas del día en las que la demanda de energía es menor (valle), el agua es bombeada al embalse superior cerrando el ciclo productivo. Para esto la central puede disponer de grupos de motores-bombas independientes de los generadores o en su defecto, las turbinas pueden ser reversibles de manera que funcionan como bombas y los alternadores como motores.

7.3.1 La central hidroeléctrica Calderas

Está ubicada en el departamento de Antioquia. Aprovecha las aguas de los ríos Calderas y Tafetanes, con un caudal promedio de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$, produciendo anualmente 87 GWh. Las aguas turbinadas en la central descargan finalmente en el río San Carlos, que alimenta el embalse Punchiná, incrementando la producción de la hidroeléctrica San Carlos en 269 GWh-año.

Foto 49. Central hidroeléctrica Calderas.



Fuente: <http://www.sancarlosantioquia.com/energia.html>.

La casa de máquinas está localizada en el municipio de San Carlos, mientras que los embalses de los ríos Tafetanes y Calderas están en jurisdicción del municipio de Granada. La central propiamente dicha se encuentra en la estribación oriental de la cordillera Central entre 1.000 y 2.200 msnm, en inmediaciones de la carretera que conecta a Medellín con los municipios de Santuario, Granada y San Carlos, a una distancia aproximada de 100 km desde Medellín.

Casa de máquinas

Es de tipo superficial, incluye dos turbinas tipo Pelton de eje vertical, 6 inyectoras, generadores sincrónicos, trifásicos, de eje vertical, con factor de potencia de 0,95, tensión nominal de 13,8 kV y capacidad de 13,2 MVA cada uno. La conexión a la subestación 115 kV se hace a través de un transformador principal de potencia, trifásico, con capacidad de 20/26,8 MVA y relación de tensión 13,8/115 kV. La central también dispone de un transformador de repuesto en sitio.

La presa

Esta central consta de una presa de concreto, tipo gravedad, de 25 m de altura por 152 m de longitud y un volumen de 25.000 m³. La presa cuenta

con un vertedero central de 60 m de ancho y 24 m de longitud, así como una descarga de fondo controlada por una compuerta radial. La capacidad de almacenamiento del embalse Calderas es de 330.000 m³.

7.3.2 Central hidroeléctrica embalse Peñol-Troneras

Esta central se encuentra en el departamento de Antioquia, fue construida para regular el caudal dirigido a la central de generación eléctrica de Guatapé, con lo cual contribuyó al desarrollo hidroeléctrico del río Nare. Su presencia en la región tiene numerosas implicaciones para la vida socio-cultural y económica del municipio El Peñol y de sus habitantes.

Foto 50. Embalse Peñol-Troneras.



Fuente: Autor.

El llenado del embalse se realizó en 1965 y su finalidad es la generación de energía eléctrica. Pertenece a la cuenca del río Magdalena y a la subcuenca del río Guadalupe, sus principales afluentes son los ríos Guadalupe, Tenche, Nechi, Pajarito y Dolores, mientras que el río efluente es el Guadalupe.

7.3.3 Central hidroeléctrica embalse Peñol-Guatapé

Está ubicado en el sitio conocido como la Araña, jurisdicción del municipio de San Rafael, al oriente del departamento de Antioquia, a 100 kilómetros de Medellín. El llenado se realizó en 1971, la primera etapa fue puesta en servicio entre 1971 y 1972 y la segunda en 1979. Cada etapa está compuesta por 4

unidades generadoras. Esta central contribuye al sistema con 2.730 GWh de energía media anual.

Su capacidad instalada es de 560 MW (nominal y efectiva), entregados por 8 unidades generadoras de igual capacidad, accionadas por turbinas tipo Pelton de eje vertical. La central hidroeléctrica Guatapé utiliza el río Nare, que se desvía al río Guatapé para aprovechar una diferencia de nivel de 810 metros entre las cuencas de estos dos ríos.

El embalse Peñol-Guatapé pertenece al aprovechamiento del río Nare, es el de mayor regulación del país, con una capacidad de almacenamiento total de 1.070,21 millones de metros cúbicos. El río Nare es su principal afluente y efluente, cuya descarga es de 49.40 m³/s. Está ubicado a una altitud de 1.887 m, tiene 6.340 ha de superficie, el área de la cuenca es de 1.250 km², la profundidad es de 27.50 m en verano y 43.00 m en invierno. El volumen del embalse es de 1.240 Mm³ y cuenta con una cunata de 9.5 km de longitud máxima, 1.5 km de ancho máximo y perímetro de 419.5 km. El nivel de fluctuación anual es de 15.5 m.

7.3.4 Central hidroeléctrica Piedras Blancas

Esta central fue inaugurada en 1921 cuando tenía como fin principal suministrar energía eléctrica al tranvía y compensar las deficiencias de energía de la planta Santa Elena. En 1952 cumplió su vida útil, por lo que fue remodelada y puesta en servicio nuevamente en 1958, junto con el embalse del mismo nombre.

La central y el embalse reciben aportes de las quebradas Chorro, Clarín, Quebraditas, Chorrillos y Piedras Blancas, más el caudal por bombeo de la quebrada Honda.

Las aguas de la represa son llevadas por gravedad a través 7 kilómetros al tanque de carga situado en el Alto del Toldo, posteriormente llegan a través de la tubería de presión a la casa de máquinas, donde está la unidad generadora con una turbina tipo Pelton, que tiene capacidad de 10 MW y velocidad de 600 r. p. m. El caudal generado de 2,55 m³/s, es aprovechado para el sistema de acueducto mediante la planta de potabilización Villa Hermosa.

7.3.5 Central hidroeléctrica Las Playas

Se encuentra en el departamento de Antioquia, a 120 km de Medellín por carretera. Sus obras e instalaciones están en jurisdicción de los municipios de

San Rafael, San Carlos y su cuenca hidrográfica comprende también territorios del municipio de Guatapé.

El llenado de la represa se realizó en 1987. Esta central forma parte del aprovechamiento hidroeléctrico de los ríos Nare y Guatapé, el cual está formado por cuatro centrales, dos sobre el río Nare: Guatapé (560 MW) y Jaguas (170 MW) y dos sobre el río Guatapé (principal afluente de esta central): Playas (200 MW) y San Carlos (1.240MW).

El aprovechamiento de las aguas y condiciones topográficas de las cuencas de estos ríos ocurre de la siguiente forma: desde su primer embalse de regulación “El Peñol”, el río Nare permite desviar un caudal de 45 m³/s hacia río Guatapé, a través de la central hidroeléctrica del mismo nombre, por otra parte, desde el embalse de San Lorenzo, permite desviar un caudal medio de 39 m³/s, también hacia el río Guatapé, a través de la central hidroeléctrica de Jaguas.

A los caudales mencionados se suma el propio (29 m³/s), aportado por la cuenca del río Guatapé y que en conjunto son regulados por el embalse Las Playas. Como resultado la central hidroeléctrica cuenta con una capacidad instalada de 200 MW en tres unidades y utiliza un caudal medio de 112 m³/s, además de una cabeza neta de 176 m.

7.3.6 Central hidroeléctrica presa de Punchiná

La presa Punchiná está localizada en el departamento de Antioquia, 150 km al oriente de Medellín, en jurisdicción del municipio de San Carlos, cerca al corregimiento El Jordán, sobre el río Guatapé. Forma un embalse de 3.4 km², con capacidad de almacenamiento de 72 Mm³, de los cuales 50 son de embalse útil. Tiene una altura de 70 m sobre el nivel medio del río, 800 m de longitud, así como 6 Mm³ de lleno de suelos residuales compactados.

La primera etapa de esta represa entró en funcionamiento en 1984 y la segunda en 1987. Sus ríos afluentes son Guatapé y San Carlos y el efluente es el río Samaná. Con más de 20 años de operación comercial, continúa siendo la de mayor capacidad instalada del país, con 1.240 MW, distribuidos en ocho unidades de 155 MW cada una y con la infraestructura necesaria para la instalación de dos unidades adicionales.

7.3.7 Central hidroeléctrica embalse de San Lorenzo

El embalse de San Lorenzo está ubicado a 60 km lineales de Medellín, sobre la vertiente oriental de la cordillera Central, en el municipio de San Roque, departamento de Antioquia.

Foto 51. Embalse San Lorenzo.



Fuente: www.alejandria-antioquia.gov.co

El embalse es propiedad de la empresa ISAGEN, la cual realizó grandes esfuerzos para promover las actividades de conservación e investigación en la zona de Antioquia. Fuente: <http://birdlaa2.memset.net/dz2/site/factsheet/embalse-de-punchin%C3%A1-y-su-zona-de-protecci%C3%B3n-iba-colombia>

Sus principales afluentes son los ríos: San Lorenzo, Nare y Nusito, mientras que sus efluentes son los ríos Guatapé y Nare respectivamente. Se considera como río efluente principal aquel que recibe el agua turbinada y como río efluente secundario el que recibe el agua pasada por rebosadero. Fuente: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab488s/AB488S04.htm>

7.3.8 Central hidroeléctrica embalse de Porce II

La central hidroeléctrica Porce II, bautizada “Juan Guillermo Penagos Estrada”, se encuentra ubicada al Nordeste del departamento de Antioquia, a una distancia aproximada de 120 kilómetros de la ciudad de Medellín, por la carretera que de esta ciudad conduce a las poblaciones de Amalfi y Anorí. Fuente: <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>

Esta hidroeléctrica es alimentada principalmente por el río Porce, el cual nace en el alto de Minas, al sur de Medellín y desciende atravesando la parte central del departamento de Antioquia en dirección noreste, hasta desembocar en el río Nechí, después de un recorrido de 232 km. Además de su afluente principal, también recibe vertimientos y descargas de la central hidroeléctrica Riogrande II.

Foto 52. Central hidroeléctrica Porce II.



Fuente: http://2.bp.blogspot.com/_th_7xujPBHE/TNjFsqblEml/AAAAAAAAAE4/kQY4gdtLFtY/s400/PORCE%2BII.JPG.

Porce II se compone de un embalse con una capacidad total de 149,37 millones de m³, que inunda un área de 890 hectáreas, en su nivel normal de operación.

7.3.9 Central hidroeléctrica Guadalupe III

Está localizada bajo el nivel de aguas de la central Troneras. Recibe las aguas turbinadas de la planta Troneras y las provenientes de la quebrada Cañas Gordas, que en conjunto son represadas en una bocatoma y conducidas a la casa de máquinas de esta central. Allí se alojan seis unidades generadoras, accionadas por turbinas tipo Pelton de eje vertical, de 45 MW cada una, para completar 270 MW de capacidad instalada (nominal y efectiva neta).

Sus dos primeros grupos entraron en servicio en 1962, el tercero en 1965 y los tres últimos en 1966. Su contribución a la energía media anual del sistema de EPM es de 1.617 GWh y a la energía firme de 1.377 GWh

7.3.10 Central hidroeléctrica Guadalupe IV

Pertenece al aprovechamiento del río Nare, regulado por el embalse El Peñol - Guatapé. Está ubicada en el sitio conocido como La Araña, jurisdicción del municipio de San Rafael, al Oriente del departamento de Antioquia, a 100 kilómetros de Medellín. Fuente: Pertenece al aprovechamiento del río Nare, regulado por el embalse El Peñol - Guatapé. Está ubicada en el sitio conocido como La Araña, jurisdicción del municipio de San Rafael, al Oriente del departamento de Antioquia, a 100 kilómetros de Medellín.

Su entrada en operación comercial se produjo durante 1985, año en el que salieron de funcionamiento las centrales Guadalupe I y II. Fuente: <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>

Foto 53. Central hidroeléctrica Guadalupe IV.



Fuente: EPPM.

Después de pasar por un túnel de 6.4 km, la casa de máquinas de Guadalupe IV recibe las aguas turbinadas en Guadalupe III, después haber sido descargadas en un tanque de captación con capacidad para 22.000 m³.

Ésta instalación generadora tiene una capacidad nominal de 216 MW y capacidad efectiva neta de 202 MW, repartida en dos unidades de 67 y 68 MW respectivamente, las cuales son movidas por turbinas tipo Francis de eje vertical. Sus aportes de energía al sistema suman 1.205 GWh al año de energía media y 1.026 GWh al año de energía firme. Fuente <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>

7.3.11 Central hidroeléctrica Chivor

Está situada a 160 km al nororiente de la ciudad de Bogotá, cerca al municipio boyacense de Santa María. Aprovecha el potencial hidroeléctrico del río Batá, regulado por la presa de La Esmeralda, que forma un embalse con una capacidad de almacenamiento de 760 Mm³. El caudal regulado del río Batá, se desvía por medio de dos túneles a la hoya del río Lengupá, donde se encuentra situada la casa de máquinas. Esto permite aprovechar una caída de 768 m. Fuente http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/centraleshidroelectricasdecol/centrales_hidroelectricas_de_col.html

Foto 54. Central hidroeléctrica Chivor.



Fuente: www.ingetec.com.co

La capacidad instalada de la planta es de 1.000 MW, divididos en dos etapas similares, con cuatro unidades generadoras cada una. La primera etapa inició su operación comercial en 1977 y la segunda en 1982.

La conducción de la primera etapa está diseñada para un caudal de 80 m³/s. Su longitud total es de 8 km y está constituida por tres tramos de túnel inclinado, conectados por dos pozos verticales. El tramo superior del túnel, de 5.4 m de diámetro y 5.8 km de longitud, está casi totalmente revestido en concreto, excepto la parte final de 581 m, blindada en acero de 3.95 m de diámetro.

Por otra parte, la conducción de la segunda etapa, se diseñó para un caudal de 120 m³/s. Está constituida por un túnel superior de 5.4 km de longitud y 6.6 m de diámetro, un pozo vertical de 4.6 m de diámetro y 285 m de profundidad, así como por un túnel inferior de 2.200 m de longitud.

7.3.12 Central hidroeléctrica embalse de Salvajina

El embalse de Salvajina se ubica geográficamente en las coordenadas $2^{\circ} 57'$ N y $76^{\circ} 42'$ W, en el departamento del Cauca, municipio de Suárez. Es una central hidroeléctrica con capacidad instalada de 270 MW y energía media/anual de 1.050 GWh. Su presa es de grava y enrocado con cara de hormigón aguas arriba y posee una altura de 146 m. El túnel de carga tiene una longitud de 354 m y diámetro de 7.6 m, la capacidad total del embalse es de 906 Mm³ y la capacidad útil 753 Mm³. El rebosadero es de tipo canal abierto con compuertas y disipación con salto de esquí, con una capacidad de 3.550 m³/s. Fuente: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab488s/AB488S04.htm>

Foto 55. Central hidroeléctrica Salvajina.



Fuente: www.ingetec.com.co.

La presa y las estructuras anexas a Salvajina sirven para regular los caudales del río Cauca, lo cual permite controlar inundaciones, generar energía hidroeléctrica y contribuir al riego de cultivos en la región, además de contar con una fuente de recreación para sus habitantes. La construcción del embalse también tenía entre sus objetivos la desviación parcial de las aguas del río Cauca hacia el Pacífico, regulando caudales entre 80 m³/s en estación seca y 165 m³/s durante la estación lluviosa. Desde el embalse también se desvían aguas hacia la cuenca del río Calima, para la instalación de 560.000 kW en Calima III y 440.000 kW en Calima IV, con un caudal promedio de 147 m³/s, lo que resulta en la generación media de 5.160 millones de kWh/año en Calima III y 1.930 millones de kWh/año en Calima IV.

7.3.13 Central hidroeléctrica de Urrá I

La central hidroeléctrica Urrá I está localizada sobre el río Sinú, 30 kilómetros al sur del municipio de Tierralta, en el departamento de Córdoba, al noroccidente de Colombia. La principal fuente de abastecimiento de agua la constituye el río Sinú y sus afluentes, que nacen en el Parque Nacional Natural Paramillo, cubierto en su mayor parte por bosque húmedo tropical y con niveles de precipitación del orden de 3.000 mm/año, factores que contribuyen a mantener un caudal promedio de 340 m³/s.

Foto 56. Central hidroeléctrica Urrá I.



Fuente: www.skyscrapercity.com.

El área de influencia directa de Urrá comprende la zona rural del municipio de Tierralta. La hidroeléctrica tiene acceso terrestre, por carretera pavimentada a lo largo de 110 km desde Montería, capital del departamento de Córdoba. La energía que genera la central hidroeléctrica Urrá I es evacuada por dos líneas a 230 KV, una de ellas sale desde la subestación de ISA en Urrá, hasta la subestación Cerromatoso, donde se interconecta con la red nacional, mientras que la segunda línea llega a Urabá.

Sumado a lo anterior, Urrá I cuenta con una línea de 110 KV, que distribuye energía eléctrica directamente a Montería, a través de la línea Montería-Tierralta-Urrá. Esta línea aumentó la confiabilidad del sistema Córdoba-Sucre, que abastece cargas regionales. También permitió reducir la dependencia

que tiene la costa Atlántica, de energía proveniente del interior del país y respaldar el sistema térmico existente en la región.

Lo anterior hace que Urrá I esté en capacidad de aportar confiabilidad al sistema interconectado nacional y al sistema de generación de la costa Atlántica, que cuenta con plantas de generación térmica en Barranquilla, Cartagena y Mingueo (Guajira). Esta central también permite expandir las redes de servicio de electrificación rural, como es el caso de la electrificación pública y domiciliaria de los nueve reasentamientos construidos por la Empresa URRÁ S.A. E.S.P., en zona de influencia, de la que se han beneficiado alrededor de 600 familias que habitan en el Alto Sinú, departamento de Córdoba.

Urrá I tiene una capacidad instalada de 340 MW, distribuida en cuatro turbinas de 85 MW cada una, con energía firme de 710 GWh anuales y energía media de 1.378 GWh anuales. (<http://urra.com.co>) El complejo hidroeléctrico está constituido por:

Rebosadero: localizado sobre la margen derecha del río, con capacidad máxima de descarga de 9.500 m³/s. Su longitud es de 196,4 metros, con vertedero de ancho variable entre 120 metros en la cresta hasta 80 metros en la entrada al río.

Estructura de toma: está compuesta por cuatro bocatomas (cada una de ellas con caudal de diseño de 175 m³/s), con cuatro compuertas de servicio y una compuerta de guarda.

Embalse: el río se represó a la altura de la angostura de Urrá, a 276 km de su desembocadura. El área de inundación es de 7.400 hectáreas.

Edificio de control: cumple funciones administrativas y en su primer piso está ubicada la sala de control, desde donde se coordinan y ejecutan las maniobras de control de la central hidroeléctrica.

Presa: conformada por un terraplén zonificado con núcleo central de gravas arcillosas y espaldones de gravas limpias. Tiene 73 metros de alto, terminando en una cresta de 660 metros de longitud y 12 metros de ancho.

Sistema de desviación o descarga de fondo: localizado sobre la margen derecha del río Sinú. Consta de un canal de aproximación, dos túneles paralelos de 7 metros de diámetro y longitud total de 1.183 metros, con capacidad máxima de descarga por ambos túneles de 1.180 m³/s. En el túnel No. 2 se encuentra instalada la descarga de fondo, con un sistema de compuertas deslizantes. El caudal de descarga máxima es de 317.4 m³/s.

Casa de máquinas: de tipo superficial, alberga cuatro conjuntos turbina-generator, con turbinas tipo Francis de 85 MW por unidad. Su altura es de 44 metros y 130 metros de largo, incluye una zona de montaje. La conducción de agua desde el embalse hasta las turbinas se realiza por cuatro túneles de carga con blindaje de acero, cada uno de los cuales tiene 6,5 metros de diámetro y 215 metros de longitud.

Canal de descarga: el agua una vez turbinada sale a través de un sistema de compuertas, correspondientes a dos por cada unidad. El canal conduce el agua turbinada nuevamente al río y su caudal máximo evacuado es de 700 m³/s.

7.3.14 Central hidroeléctrica embalse del Guavio

Ubicado en las estribaciones de la cordillera Oriental, en los municipios de Guasca, Gachetá, Ubalá y Gachalá, el embalse del Guavio es considerado el quinto en importancia y magnitud a nivel mundial, lo cual implica que su construcción tiene grandes repercusiones en el aspecto ecológico. Perteneció al Proyecto Hidroeléctrico del Guavio, fue construido por la empresa de Energía Eléctrica de Bogotá, aunque su ejecución se retrasó cinco años.

Foto 57. Central hidroeléctrica Guavio.



Fuente: www.ingetec.com.co

Sus principales afluentes son los ríos Guavio, Chivor y Batatas y sus efluentes los ríos Upía y Meta. De los ríos Gachetá, Batatas y Chivor, recibe caudales de 62.5, 5.0 y 4.2 m³/s, respectivamente, para un caudal total medio de entrada

de 71,7 m³/s o 2.300 Mm³/año, en una zona de mediana pluviosidad con 2.300 mm de precipitación al año.

Tiene una longitud de 14 kilómetros para almacenar solamente 1.140 Mm³, de los cuales 950 millones son útiles. De estos últimos, 120 millones en teoría, son para regulación de crecientes, sin razón de ser por el pobre desarrollo actual de la zona aguas abajo. La profundidad media se calculó en 240 metros.

7.3.15 Central hidroeléctrica embalse del Muña

Pertenece a la Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB). El primer embalse del sistema Muña se construyó en 1911 y en el período 1944-1948, se amplió mediante la construcción de un dique principal bajo de 560 metros y uno auxiliar de 2.740 metros. Su capacidad es de 41 millones de metros cúbicos, de los cuales solo aproximadamente 30 son útiles, sin embargo es uno de los embalses más importantes en el esquema de aprovechamiento del río Bogotá ya que sirve de depósito de sedimentos y contaminantes, por encontrarse a la salida de la Sabana, también alimenta un sistema hidroenergético de alta caída, que dispone de dos cascadas de centrales hidroeléctricas denominados: Colegio Mesitas, con capacidad instalada de 550 MW y El Paraíso-La Guaca, con capacidad instalada de 600 MW.

Inicialmente se instalaron dos bombas de 2.0 m³/s cada una, en la llamada estación Muña I, que dispuso de una tubería de impulsión de 1.45 metros de diámetro y 456 metros de longitud. Posteriormente fue instalada una bomba-turbina de 8 m³/s, que conformó la ampliación Muña II en 1963, con una tubería de 2,3 metros de diámetro y 325 metros de longitud. Esta última aportó una capacidad de 12 m³/s, para elevar mecánicamente las aguas desde el río Bogotá hasta embalse Muña Alto de 400 Mm³, en época de invierno y llenarlo. Durante el verano hay una descarga por la bomba-turbina o a través las compuertas, para alimentar la cascada de cuatro plantas del sistema Canoas-Salto-Laguneta-El Colegio.

Previendo la entrada de agua de Chingaza, posteriormente se construyó la planta Muña III, con tres grupos de bombeo de 17.5 m³/s cada uno, para aumentar la entrada de agua al embalse alto, a través de una línea de 3.7 metros de diámetro y 520 metros de longitud y así alimentar la cascada Paraíso-La Guaca. En 1986 se realizó la presa del embalse Muña con el objetivo de aumentar su capacidad.

El embalse llegó a estar completamente contaminado por las aguas negras y los residuos de la zona industrial de Bogotá, así como de las fábricas del sector de “Alicachín” ubicadas a orillas del río y sus alrededores, las cuales producen

acero, hierro, llantas y químicos, entre otros. El Sistema de Bogotá descarga al embalse del Muña 180.000 toneladas/año de carga orgánica.

Foto 58. Central hidroeléctrica del Muña.



Fuente: Autor.

La cuenca que abastece el sistema del Muña tiene un total de 13.477 ha y comprende los municipios de Sibaté con 8,585 ha y Soacha con 4,892 ha. Los principales afluentes del embalse son el río Bogotá por bombeo y el Muña, que también es el efluente principal.

Construcción de diques: se construyeron con el ánimo de aislar el casco urbano del municipio de Sibaté, del cuerpo principal del embalse Muña, para mitigar los impactos ambientales generados principalmente por la presencia de zancudos, malos olores y el deterioro paisajístico.

Una vez construidos los diques, era necesario hacer una estación de bombeo para que las aguas del río Muña y la quebrada Aguas Claras, llegaran al cuerpo principal del embalse, junto con las aguas residuales provenientes del municipio y así aprovechar también los caudales para la generación de energía.

Interconexión de colas del embalse: son las zonas que están más cercanas al casco urbano del municipio. La interconexión buscaba conducir las aguas de la quebrada Aguas Claras, el río Muña y las aguas residuales de Sibaté, hacia la estación de bombeo.

Estudio de manejo ambiental en las colas del embalse: Emgesa contrató la ejecución de un estudio de alternativas de manejo ambiental en las colas del embalse del Muña, en el cual se consideraron tres alternativas, entre las que se seleccionó el vaciado de las colas y reestablecimiento original del cauce de los ríos.

Rectificación de los cauces: los cauces del río Muña y la quebrada Aguas Claras, presentaban zonas que impedían el flujo normal de los ríos, generando emposamientos que se convierten en foco de proliferación de zancudos. También se construyeron unas dársenas, que son estructuras adicionales para el control de sedimentos, antes del ingreso a la estación de bombeo.

Limpieza de los taludes: con el secado de las colas, se generó un crecimiento rápido de vegetación espontánea, que se convirtió en un foco de infestación de roedores y zancudos, por lo que se hizo necesario quitar toda esta vegetación y realizar mantenimiento permanente.

Construcción de sendero ecológico: se construyó alrededor del embalse, con el fin de generar un sistema de recreación pasiva para el bienestar de la población.

Realización de mesas de expertos internacionales: en junio de 2003 y junio de 2005, se adelantaron mesas técnicas, promovidas por Emgesa, la Empresa de Energía de Bogotá (EEB) y el Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), donde participaron expertos internacionales de amplia trayectoria controlando la problemática de vegetación acuática, para trasladar su experiencia a Colombia.

Los expertos plantearon el retiro de la totalidad del buchón existente en el cuerpo de agua del embalse y el mantenimiento “cero buchón”, para evitar su reproducción, como medida para limitar los impactos ambientales en el embalse del Muña.

7.3.16 Centrales hidroeléctricas Paraíso y La Guaca

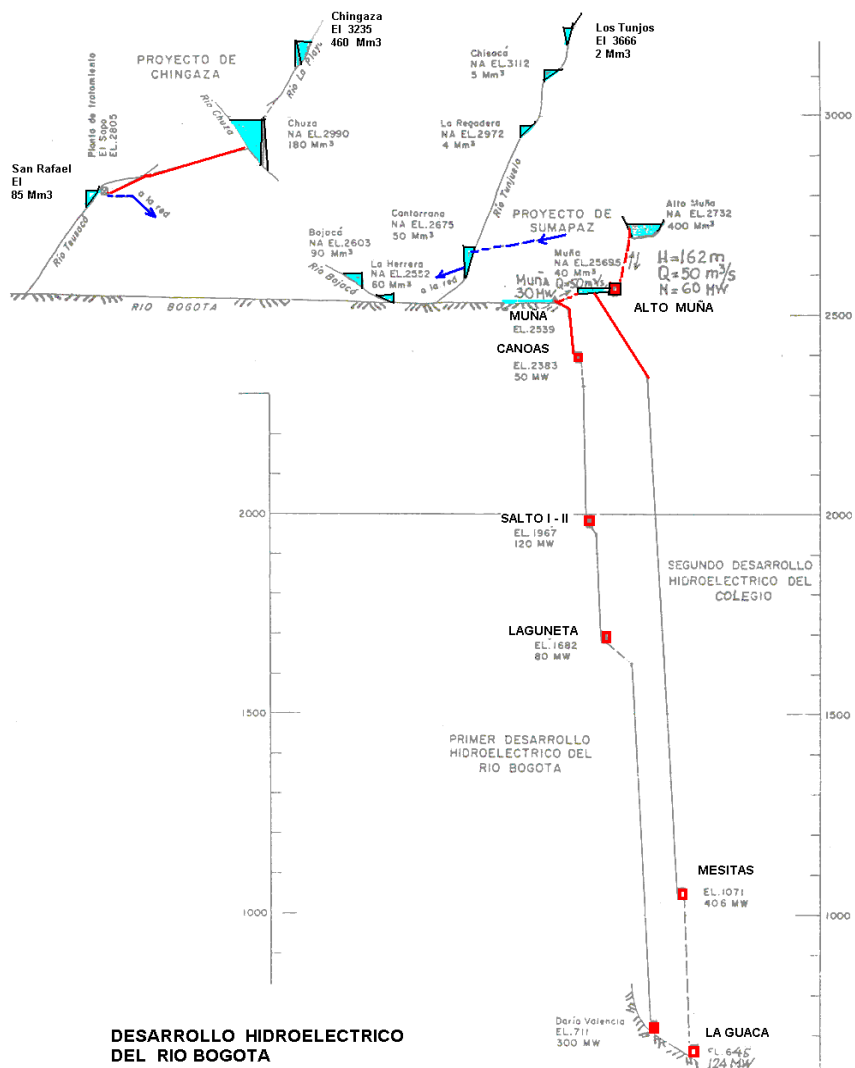
La cadena Pagua está formada por las centrales Paraíso y La Guaca, que utilizan agua del río Bogotá, a partir del embalse del Muña. Estas dos centrales entraron en operación entre 1985 y 1986, o sea que son plantas relativamente nuevas, al igual que Guavio, si se tiene en cuenta que la vida útil promedio de una central hidroeléctrica es aproximadamente de 50 años.

La Central Paraíso consta de tres unidades de 90 MW cada una, para un total de 270 MW. Por su parte la Central La Guaca consta de tres unidades de 103,5 MW cada una, para un total de 310,5 MW. La capacidad efectiva actual de ambas centrales es igual a la capacidad nominal, es decir que en esta cadena se dispone de 580,5 MW efectivos.

En 1998 la central Paraíso tuvo un factor de disponibilidad de 95,6% y La Guaca de 97,1%, factores que están por encima del promedio nacional. Los factores

de operación para el mismo año fueron de 76,7 y 76,2% respectivamente, mientras que los de carga fueron de 60,3 y 62,1%. El cargo por capacidad para el año 1999 fue de 242,64 MW (90% de la capacidad nominal) para Paraíso y de 277,59 MW (90% de la capacidad nominal) para La Guaca. Estos factores están entre los más altos del Sistema Interconectado Nacional.

Figura 101. Embalses del sistema del río Bogotá.



Fuente: Embalses en Colombia Germán Oramas.

La cadena Casalaco está formada por las centrales Canoas, Salto I, Salto II, Laguneta y Colegio ver figura 97. Como conjunto, la cadena Casalaco en 1998 tuvo un factor de disponibilidad de 89,7 %, factor de operación de 31,1% y factor de carga de 20,3%. La capacidad nominal y el cargo por capacidad para estas centrales se aprecian en la tabla 6.

El cargo por capacidad para 1999 no incluyó Salto I, central que estaba siendo sometida a trabajos de modernización y mantenimiento mayor, pero que en la actualidad ya se encuentra disponible con una capacidad efectiva igual a la nominal.

De las cifras anteriores se puede observar el bajo índice de utilización de esta cadena de centrales, por lo cual puede considerarse como una reserva del sistema. Por otra parte, el hecho de contar con dos cadenas en paralelo que pueden operar con el agua del río Bogotá, representa un factor de seguridad en la generación de energía, que no se observa en otros sistemas hidroeléctricos del país y que permite programar mantenimientos en cualquiera de las centrales de ambas cadenas, sin afectar la generación total e incluso solucionar situaciones de emergencia.

7.3.17 Central hidroeléctrica embalse de Betania

Foto 59. Central hidroeléctrica Betania.



Fuente: <http://www.industcards.com/hydro-colombia.htm>.

El embalse de Betania se formó por el represamiento del río Magdalena en la confluencia con el río Yaguará, de manera que los dos ríos forman los

brazos de dicha estructura. Se encuentra en el valle alto del río Magdalena, al sur del departamento del Huila, a $2^{\circ}42' N$ y $75^{\circ}26' O$ y una altitud de 561 m. En esta zona hay predominio de vegetación de bosque seco tropical (bs-T), con temperatura promedio superior a $24^{\circ}C$ y precipitación anual de 1.000 a 2.000 mm, de carácter bimodal con picos de lluvia en abril y noviembre. La evapotraspiración supera al promedio de las precipitaciones, lo que ocasiona un déficit hídrico durante algunos meses del año.

Los principales del embalse son los ríos Magdalena y Yaguará, mientras que el principalefluente es el río Magdalena. El represamiento de las aguas tuvo como finalidad la generación de energía eléctrica. Su extensión es de 7.400 ha, con una altura de cresta de 98 m, almacena 2.000 millones de metros cúbicos de agua y genera 510,000 KW a través de tres turbinas (Central Hidroeléctrica Betania1983).

7.3.18 Central hidroeléctrica embalse de Prado

Foto 60. central hidroeléctrica embalse de Prado.



Fuente: Autores.

Se localiza en el piedemonte de la cordillera oriental del valle del río Magdalena, en el departamento del Tolima. El embalse es un sistema lagunar artificial, con un espejo de agua de 4.200 hectáreas, profundidad máxima de 90 metros, profundidad media de 45 metros, perímetro de 74 kilómetros, con una longitud de 25 kilómetros y ancho máximo de cerca de 8 kilómetros.

Es considerado un lago caliente con temperaturas superficiales que varían entre 27° y 31° C, la termoclina oscila entre 3 y 4 metros de profundidad en épocas de aguas bajas, mientras que en aguas altas es de 10 metros. En promedio su espesor es de 1 a 3 metros y la visibilidad varía entre 0,77 y 1,43 metros.

Este depósito de agua es alimentado por el río Prado con un caudal promedio de 45 m³/s. Entre sus principales afluentes también están los ríos Negro y Cunday, mientras que sus efluentes son los ríos Cuinte Negro y Cuinte Blanco. Su capacidad es de 1.100 millones de metros cúbicos de agua, lo que lo convierte en el cuerpo de agua lagunar más extenso del Tolima.

De la capacidad del embalse, 428 Mm³ se utilizan para fines de generación eléctrica e irrigación. La reserva energética de esta central hidroeléctrica es de 65/219 GWH-año, siendo muy estable en la generación eléctrica.

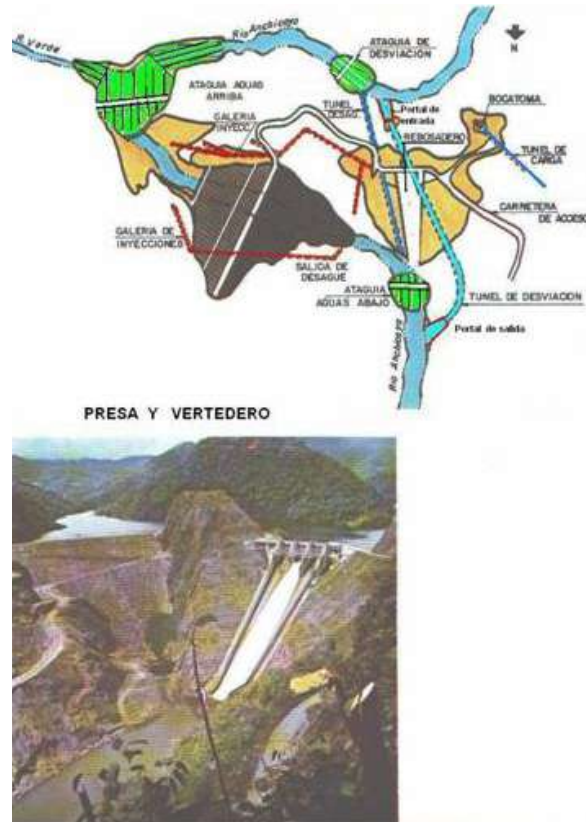
7.3.19 Central hidroeléctrica embalse de Anchicayá

El río Anchicayá alimenta dos embalses construídos para la generación de energía eléctrica principalmente. Uno de estos embalses se encuentra en el bajo Anchicayá e inició operaciones en 1955, con dos unidades de 12 MW y en 1967 con dos unidades de 20 MW, de manera que su capacidad total instalada es de 64 MW, con energía media anual de 360 GWh. Cuenta con una presa de gravedad, túnel de carga de 1.367 m de longitud y 6.3 m de diámetro, túnel de presión de 100 m de longitud, rebosadero libre sin compuertas, casa de máquinas superficial y cuatro unidades tipo Francis. La caída media es de 72 m y el caudal medio 83.0 m³/s.

El segundo embalse se ubica en el alto Anchicayá ver imagen No 98 se inició operaciones en 1974, su capacidad instalada es de 340 MW y su producción de energía media anual es de 1.590 GWh. El área de su cuenca abastecedora es de 550 km² y el caudal medio de 52 m³/s. Sus principales afluentes son los ríos Verde y Anchicayá, siendo este último su principal efluente. El embalse tiene una capacidad total de 45 Mm³ y una capacidad útil de 30 Mm³.

La presa de este embalse es de enrocado con pantalla de hormigón impermeable aguas arriba, de 140 m de altura. El túnel de carga tiene una longitud de 8.300 m y un diámetro de 4.5 m, el rebosadero presenta tres compuertas radiales y dissipador de salto de esquí, con capacidad máxima de 4.600 m³/s. La casa de máquinas es subterránea con tres unidades tipo Francis y una caída media de 440 m.

Foto 61. Central hidroeléctrica Alto y Bajo Anchicayá.



Fuente: Oramas, G. Año. Embalses y lagos en Colombia, Popayán Colombia 120 pags, 1985.

7.3.20 Central hidroeléctrica Calima

Sus obras de construcción culminaron en 1966, siendo uno de los primeros embalses mayores del país. Fue diseñado con fines de producción de energía hidroeléctrica, sin embargo actualmente su uso energético es poco significativo, a pesar de cubrir cargas de horas pico, de manera que predomina su utilidad con fines turísticos y recreacionales. En sus inicios Emcali fue su propietaria y después de saldar la deuda externa, además de producir beneficios monetarios netos al municipio de Cali, en 1985 pasó a ser propiedad de la CVC. . Más tarde fue privatizado y vendido a mitad de precio a la empresa de energía EPSA.

Ocupa una superficie de 1.934 hectáreas, su profundidad media es de 95 metros, con un volumen de almacenamiento de 529 millones de metros

cúbicos. Utiliza 437 millones de metros cúbicos, con una reserva máxima de energía de sólo 224 GWh-año.

El llenado de este embalse es poco frecuente, debido a la deficiencia de caudales de los ríos Calima y Bravo, por ello su régimen de operación está restringido a la demanda de energía del sistema en horas de pico, de hecho hasta 1988, por primera vez se arrojó agua por su vertedero circular. El ancho medio del embalse es de 1.5 kilómetros y el desarrollo de sus orillas es de 50 kilómetros. En el futuro, con un proyecto de hidroacumulación, podría bombearse agua de la laguna de Sonso (río Cauca) al embalse Calima I y así, mejorar sus características operacionales.

Foto 62. Central hidroeléctrica Calima.



Fuente: www.ingetec.com.co

El sector que tiene acceso a la carretera Buga-Buenaventura, en las dos últimas décadas sufrió un intenso proceso de urbanización y construcción de costosas villas campestres, con carácter especulativo. Producto de este proceso, en el cuerpo de agua se hizo evidente el efecto de la contaminación por descarga de aguas negras de más de cien edificaciones y desechos arrojados por los turistas. La longitud del cuerpo acuático es de 13 kilómetros y se utiliza en competencias de navegación a vela y canoas a motor.

El área de influencia de esta hidroeléctrica cuenta con un hotel de excelentes condiciones y carretera asfaltada hasta el sitio del embalse y el corregimiento Madroñal. En el año 2004 la producción acuícola del embalse se estimó en 3.5 toneladas/ha/año, sin embargo también recibía cerca de 255 toneladas/año de residuos orgánicos y aguas negras, provenientes de poblaciones y urbanizaciones como Darién, El Lago, Palermo y Jiguales, entre otras, ubicadas

en la márgenes del embalse. Esta carga orgánica afectaba los peces y generaba acumulación de sedimentos en la cola del embalse, los cuales representaban un peligro potencial para la navegación recreativa.

7.3.21 Central hidroeléctrica Jaguas

Su operación comercial se inició en 1988. Está localizada en el departamento de Antioquia, sobre las hoyas de los ríos Nare y Guatapé, a 117 km al oriente de Medellín, por la vía Medellín - El Peñol - Guatapé - San Rafael. Tiene capacidad instalada de 170 MW y aprovecha el caudal del río Nare, aguas abajo de la presa Santa Rita (embalse del Peñol), mediante una presa de tierra, que forma un embalse con capacidad total de 185.5 Mm³. Entre sus características técnicas se encuentran las que se mencionan a continuación.

Foto 63. Central hidroeléctrica Jaguas.



Fuente: <http://www.sancarlosantioquia.com/energia.html>.

Presa Guillermo Cano: localizada sobre el río Nare, un kilómetro aguas abajo de la confluencia con el río San Lorenzo. Su longitud de cresta es de 580 m, la altura máxima de 63 m y el volumen de 3.2 Mm³. Fue construida en limo y roca descompuesta, forma un embalse de 10.6 km² de extensión, con capacidad total de 185.5 Mm³, de los cuales 162.65 Mm³, corresponden al

volumen útil. Su nivel máximo normal está en la cota 1.247 msnm. La presa de *zona baja*, fue construida sobre la margen derecha del río Nare para cerrar una depresión en la línea divisoria de las hoyas de los ríos Nare y Guatapé, tiene una longitud por la cresta de 715 m y una altura máxima de 50 m, desde su fundación. Fuente: http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/centraleshidroelectricasdecol/centrales_hidroelectricas_de_col.html

Pozo de cables y aireación: los cables de alta tensión salen de la central por un pozo inclinado de 170 m de longitud. Para la ventilación de la casa de máquinas y aireación de la almenara de aguas abajo, se excavaron sendos pozos verticales de 130 y 126 m de profundidad respectivamente, los cuales se comunican con una ventana de construcción que sirvió para acometer la excavación del túnel de presión.

Túnel de conducción: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/centrales.html> el túnel de conducción tiene una longitud de 1.831 m. Está provisto de una almenara de tipo orificio restringido que tiene una profundidad de 150,24 m, de los cuales 120,3 corresponden al tanque superior.

Estructura de captación: la captación es una estructura de concreto que se comunica con el túnel de presión mediante un pozo vertical de 4,7 m de diámetro interior y 50,77 m de profundidad, de sección circular y revestido de concreto.

Caverna principal: los equipos principales de la central se alojan en una caverna de 16,5 m de ancho, 28,4 m de alto y 66,3 m de longitud, cuya vía de acceso es un túnel vehicular de doble vía, con pendiente variable, siendo la máxima de 10% y una longitud total de 775,35 m.

Pozo de compuertas: tiene una profundidad de 102,6 m y una sección ovalada de 8,3 m en su dimensión mayor. Aloja dos compuertas planas, una principal y otra auxiliar con su equipo de alce y central oleohidráulica. El pozo dispone además de un ducto para admitir y desalojar aire del túnel de conducción.

Pozo de presión: pozo vertical revestido en concreto de 156 m de profundidad y 4,3 m de diámetro.

Túnel de descarga: https://www.isagen.com.co/comunicados/Centrales_generacion.pdf se dispuso de un túnel de descarga a presión sobre la quebrada El El Jagüe, el cual tiene una longitud aproximada de 1.757 m. Al recibir la descarga de la Central, el caudal normal de la quebrada aumenta a 43,4 m³/s con una unidad en funcionamiento y 86,8 m³/s con las dos unidades en funcionamiento. Para controlar la erosión del lecho y lados de la quebrada, se

construyeron cuatro estructuras de disipación de energía en un tramo de 3,8 km de longitud, aguas abajo de la descarga de la central.

Almenara de aguas abajo: https://www.isagen.com.co/comunicados/Centrales_generacion.pdf separada 25 m de la caverna principal, está localizada la almenara de aguas abajo, donde descargan los tubos de aspiración de las turbinas. Las dimensiones de la caverna de esta almenara son: longitud 40 m, ancho 13 m y altura 36,1 m.

Túnel de presión: https://www.isagen.com.co/comunicados/Centrales_generacion.pdf **Fuente:** el túnel de presión está conformado por un túnel revestido en concreto reforzado de 43 m de longitud y 4,3 m de diámetro, además de un túnel blindado. Éste último tiene 70,5 m de longitud, al final de la cual se bifurca en dos ramales que tienen 28 y 32 m de longitud y por ellos se alimentan las dos unidades generadoras de la casa de máquinas.

Equipos principales: **Fuente** https://www.isagen.com.co/comunicados/Centrales_generacion.pdf

Dos turbinas tipo Francis de eje vertical, cada una con una potencia nominal de 96 MW y una velocidad de rotación de 400 r. p. m. Las turbinas tienen como elemento de cierre una válvula incorporada de tipo cilíndrico y su regulador de velocidad es de tipo electro hidráulico. Cada unidad tiene una posibilidad de generación en AGC de ± 35 MW, con respecto a una generación promedio de 50 MW (Operación en cargas parciales de 15 a 85 MW).

Dos generadores sincrónicos, trifásicos, de eje vertical con tensión nominal de 13,8 kV, potencia nominal de 90 MVA a 60 °C de elevación de temperatura, factor de potencia de 0,95. Los generadores tienen excitación estática con base en tiristores, alimentados por transformadores conectados directamente en sus barras.

Dos transformadores principales de potencia trifásicos, enfriamiento clase FOW, capacidad 103,5 MVA, cada uno para una elevación de temperatura de 65 °C y relación de tensión de 13,2/230 kV.

Equipos de ventilación y enfriamiento del aire de la caverna.

Equipos de detección y extinción de incendios, para las celdas de transformadores y los generadores.

Cables de potencia de alta tensión a 230 kV, aislados en aceite, los cuales a través del pozo de cables, conectan los transformadores principales con la estructura de cables y la subestación de la Central.

Cada etapa de la Central tiene una conducción independiente con dos túneles de 4.474 m y 4.501 m de longitud y pendientes de 1,5% y 0,5%. Los túneles están recubiertos en gran parte de su trayecto por concreto lanzado y en los tramos de roca descompuesta por concreto convencional, con sección circular de diámetro de 6,1 m y 7,5 m.

Conexión al Sistema de Transmisión Nacional, STN, https://www.isagen.com.co/comunicados/Central_jaguas_2013.pdf

La energía producida por la central hidroeléctrica Jaguas es suministrada al Sistema de Transmisión Nacional, STN, mediante una subestación a 230 kV que tiene configuración, barra principal y transferencia.

El vertedero: localizado sobre el estribo derecho de la presa, es del tipo canal abierto, de flujo no controlado. Tiene un ancho variable de 50 m de azud a 30 m en el canal de salida, una longitud de 264 m y termina en un deflector de chorro. Está diseñado para evacuar un caudal máximo de 2.070 m³/s. Fuente; http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/centraleshidroelectricasdecol/centrales_hidroelectricas_de_col.html

7.3.22 Central hidroeléctrica San Carlos

Está localizada en el departamento de Antioquia, 150 km al oriente de Medellín, en jurisdicción del municipio de San Carlos, cerca al corregimiento El Jordán. Con más de 20 años de operación comercial, continúa siendo la de mayor capacidad instalada del país: 1.240 MW, distribuidos en ocho unidades de 155 MW cada una y con la infraestructura necesaria para la instalación de dos unidades adicionales. Su primera etapa entró en funcionamiento en 1984 y la segunda, en 1987.

Presa Punchiná: está localizada sobre el río Guatapé, cerca del caserío de Puerto Belo. Forma un embalse de 3,4 km², con capacidad de almacenamiento de 72 Mm³, de los cuales aproximadamente 53,23 Mm³ son de embalse útil. La presa tiene una altura de 70 m sobre el nivel medio del río, 800 m de longitud, 6 Mm³ de lleno de suelos residuales compactados, con cresta en la cota 781 msnm.

Estructura de desviación y descarga de fondo:

La desviación del río durante la construcción, se hizo mediante un conducto en concreto de sección rectangular de doble cuerpo, localizado en la margen derecha del río, cuyas dimensiones son 414 m de largo y 35 m² de sección. Uno de ellos era obturado por dos compuertas deslizantes para controlar el flujo y

poder ser utilizado como descarga de fondo del embalse y el otro fue sellado al terminar la construcción de la presa, mediante un tapón de concreto.

Foto 64. Central hidroeléctrica San Carlos.



Fuente: <http://www.sancarlosantioquia.com/energia.html>.

Equipos principales: esta central cuenta con ocho turbinas Pelton de eje vertical, 22 cangilones y caudal nominal de $32,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Cada una tiene 4,0 m de diámetro, 22 toneladas de peso y potencia nominal de 160 MW, de forma que opera bajo una caída media neta de 554 m y 300 r. p. m.

A la entrada de cada turbina se dispone de una válvula esférica de 1,90 m de diámetro y 68 toneladas de peso, con un tiempo de cierre o apertura de 120 s. También se presentan ocho generadores de tipo sincrónico, de eje vertical, trifásicos, acoplados a las turbinas, de 159 MVA de potencia nominal, cada uno operando a 300 r. p. m., con factor de potencia de 0,9, frecuencia de 60 Hz y tensión de salida de 16,5 kV. La central contiene 12 transformadores monofásicos, con una potencia nominal de 109 MVA cada uno, más uno de reserva. Estos se disponen en cuatro bancos trifásicos para atender dos unidades cada uno, para una relación de transformación de 15,8 kV a 230 kV.

Existen también equipos de ventilación y enfriamiento del aire de la caverna, equipos de detección y extinción de incendios para el pozo de cables, celdas de transformadores y generadores.

De cada uno de los bancos de transformadores principales de potencia, sale un circuito trifásico de 230 kV en cables monopolares aislados en aceite. Los circuitos tienen una longitud promedio de 450 m, instalados en dos pozos inclinados, construidos desde la caverna de transformadores hasta una estructura exterior, en donde empalman con igual número de líneas aéreas, que van hasta la subestación a 230 kV, cada una de las cuales tiene una longitud de 2,5 km.

La central está supervisada por el Centro Nacional de Despacho, CND, cuyos computadores cumplen funciones de control automático de generación (AGC) así como supervisión y adquisición de datos (SCADA). Dichos computadores se comunican con las unidades terminales remotas (RTU), localizadas en la casa de máquinas, para dar y recibir órdenes y señales a los reguladores de las unidades generadoras. Las comunicaciones entre el edificio de mando y el CND en Medellín, se realizan por medio de una red de microondas y fibra óptica.

La generación de la central San Carlos es entregada al Sistema de Transmisión Nacional - STN, para llevarse a los centros de consumo del Sistema Interconectado, utilizando dos subestaciones: una a 230 kV y otra a 500 kV.

Almenaras: son del tipo orificio restringido, revestidas en concreto hidráulico, con un tanque amortiguador de 105 m de altura y diámetro interior de 13,5 m en la almenara N°1, y de 17 m en la almenara N°2. Están conectadas a los túneles de presión a través de un pozo elevador de 170 m de altura.

Pozos y tubería de presión: los túneles de conducción terminan en sendos pozos de presión inclinados a 46° con la horizontal y 346 m de longitud cada uno, revestidos en concreto, con sección circular de diámetro interior de 5,5 m y 6,75 m. Estos pozos inclinados terminan en tuberías de presión de 3,30 m de diámetro, embebidas en concreto, que en su parte inferior se ramifican en dos distribuidores por cada ramal de tubería de presión, los cuales alimentan cuatro unidades de generación en la primera etapa y seis en la segunda. Los distribuidores también tienen un blindaje de acero embebido en concreto con diámetro de 2,30 m.

Pozo y túnel de aireación: la aireación de las cavernas se hace por medio de un pozo vertical de 1,87 m de altura, con una sección circular de 4 m de diámetro que termina en un túnel horizontal.

Pozos de cables: los cables de potencia salen de la caverna de transformadores por dos pozos inclinados a 47° . El correspondiente a San Carlos I tiene 270 m de longitud y 7 m^2 de sección, mientras que el de San Carlos II tiene 260 m de longitud y 8 m^2 de sección. Los dos pozos terminan en la parte superior, en un túnel horizontal de donde los cables pasan a una estructura de salida y de allí se llevan a la subestación principal.

Obras de captación: las aguas del embalse se toman a través de dos torres de captación de 54 m de alto, cada una con secciones circulares de 6,30 m de diámetro para San Carlos I y 7,50 m de diámetro para San Carlos II. Las torres se encuentran sobre la margen derecha del río Guatapé y están controladas por compuertas cilíndricas. A través de ellas se entregan los caudales requeridos para la generación de la Central a los túneles de conducción, por medio de dos pozos verticales revestidos de concreto, de 147 m de profundidad cada uno. Un puente metálico une los pisos de operación de las torres y permite el traslado de las compuertas auxiliares de una a otra torre, en un carro especial. Cada entrada de agua a las torres está provista de una reja coladera.

Casa de máquinas: está conformada por dos cavernas subterráneas paralelas, localizadas a unos 400 m de profundidad. La caverna principal destinada a las unidades generadoras tiene 203 m de longitud, 19,65 m de ancho y 27,5 m de alto. La caverna de transformadores tiene 203 m de longitud, 13 m de ancho y 15,3 m de altura. El acceso a las cavernas se hace por un túnel de 1.113 m de longitud, con pendiente de 8,9% y doble calzada pavimentada en concreto.

Conducciones: cada etapa de la central tiene una conducción independiente con dos túneles de 4.474 m y 4.501 m de longitud respectivamente, con pendientes de 1,5% y 0,5%. Los túneles están recubiertos en gran parte de su trayecto por concreto lanzado y en los tramos de roca descompuesta, por concreto convencional con sección circular de diámetro 6,1 y 7,5 m.

Túneles de descarga: el agua utilizada por las turbinas para la generación de energía, sale de la Central y se entrega al río Samaná Norte, a través de dos túneles de descarga de 1.587 m de longitud y secciones de 74 y 102 m², con pendientes de 0,18 y 0,17 %. Los túneles operan como conducto de flujo libre para una descarga de 132 y 198 m³/s, con un borde libre de 2,6 m en la parte superior.

7.3.23 Central hidroeléctrica Miel I

Está ubicada en el municipio de Norcasia y forma parte del potencial hídrico del oriente del departamento de Caldas, región conformada por las cuencas de los ríos Guarinó, La Miel, Moro, Manso, Samaná Sur y afluentes menores como los ríos Pensilvania y Tenerife. Tiene una capacidad instalada de 396 MW en tres unidades, la cual, en operación aislada, puede generar una energía firme de 1.135 GWh/año y promedio de 1.460 GWh/año, con los caudales naturales del río.

Foto 65. Central hidroeléctrica La Miel I.



Fuente: www.ingetec.com.co.

Presa Patángoras: tiene 188 m de altura, hecho que la convierte en la más alta del mundo, construida en Concreto Compactado con Rodillo (CCR). Es de tipo gravedad, con rebosadero incorporado. Su volumen es de 1,73 Mm³, la corona tiene 340 m de longitud, corresponde a la cota 454 msnm y el nivel máximo normal del embalse está a la cota 445,5 msnm. Está ubicada sobre el río La Miel, aguas abajo de la desembocadura del río Moro. Forma el embalse Amaní de 1.220 ha, cuya capacidad de almacenamiento es de 571 Mm³. La presa.

Estructura de desviación y descarga de fondo. Para la construcción en seco de la presa, el río se desvió a través de un túnel localizado en el estribo derecho, que fue sellado al terminar la construcción de la presa y tiene las siguientes características: 550 m de longitud y sección rectangular con bóveda circular de 10,8 x 10,8 m, sin revestimiento. Por otra parte, la descarga de fondo consta de una estructura de captación y un pozo que alimenta a dos túneles paralelos. El flujo en los túneles está controlado con válvulas Mariposa y *Howell-Bunger*. Está en capacidad de descargar hasta 250 m³/s y permitirá descargar el caudal ecológico cuando se requiera.

Bocatoma y túnel de carga: están ubicados en la margen izquierda del río. El control del túnel de carga se realiza mediante dos compuertas instaladas en el pozo de compuertas, ubicado a 68 m de la entrada. Las compuertas son operadas por medio de servomotores localizados en la parte superior del pozo. Luego de la bocatoma, se encuentra el túnel superior de carga, de 90 m de longitud, revestido en concreto reforzado de 6,55 m de diámetro. A continuación está un codo vertical revestido en concreto reforzado, que conecta con el pozo de carga (vertical) de 119,20 m de profundidad. El túnel

inferior tiene 58 m de longitud, incluye un tramo revestido en concreto reforzado y un blindaje de acero de 45 m de longitud. A partir de este punto, se encuentran dos bifurcaciones metálicas que se conectan con los tres túneles inferiores, blindados, de 3,35 m de diámetro, que conducen el agua a presión a la caverna de máquinas.

Casa de máquinas: la central subterránea se localiza en la margen izquierda del río La Miel y consta de tres cavernas, desde aguas arriba a aguas abajo: caverna de máquinas, caverna de transformadores y caverna de oscilación.

Caverna de máquinas: la caverna principal tiene 19,3 m de ancho, 86,5 m de longitud y 38,8 m de altura. Aloja tres turbinas Francis con sus correspondientes generadores y equipos auxiliares. Cuenta con ventilación permanente y forzada a través de galerías horizontales y del pozo de ventilación, localizado al noroccidente de la caverna.

Caverna de transformadores: aloja los tres transformadores de 150 MVA. Los cables secos de 230 kV de los transformadores, llegan al exterior a través de una galería y un pozo, hasta el pórtico de cables, en la ladera de la montaña. De estos pórticos salen dos líneas aéreas, una de circuito sencillo y otra de doble circuito, hasta la subestación Miel I.

Caverna de oscilación: está localizada aguas abajo de la caverna de máquinas, sirve para coleccionar las descargas de las turbinas y amortigua los transientes de presión, ocasionados por la operación normal de las máquinas. La caverna tiene 52 m de longitud, 15 m de ancho y 44,5 m de altura.

Túnel de fuga: ubicado en la margen izquierda del río La Miel, vierte nuevamente las aguas al mismo río. Tiene 9,0 m por 9,05 m de sección, se inicia a continuación de la caverna de oscilación y su longitud total es de 4,1 km, con solera de concreto y revestimiento en concreto neumático. En la salida tiene una estructura de concreto reforzado con guías para tabloncillos metálicos.

Equipos principales:

La central cuenta con tres unidades de generación, impulsadas por turbinas tipo Francis de eje vertical, que operan a 300 r. p. m. y tienen una potencia nominal de 132 MW cada una. Los tres generadores sincrónicos de eje vertical, de 24 polos y 13,8 kV, tienen sistemas de enfriamiento por aire para rotor y estator, excitación estática con sistemas de control, protecciones e instrumentación, que incorporan las últimas tecnologías y las hacen compatibles con el sistema de control digital de la central. Para elevar el voltaje de transmisión de la energía generada, de 13,8 kV a 230 kV, se utilizan transformadores trifásicos

de 150 MVA, incluyendo una unidad de reserva. También cuenta con conexión al Sistema de Transmisión Nacional (STN).

La energía se evacuará hacia la subestación Miel I, mediante cables aislados tipo XLPE y tramos cortos de líneas aéreas. Esta subestación (propiedad de ISA), es de tipo convencional, a 230 kV.

7.3.24 Proyecto hidroeléctrico Río Grande

Está ubicado en la cuenca del río Grande, la cual también hace parte de la hoya hidrográfica del río Porce. Dicha cuenca se encuentra en la zona central del departamento de Antioquia, en jurisdicción de los municipios de San Pedro, Entreríos, Belmira, Don Matías y Santa Rosa de Osos.

Los estudios preliminares para la construcción de río Grande I se remontan a 1941, “ante la urgencia de resolver pronto el problema de escasez de energía frente a la creciente demanda, así como el abastecimiento de agua de consumo para Medellín”.

En 1951 río Grande I inició operación con dos unidades de 25.000 kW cada una, capacidad que fue ampliada en 1956 a 75.000 kW, al ser instalada una tercera unidad. La central aprovecha las aguas de la cuenca del río Grande, cuyo caudal promedio anual es de 34 m³/s, aguas que son conducidas hacia el embalse de Quebradona, cuya capacidad útil es 500.000 m³. El área inundada por el embalse es de 1100 ha, la capacidad de este es 200 Mm³ y su volumen útil 110Mm³.

Actualmente sólo en servicio una de las tres unidades que conforman la central, las otras dos fueron retiradas del Mercado de Energía Mayorista, en el año 2003. El objetivo principal de esta hidroeléctrica es atender la demanda del acueducto metropolitano de Medellín y adicionalmente e generar energía mediante el aprovechamiento de la diferencia de altura de 900 m, existente entre la altiplanicie del río Grande y el Valle de Aburrá.

Generación de energía por medio del embalse

El embalse se forma gracias al represamiento de los ríos Grande y Chico, mediante la construcción de una presa sobre el río Grande, localizada 2.0 km aguas abajo de la confluencia de estos ríos. Una estructura de captación, se encarga de tomar y distribuir las aguas hacia los túneles que las conducen a las centrales de La Tasajera y Niquía. Los túneles tienen 7.2 y 16.4 km de longitud respectivamente.

7.3.25 Central hidroeléctrica La Tasajera

Esta central es subterránea y se encuentra en jurisdicción del municipio de Barbosa al norte del Valle de Aburrá, en cercanías del municipio de Girardota. Utiliza las aguas traídas del embalse, para la generación de 303 MW, correspondiente a un caudal de diseño de 40 m³/s y un salto bruto de 936.4 m. Una vez son utilizadas las aguas en la generación de energía, son descargadas al río Medellín mediante un túnel de fuga de 1.9 km de longitud y un canal de descarga de 780 m. Cuenta con tres turbinas Pelton de cuatro chorros, tres generadores de eje vertical y tres transformadores trifásicos, su potencia nominal es 105 MW, la capacidad nominal es 109 MVA y el voltaje 13.8 KV.

La hidroeléctrica La Tasajera hace parte del proyecto denominado *Aprovechamiento Múltiple del Río Grande*, concebido por Empresas Públicas de Medellín (EPM) con dos propósitos básicos: suministrar agua para el acueducto metropolitano hasta el año 2020 y generar energía para atender la demanda regional y nacional. Sin embargo también aporta bastante al proceso de oxigenación del agua y de esta forma a la descontaminación del río Medellín, donde se descarga el agua turbinada.

Por último, ésta central hidroeléctrica, junto con la central Niquía, conforman el desarrollo hidroeléctrico río Grande II.

7.3.26 Central hidroeléctrica Niquia

Se ubica en el municipio de Bello, en los límites de los municipios de Cañasgordas y Frontino, a 142 km al norte del área metropolitana de Medellín, por la carretera hacia Urabá, costa atlántica antioqueña. También hace parte del proyecto denominado *Aprovechamiento Múltiple del Río Grande* de EPM, cuyos propósitos básicos ya fueron mencionados.

La central Niquía entró en servicio en junio de 1993. Cuenta con una capacidad instalada de 21.000 kW correspondientes a su primera etapa y su infraestructura física quedó habilitada para instalar en un futuro, otras dos unidades generadoras, para una capacidad total de 57.000 kW. Utiliza las aguas del embalse río Grande II, que son conducidas a través de un túnel de 16,4 kilómetros hasta la casa de máquinas.

Después del proceso de generación de energía en la central, estas aguas se llevan por gravedad desde el tanque de carga a la planta de tratamiento Manantiales, a través de una conducción de 4,1 kilómetros de longitud y 1,6 m de diámetro. Dicha planta de tratamiento tiene capacidad de 6 m³/s, que significan 500 millones de litros diarios de agua pura adicionales para el sistema

de acueducto de EPM, capacidad que será aumentada a 9 m³/s, en una segunda etapa.

La central Niquía cuenta con una turbinatipo Pelton de eje vertical y cinco chorros, un generador de eje vertical y un transformador trifásico. Su potencia nominal es 21 MW, la velocidad de 450 r. p. m., capacidad nominal de 23.5 MVA y voltaje de 13.8 KV.

7.3.27 Central hidroeléctrica Herradura

La captación del proyecto sobre el río La Herradura, está localizada en el municipio de Frontino, mientras que la casa de máquinas, las obras de conducción y la descarga de aguas turbinadas al río Cañasgordas, se encuentran en el municipio del mismo nombre.

Foto 66. Central hidroeléctrica La Herradura.



Fuente: EEPPM.

Esta central aprovecha la parte alta y media de la cuenca del río La Herradura hasta aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Pizarro, en la cota 1.187 msnm. La cuenca aprovechable tiene una extensión de 324 km² y drena en el sitio de captación un caudal de 13,8 m³ por segundo. La hidroeléctrica tiene capacidad instalada de 19,8 MW.

7.3.28 Central hidroeléctrica La Vuelta

Está ubicada en jurisdicción de los municipios de Frontino y Abriaquí, el primero situado a 160 km de Medellín por la vía al mar y el segundo a 30 km de Frontino, por una vía de carácter secundario sin pavimentar. El área de captación está en el límite de los dos municipios, en la cota 1.600 msnm,

aprovecha la parte alta y media de la cuenca del río La Herradura hasta la cota 1.600 msnm en la desembocadura de la quebrada La Nancuít, en jurisdicción del municipio de Abriaquí.

Foto 67. Central hidroeléctrica La Vuelta.



Fuente: EPPM.

Esta central entró en operación en octubre de 2004, junto con la central La Herradura, hace parte del proyecto *Desarrollo hidroeléctrico del río La Herradura* y tiene capacidad instalada de 11,8 MW.

La cuenca tiene una extensión aproximada de 286 km² y drena en el sitio de captación un caudal promedio de 12,1 m³/s. La central aprovecha una caída neta de 112,9 metros y un caudal de 12 m³/s, posee una unidad generadora accionada por una turbina tipo Francis de eje horizontal.

7.3.29 Central hidroeléctrica La Ayura

Está localizada en Envigado a 12,5 kilómetros al sureste de Medellín. Su construcción fue sugerida en 1976, como una forma de aprovechar las aguas que alimentan la planta de potabilización de la Ayurá, para la generación de energía. De acuerdo con dicho estudio, empezó a operar en 1983 y se convirtió en la segunda central de EPM con doble funcionalidad: producción de energía y abastecimiento de agua, después de la central Piedras Blancas. Dentro de EPM, la propietaria de esta central es la Gerencia de Aguas y la Gerencia Generación de Energía, está a cargo de su operación y mantenimiento.

La central de Ayurá tiene capacidad instalada de 20.000 kW y se sirve de las aguas desviadas del río Buey hacia el río Piedras, bombeando a su vez al Pantanillo. El caudal resultante junto con la quebrada las Palmas, conforman el embalse la Fe.

Foto 68. Central hidroeléctrica La Vuelta.



Fuente: EEPPM.

Las aguas captadas son conducidas a la casa de máquinas a través de un túnel de 8.600 m, que en su parte final se trifurca para posibilitar el óptimo funcionamiento de la central y de su planta de tratamiento.

La casa de máquinas de la Ayurá aloja una turbina tipo Francis con 20 MW de potencia y una velocidad nominal de 720 r. p. m.

La descarga del agua turbinada (8,2 m³/s), es conducida hacia la planta de potabilización Ayurá, para abastecer el sistema de acueducto.

CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITUANGO

Foto 69. Central hidroeléctrica Ituango.



Fuente: <http://www.elinformador.com.co/index.php/general/79-nacional/176409-epm-teme-que-pueda-romperse-la-represa-de-la-hidroelectrica-de-ituango>.

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango se localiza sobre el río Cauca, en el llamado “Cañón del Cauca”, tramo en el cual este río, que nace en el sur del país, corre a través de profundos cañones y desciende unos 800m. Fuente <http://www.hidroituango.com.co/>

El Proyecto está conformado por una presa de 225 m de altura y 20 millones de m³ de volumen, y una central subterránea de 2.400 MW de capacidad instalada y 13.930 GWh de energía media anual. <http://www.hidroituango.com.co/>.

Es de anotar que esta central hidroeléctrica es la mas grande en Potencia, energía y en volumen embalsado de Colombia, se estima que entra a operar en el año 2018, pero como es conocido se presentaron problemas en su construcción y según EPM entraría a operar en los próximos años.

CENTRAL HIDROELÉCTRICA SOGAMOSO

Foto 70. Central hidroeléctrica Sogamoso.



Fuente: <http://1.bp.blogspot.com/-epO6JRtzipF8/VLf7JSdJXOI/AAAAAAACL3U/1j4nVWL3zAk/s1600/HIDROSOGAMOSO.jpg>.

La Central utiliza las aguas del río Sogamoso en la generación de energía eléctrica mediante la construcción de una presa de 190 m de altura y una casa de máquinas subterránea con las tres unidades de generación más grandes de Colombia. Con 820 MW de capacidad instalada y una generación media

anual de 5.056 GWh-año, es la cuarta hidroeléctrica con mayor capacidad instalada en el país que incrementará nuestra producción de energía alrededor del 60% y pondrá al servicio de los colombianos cerca del 8,3% de la energía que consumen en un año. Fuente: <https://www.isagen.com.co/SitioWeb/es/nuestro-negocio/generamos-energia/central-hidroelectrica-sogamoso>

CENTRAL HIDROELECTRICA EL QUIMBO

La central hidroeléctrica El Quimbo está situada en el departamento del Huila, sur de Colombia, entre las cordilleras central y oriental a 70 Km al sur de Neiva. Se encuentra ubicado aguas arriba del embalse de Betania, también de Emgesa, y su área de influencia abarca los municipios de Altamira, El Agrado, Garzón, Gigante, Paicol y Tesalia. Fuente: <http://www.proyectoelquimboemgesa.com.co/site/AvancesenObra.aspx>

Esta central tiene una capacidad de generación de energía aproximada de 400 MW (2.216 GWh/año) producidos por dos turbinas tipo Francis de eje vertical, situadas en una casa de máquinas construida a cielo abierto a 230 metros del pie de presa. El embalse tiene una cota máxima de 720 msnm y cubre un área de 8.250 hectáreas con un volumen útil de 2.354 hm³. Fuente: <http://www.proyectoelquimboemgesa.com.co/site/AvancesenObra.aspx>

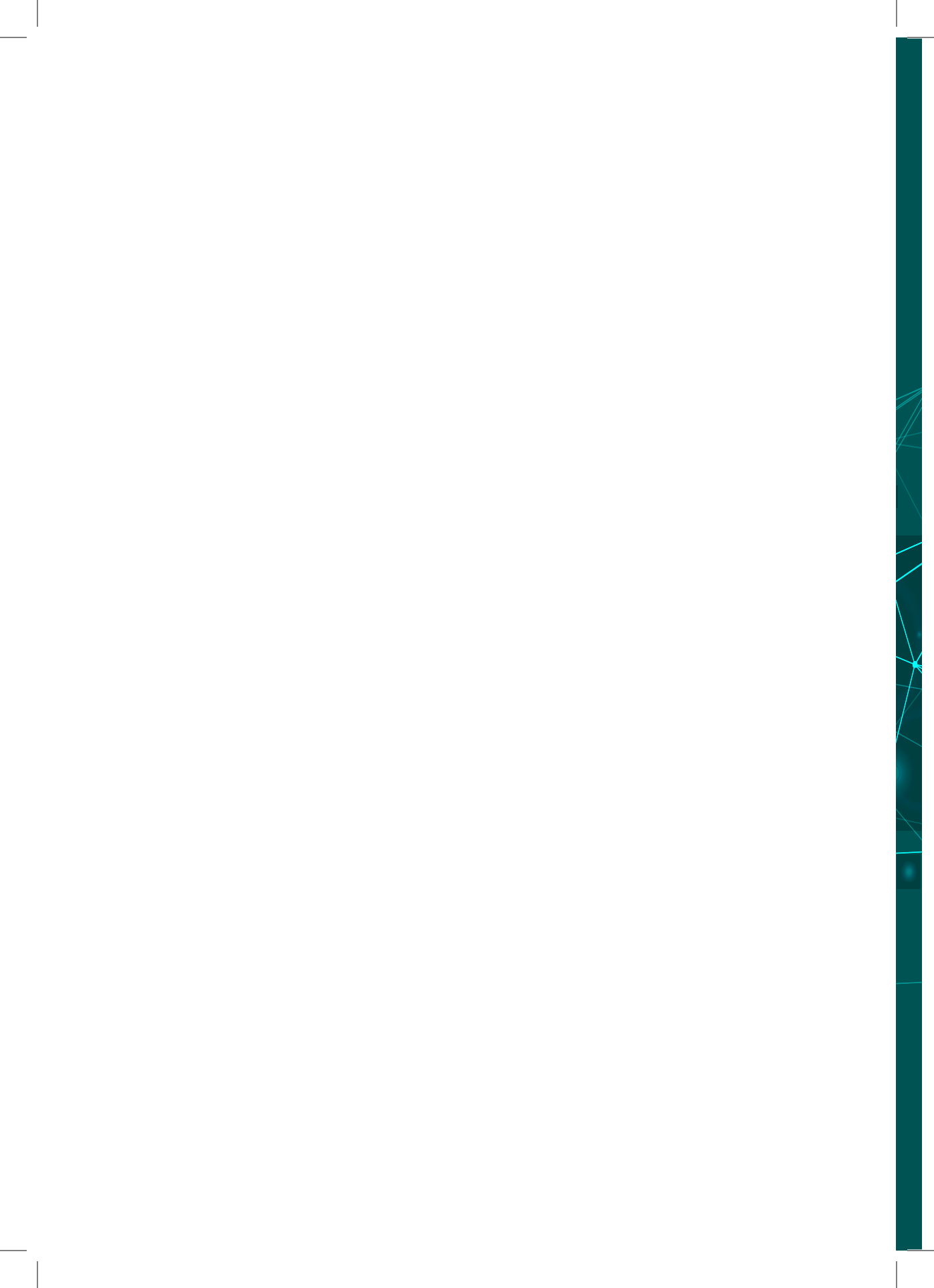
7.4 CONCLUSIONES

Se realizó Investigación aplicada en el tema de Gestión Integral de recurso hídrico, caracterización básica de la capacidad de almacenamiento e información técnica de 44 embalses en Colombia, que prestan diferentes servicios, dentro de los que se encuentran: producción de energía eléctrica, riego y abastecimiento de agua potable.

Entre la información recolectada se evidenció que no existen base de datos, ni información suficiente para algunos embalses.

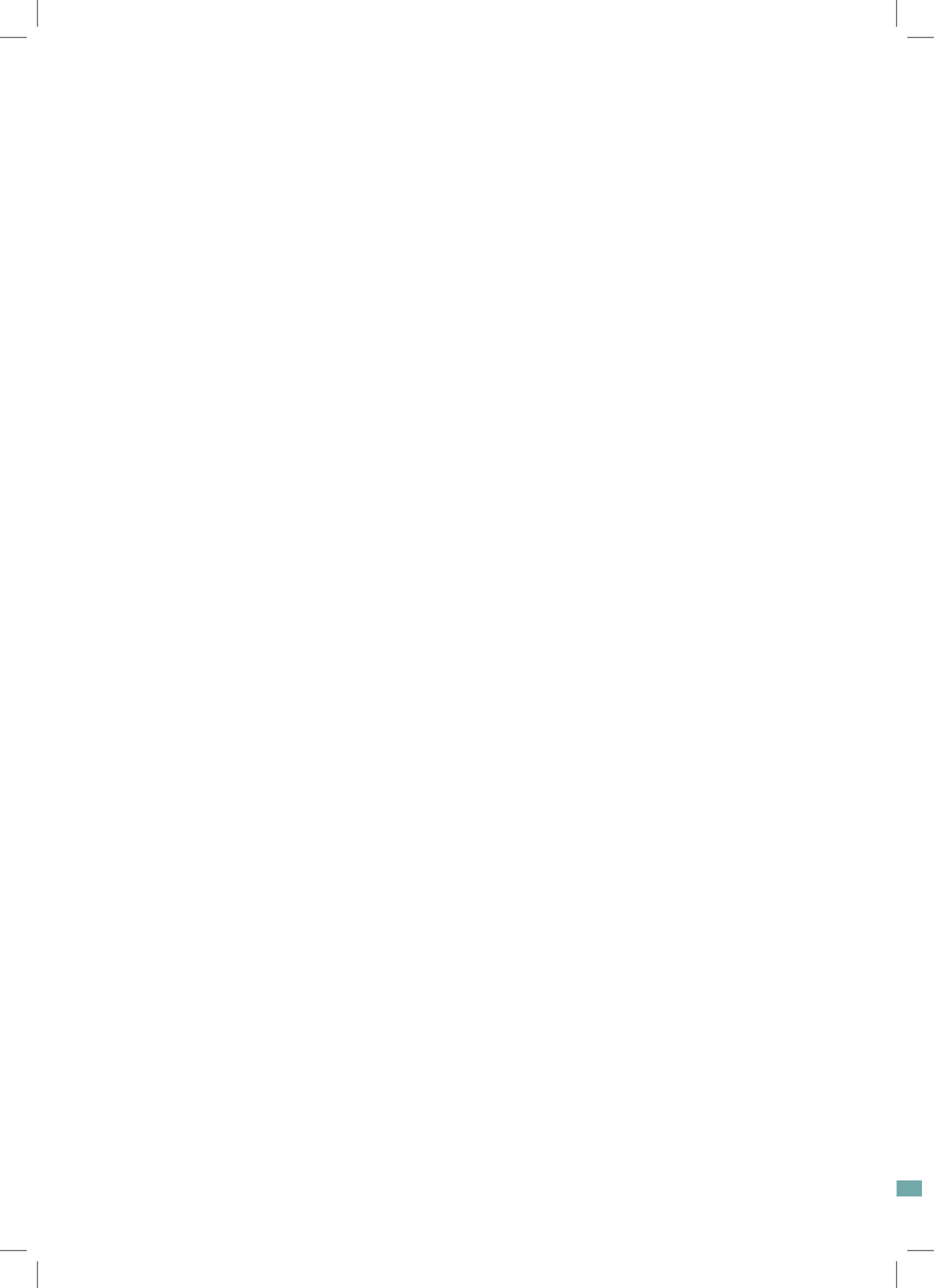
De los embalses caracterizados en este estudio, se encontró que nueve grandes embalses cumplen una función de riego, aunque uno de ellos todavía está en construcción. Nueve grandes embalses están destinados al abastecimiento de agua y 18 tienen la finalidad de producir energía. Respecto al funcionamiento, se encontró que 11 grandes centrales hidroeléctricas funcionan a filo de agua y otros sistemas funcionan en cascada, aunque la totalidad de los embalses son multifuncionales, adicional a su objetivo principal sirve para otros fines como regulación de caudales y amortiguamiento de crecientes.

Actualmente, hay más de 1.200 grandes presas en España que aportan una capacidad de unos 56.000 hm³. España es el quinto país del mundo después de China (85.000 embalses), Estados Unidos, India y Japón con mayor número de éstas; adicionalmente, España utiliza aproximadamente 100 veces que Colombia comparando volumen embalsado contra área del territorio en Km², más de 100 de las mismas ya existían en el año 1915 y unas 450 son anteriores a 1960. Estas cifras indican que una parte importante de los esfuerzos debe centrarse en su conservación y reparación, manteniéndolas en unas condiciones óptimas de explotación y seguridad acorde con las exigencias del siglo XXI, Colombia ha construido del orden de 36 grandes embalses.





BIBLIOGRAFÍA



1. Abuchaibe et al. 1988
2. aes chivor & cia s.c.a. e.s.p
3. AGUADO, E., & BURT, J. (2015). Understanding Weather & Climate. Glenview: Pearson.
4. APARICIO. Francisco Javier. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial LIMUSA, 2001.
5. Astrono Disponible en: <http://www.astromia.com/glosario/precipitacion.htm>. Fecha de consulta:
6. Barriga, J. 2008. Batimetría embalse San Rafael, sistema de reserva para Bogotá y municipios aledaños. Trabajo de grado de Recursos Hídricos. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D. C. 100 p.
7. Caicedo B. y López, F. 1997. Resultados del estudio geotécnico de la zonificación sísmica de Bogotá. IX Jornadas Geotécnicas. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá
8. Campos Aranda Daniel Fco, Procesos del ciclo hidrológico, 1984
9. CAR, Boletín Estadístico de hidrología y climatología, 2011
10. CAR, Catalogo de estaciones hidrometereológicas, 2005
11. CHOW, V. T., & MAIDMENT, D. (1994). Hidrología Aplicada . Santa fe de Bogotá: McGraw Hill.
12. Cocco Quezada. 1997
13. Corporación Autónoma Regional (CAR). 2004 - 2006. Informes Corporación Autónoma Regional. Estaciones Hidrometeorológicas. Informes técnicos. Bogotá.
14. Corporación Autónoma Regional del Valle -CVC-
15. Del Campo Aguilera, A. 1967. Curso de Hidrología General y Aplicada. Instituto de Hidrología Escuela de Hidrología. Madrid. 372 p.

16. E.A.A.B. 1.987. Análisis del aprovechamiento hídrico de los reboses de los embalses de La Regadera y Chisacá. Departamento de hidrología E.A.A.B. Bogotá.
17. Ecoforest. 1997. Inventario y Diagnostico de los Recursos Naturales Renovables en el Área Jurisdiccional de la Car.
18. Eslava, 1995.
19. ESLAVA, J. (1995). Regimén de la presión atmosférica en Colombia (Vol. 8). (F. y. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Ed.) Santafe de Bogotá: Editora Guadalupe LTDA.
20. ESLAVA, J. A. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. Revista Academia Colombiana de Ciencias exactas, físicas y naturales , 18 (71), 507-538.
21. Estructuras hidráulicas. embalses. m. e. guevara 2
22. Estudio Nacional del Agua, IDEAM, 2000. Informe.
23. FONSERÉ, Eduardo. Elementos de Meteorología. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A., 1943, 358 p.
24. Hidrología Básica. Universidad Nacional Facultad de Ingeniería, 1 Edición Santa FE de Bogotá, 1998.
25. Horemans G. Embalses y presas en Colombia. Bogotá 2006.
26. IDEAM, Balance hídrico y relación de oferta y demanda de agua en Colombia. 2016
27. Informes Corporación Autónoma Regional (2004 - 2006), Estaciones Hidrometeorológicas.
28. INGETEC. 1.996. Refuerzo presa La Regadera. Santa Fe de Bogotá D.C., E.A.A.B.
29. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas. Logros en Hidrología Isotópica. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, Colombia 1997.
30. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA DE ESPAÑA/UNESCO. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos . (R. Heras, Ed.) Madrid: UNESCO.
31. JIMÉNEZ ESCOBAR, H. (1992). Hidrología básica I. Cali: Universidad del Valle.

32. Jiménez Escobar, H. 1992. Hidrología básica I. Universidad del Valle. Cali. 188 p.
33. LINSLEY, R., KOHLER, M., & PAULUS, J. (1977). Hidrología para Ingenieros. Bogotá: Mc Graw Hill.
34. Maderey Laura, Principios de hidrogeografía, 2005
35. Marbello Pérez, Ramiro Vicente, Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica, 2005.
36. Materón Muñoz, H. 1991. Obras Hidráulicas Rurales. Universidad del Valle, Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas. Cali. 318 p.
37. MATERÓN MUÑOZ, Hernán. Hidrología Básica II. Cali: Universidad del Valle, 1992, 188 p.
38. MATERÓN MUÑOZ, Hernán. Obras Hidráulicas Rurales. Cali: Universidad del Valle, Departamento de Mecánica de Fluidos y Ciencias Térmicas, 1991, 318 p.
39. MONSALVE SÁENZ, G. (1995). Hidrología en la ingeniería.
40. MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. 1ª edición. Santafé de Bogotá Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, Julio 1995, 358 p.
41. Oramas, G. 2006. Embalses y presas en Colombia. Bogotá.
42. Oramas, G. Año. Embalses y lagos en Colombia, Popayán Colombia 120 pags, 1985
43. PEREZ ROMO, A. T., & VANEGAS SANDOVAL, L. j. (2016). Estudio hidrológico e hidraulico en la zona baja de la cuenca del río frío en el municipio de Chia (Trabajo de grado pregrado). Bogotá: Universidad Catolica.
44. PLATA, Bedmar A. Isótopos en Hidrología. Primera edición. España: Alhambra S.A., 1972.
45. Proyecto de grado "Estudios hidrológicos y ambientales aplicables a la cuenca del río Frío y/o cuencas de interés en Colombia.
46. Roldan, Márquez y Guillot, Guías embalses en Colombia.
47. ROTH, G. (2010). Guide de la Météorologie. Paris: Delechaux et Niestlé SA.
48. SILVA MEDINA, G. (1998). Hidrología Básica (1 Edición ed.). Santafe de Bogotá: Universidad Nacional Facultad de Ingeniería.
49. Torres E. 2006. Técnicas nucleares y convencionales aplicados a aguas superficiales y subterráneas. Universidad Libre. Bogotá.

50. TORRES RUIZ, E. (2006). Agrometeorología. Mexico D.F: Editorial Trillas.
51. Torres, T. 1992. Conceptos de hidrología isotópica y aplicaciones en la ingeniería.
52. Ugarte Alexandra, Disponibilidad hídrica en la capa agrícola del suelo, 2017
53. USDA-SCS 1965.
54. Vallejo M. Gilberto (Noviembre de 2013) . Reflexiones, elementos y perspectivas para pensar la dimensión ambiental en las Instituciones de Educación Superior en Colombia (PRAU). Universidad Libre. Bogotá D.C. Pág. . ISBN: 978-958-8791-37-1.
55. WMO. (1992). Measurement of Temperature and Humidity. Technical Note No. 194 WMO-No. 759. Geneva: World Meteorological Organization.
56. WMO. (2008). WMO-No. 8. Geneve: World Meteorological Organization.
57. WMO. 1992. Technical Note No. 194WMO-No. 759.Measurement of Temperature and Humidity. Technical Note No. 194WMO-No. 759. Geneva. World Meteorological Organization.
58. ZABALETA M, Evaluación hidráulica e hidrológica de embalses de la sabana. Colombia. 1999.

INFOGRAFÍA

- <http://brc.com.co/archivos/emgesa%20rev%20anual%202000.pdf>
- <http://ecgroup.com.co/services/>
- http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/centraleshidroelectricasdecol/centrales_hidroelectricas_de_col.html
- <http://hisagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/presas/presas.htm>
- <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/centrales.html>
- http://poseidon.unalmed.edu.co/parh/lab_hca/historia.html
- <http://urra.com.co>

- <http://www.astromia.com/glosario/precipitacion.htm>
- <http://www.astromia.com/glosario/precipitacion.htm>
- <http://www.car.gov.co/informeshidrometeorologicos/año2006/html>
- <http://www.cathalac.org/balancehidrico/>
- <http://www.cnn.com/specials/1999/china.50/asian.superpower/three.gorges/>
- <http://www.eppm.com/epm/institucional/energia>
- <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>
- <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>
- <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab488s/AB488S04.htm>
- <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab488s/AB488S04.htm>
- <http://www.hidroituango.com.co/>
- <http://www.ideam.gov.co/hidrologiaencolombia/html>
- <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp2.pdf>
- <http://www.infoplease.com/ipa/a0113468.html>
- <http://www.isagen.com.co/metainst.jsp>
- <http://www.planetaorganico.com.br/enhistor.htm>
- https://www.isagen.com.co/comunicados/Central_jaguas_2013.pdf
- www.aes.com/chivor
- www.ambientum.com/enciclopedia/atmosfera/3.01.16.26_2r.html
- www.chivor.com.co
- www.eppm.com
- www.epsa.com.co
- www.hidromet.com.pa/educacion_hidrologico.php
- www.ingetec.com.co

Investigación en Hidrología: General, Isotópica y Aplicada.

Se terminó de imprimir en agosto de 2018.

Para su elaboración se utilizó papel bond de 90 gramos en páginas interiores y papel propalcote de 300 gramos para la carátula.

Las fuentes tipográficas empleadas son Trebuchet (Regular) 11,16 puntos en texto corrido y Trebuchet (Bold) 30 y 15 puntos en títulos.



Juan Antonio Aragón

Es un apasionado por las nubes, como el mismo se define, eso lo llevo a estudiar ingeniería ambiental, en la Universidad Libre Colombia, y luego la maestría en ciencias-Meteorología, en la Universidad Nacional de Colombia. Trabajó un tiempo en el servicio meteorológico colombiano, IDEAM, en la oficina de pronósticos y alertas, donde elaboró el Protocolo para la validación de los pronósticos del estado del tiempo de Bogotá.

Luego de cumplir uno de sus sueños personales de perfeccionar un segundo idioma, Juan Antonio, regreso al país y desde el año 2013, hasta la fecha, se ha dedicado principalmente a la docencia, de la asignaturas Meteorología, y Climatología, la dirección del semillero de investigación Rachel Carson, y la dirección de trabajos de grado asociados a cambio climático, variabilidad climática, hidrometeorología, agrometeorología, y climatología urbana, vinculados al grupo de investigación TECNOAMBIENTAL, pertenecientes al programa de ingeniería ambiental de la Universidad Libre.

También se destaca que en el año 2015 tuvo la oportunidad de asistir, en calidad de becario, al curso Latinoamericano sobre técnicas de percepción remota aplicadas a la química de la atmosfera, organizado por la Universidad Autónoma de México (UNAM) y el proyecto Química Atmosférica Global Internacional (IGAC) grupo Américas, celebrado en Ciudad de México.



El Libro investigación en hidrología general. Isotópica y aplicada fue desarrollado por experiencia profesional de los autores, con apoyo del semillero de investigación TECNOAMBIENTAL y estudiantes y auxiliares de investigación del Grupo de Investigación TECNOAMBIENTAL, desarrollando investigaciones en el área de Gestión Integral del Recurso Hídrico, enmarcada en la Gestión y manejo integral de Recursos naturales.