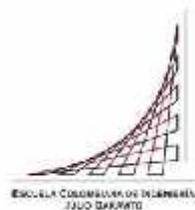


Maestría en Ingeniería Civil

Aplicación del algoritmo MinMax en la optimización de embalses multipropósito (Caso de estudio: Represa Rio Ranchería)

Liliana Marcela Rojas Troncoso

Bogotá, D.C., 23 de junio de 2021



Aplicación del algoritmo MinMax en la optimización de embalses multipropósito (Caso de estudio: Represa Rio Ranchería)

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil,
con énfasis en Recursos hidráulicos y medio ambiente**

Germán Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., 23 de junio de 2021



La tesis de maestría titulada “Aplicación del algoritmo MinMax en la optimización de embalses multipropósito (Caso de estudio: Represa Rio Ranchería)”, presentada por Liliana Marcela Rojas Troncoso, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Ing. Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Ing. Freddy Santiago Duarte Prieto

Jurado

Ing German Eduardo Acero Riveros

Bogotá, D.C., 23 de junio de 2021

AGRADECIMIENTOS

A En primer lugar quiero agradecer al Dr. German Santos, director de esta tesis por toda su paciencia, sus conocimientos y apoyo que me brindo para el desarrollo de la misma y que no me dejo desistir. A mi querida universidad la Escuela Colombiana de Ingeniería y a los que tuve la suerte de tener como profesores por todos los conocimientos y la formación que me permitieron adquirir y por el gran orgullo que me da haber formado parte de esta institución.

Y finalmente, y muy especialmente a mi papá, Luis Mario Rojas, porque sin sus consejos, sin su apoyo e incondicional ayuda no hubiera sido posible la realización de éste trabajo.

A todos muchas gracias.

RESÚMEN

Las políticas de gestión de los recursos hídricos se constituyen como un tema de interés general a nivel mundial, dentro de las cuales es frecuente la construcción de embalses que permitan el aprovechamiento y control del agua de una región ante diferentes necesidades en su entorno. Para llevar a cabo una gestión eficiente del recurso, resulta muy beneficioso construir embalses en capacidad de gestionar más de un requerimiento funcionando como elemento de gestión del recurso hídrico. Una política sostenible dentro del manejo de un embalse multiobjetivo debe entonces permitir la protección del ambiente y los ecosistemas a la par que se generan políticas que permitan el desarrollo económico y social a través del aprovechamiento del recurso. Esto entonces involucra múltiples factores e intereses que frecuentemente resultan opuestos entre ellos, de esto deriva la necesidad de generar reglas de operación y herramientas de toma de decisiones que permitan ofrecer el mejor consenso entre los objetivos que el embalse debe ofrecer.

Para establecer unas políticas óptimas de manejo en embalses se pueden utilizar diferentes técnicas de optimización y aproximación a problemas multiobjetivo desde las más clásicas y sencillas a funciones de alta complejidad. El presente trabajo busca hacer uso de un algoritmo clásico de la teoría de juegos el algoritmo Minimax que en su esencia plantea una alternativa que genere la mínima pérdida a todos los jugadores para hacer una aproximación al problema de regulación de un embalse multipropósito. Para esto se utilizará información histórica de caudales y demandas para generar reglas de operación. El presente trabajo toma la Represa El Cercado sobre el Rio Ranchería como caso de estudio para la aplicación del algoritmo.

Palabras clave:

Minimax, optimización, reglas de operación embalse multipropósito, La guajira, Rio Ranchería, El cercado.

ABSTRACT

Water management policies are emerging as a global issue. One of the most used tools for water resource management is the construction of reservoirs, which allow the use and control of water in different regions and respond to different needs and requirements of the environment. To carry out an efficient management of water resources, it is very beneficial to build reservoirs capable of managing more than one requirement, functioning as an element in which decisions can be made regarding the distribution of water.

A sustainable policy within a multi-objective reservoir must therefore allow the protection of the environment and ecosystems, while at the same time generating policies that allow economic and social development through the efficient use of water resources. These principles involve multiple factors and interests, which are often opposed to each other, hence the need to generate operating rules and decision-making tools that offer the best consensus among the objectives that the reservoir should offer.

To establish optimal management policies in reservoirs, different optimization techniques and approaches to multi-objective problems can be used, from the most classic and simple to highly complex functions. This work uses a classical game theory algorithm, the Minimax algorithm, which essentially proposes an alternative that generates the minimum loss to all players, to make an approximation to the regulation problem of a multi-purpose reservoir. For this, historical flow and demand information will be used to generate operating rules. This work takes El Cercado Dam on the Ranchería River as a case study for the application of the algorithm.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
Resumen	5
Abstract	6
1 INTRODUCCIÓN.....	20
2 ANTECEDENTES.....	22
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
3.1 GENERALIDADES.....	30
3.2 CASO DE ESTUDIO	33
4 OBJETIVOS.....	36
4.1 OBJETIVO GENERAL	36
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	37
6 MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA.....	39
6.1 ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	39
6.1.1 Optimización multiobjetivo	39
6.1.2 Algoritmo MinMax.....	44
6.2 EMBALSES MULTIPROPÓSITO.....	46
6.2.1 Descripción.....	46

6.2.2	Reglas de operación de embalses multipropósito	48
6.2.3	Demandas de consumo humano y/o industrial.....	49
6.2.4	Demandas de riego	52
6.2.5	Caudal ecológico	53
6.3	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON.....	53
7	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.....	55
7.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	55
7.2	VARIABLES Y PARÁMETROS DEL MODELO	57
7.3	RESTRICCIONES.....	59
7.4	FUNCIÓN OBJETIVO	60
7.5	ALGORITMO MINIMAX	62
7.5.1	Fase a.....	64
7.5.2	Fase b.....	65
8	DESARROLLO COMPUTACIONAL EN LENGUAJE PYTHON	67
8.1	GENERALIDADES.....	67
8.2	OBJETIVO	68
8.3	REQUERIMIENTOS DE FUNCIONAMIENTO.....	68
8.4	ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	68
8.4.1	Módulo de Preferencias de Cálculo.....	71

8.4.2	Módulo de Embalse.....	79
8.4.3	Módulo de Información hidroclimática y caudales.	81
8.4.4	Módulo de Producción de energía.....	83
8.4.5	Módulo de Suministro.....	85
8.4.6	Módulo de Riego.	88
9	CASO DE ESTUDIO.....	90
9.1	ANTECEDENTES DEL SISTEMA DEL EMBALSE.....	91
9.2	EMBALSE “EL CERCADO”.....	95
9.3	PRESA.....	96
9.4	DESCARGA DE FONDO	98
9.5	ALIVIADERO.....	99
9.6	PRESA DERIVADORA	99
9.7	DISTRITO RANCHERIA	100
9.7.1	Canal del Aducción (Inicio de la conducción Ranchería).....	101
9.8	DISTRITO SAN JUAN DEL CESAR:	103
9.9	DISTRIBUCIÓN PARA CONSUMO HUMANO (ACUEDUCTO).....	106
9.10	USUARIO HIDROELÉCTRICO.....	107
9.10.1	Descripción de la central hidroeléctrica	107
9.11	RESUMEN DE INFRAESTRUCTURA	107

9.12	HIDROLOGÍA.....	108
9.12.1	Cuenca del Río Ranchería.....	108
9.12.2	Estaciones de medición	111
9.12.3	Caudales afluentes al embalse (at)	113
9.12.4	Precipitación	120
9.12.5	Temperatura	122
9.12.6	Brillo solar	123
9.12.7	Humedad Relativa	123
9.12.8	Evaporación.....	124
9.12.9	Evapotranspiración potencial.....	124
10	APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	125
10.1	PARAMETROS DE ENTRADA	125
10.1.1	Parámetros hidrológicos	125
10.1.2	Parámetros del embalse	132
10.1.3	Demandas	133
10.2	ESCENARIOS DE CÁLCULO	135
10.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	137
10.3.1	Primer escenario.....	142
10.3.2	Segundo escenario	143

10.3.3	Tercer escenario.....	144
10.3.4	Cuarto escenario	145
10.3.5	Quinto escenario.....	146
10.3.6	Sexto escenario	147
10.3.7	Séptimo escenario	148
10.3.8	Octavo escenario	149
10.3.9	Noveno escenario.....	150
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
12	Referencias	153
13	Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.
13.1	ANEXO 1: ALGORITMO (MOTOR DE CÁLCULO WÛIN) ...	¡Error! Marcador no definido.
13.2	ANEXO 2: TABLAS DE DATOS CLIMATOLÓGICOS	¡Error! Marcador no definido.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2-1: Cuenca Rio Ranchería (Doria & Vivas, 2016)	26
Figura 3-1: Árbol de problema de investigación	33
Figura 6-1: Frente de Pareto de una función con dos objetivos	42
Figura 6-2: Mapa de demanda hídrica para los sectores de industria, servicios y energía (Fuente: IDEAM).....	51
Figura 6-3: Mapa de demanda hídrica para los sectores de industria, servicios y energía (Fuente: IDEAM).....	52
Figura 7-1: Esquema planteamiento del problema de optimización	56
<i>Figura 7-2: Estructura del conjunto R_m de las series hidrológicas de referencia.</i>	58
Figura 7-3: Efecto de diferentes elecciones de la duración m en U_m	63
Figura 8-1: Pantalla inicial	69
Figura 8-2: Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin	70
Figura 8-3: Pantalla inicial	71
Figura 8-4: Boton de ingreso a módulo de preferencias de cálculo	71
Figura 8-5: Pantalla de selección de preferencias de cálculo.....	72
Figura 8-6: Selección sistema de unidades	72
Figura 8-7: Selección de precisión de cálculo para iteraciones	72
Figura 8-8: Botón de acción.....	72

Figura 8-9: Ventana de selección de archivos	73
Figura 8-10: Página de archivo excel de ingreso de datos (Embalse)	73
Figura 8-11: Mensaje de lectura exitosa de datos	79
Figura 8-12: Boton de ingreso a modulo de embalse	80
Figura 8-13: Modulo de datos del embalse.....	80
Figura 8-14: Menu desplegable, opciones modulo embalse.....	81
Figura 8-15: Gráfica caudal de salida del embalse por tunel inferior	81
Figura 8-16: Botón de ingreso al módulo de información hidro climática..	82
Figura 8-17: Modulo de información hidroclimática	82
Figura 8-18: Menú desplegable módulo de información hidroclimática	83
Figura 8-19: Grafica de representación de variables hidroclimáticas	83
Figura 8-20: Botón de ingreso al módulo de información de energía	84
Figura 8-21: Módulo información requerimiento de energía	84
Figura 8-22: Representación gráfica de los requerimientos de energía ...	85
Figura 8-23: Botón de ingreso al módulo de suministro.....	85
Figura 8-24: Representación gráfica de los datos del requerimiento de suminsitro.....	86
Figura 8-25: Módulo para estimar el caudal de suministro a partir de datos de población	87

Figura 8-26: Botón de ingreso al módulo de ingreso de parámetros de riego	88
Figura 8-27: Módulo de requerimientos de riego	89
Figura 9-1: Localización y distribución del proyecto (Fuente: Elaboración propia)	92
Figura 9-2: Represa el Cercado, estado actual (Fuente: GoogleEarth)	94
Figura 9-3: Vista de la presa El Cercado (Fuente: ADR, 2020)	95
Figura 9-3: Diseño presa en planta (Fuente: ADR, 2020).....	96
Figura 9-3: Diseño presa Perfil (Fuente: ADR, 2020)	97
Figura 9-4: Presa derivadora. Imágenes captación (Fuente ADR, 2020)	100
Figura 9-5: Canal de aducción de la conducción Ranchería	102
Figura 9-6: Tanque de amortiguación K0+000	104
Figura 9-7: Bloque distribuidor (Deriva a la conducción San Juan-PCH- Descarga Válvula HB	105
Figura 9-8 Poblaciones del río Ranchería. Fuente: Fundación Pro-Sierra Nevada de Santa Marta	109
Figura 9-9: Localización estaciones.....	112
Figura 9-10: Serie histórica caudales medios mensuales Caracolí	115
Figura 9-11: Serie histórica.....	115
Figura 9-12: Curva de duración de caudales.....	116
Figura 9-13: serie de caudal medio mensual multianual.....	117

Figura 9-14: Serie histórica de caudales	117
Figura 9-15: Curva de duración de caudales	118
Figura 9-16: Análisis de homogeneidad de datos.....	119
Figura 9-17 Aportaciones anuales	120
Figura 9-18: Área de influencia.....	121
Figura 9-19: Serie de precipitaciones mensuales	122
Figura 9-20: Serie anual de temperatura	122
Figura 9-21: Serie anual de brillo solar	123
Figura 9-22: Serie anual de humedad relativa en el sitio del embalse..	123
Figura 9-23., Serie anual de evaporación medida con tanque evaporímetro tipo A.....	124
Figura 9-24: Variación mensual de la evapotranspiración potencial en las estaciones más cercanas, estimada a partir del método de Thornwaite	124
Figura 10-1 Lluvia máxima diaria. Valores máximos, medios y mínimos multianuales	126
Figura 10-2: Precipitaciones relacionadas con fenómenos niño y niña ..	127
Figura 10-3: Hietograma de lluvia de 24 horas. Fuente: INCODER	128
Figura 10-4: Mapa Agrológico de la zona Fuente IGAC	129
Figura 10-5 Mapa geológico de la zona Fuente: IGAC.....	129
Figura 10-6: Serie de aportación de caudales utilizada en la modelación	131

Figura 10-7: Caudales medios mensuales	131
Figura 10-8: Curva Elevación-Volumen. Fuente: INCODER	133
Figura 10-9: Datos de entrada del embalse.....	138
Figura 10-10: Caudales medios, maximos y minimos mensuales	139
Figura 10-11: Frente de Pareto	141
Figura 10-12: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 1	142
Figura 10-13: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 2	143
Figura 10-14: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 3	144
Figura 10-15: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 4	145
Figura 10-16: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 5	146
Figura 10-17: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 6	147
Figura 10-18: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 7	148
Figura 10-19: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 8	149
Figura 10-20: Volumenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 9	150

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1: Ejemplos de embalses multipropósito alrededor del mundo Fuente: (Banche, 2013).....	24
Tabla 2-2: Principales embalses de Colombia.....	24
Tabla 7-1 Variables del algoritmo de optimización	58
Tabla 8-1 Parámetros de ingreso módulo embalse	74
Tabla 8-2: Parámetros de entrada módulo hidroclima	74
Tabla 8-3: Parámetros de entrada módulo energía	75
Tabla 8-4: Parámetros de entrada módulo Producción de energía	75
Tabla 8-5: Parámetros de entrada módulo demandas de consumo	76
Tabla 8-6: Parámetros de entrada módulo riego	76
Tabla 8-7: Parámetros de entrada módulo caudal medio mensual	77
Tabla 8-8: Nivel medio mensual	78
Tabla 8-9: Demandas de consumo.....	78
Tabla 8-10: Temperatura media mensual.....	79
Tabla 8-11: Datos requeridos para el cálculo de las necesidades de suministro.....	87
Tabla 9-1: Características del cuerpo de la presa. Fuente: INCODER.....	97
Tabla 9-2: Parámetros de la descarga de fondo. Fuente: INCODER.....	98
Tabla 9-3: Parámetros del aliviadero. Fuente: INCODER	99

Tabla 9-4: Distribución de cultivos Distrito Ranchería (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020).....	102
Tabla 9-5: Distribución de cultivos distrito San Juan (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020).....	105
Tabla 9-6: Resumen Infraestructura Represa el Cercado	107
Tabla 9-7 Características geomorfológicas del Rio Ranchería Fuente: INCODER.....	111
Tabla 9-8: Estaciones de medición.....	113
Tabla 9-9: Serie histórica caudales medios mensuales Caracolí	114
Tabla 9-10:	116
Tabla 9-11: Datos de caudales en la estación El Cercado	118
Tabla 9-12: Estaciones pluviométricas	121
Tabla 10-1: Máxima precipitación diaria de cada año de Sabanas de Manuela. Fuente: INCODER	126
Tabla 10-2: Clasificación del número de curva del terreno.....	130
Tabla 10-3: Serie de valores medios represa El Cercado	132
Tabla 10-4: Demandas futuras embalse El Cercado Fuente:TYPESA	133
Tabla 10-5: Volúmenes de agua para futuros riegos. Fuente: INCODER	134
Tabla 10-6: Demandas futuras presa El Cercado. Fuente: TYPESA.....	135
Tabla 10-7: Escenarios de modelación.....	135

Tabla 10-8: Valores de los parámetros α y β obtenidos en la modelación de los 9 escenarios	140
---	-----

Tabla 10-9: Escenarios de modelación originales del diseño del embalse.	140
--	-----

1 INTRODUCCIÓN

“El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía, la producción de alimentos, los ecosistemas y para la supervivencia de los seres humanos. El agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es un decisivo vínculo entre la sociedad y el medioambiente. El agua es, además, una cuestión de derechos. A medida que crece la población mundial se genera una necesidad creciente de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades...” (Organización de las Naciones Unidas, 2020)

El presente trabajo tiene como propósito el desarrollo de un programa que plantee reglas óptimas de operación para embalses multipropósito, cuyas características y requerimientos tengan propósitos opuestos. Este programa, funciona con base en la aplicación del algoritmo MINMAX, que tiene sus orígenes en la teoría de juegos y que plantea en su esencia una solución que dé como resultado la menor pérdida posible en todos los jugadores. Para este caso puntual y de manera paralela se establece el menor porcentaje agrupado de insatisfacción para todos los requerimientos. El aumento de las sequías e inundaciones, así como las demandas energéticas a nivel mundial ha dado como resultado que se plantee más de una funcionalidad en la construcción de un embalse y que en ésta se busque establecer reglas eficientes de operación que permitan satisfacer de la mejor manera los requerimientos colectivos. Sin embargo, al ser un problema de optimización multiobjetivo se pueden plantear diferentes soluciones a partir de la eficacia de cada algoritmo utilizado, esto genera en ocasiones reglas de operación insuficientemente satisfactorias. En este contexto, este trabajo de grado pretende utilizar un algoritmo que garantice la mejor relación de cumplimiento de los objetivos de cada requerimiento, por esto se seleccionó el algoritmo MINMAX para su elaboración. El algoritmo Minimax fue inicialmente planteado por John Von Neumann dentro de las bases de la moderna teoría de juegos, aunque principios

similares también se pueden hallar en los trabajos de Charle Babbage y Emile Borel. Para llevar a la aplicación práctica del programa desarrollado se tomó como caso de estudio la represa de El Cercado en la Guajira, en cuya concepción inicial buscaba generar un embalse multipropósito que permitiera llevar a cabo actividades de riego, suministro de agua, control de inundaciones y generación eléctrica. El departamento de la Guajira es el territorio con mayor índice de escasez hídrica del territorio colombiano, es por esto, que en esta zona en especial la gestión eficiente de los recursos hídricos adquiere un tono de vital importancia para la conservación de las comunidades que la habitan. La Guajira es un departamento de contrastes, que presenta importantes inundaciones en época invernal seguido de largas sequias la mayor parte del año, también tiene muy bajos índices de acceso al agua potable. Estos factores, sumados a entornos multiculturales, lo llevan a ser un lugar de altísima vulnerabilidad por la baja disponibilidad de recurso hídrico. Por esta razón se seleccionó este embalse, localizado sobre el río principal del departamento, El Río Ranchería, como ejemplo del presente trabajo; buscando generar una política ideal de gestión del recurso hídrico que en un futuro permitiese el acceso y aprovechamiento a todas las comunidades de la región.

2 ANTECEDENTES

Un embalse es un cuerpo artificial de agua formado por la obstrucción total o parcial de un cauce de agua mediante la construcción de una presa. Las tendencias actuales de aprovechamiento en los recursos hídricos y de sostenibilidad conducen a que hoy en día gran cantidad de embalses estén diseñados para suplir más de un propósito durante su operación. Dentro de estos múltiples usos están la producción hidroeléctrica, el control de inundaciones la provisión de agua para consumo humano y para distritos de riego, el almacenamiento y reserva de agua, el uso recreacional, la pesca, la mejora de la navegabilidad entre otros. Los embalses pueden ser de variadas dimensiones y capacidad de embalse. Esta variedad de usos genera una gran multiplicidad de requerimientos hídricos para cada instante de tiempo, por lo tanto, la capacidad de satisfacción de cada uno de estos requerimientos depende de la disponibilidad de agua en dicho instante de tiempo. Dicha disponibilidad depende tanto de la capacidad de almacenamiento del embalse como de la precipitación de la cuenca, por lo tanto, no siempre es posible satisfacer al 100% los requerimientos de cada actividad ya que las demandas de las diversas actividades pueden incluso entrar en conflicto. Por ejemplo, un embalse que debe ejercer como un sistema de control de inundaciones, pero a su vez está ideado para la generación hidroeléctrica tiene necesidades opuestas. Mientras que la generación hidroeléctrica, requiere niveles altos del agua sobre la presa para así aumentar su producción, el control de inundaciones se ve favorecido por niveles bajos de agua que aumentan la capacidad de retención de una creciente en caso de que se presente. Para solucionar este tipo de “conflicto de intereses” entre los diversos usos para los que se ha planteado un embalse dado, se deben establecer estrictas normas de operación que permitan optimizar la utilización del recurso hídrico

La utilización óptima de los recursos hídricos se reconoce hoy en día como una estrategia fundamental de sostenibilidad tanto para las naciones como para las organizaciones internacionales. (Ms. Hossain and A. El-Shafie, 2013) En la gran

mayoría de países la producción energética se realiza en su mayoría a través de hidroeléctricas (Scola, 2014) Sin embargo, y tal y como se mencionó anteriormente, los reservorios de agua no tienen a ésta como única actividad productiva y cada día es más frecuente encontrar embalses que entre sus usos, adicional a la producción energética, se encargan del control de inundaciones, suministro de agua, riego, navegabilidad, entre otros. Por esto resulta necesario enfocarse en manejar la efectividad operacional de estos sistemas garantizando la menor cantidad posible de fallas en los mismos.

Con el pasar de los años y con la evolución que se presenta actualmente hacia la construcción, diseño y mantenimiento de sistemas sostenibles se ha comenzado a hablar de términos como la huella hídrica, el manejo integrado de los recursos hídricos y el uso eficiente del agua. Todos estos encaminados a lograr un uso sostenible de los recursos hídricos de las naciones. El uso correcto de este recurso garantiza la protección del medio ambiente, así como la obtención de beneficios económicos y sociales. Después del 6to foro mundial del agua que se celebró en Marsella en el 2012 el World Water Council (Wwc) consideró fundamental dentro de las políticas mundiales de uso del agua, hacer énfasis en la necesidad de darle múltiples usos a los embalses monopropósito actuales (hidroenergía); así como impulsar la construcción de reservorios multipropósito como principio fundamental del represamiento de cauces. Siguiendo con esta línea, los siguientes foros del agua se han encausado sobre dos direcciones: i) ¿Cómo minimizar las contradicciones entre los diferentes usos del agua? ii) ¿cómo realizar correctas políticas de gobernabilidad que permitan realizar la coordinación y manejo adecuado del recurso hídrico en términos de estrategias, planeación, toma de decisiones y operación de embalses? (Branche,2015) Otras organizaciones alrededor del mundo como el ICOLD Committee también están realizando importantes avances dentro de este marco.

Algunos de los más importantes embalses multipropósito del mundo se listan a continuación

Tabla 2-1: Ejemplos de embalses multipropósito alrededor del mundo Fuente: (Banche, 2013)

Usos multipropósito del agua de embalses de generación de energía	País	Fase	Propósito						
			Generación hidroeléctrica	Control de inundaciones	Suministro de agua	Riego	Pesca	Recreación	Navegación
Arenal	Costa-Rica	Operación	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗
Olmos	Peru	Operación	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Cumberland	USA	Operación	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
Tennessee Valley Authority	USA	Operación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Durance-Verdon	France	Operación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Villerest	France	Operación	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Kandadji	Niger	Planificación	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Lom Pangar	Cameroon	Operación	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Pancheshwar	Nepal/India	Planificación	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗

Colombia cuenta actualmente con más de 25 embalses ubicados en las regiones de Antioquia, Caribe, Centro, Oriente y Valle. Los principales y actualmente en funcionamiento son:

Tabla 2-2: Principales embalses de Colombia

Región	Planta	Embalse
Antioquia	Miel I	Amani
Antioquia	Guatrón	Miraflores
Antioquia	Guatapé	Peñol
Antioquia	Playas	Playas
Antioquia	Porce II	Porce II
Antioquia	Porce III	Porce III
Antioquia	San Carlos	Punchiná
Antioquia	La Tasajera	Riogrande2
Antioquia	Jaguas	San Lorenzo
Antioquia	Guatrón	Troneras
Caribe	Urra	Urra1

Región	Planta	Embalse
Centro	Pagua	Agregado Bogotá
Centro	Betania	Betania
Centro	El Quimbo	El Quimbo
Centro	Pagua	Muna
Centro	Prado	Prado
Centro	Sogamoso	Topocoro
Oriente	Pagua	Chuza
Oriente	Chivor	Esmeralda
Oriente	Guavio	Guavio
Valle	Albán	Altoanchicaya
Valle	Calima	Calima 1
Valle	Salvajina	Salvajina

El principal proyecto de inversión pública de La Guajira depende del río. La construcción de la represa El Cercado, en el sur del departamento, es parte de un ambicioso proyecto de reactivación de la economía de la región.” (Otero, 2013) La represa El Cercado se encuentra localizada en la cuenca alta del río Ranchería, entre los municipios de San Juan del Cesar y Distracción. Su capacidad de almacenamiento es de 198 millones de metros cúbicos, que beneficiarían un área neta de 18.536 hectáreas. La profundidad máxima de la represa es de 110m. aunque el nivel del agua se mantiene en 85 m. La longitud de la presa es de 375 m y el ancho de cresta es de 8 m El caudal medio del río es de 7 m³/s llegando a un máximo de 20 m³/s. La represa cuenta con un sistema de regulación y oxigenación del agua que expulsa hasta 16 m³/s.(Bertel et al. 2013)

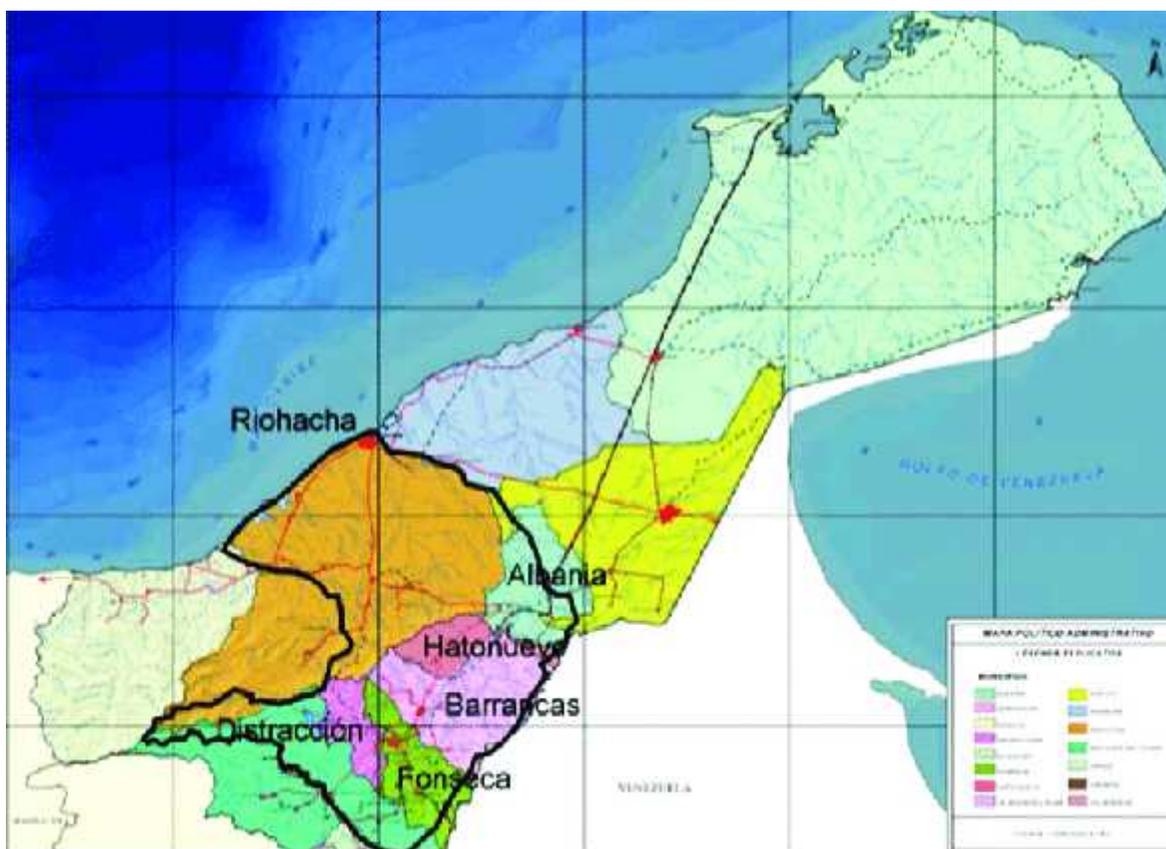


Figura 2-1: Cuenca Río Ranchería (Doria & Vivas, 2016)

“La construcción de esta obra de infraestructura se realizó con el fin de poder instaurar los distritos de riego Ranchería y San Juan del Cesar, que beneficiarían a los municipios de Distracción, Barrancas, Hatonuevo y San Juan del Cesar, ya que dichas poblaciones podrían ejercer actividades agrícolas y pecuarias diversificadas y de alta productividad aún con las características climatológicas y geológicas del departamento. Adicionalmente, con este proyecto de inversión, se buscaba abastecer los acueductos municipales de Albania, Barrancas, Fonseca, Hatonuevo, Maicao, Manaure y Uribia y la creación de una hidroeléctrica pequeña, que generaría siete megavatios de energía para atender la población vecina del proyecto (aproximadamente 3.000 viviendas). Dado el alcance de los beneficios potenciales de la represa, se esperaba que 94.000 personas se vieran favorecidas por el distrito de riego y 400.000 habitantes más con el proyecto de los acueductos municipales. Además, de una reactivación de las economías de los municipios de

Distracción, Fonseca, Barrancas y San Juan del Cesar gracias al aumento en la diversidad de cultivos que se podrían tener debido a la disponibilidad de los distritos de riego. "(Otero, 2013) Adicionalmente durante el 2010 se entendió la importancia adicional del embalse en el control de inundaciones durante la ola invernal de este año que lleno a su máxima capacidad al embalse. Sin embargo, la situación del embalse el cercado y el rio ranchería hoy en día es otra. El suministro a los acueductos y la central hidroeléctrica no se llevaron a cabo. Se dio prioridad a uno de los distritos de riego y se generó un desbalance total entre los diferentes requerimientos del embalse multipropósito. El gobierno se comprometió en el 2012 a garantizar el aporte de agua a todos los propósitos para los que se realizó la obra, sin embargo, hoy en día esto no se ha presentado, sumiendo a la Guajira en una gran contradicción: siendo hogar de uno de los proyectos multipropósito más famosos del país, pero con un importante déficit de agua en su población; generando una peligrosa problemática humanitaria, ambiental y económica en el departamento. En una región semidesértica como la Guajira, el agua posee un carácter especial en la estabilidad de los ecosistemas, las comunidades y la producción agrícola. El rio ranchería representa para la Guajira una esperanza de mejorías en las comunidades con nueve acueductos una central hidroeléctrica, el control de inundaciones y el suministro de agua a dos grandes distritos de riego que mejoren la calidad de vida de las poblaciones cercanas. Es por esto que el estudio del punto de equilibrio sobre los requerimientos de este embalse considerando todos sus propósitos resulta no solo interesante como actividad académica sino como una importante herramienta de decisión para las entidades gubernamentales a cargo de que este proyecto termine de llevarse a cabo y tenga las condiciones óptimas para garantizar el mínimo déficit en todos los propósitos para los que fue creado.

Hoy en día se han realizado múltiples estudios y aproximaciones a la solución del problema de manejo y optimización de los embalses multipropósito algunos de esos ejemplos son (Peñuela – Granada, 2007) que realiza una aproximación a través de algoritmos sin embargo la investigación al respecto aún

continua ya que no existe una solución única al problema. (Branche, 2013) y las variables pueden ser tantas y tan variadas como se quiera por ejemplo (Anghileri,2013) realizó un enfoque de solución buscando analizar la intervención del cambio climático en los procesos de regulación de embalses. Por otro lado, se busca no solo presentar una aproximación al problema mediante un algoritmo de optimización sino generar una herramienta que presente una solución eficiente, de fácil acceso y de bajo costo. Al evaluar el estado del arte al respecto, es fácil encontrarse con que quizás la alternativa más viable al realizar un nuevo software sería basarse en el software WEAP Water Evaluation and Planning System (<http://www.weap21.org/>) que para Países en vía de desarrollo y para fines académicos implica un costo inclusive nulo. Sin embargo, sigue tratándose de un software cerrado y comercial para el cual valen las limitantes indicadas. Además, siendo particularmente contra-intuitivo, necesita prácticamente siempre de un soporte por parte del equipo del Stockholm Environment Institute que lo ha desarrollado y eso representaría un costo relevante. Desde el punto de vista técnico, WEAP sufre de una serie de debilidades que para el caso específico del caso de estudio (Represa el cercado, Guajira) son muy relevantes i) no permite calcular explícitamente la demanda al embalse (cosa que se considera fundamental para la utilización en tiempo real);ii) no permite definir y aplicar una política de manejo del mismo embalse explícita y bien entendible por los actores involucrados (factor clave para la aceptación por parte de los gestores reales del resultado de la modelación); iii) no permite flexibilizar la entrega a los usuarios explicitando y aprovechando del balance hídrico de cada tramo fluvial, manteniendo el criterio de repartición “solidaria” (que optimiza el caso del más desafortunado para evitar de dejar alguien muy mal); es decir, no permite satisfacer más algunos usuarios cuando esto no empeora la mínima satisfacción de los demás; iv) no permite sintetizar políticas de tipo “min-max” capaces de evitar la crisis hidrológica más profunda (criterio extremadamente idóneo para el caso específico de la represa El Cercado en el río Ranchería).

Otro software similar es AQUATOOL constituido por diferentes módulos. Tiene la ventaja, análogamente a WEAP, de gozar de actualizaciones continuas. Como concepción es parecido a WEAP y sufre de defectos análogos. La ventaja sustancial con respecto a WEAP es el estar desarrollado en español; contar con una modelación bastante más refinada en lo que corresponde al tratamiento de acuíferos y uso conjunto superficial-subterráneo.

Se buscaría entonces aportar tanto a los mecanismos como a las herramientas de solución del problema de optimización de embalses desarrollando un modelo matemático denominado SIMIMAX (Nardini, 1995) que permita sintetizar políticas de tipo “mini-max” para el manejo de embalses hídricos multiuso y permita simular sistemas de recursos hídricos complejos, de forma suficientemente general para poder ser aplicado en muchos casos reales, capaz de capturar las peculiaridades territoriales de diferentes sistemas y basado en código de fuente abierta (Open Source). Un software Open Source tiene la característica que desarrolladores de todo el mundo, vía internet, pueden aportar al mejoramiento del programa; puede que estén interesados en utilizar el modelo, o encuentran alguna debilidad que piensan poder superar, entonces aprovechan el código ya desarrollado, lo modifican o agregan nuevos módulos, todo gratuitamente, y luego se reportan las innovaciones para que sean accesibles a todo el mundo.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 GENERALIDADES

El desarrollo sostenible según (Banche , 2015) de un embalse multipropósito implica cinco proposiciones principales:

i) Una aproximación sostenible para todos los usuarios: Los objetivos de desarrollo sostenible dependen del cuidado planificación, construcción, operación, administración y gobernación.

ii) Mayor eficiencia y equidad entre todos los sectores: Los datos económicos y los mecanismos financieros innovadores son cruciales para compartir beneficios de forma equitativa y eficiente entre los usuarios del agua. Es necesario asignar un valor para todos los beneficios, para permitir discusiones y negociaciones entre los diferentes usuarios del agua y así encontrar soluciones óptimas y eficientes.

iii) Adaptabilidad para todas las soluciones: es esencial proporcionar una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la manera en la que el agua se distribuye entre los usuarios durante toda la vida útil del embalse.

iv) Perspectivas de la cuenca hidrográfica para todos: Para un enfoque integrado es esencial alcanzar una visión holística de la cuenca. Realizar un esquema que integra todas las necesidades de esta lleva a un manejo más adecuado y con menor impacto del recurso hídrico.

v) Involucrar a todos los interesados: participación de los interesados es fundamental para el éxito en el depósito multipropósito gestión en términos de sostenibilidad y eficiencia.

La problemática que entonces se busca enfrentar es la regulación u optima planeación de un embalse con requerimientos opuestos. El problema para una hidroeléctrica se trata básicamente de que tanta energía se puede producir con el

nivel de agua disponible, y se busca maximizar este nivel. El problema para el control de inundaciones se refiere a que cantidad de agua se puede amortiguar durante una creciente, siendo entonces de interés la minimización del nivel de agua del embalse para maximizar su capacidad de almacenamiento en caso de crecientes. Un problema de regulación de embalses se caracteriza entonces por ser un problema multiobjetivo de optimización y por requerir una optimización dinámica dada la independencia de múltiples variables cada instante de tiempo, como por ejemplo la demanda de un acueducto de un mes vacacional a un mes normal. El problema adicionalmente es no lineal dado que la relación entre el caudal de ingreso y el nivel de agua en el embalse raramente lo es, esto conlleva por lo tanto que las funciones objetivo tengan la propiedad de no linealidad.

De este modo la gestión del recurso hídrico a través de la utilización de un embalse multiobjetivo no es una tarea sencilla, sino que por el contrario se parte de un problema complejo el cual requiere el análisis y evaluación de todas y cada una de las variables involucradas, que como se mencionó anteriormente, comúnmente tienen objetivos contrarios por lo que se requiere optimizar la satisfacción de cada variable logrando el mejor resultado posible de manera que se puedan beneficiar todos los requerimientos.

El objeto de estudio del presente trabajo es realizar un programa capaz de optimizar la operación de un embalse a través de la utilización de un algoritmo minimax en el análisis del problema multiobjetivo. Para esto se deben resolver entonces los siguientes planteamientos.

- i) ¿se puede desarrollar un esquema de regulación del embalse de río ranchería que optimice el déficit en la satisfacción de cada requerimiento utilizando algún algoritmo derivado de la teoría de juegos que minimice la pérdida de cada jugador?
- ii) Se puede desarrollar una herramienta computacional que sea amigable, de fácil acceso, de uso libre y que permita la modelación de leyes de

regulación de embalses considerando situaciones particulares de cada lugar como clima, requerimientos especiales, demanda y disponibilidad variable etc.

A través de la resolución de los planteamientos anteriores se plantean las siguientes posibles soluciones:

i. Si se requiere un algoritmo de baja complejidad que garantice minimizar la insatisfacción de cada requerimiento del embalse multipropósito resulta apropiado recurrir al algoritmo MINIMAX. Este tipo de algoritmo se deriva de la teoría de juegos y su propósito original es la minimización de la pérdida de cada jugador. En su aplicación a la optimización de embalses y dadas unas condiciones hidrológicas de entrada, unas limitantes por la infraestructura de salida de la presa, y unos requerimientos en un periodo de tiempo, la capacidad o factor de satisfacción de cada objetivo del embalse.

ii. Se desarrollará un software libre de fácil utilización y acceso, que permita que cualquier entidad, ente regulador u operador de embalse tenga a la mano una herramienta eficiente y adaptable de decisión para la formulación de políticas de regulación.

iii. Para evaluar los puntos anteriores resulta necesario definir un caso de estudio que por sus condiciones pueda ser estudiado a través de la herramienta generada.

Todos estos ítems anteriores parten del análisis del árbol de problemas del planteamiento de investigación

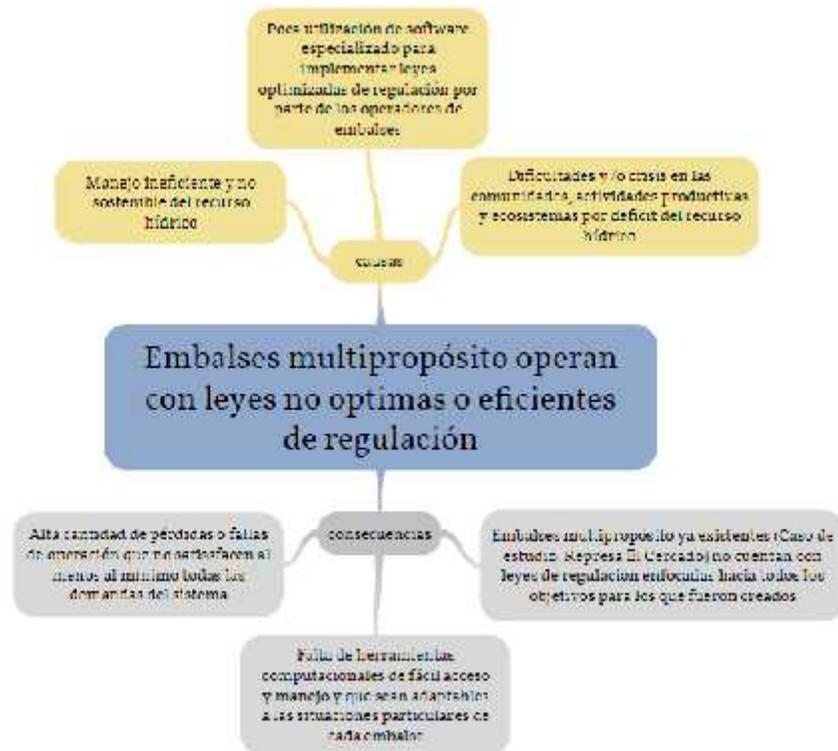


Figura 3-1: Árbol de problema de investigación

3.2 CASO DE ESTUDIO

Colombia es uno de los países de mayor cantidad de recursos hídricos y ecosistemas acuáticos en el mundo. Según un estudio del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia (IDEAM) el país posee 6 veces más oferta de recursos hídricos que el promedio mundial. Esto la ubica en una posición privilegiada en cuanto a este preciado recurso, pero también en una posición crucial y de fuerte responsabilidad frente al mismo. Ya que a pesar de la gran cantidad de agua con la que cuenta el país existe un grave déficit del recurso en la población y sobre todo se tiene graves problemas de déficit de agua en numerosas poblaciones e irónicamente se ve anualmente sometido a múltiples inundaciones en diferentes centros poblados. Adicionalmente en Colombia la gran mayoría de su producción energética depende de las hidroeléctricas que son ya un ícono en diferentes regiones del país.

Para el presente trabajo se desea tomar un caso de estudio para evaluar la efectividad tanto del algoritmo como de la herramienta computacional, por esto se eligió uno de los proyectos multipropósito más importantes por su capacidad de beneficiar a la región y al mismo tiempo uno de los menos eficientes en su gestión, lo que permitiría al presente trabajo no solo realizar un interesante ejercicio académico si no generar un aporte a una importante problemática nacional. El caso de estudio que se contempla hace referencia al embalse El Cercado ubicado en el Río Ranchería en el departamento de la Guajira. “El río Ranchería, en su recorrido desde la Sierra Nevada de Santa Marta hasta su desembocadura en el Mar Caribe, pasa por nueve de los quince municipios del departamento de La Guajira, que son: Albania, Barrancas, Distracción, Fonseca, Hatonuevo, Maicao, Manaure, Riohacha y San Juan del Cesar. De esta forma, se convierte en la principal fuente de agua de un departamento que se considera desértico en la zona más nórdica del mismo y en el que el resto de las tierras enfrentan la amenaza de volverse suelos áridos. La importancia del Ranchería para La Guajira no está asociada tanto a la explotación directa del río en materia de pesca, sino a su tarea como agente regulador de los ecosistemas que existen a lo largo y ancho de su área de influencia y también como la principal arteria que hidrata los suelos para que sean aptos para actividades agropecuarias y para beneficio del hombre. Adicionalmente, el río posee un inmenso valor cultural para las comunidades indígenas como la Wayuú, la Wiwa y la Kogui, que desde tiempos atrás se han asentado en sus riberas, buscando estar en contacto con el agua y poder realizar actividades agrícolas de subsistencia, en un suelo semidesértico. (Otero Cortés, 2013)

A partir de todo lo anteriormente expuesto se presentan los tres cuestionamientos principales de investigación con base en los cuales se desarrollará el presente trabajo de grado

i) Con un embalse multipropósito dado (Caso de estudio: Represa Rio Ranchería) ¿se puede desarrollar un esquema optimizado de regulación de dicho embalse para que se cumpla de la mejor manera posible los requerimientos de las

diferentes actividades objeto de interés del embalse minimizando el riesgo de falla en uno de los requerimientos de este utilizando para este propósito en algoritmo MinMax de optimización?

ii) Se puede desarrollar una herramienta computacional que sea amigable, de fácil acceso, de uso libre y que permita la modelación de leyes de regulación de embalses considerando situaciones particulares de cada lugar como clima, requerimientos especiales, demanda y disponibilidad variable etc.

iii) ¿Se puede generar una posible solución de regulación del embalse El Cercado en la Guajira que supla de manera satisfactoria todos los requerimientos para los que fue originalmente creado?

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional Open Source para la regulación de embalses multipropósito utilizando el algoritmo MinMax

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

i) Desarrollar un protocolo para la generación de leyes de regulación para embalses multipropósito utilizando como herramienta de optimización y decisión un algoritmo tipo Min Max

ii) Desarrollar una herramienta computacional Open Source para la regulación de embalses multipropósito.

iii) Establecer una ley óptima de regulación basada en el algoritmo creado para la represa el cercado del Río Ranchería, departamento de La Guajira.

5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se estructurará en 4 diferentes fases:

Fase 1: Marco conceptual y estado del arte

Capítulo 6: Marco teórico: En primer lugar, se plantearán los fundamentos teóricos para establecer leyes óptimas de operación en embalses.

Fase 2: Planteamiento del problema de optimización

Capítulo 7: Descripción detallada del problema y metodología: En este capítulo se planteará el problema multiobjetivo a optimizar utilizando los conceptos de operación y funcionamiento de embalses y las bases teóricas de un problema tipo MINIMAX

Fase 3: Desarrollo del software WUIN para obtención de leyes óptimas de operación de embalses a través de un algoritmo tipo MINIMAX

Capítulo 8: Desarrollo computacional en lenguaje Python del algoritmo MINIMAX aplicado al caso de optimización de leyes de operación en embalses multipropósito: Una vez establecido el problema de optimización se implementará su solución a través de la creación de un software en lenguaje Python.

Fase 4: Aplicación al caso de estudio del embalse El Cercado del río Ranchería

Capítulo 9: Caso de estudio: Embalse del río Ranchería. Finalmente se buscará la capacidad de satisfacción de las demandas para un caso de aplicación real. En este trabajo se seleccionó la represa del río Ranchería por su nivel de complejidad e importancia en el departamento de la Guajira. En el capítulo 9 se hace una descripción general del proyecto multipropósito del río ranchería.

Capítulo 10: Aplicación del modelo y análisis de resultados: En el décimo capítulo del presente documento se analizan los parámetros de entrada para la estimación

óptima de la regulación del embalse, así como los escenarios de modelación que se utilizarán y finalmente se realiza un análisis sobre los resultados obtenidos.

6 MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA

6.1 ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

6.1.1 Optimización multiobjetivo

La optimización es un procedimiento matemático que se utiliza para ajustar las variables de decisión hasta determinar la solución con mejor valor en las funciones objetivo. Los modelos de optimización se dividen en determinísticos y estocásticos. (Kiombo, 2012) Según el mecanismo de optimización elegido, las características de las variables utilizadas y el tipo de reglas de operación seleccionadas se realiza su clasificación.

Los métodos de optimización estocástica explícita incorporan directamente en el modelo la información estadística y las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias involucradas. Por el contrario, los métodos de optimización estocástica implícita son, de hecho, métodos deterministas (Rani & Moreira, 2006). Se basan en valores históricos, generados o previstos, de las entradas mediante el uso del análisis de series temporales u otros métodos probabilísticos. Requieren un modelo de predicción adicional para las operaciones en tiempo real. La dificultad de los métodos deterministas es que las reglas de operación óptima que se emplean para llevar a cabo las operaciones del sistema en tiempo real se basan en las series temporales consideradas, pudiendo requerir una gran cantidad de tiempo computacional. (Kiombo, 2012)

(Celeste, Curi, & Curi, 2009) utilizan el método de optimización estocástica implícita para determinar reglas de operaciones mensuales de un sistema de embalses situado en una región semi-árida del Nordeste brasileño. Utilizan optimización determinista para gestionar el embalse bajo distintos conjuntos de

afluencias igualmente probables. De este modo, examinan el conjunto resultante de datos de la operación óptima para desarrollar las curvas guía, que pueden servir de referencia a los operadores de embalses para decidir sobre el volumen de agua que sería asignado en cada periodo de tiempo. En otro caso de estudio, Ríos Insua et al. (1997) destacan que la gestión del lago Kariba, en Zambia, se ha basado, tradicionalmente, en curvas guía que asocian la descarga del embalse a un caudal específico del agua almacenada durante un determinado periodo de tiempo. Dichas curvas proporcionan el volumen de almacenamiento previo deseado para cada mes del año. (Bravo, Collischonn, Pilar, & Depettris, 2006).

Nardini y Montoya (1993) realizaron un modelo para la gestión del sistema hídrico de la cuenca del río Biobio. El problema se enfrentó a análisis de sistemas con técnicas como simulación, optimización y análisis multiobjetivo. Un modelo de simulación busca representar a un sistema de manera tal que se pueda, bajo diferentes condiciones, predecir su comportamiento futuro permitiendo ser una herramienta de toma de decisiones, frente a diferentes escenarios. Para Wurbs (1991), la simulación permite imitar el comportamiento del sistema real y experimentar con modelos antes de implementar, tras la etapa de pruebas, las decisiones adoptadas. En otras palabras, los decisores tendrán una mejor comprensión de las posibles consecuencias de sus decisiones antes de aplicarlas. Igualmente, permite recopilar datos relativos al comportamiento del sistema de embalses y poner a prueba diversas hipótesis (Kiombo, 2012)

La optimización multiobjetivo se refiere a problemas que involucran más de un objetivo a la vez. Los problemas de operación de embalses involucran típicamente objetivos en conflicto tales como el riego, el control de las inundaciones, la producción de energía hidroeléctrica y la preservación del medio ambiente. (Kiombo, 2012) Para solucionar dichos problemas, se pueden aplicar diferentes enfoques de resolución de problemas, que fueron resumidos por Kiombo (2012) como sigue:

6.1.1.1 “Técnica de ponderaciones:

Esa técnica implica la asignación de un peso o ponderación para transformar el vector objetivo en un escalar que es la suma ponderada de las distintas funciones objetivo. Las ponderaciones pueden cambiar para generar un conjunto de soluciones eficientes. (Kiombo, 2012)

6.1.1.2 Técnica de restricciones

Consiste en maximizar un objetivo sujeto a ciertos límites inferiores sobre los otros objetivos. Bajo condiciones apropiadas, para cada límite inferior, la maximización aporta una solución eficiente.

6.1.1.3 Programación por metas

En problemas de optimización con múltiples objetivos en conflicto, dichos objetivos se convierten en una única meta. El modelo resultante proporciona una solución eficiente que no es necesariamente óptima con respecto a objetivos contrapuestos (Taha (2004)). En este método, el decisor selecciona un grupo de objetivos que pretende alcanzar. La solución preferida es aquella que minimiza las desviaciones del grupo de objetivos fijados (Haimés et al. (1975)). Además, Aouni and Kettani (2001) destacan que este método se centra en la “satisfacción” de las metas en lugar de la optimización. De este modo, se utiliza para establecer una solución que esté “lo más cerca posible” a satisfacer todas las metas. Es una técnica de fácil aplicación, que puede gestionar un gran número de variables, restricciones y objetivos, y utilizarse en combinación con otras aplicaciones de toma de decisiones. Por ejemplo, Verma et al. (2010) utilizan la programación por metas para determinar la mejor política de operación mensual de la cuenca Mahanadi, que comprende seis embalses con propósitos múltiples. La desventaja de la programación por metas surge en el caso del procedimiento de agregación de las desviaciones asociadas a objetivos con unidades de medida incompatibles. (Kiombo, 2012)

6.1.1.4 Frente de Pareto

Propuesto por Edgeworth en 1881 y generalizado después por Pareto en 1896. Sea P un problema de optimización multiobjetivo. Se dice entonces que una solución S_1 es pareto-óptima cuando no existe otra solución S_2 tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros. El frente de Pareto se puede aplicar en problemas de áreas de investigación operativa y la teoría de juegos. Sus aplicaciones son múltiples en toma de decisiones, en entornos con objetivos múltiples y en análisis coste-beneficio.

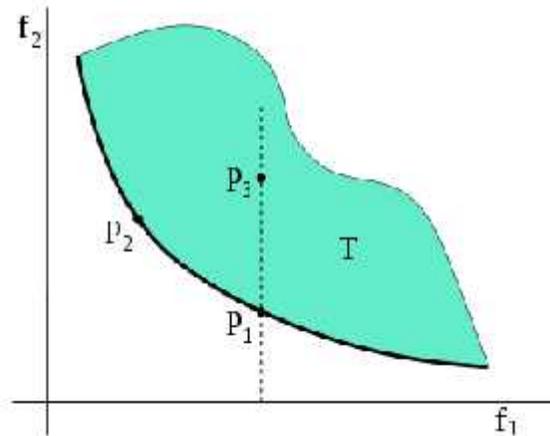


Figura 6-1: Frente de Pareto de una función con dos objetivos

En la Figura 6-1 se representa, con trazo grueso, el frente de Pareto de una función con 2 objetivos. El área coloreada T representa la imagen de dicha función objetivo. Se puede observar que no existe ningún punto perteneciente a T que mejore en el sentido de Pareto, a algún punto del Frente: eligiendo un punto de T de forma arbitraria, por ejemplo, p_3 , se puede trazar la vertical hasta obtener el punto de corte con el Frente de Pareto, en este caso p_1 ; dicho punto de corte siempre tendrá el mismo valor de f_1 y un valor mejor de f_2 . También se puede observar que, para 2 puntos cualesquiera del Frente de Pareto, nunca habrá uno que mejore de forma simultánea los dos objetivos respecto al otro punto. Cogiendo

por ejemplo los puntos p1 y p2, se observa que para p1 mejora f2, pero a costa de empeorar f1 (se está considerando un caso de minimización).

6.1.1.5 Algoritmos evolutivos multiobjetivo:

Los algoritmos evolutivos multiobjetivo proporcionan soluciones múltiples óptimas de Pareto en una única iteración. Cuando se utilizan en optimización multiobjetivo, ayudan a encontrar soluciones cercanas a la frontera de Pareto y determinar soluciones tan diversas como sea posible en la frontera no dominada obtenida (Adeyemo and Otieno (2009)). En cuanto a su aplicación en la gestión de recursos hídricos, se utilizan distintos algoritmos. Por ejemplo, Hashemi et al. (2008) utilizan algoritmos genéticos para la gestión óptima multiobjetivo del embalse de Jiroft, en Irán. Consideran la probabilidad de afluencias para un periodo de 12 meses. Los resultados muestran que, en condiciones críticas de sequía, tal embalse puede satisfacer tanto las demandas como ayudar al control de inundaciones. (Kiombo, 2012)

En otro estudio, (Pilpayeh et al., 2010) utilizan un modelo de algoritmo genético para la gestión multiobjetivo de un sistema de embalses en serie. Las variables de decisión utilizadas en ese modelo son la producción del riego y la generación de energía eléctrica. (Kim et al. ,2006) sugieren el uso del algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) para determinar las políticas óptimas de operación de un sistema de embalses multicriterio. El MOGA permite identificar las soluciones óptimas, y puede explorar y explotar más el espacio de búsqueda de soluciones. (Yang et al. ,2009), por ejemplo, desarrollan un enfoque nuevo, integrando un algoritmo genético multiobjetivo, un método de programación dinámica diferencial limitada, y un modelo de simulación de aguas subterráneas, para resolver problemas multiobjetivo. (Reddy and Kumar, 2006) aplican el MOGA para determinar soluciones alternativas para el operador del embalse, proporcionando la flexibilidad de elección de la mejor alternativa, entre las distintas existentes. Además del MOGA, en otro estudio, (Reddy and Kumar, 2007) presentan el algoritmo de evolución diferencial multiobjetivo (EDMO) con una aplicación a un caso de estudio

en la optimización de un sistema de embalses. El EDMO estimado proporciona varias soluciones alternativas óptimas de Pareto, con cobertura uniforme y convergencia hacia la frontera de Pareto. Además, en otro estudio, (Reddy and Kumar, 2008) utilizan el EDMO para desarrollar diferentes estrategias para la planificación del riego y las políticas de operación de embalses. De manera similar, (Chang and Chang, 2009) presentan un algoritmo evolutivo multiobjetivo para analizar las operaciones de dos embalses que suministran agua para usos doméstico e industrial en Taiwán. (Kiombo, 2012)

Se utiliza un modelo de simulación para determinar los índices de escasez (IE) de ambos embalses. Se aplica el algoritmo genético de ordenación no dominada (NSGA-II) para minimizar los valores de IE mediante la identificación de las estrategias de operación conjunta óptima. Los resultados indican que el NSGA-II proporciona un enfoque prometedor.”

6.1.2 Algoritmo MinMax

Minimax es un método de decisión para minimizar la pérdida máxima esperada en juegos con adversario y con información perfecta (para maximizar la ganancia mínima esperada).

Suele atribuirse a John Von Neumann el principal mérito de la concepción del principio minimax, ya que fue él quien, en su artículo de 1928 «Zur Theorie der Gesellschaftsspiele» («Sobre la teoría de los juegos de sociedad») publicado en la revista *Mathematische Annalen*, puso las bases de la moderna teoría de juegos y probó el teorema fundamental del minimax, por el que se demuestra que para juegos de suma cero con información perfecta entre dos competidores existe una única solución óptima.

John Von Neumann dio la siguiente definición de lo que era un juego: “Un juego es una situación conflictiva en la que uno debe tomar una decisión sabiendo

que los demás también toman decisiones, y que el resultado del conflicto se determina, de algún modo, a partir de todas las decisiones realizadas.”

Y demostró en 1928 que siempre existe una forma racional (una estrategia óptima) de actuar en juegos de dos participantes, si los intereses que los gobiernan son completamente opuestos. A este resultado se le conoce como Teorema Minimax.

Este resultado establece que en los juegos bipersonales de suma cero (aquellos en los que los intereses que los gobiernan son completamente opuestos, o lo que es lo mismo, que lo que gana un jugador lo pierde el otro), donde además cada jugador conoce de antemano la estrategia de su oponente y sus consecuencias, existe una estrategia que permite a ambos jugadores minimizar la pérdida máxima esperada. En particular, cuando se examina cada posible estrategia, un jugador debe considerar todas las respuestas posibles del jugador adversario y la pérdida máxima que puede acarrear. El jugador juega, entonces, con la estrategia que resulta en la minimización de su máxima pérdida. Tal estrategia es llamada óptima para ambos jugadores sólo en caso de que sus minimax sean iguales (en valor absoluto) y contrarios (en signo). Si el valor común es cero el juego se convierte en un sinsentido. En los juegos de suma no nula, existe tanto la estrategia Minimax como la Maximin. La primera intenta minimizar la ganancia el rival, es decir, busca que el rival tenga el peor resultado, mientras que la segunda intenta maximizar la ganancia propia, es decir, busca que el jugador obtenga el mejor resultado.

Características del algoritmo minimax:

- Facilidad de problemas complejos con reglas simples.
- Pruebas contra humanos escalables.
- Existencia de un solo ganador.

-
- Exploración de N capas.
 - Tiempo de exploración agotada.
 - Situaciones estáticas sin cambios significativos

6.1.2.1 Funcionamiento del algoritmo (Sancho Caparrini, 2019)

- Generación del árbol de juego, se generarán todos los nodos hasta llegar a un estado final.
- Cálculo de los valores de las funciones de utilidad para cada nodo terminal.
- Calcular el valor de los nodos superiores a partir del valor de los inferiores. Según el nivel si es Max o es Min se elegirán los valores mínimos y máximos representando los movimientos del jugador y del oponente, de ahí el nombre de “minimax”.
- Elegir la mejor jugada valorando los valores que han llegado al nivel superior.

6.2 EMBALSES MULTIPROPÓSITO

6.2.1 Descripción

Se denomina embalse a la acumulación de agua producida por la construcción de una presa sobre el lecho de un río o arroyo, la cual cierra parcial o totalmente su cauce.

Los embalses se construyen para:

- Regular el caudal de un río o arroyo, almacenando el agua de los períodos húmedos para utilizarlos durante los períodos más secos;

-
- La generación de energía eléctrica;
 - Riego de cultivos;
 - El abastecimiento de agua potable para la población (consumo humano);
 - Uso industrial
 - Permitir la navegación;
 - Diluir sustancias contaminantes;
 - Contener y atenuar los caudales extremos de las crecidas (función de regulación de crecientes);
 - Crear espacios de esparcimiento y deportes acuáticos.

Cuando los embalses cumplen una función particular se llaman unipropósito y cuando tienen más de un fin, se les denominan embalses multipropósito.

La mayoría de los embalses del sector eléctrico colombiano son embalses monopropósito, su función es únicamente la generación de energía eléctrica. Sin embargo, la existencia y la operación de los embalses, por sí mismas, ayudan a regular las crecientes.

Otros embalses del sector eléctrico colombiano, como Urrá y Salvajina, entre otros, son embalses multipropósito, pues además de servir para la generación de energía eléctrica fueron diseñados y construidos para cumplir otros usos como regular las crecientes y/o el abastecimiento de agua para otros usos tales como acueducto y riego.

Por otro lado, desde el punto de vista de su capacidad reguladora, el embalse puede tener un ciclo diario, mensual, anual e, incluso, en algunos pocos casos, multianual. Esto significa que el embalse acumula el agua durante, por ejemplo, 20 horas por día, para descargar todo ese volumen para la generación de energía eléctrica durante las 4 horas de pico de demanda; o acumula las aguas durante el período de lluvias, 3 a 6 meses según la región, para usarlas en el período seco.

6.2.2 Reglas de operación de embalses multipropósito

La utilización del agua en generación de energía se registra como un componente más de la demanda, teniendo en cuenta tres premisas que determinan la condición de uso en un momento dado: a) la tipificación del uso del agua en actividades de generación de energía como uso industrial (Decreto 3930 de 2010, Cap. IV, Art. 16); b) el almacenamiento más o menos prolongado en embalses y otros reservorios no naturales, requerido para mantener los estándares de generación que implican una oferta de agua no disponible, durante cierta temporalidad, siendo por tanto el uso excluyente y rival frente a otras demandas in situ; y c) si bien se reconocen tasas de retorno cercanas al 100%, la calidad del agua y la variación en el régimen hidrológico que retorna introduce restricciones de uso frente a otras demandas en competencia. Registro sobre el caudal útil por regiones y sistemas de generación eléctrica reportado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)

Para el cálculo del consumo de agua en generación de energía se considera el volumen de agua que es utilizado en los sistemas convencionales y combinados de generación hidráulica y térmica. Uso de agua en generación de energía hidroeléctrica. Para establecer el uso del agua en generación a través de sistemas que utilizan el agua como fuerza hidráulica, se trabaja con el volumen efectivamente utilizado y no con el volumen total que es sustraído del sistema hídrico y que se almacena en reservorios no naturales durante un periodo de tiempo dado.

El dato es reportado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), que muestra por región (Antioquia, Centro, Caribe, Oriente y Valle), y con periodicidad mensual, los indicadores técnicos de operación para cada uno de los sistemas de generación. Para el cálculo del volumen de agua utilizada se consideran, de esta información, los siguientes conceptos:

-
- Volumen útil diario: volumen almacenado por encima del nivel mínimo técnico, reportado diariamente por los agentes (según acuerdo Nro. 294 del CON), se expresa en Mm³ /día y en GWh/día.
 - Relación entre el volumen (Mm³) y el volumen máximo técnico del embalse. Se expresa en%.
 - Volumen máximo técnico: se define como el volumen almacenado en el embalse por encima del nivel mínimo físico y equivale a la suma del volumen mínimo técnico y del volumen útil del embalse.
 - Volumen mínimo técnico: el volumen máximo técnico menos el volumen útil del embalse

6.2.3 Demandas de consumo humano y/o industrial

El cálculo de la demanda de agua para uso doméstico se establece a partir de la estimación del consumo que un habitante requiere para satisfacer las necesidades fundamentales en un día. El ejercicio planteado coteja diferentes propuestas frente al umbral mínimo de consumo, dado un nivel de bienestar versus la tendencia real de consumo actual de los hogares acorde con la estratificación, el tamaño medio de los hogares, la caracterización climática y la continuidad del suministro; esta última, en función de la complejidad de los sistemas de abastecimiento. En el agregado nacional, representa el volumen de agua, en millones de metros cúbicos (Mm³), utilizada por la población urbana y rural para suplir sus necesidades

El cálculo del uso del agua en el sector doméstico se aborda desde la definición de dos conceptos:

- El consumo propio o vital de la población (preparación de alimentos, higiene, lavado de ropa y usos en sistemas sanitarios), y el uso en actividades de mantenimiento y aseo en las viviendas, expresado a nivel per cápita en litros/habitante-día.

-
- El agua extraída no consumida, que se explica mediante el cálculo de las pérdidas en la cadena de conducción y suministro en red. Este último, conforme a los estándares establecidos en el Reglamento Sanitario del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000: 5% por aducción, 5% en plantas de tratamiento, 5% en conducción y pérdidas técnicas conforme al nivel de complejidad del sistema. El consumo propio o vital de la población se establece a partir de la correlación entre el consumo facturado por los suscriptores residenciales, registrado por la SSPD en el Sistema Único de Información (SUI), y la ocupación de personas y hogares para el total de las viviendas con desagregación municipal (Censo 2005) conectadas al sistema de abastecimiento por red. El consumo vital o propio marca la intensidad de uso a nivel de la población, diferenciando los niveles de consumo en el área urbana y rural municipal. El volumen de agua extraída no consumida se establece como el producto entre el volumen total del agua extraída (total consumo facturado) por el factor de pérdidas, establecidos según el Reglamento de Saneamiento Básico, RAS. La imputación del consumo vital o propio para el conjunto de municipios sin información se establece a partir del consumo registrado en los municipios, con información con un equivalente nivel de bienestar, visto a través del indicador de necesidades básicas insatisfechas (NBI) y de complejidad del sistema de abastecimiento mediante suministro en red.

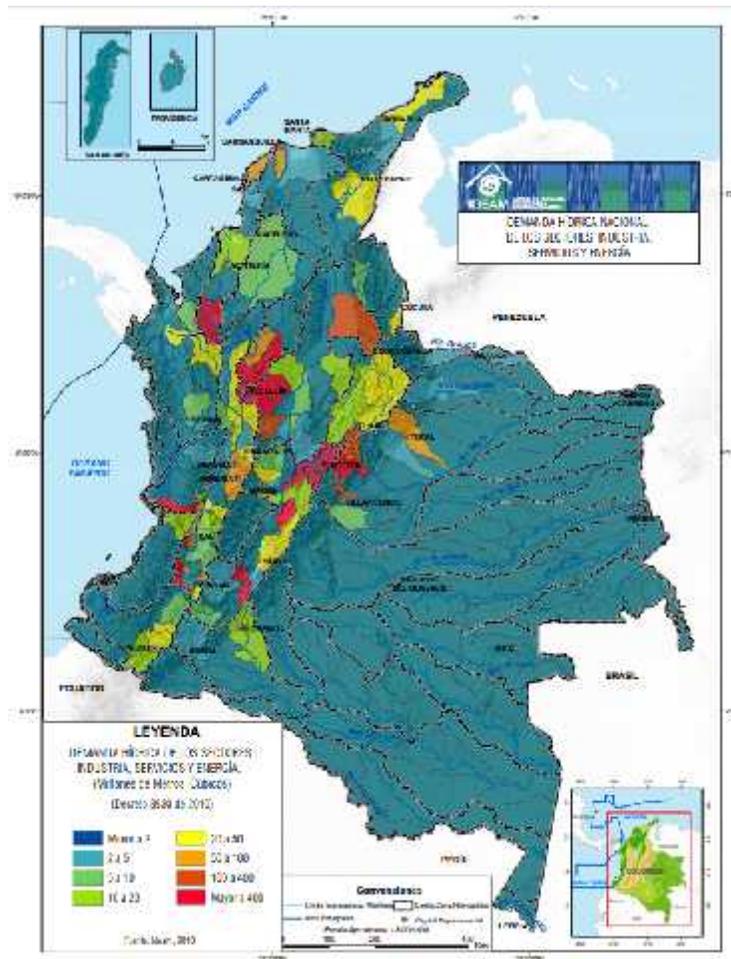


Figura 6-2: Mapa de demanda hídrica para los sectores de industria, servicios y energía (Fuente: IDEAM)

Las siguientes son las variables requeridas para la estimación de la demanda hídrica doméstica: a) volumen total de población (número de habitantes); b) número total de viviendas a nivel municipal con desagregación urbano y rural; c) número de personas y hogares por vivienda; d) consumo facturado (m³)

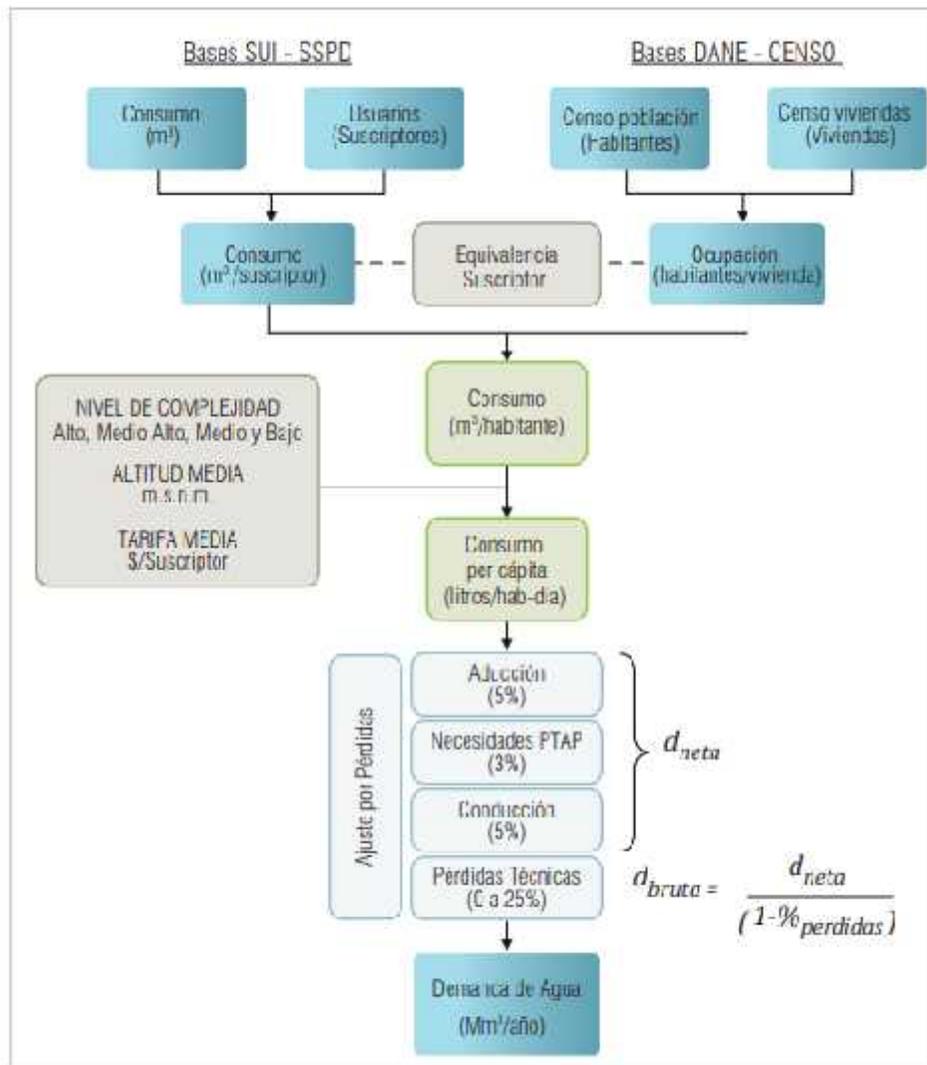


Figura 6-3: Mapa de demanda hídrica para los sectores de industria, servicios y energía (Fuente: IDEAM)

6.2.4 Demandas de riego

Referidas a la cantidad de agua y al momento de su aplicación, a fin de compensar el déficit de humedad del suelo durante un periodo vegetativo. Se determinan utilizando la evapotranspiración del cultivo en consideración (ET_c) menos el agua aportada por las precipitaciones. Cuando la precipitación efectiva es mayor que las necesidades de riego, la demanda o riego bruto es igual a cero (0). En caso contrario, cuando la precipitación efectiva es menor al uso consuntivo del

cultivo, la demanda se define por la diferencia entre la ETc y el agua que se aporta por precipitación. (IDEAM, 2010)

6.2.5 Caudal ecológico

Aplicable a la demanda de los ecosistemas. El Decreto 3930 del 25 de octubre de 2010 lo define como " Volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas".

Para las unidades de análisis del ENA, se define como un caudal variable expresado en magnitud de frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de cambio para permitir el desarrollo de los ecosistemas lóticos, delimitados de acuerdo con criterios explícitos. Una aproximación a su estimación se basa en el método de curva de permanencia o de duración de caudales. Este consiste en la construcción de una curva a partir de datos de caudales diarios, mensuales o anuales en la que se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido. El caudal ambiental es expresado como un valor fijo, que corresponde a un rango de caudal que se mantiene igualado o excedido un cierto porcentaje de tiempo

6.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON

Python es un lenguaje de programación de código abierto, orientado a objetos, muy simple y fácil de entender. Tiene una sintaxis sencilla que cuenta con una vasta biblioteca de herramientas, que hacen de Python un lenguaje de programación único. Una de las ventajas principales de utilizar Python es la posibilidad de crear un código con gran legibilidad, que ahorra tiempo y recursos, lo que facilita su comprensión e implementación. Python permite construir mucho más con menos líneas de código, por lo que se crean prototipos de forma más eficiente. Los usos y aplicaciones de Python se encuentran desde el desarrollo de juegos

hasta la visualización de datos, desde la creación de redes hasta el desarrollo de software en general. Las aplicaciones de Python son numerosas. Python es un lenguaje de escritura rápido, escalable, robusta y de código abierto, ventajas que hacen de Python un aliado perfecto para la construcción de aplicaciones matemáticas y de ingeniería. Python permite plasmar ideas complejas con unas pocas líneas de código, lo que no es posible con otros lenguajes. (Soloaga, 2018)

Desde la introducción de los motores numéricos de Python como 'Pandas' y 'NumPy', los investigadores han cambiado a Python desde el anterior lenguaje, MATLAB. Python se ocupa de los datos tabulares, matriciales y estadísticos, e incluso los visualiza con bibliotecas populares como «Matplotlib» y «Seaborn» Pero, sobre todo, Python es un lenguaje gratuito de código abierto con una gran comunidad en activo, que proporciona soporte a cualquier programador. Todas estas razones combinadas, hacen que utilizar Python sea una opción fácil sobre otros lenguajes para aplicaciones de tipo científico.

7 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Si bien un embalse es una obra de ingeniería muy compleja y su operación puede perseguir la optimización de varios objetivos simultáneamente tales como generación de energía, control de crecidas, regulación de caudales, riego, etc. La idea consiste en formular un modelo de optimización de mediano a largo plazo que, una vez verificado mediante una prueba retrospectiva, pueda ser usado para planificar y tomar decisiones.

La gestión (control o regulación) de un embalse multipropósito se puede afrontar en la búsqueda de escenarios que reduzcan la insatisfacción de los requerimientos del recurso, de manera tal que se pueda obtener el mejor comportamiento medio a largo plazo. Para el planteamiento del problema, conviene partir de una función de utilidad cuyo valor se buscará minimizar para obtener el valor esperado.

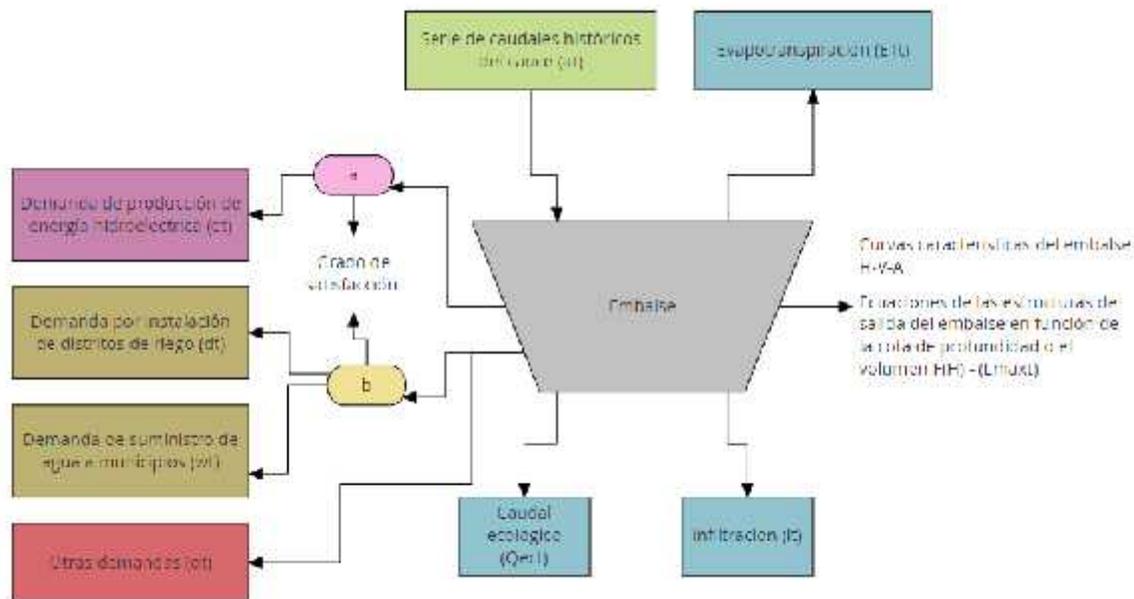


Figura 7-1: Esquema planteamiento del problema de optimización

El problema de optimización se puede entonces describir mediante el diagrama anterior como sigue:

- i. El embalse es en esencia un reservorio capaz de almacenar una determinada cantidad de agua disponible para suplir diferentes necesidades o requerimientos como los planteados en el numeral 6.2 del presente documento.
- ii. El volumen de agua almacenada en el embalse cambia mes con mes con la variación de las entradas y salidas sobre éste.
- iii. Son entradas de agua al embalse los caudales provenientes de los cauces represados, y la precipitación sobre la superficie del embalse.
- iv. Las salidas del embalse se pueden dividir en dos criterios, los requerimientos y aquellas propias de las características físicas del embalse. En el primer grupo encontramos las demandas de riego, consumo, la producción de energía, la liberación para control de

-
- crecientes etc. En el segundo grupo encontramos, la infiltración, la evapotranspiración y el caudal ecológico
- v. El problema de operación de un embalse que tiene objetivos que por sus características son opuestos, consiste básicamente en satisfacer lo mejor posible todos los requerimientos con las condiciones hidrológicas y de almacenamiento del embalse en un instante dado.

Nardini y Montoya en 1993 desarrollaron un planteamiento matemático que permitía la aplicación del algoritmo MINIMAX, típicamente utilizado como teoría de juegos y más utilizado en escenarios diferentes a la gestión de recursos, para la posible solución de un problema multiobjetivo de gestión del recurso hídrico. Este modelo inicial fue desarrollado para la gestión integral de la cuenca del lago La Laja en Chile y el presente trabajo presenta dicho desarrollo matemático y la adaptación de este al caso de un embalse multipropósito.

7.2 VARIABLES Y PARÁMETROS DEL MODELO

Para la resolución de este problema, es necesario alimentar el algoritmo con una serie de datos histórica de las variables de interés. A dicha serie de datos la llamaremos *Set de referencia*. La cantidad y tipo de datos de este *set*, está definido por el intervalo de tiempo que pueden ser anual, multianual, mensual, etc. Y de manera equivalente la serie de datos está constituida por un conjunto de datos de series multianuales, anuales o mensuales de las variables estocásticas en juego: afluentes, aportes adicionales, demanda eléctrica, demandas de riego, demanda de suministro, factores climáticos, etc.

El primer paso entonces para el planteamiento del problema de optimización será definir el set de referencia o datos de ingreso. La idea es que se dispone de un conjunto ***R*** de ***N*** años hidrológicos consecutivos y que se consideran ciclos de ***m*** años consecutivos.

Figura 7-2: Estructura del conjunto R_m de las series hidrológicas de referencia.

Variable	Ciclo						
	0	1	2	...	(k+M)T-1	N(T-1)	
afluentes							
demanda energía							
demanda suministro							
ETP							
etc...							

En la primera fila de la figura anterior se tiene para cada variable del sistema, y para cada índice temporal t , los valores históricos de las demandas, los afluentes, ETP, etc los valores verificados históricamente de cada una de las variables. En el presente estudio se propone un modelo que permita generar una política de operación eficiente para el embalse, por lo que conviene trabajar con una discretización temporal mensual.

Dentro del set de referencia se deberán incluir las variables de **requerimientos de energía (et)**, **requerimientos de demandas (dt)** dentro de las que se incluye tanto suministro como riego. Y los **caudales afluentes al embalse (at)** determinados por las condiciones hidrológicas de la zona.

Otras variables involucradas en el proceso de optimización serán:

Tabla 7-1 Variables del algoritmo de optimización

Variables	Nomenclatura	Descripción
Paso de la escala temporal	t	Describe el intervalo de tiempo mínimo a ser utilizado en el procedimiento de cálculo. Para el caso del presente estudio este será 1 mes.
Numero de pasos de tiempo en 1 año	T	Describe el número total de pasos t que hay en un año
Demanda de energía	et	Es la demanda o requerimiento de energía para un instante de tiempo dentro del set de referencia t
Demanda de suministro	dt	Demanda total de requerimientos por suministro, incluye suministro, riego y regulación
Ciclos del set de referencia	M	Numero consecutivo de años hidrológicos en el set de referencia
Almacenamiento	St	Almacenamiento en el tiempo t en el embalse

Variables	Nomenclatura	Descripción
Infiltración	I_t	Pérdidas por infiltración en el embalse, representa la descarga mínima ya que no es evitable
Descarga máxima	L_t	Es la descarga máxima que se puede dar en el embalse a un cierto volumen de llenado a través de las válvulas y los vertederos
Política de liberación	u_t	U_t es la política de liberación, es decir la salida del embalse para un tiempo t , controlada por válvulas y vertederos.
Producción energética	m_t	Es la producción energética total con las condiciones del embalse en un instante t
Satisfacción de la demanda de energía en t	\square_t	Es la satisfacción real de la demanda de energía en un instante t , dadas las condiciones de entrada, perdidas y salidas del embalse en dicho tiempo.
Satisfacción de la demanda de suministro en t	\square_t	Es la satisfacción real de la demanda de suministro en un instante t , dadas las condiciones de entrada, perdidas y salidas del embalse en dicho tiempo.
Satisfacción de la demanda de energía resultante de la aplicación del algoritmo	\square	Es el porcentaje de satisfacción de energía maximizado para el peor escenario posible
Satisfacción de la demanda de suministro resultante de la aplicación del algoritmo	\square	Es el porcentaje de satisfacción de suministro maximizado para el peor escenario posible
Política de operación	U^*	Es la política que se puede asumir satisfaciendo las restricciones

7.3 RESTRICCIONES

- i. *No deben haber excedentes del almacenamiento al final del ciclo, en otras palabras el almacenamiento es igual al inicio y al final del ciclo:*
El primer requisito que se debe cumplir en cuanto al almacenamiento es que este debe ser igual al inicio y al final el ciclo de modelación, esto es que al inicio de cada ciclo el volumen debe ser igual a S_0 y que, una vez finalizado el ciclo, el volumen disponible $S_{(k+m)T}$ sea aún no menor que S_0 . Esta condición sobre el estado final es extremadamente importante y sirve para garantizar que la política de gestión sea sustentable en el tiempo. En otras palabras, para garantizar la satisfacción de la pareja (\cdot, \cdot) , no sólo se debe encontrar

una política particular $U(\cdot)$, sino simultáneamente también un valor del volumen S_0 tal que, partiendo con volumen inicial S_0 y manejando con la política de gestión estimada $U(\cdot)$, se conduzca al embalse, a un volumen no inferior a S_0 , de manera de que sea posible comenzar de nuevo en condiciones no peores. (Nardini & Montoya, 1993)

- ii. El balance de masas en el reservorio se puede expresar como $S_{t+1} = S_t + \alpha_t - u_t - l(s_t)$ en donde se debe verificar que la liberación u_t sea menor que la máxima liberación dada por las estructuras del embalse $L(s_t)$, en función del nivel del mismo o el almacenamiento según las curvas características del embalse.
- iii. En el ítem anterior, la variable $l(s_t)$ representa las pérdidas por infiltración del embalse dada una condición de almacenamiento. Está será la liberación mínima del embalse, dado que dicha salida no puede evitarse aun cuando la política de liberación sea 0. A esta variable le adicionaremos el caudal ecológico para garantizar que cualquier política de liberación garantice el cumplimiento del caudal ecológico determinado para el embalse.
- iv. Se pueden utilizar los coeficientes r y s para establecerlos objetivos del problema de gestión, de modo tal que se plantee un problema en el que se busque maximizar α en todos los instantes de tiempo t del período considerado y, análogamente, minimizar la no-satisfacción de cada uno de los requisitos de manera individual. Es decir, se requiere optimizar el peor escenario. (Nardini & Montoya, 1993) Por lo tanto

$$u_t \geq \alpha \text{ y } \beta_t \geq \beta$$

7.4 FUNCIÓN OBJETIVO

Para lograr la minimización de la insuficiencia de cada requerimiento, conviene utilizar un algoritmo de tipo MINIMAX. Para aclarar los contenidos de tal

enfoque (Nardini & Montoya , 1998) definieron los objetivos del problema de gestión como dos coeficientes de satisfacción de requerimientos opuestos, de este modo se definen r y s que representan para un intervalo de tiempo determinado t , la fracción de satisfacción del requerimiento de generación de energía r y del requerimiento de suministro y riego s . Estos coeficientes pueden expresarse como sigue:

$$\alpha_t = \frac{M_t}{e_T}$$
$$\beta_t = \frac{u_t + l(s_t)}{d_t}$$

Donde α_t representa el grado de satisfacción de la demanda de energía, M la cantidad de energía efectivamente generada, e_t la cantidad de energía requerida y β_t el grado de satisfacción de la demanda de suministro de agua, tanto para riego como para consumo, que es función del recurso efectivamente suministrado u_t , la liberación mínima del embalse para un cierto volumen almacenado l_t y la demanda del recurso tanto para riego como para suministro d_t

De este modo, se pueden utilizar los coeficientes r y s para establecerlos objetivos del problema de gestión, de modo tal que se plantee un problema en el que se busque maximizar α en todos los instantes de tiempo t del período considerado y, análogamente, minimizar la no-satisfacción de cada uno de los requisitos de manera individual. Es decir, se requiere optimizar el peor escenario. (Nardini & Montoya, 1993)

Es necesario tener presente que el objetivo es minimizar los eventos extremos, por lo tanto, en esta etapa no se tiene ninguna consideración respecto al comportamiento medio del sistema. En otras palabras, una política que produzca, respecto al conjunto de referencia, un solo evento deficitario al cual corresponda un valor de, por ejemplo $\alpha = 0.5$ en un instante particular, es equivalente a otra

política que produzca el mismo déficit puntual en cada instante. (Nardini & Montoya, 1993) Evidentemente, esta última política presentará un déficit medio mucho mayor que a la primera. Sin embargo, la gestión garantiza que al menos se cumplirá con un porcentaje de la demanda energética y un porcentaje de la demanda de suministro y riego, y cualquier escenario diferente con dicha gestión será siempre más favorable.

7.5 ALGORITMO MINIMAX

La idea que hay bajo el problema es que, en la gestión real del embalse, al inicio de un año particular, no se sabe qué año o secuencia de años vendrá; sin embargo, se puede suponer que pueda presentarse una secuencia cualquiera de m años consecutivos, que han ocurrido en el pasado, este es el objetivo de la creación de set de referencia. De este modo, la solución del problema de optimización garantiza que si se usa la política particular determinada (correspondiente a una pareja (α, β)) y el volumen del embalse es en el instante del inicio de la gestión no inferior al S_0 asociado a aquella política, cualquiera sea el ciclo del set de referencia, en ningún caso el sistema producirá un escenario peor al considerado. (Nardini & Montoya, 1993)

Al aumentar m , el conflicto entre los objetivos tiende a disminuir o, en otras palabras, las correspondientes Fronteras de Pareto tiendan a apartarse. Adicionalmente, la adopción de un m bajo permite garantizar una satisfacción menor que la correspondiente a un m mayor, pero la garantía es más segura para m pequeños, en el sentido de que vale para un mayor espectro de escenarios hidrológicos futuros. (Nardini & Montoya, 1993)

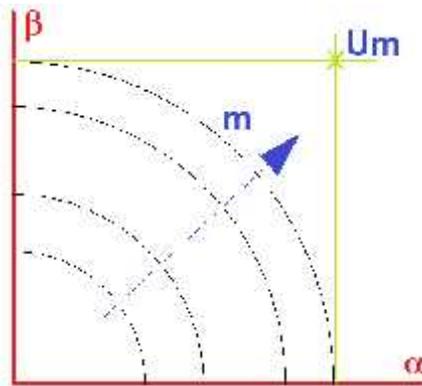


Figura 7-3: Efecto de diferentes elecciones de la duración m en U_m .

(Nardini & Montoya , 1998) Definieron entonces el problema de control como el problema de maximizar el producto α para el peor escenario hidrológico del set de referencia cumpliendo con las restricciones antes descritas. Esto se puede escribir como:

$$\max |\alpha|$$

Sujeto a: $u_t \geq \alpha$

$$\beta_t \geq \beta$$

$$s_{t+1} = s_t + a_t - u_t - l(s_t)$$

$$0 \leq u_t \leq L(s_t)$$

$$u_t = U(\tau(t), s_t, e_t d_t u_t)$$

$$k = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$t = k, k + 1, k + 2, \dots, (k + M)T - 1$$

$$\{e_t, d_t, u_t\} \in R_M$$

$$s_t = s_0 \quad t = k$$

$$S_{(R+M)T} \geq S_U$$

Fuente: (Nardini & Montoya , 1998)

El problema es maximizar los dos objetivos α y β respecto a la política de gestión $U(\cdot)$ y al volumen inicial s_U . Esta maximización debe estar sujeta a que la satisfacción de la demanda eléctrica e_t un porcentaje igual a α , en otras palabras, se fija un valor para la razón entre la energía eléctrica producida M_t y la demanda e_t (cuando ésta es mayor que cero), no sea en ningún caso menor que α . Análogamente, la impone la satisfacción de los Usuarios Aguas Abajo como β .

La solución del algoritmo se articula en dos fases: La primera de ellas asume una política de liberación mínima y se desarrolla optimizando solo con respecto a s_U . En la segunda fase para cualquier pareja α se selecciona del set de posibles resultados aquellos que produzcan el escenario menos malo. Esto se puede describir como sigue:

7.5.1 Fase a

Se ha dicho que se conoce a priori un tipo de política particular, política de mínima entrega, la cual corresponde la maximización de los objetivos y que, entonces, es posible determinar directamente la Frontera de Pareto a través de la solución del problema anterior.

La política mínima correspondiente a una pareja (α, β) que entrega el mínimo caudal estrictamente necesario para satisfacer los usuarios a los niveles α y β elegidos. Esta política, entre todas las posibles, produce el máximo valor de S_{t+1} y, por lo tanto, maximiza la posibilidad de satisfacer los usuarios a niveles α y β . (Nardini & Montoya, 1993)

Este problema se puede resolver con una aproximación mono-dimensional respecto a β utilizando una operación de bisección. Para esto se debe definir una política $F(\beta)$ tal que: (Nardini & Montoya, 1998)

$$\begin{aligned}
 F(\beta) > 0 & \text{ S e. } s_1 \geq s_0 \text{ y } l(s_1) < r_1 & d \text{ } u_t \geq \alpha \text{ y } s_{(k+M)T} \\
 & \geq s_0 \text{ e. } s_1 < s_0 \text{ } h_0 \\
 F(\beta) < 0 & \text{ e o } c_1
 \end{aligned}$$

7.5.2 Fase b

Considérese un par $\alpha^* \beta^*$ perteneciente a la Frontera de Pareto determinada en la Fase a y supongamos que la pareja corresponde a una solución eficiente. Por definición, debe existir una política U^* y un volumen inicial S_0 (Nardini & Montoya, 1993). En esta fase para seguir con el planteamiento de Minimax, se busca minimizar s_0 , de tal manera que se garantice el cumplimiento de $s_{(k+M)T} \geq s_0$. De éste modo se considera el problema:

$$\begin{aligned}
 s_0^a &= \min s_0 \\
 \text{Sujeto a:} & \quad u_t \geq \alpha \\
 & \quad \beta_t \geq \beta \\
 s_{t+1} &= s_t + \alpha_t - u_t - l(s_t) \\
 0 &\leq u_t \leq L(s_t) \\
 u_t &= U(\tau(t), s_t, e_t, d_t, \alpha_t) \\
 k &= 0, 1, \dots, N - 1 \\
 t &= k, k + 1, k + 2, \dots, (k + M)T - 1 \\
 \{e_t, d_t, \alpha_t\} &\in R_M
 \end{aligned}$$

$$s_t = s_0 p^t \quad t = k$$

$$s_{(k+m)T} \geq s_0$$

Fuente: (Nardini & Montoya , 1998)

(Nardini & Montoya, 1993). La función objetivo a minimizar es justamente el volumen inicial s_0 , la idea expresada es entonces la de encontrar el mínimo valor del volumen inicial que garantice la satisfacción de los usuarios y la existencia de la solución está garantizada por la definición misma de la pareja α perteneciente a la Frontera de Pareto. (Nardini & Montoya, 1993)

8 DESARROLLO COMPUTACIONAL EN LENGUAJE PYTHON

Algoritmo Min Max aplicado al caso de optimización de leyes de operación en embalses multipropósito

Como base del presente trabajo de grado se desarrolló un software de fácil aplicación para que cualquier operador o actor con capacidad decisional en el sistema de regulación con alguna información básica de entrada pudiera establecer leyes optimas de operación del embalse minimizando el déficit de cada uno de los requerimientos. Se desarrolló un programa en lenguaje de programación Python, al que se llamó WÜIN por la palabra agua en Wayunaiki en honor a las etnias indígenas de la Guajira, lugar en el que se encuentra la represa utilizada como caso de estudio en la presente investigación. Este software implementa y resuelve el algoritmo planteado en el capítulo anterior, solicita y procesa la información de entrada y emite en formato *.csv las tablas resultantes de la aplicación del algoritmo con las mejores opciones de operación del embalse según el algoritmo MINIMAX minimizando el déficit de cada requerimiento. Como se describe a continuación:

8.1 GENERALIDADES

WÜIN es una aplicación interactiva desarrollada en Python, que permite realizar la gestión de un embalse de tal manera que se logre satisfacer las demandas de recurso hídrico de la manera más óptima, dependiendo de las prioridades de las demandas. Sus entradas están representadas por la topografía del embalse, representada en las curvas Volumen/Area/Cota del embalse y las condiciones de operación del mismo, información sobre las preferencias de operación y de cálculo del modelo de mínimos y máximos, información hidroclimática y de caudales de la cuenca, información sobre las demandas de energía de la población, información sobre las demandas de riego de la zona y la información sobre las demandas de suministro de agua potable. Sus salidas están representadas por las satisfacciones de las demandas de recurso hídrico ingresadas a la aplicación.

8.2 OBJETIVO

Ofrecer la mejor alternativa de satisfacción de las demandas de recurso hídrico, representadas en requerimientos de energía, agua para riego y agua para consumo, en condiciones de escasez, de un sistema hidrológico compuesto por un embalse y una zona de presencia de lluvias y escorrentías.

8.3 REQUERIMIENTOS DE FUNCIONAMIENTO.

El sistema WÜIN, está desarrollado en lenguaje de programación Python 3.9., un lenguaje de programación diseñado por Guido van Rossum y desarrollado por Python Software Foundation, de uso libre bajo licencia Python Software Foundation License (FSFL, por sus siglas en inglés), de software libre permisiva, y construido bajo el sistema operativo Windows 10 de Microsoft.

Para su buen funcionamiento se requiere de un mínimo de 8 Gb de memoria RAM y de 5Gb de almacenamiento en el disco duro.

8.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA.

El sistema WÜIN está desarrollado en una sola aplicación monolítica, la cual se compone internamente de varios módulos, correspondientes a cada una de las opciones del menú principal.



Figura 8-1: Pantalla inicial

- Módulo de Preferencia de Calculo.
- Módulo del Embalse
- Módulo de Información Hidroclimática y de caudales
- Módulo de Producción de Energía
- Módulo de Suministro de Recurso Hídrico
- Módulo de Riego
- Módulo de Simulación
- Módulo de Resultados

El siguiente diagrama de bloques muestra la arquitectura de WÜIN.

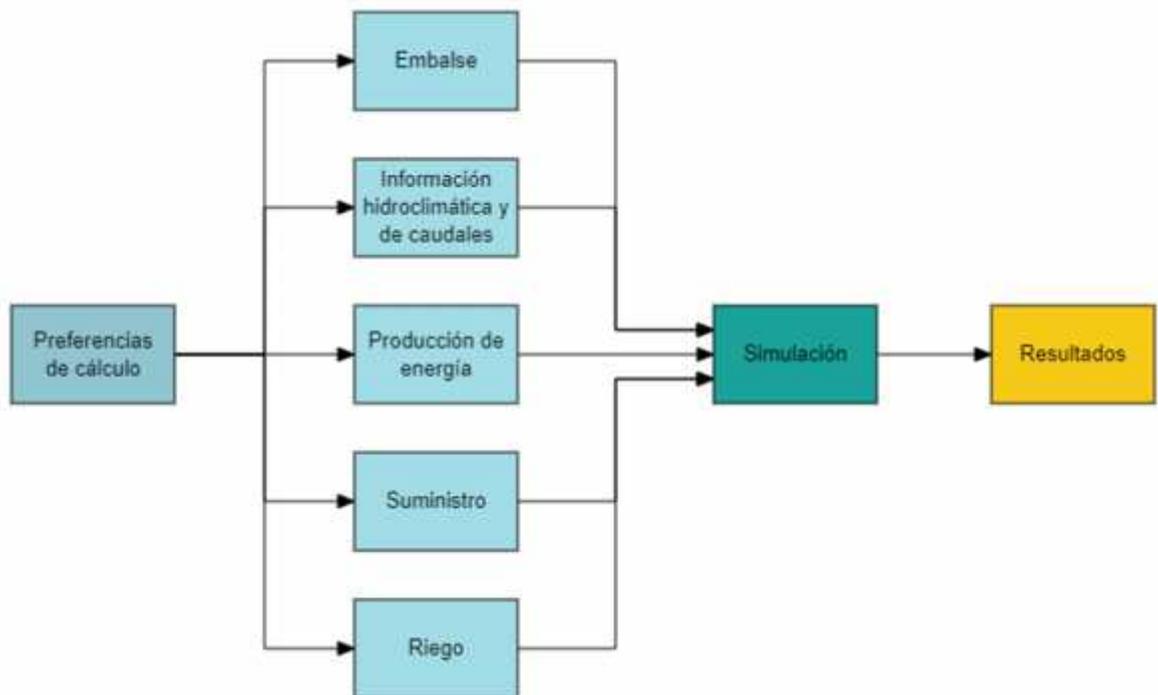


Figura 8-2: Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin

En primer lugar se debe seleccionar el módulo “Preferencias de Cálculo” para leer los datos de entrada y establecer los parámetros de operación del modelo de cálculo. Luego se pueden seleccionar los módulos de “Embalse”, “Información hidroclimática y caudales”, “Producción de energía”, “Suministros” y “Riego”. Por último, se pueden utilizar los módulos de “Simulación” y “resultados”.

Los datos de entrada que se ingresan en el módulo “Preferencias de Cálculo”, se deben preparar previamente en un archivo de Excel, tal como se describe en la sección correspondiente al mencionado modulo. Esta información es tomada en cuenta en cada uno de los demás módulos para sus procesos de cálculo y de presentación de resultados. Esta información es mantenida activa en la memoria del computador durante el tiempo en que la aplicación WÜIN este ejecución.

Descripción de los Módulos de WINN

Al ingresar a la aplicación WIIN se despliega la siguiente pantalla con su menú principal:



Figura 8-3: Pantalla inicial

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de los módulos correspondientes:

8.4.1 Módulo de Preferencias de Cálculo.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Preferencias de cálculo”.

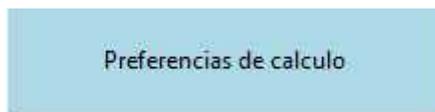


Figura 8-4: Boton de ingreso a módulo de preferencias de cálculo

El sistema presenta la siguiente ventana:

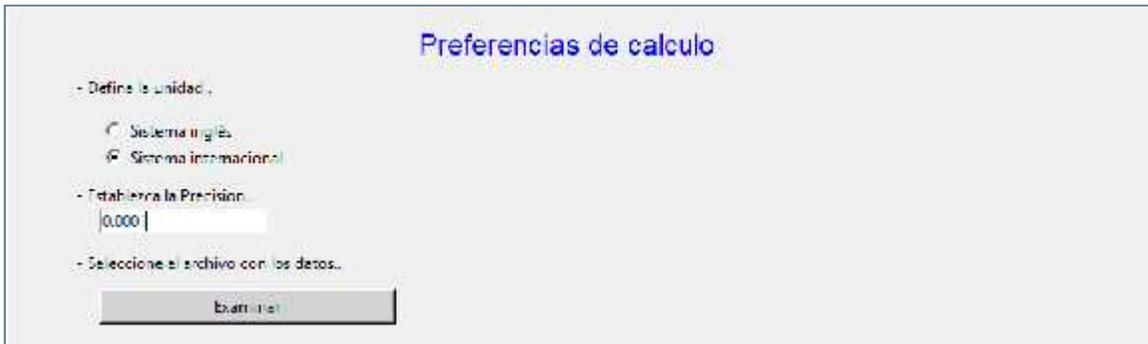


Figura 8-5: Pantalla de selección de preferencias de cálculo

Se debe seleccionar entre el sistema inglés y el sistema Internacional.

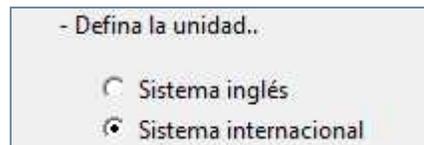


Figura 8-6: Selección sistema de unidades

Luego se debe establecer la precisión ingresando una cifra con el número de decimales deseado.

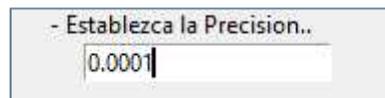


Figura 8-7: Selección de precisión de cálculo para iteraciones

Luego se debe dar clic en el botón "Examinar" para seleccionar el archivo que contiene todos los datos de entrada al modelo.

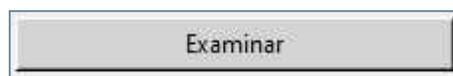


Figura 8-8: Botón de acción

Al dar clic en este botón, aparece la siguiente ventana donde se debe seleccionar la carpeta y el archivo con los datos correspondientes.

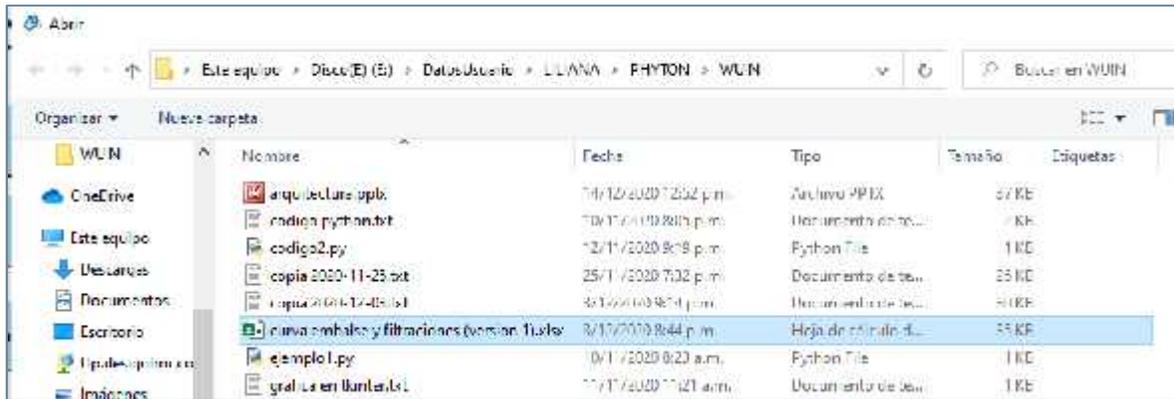


Figura 8-9: Ventana de selección de archivos

El archivo que contiene los datos debe ser de tipo Excel y debe cumplir todas las siguientes características, para que su lectura sea exitosa.

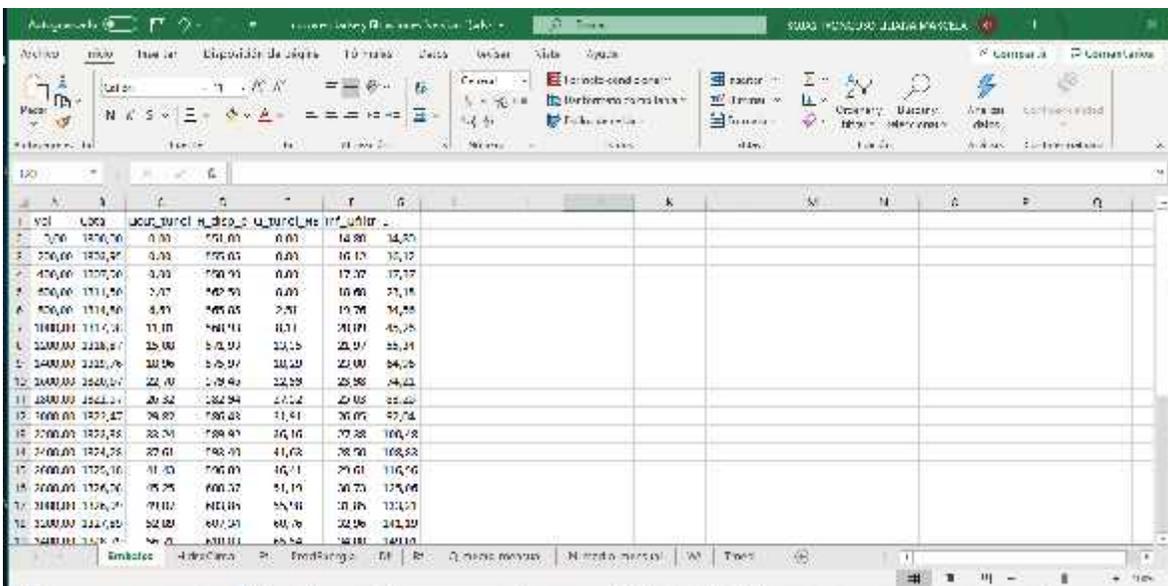


Figura 8-10: Página de archivo excel de ingreso de datos (Embalse)

Debe tener las siguientes hojas, con los nombres de hoja, nombres de columnas, tipos de datos y en el orden indicado, tal como se especifica a continuación:

8.4.1.1 Hoja: Embalse.

Esta hoja contiene los datos del embalse.

Debe tener las columnas, en su respectivo orden:

$V / C / Q_{t1} / H_d / P_e / Q_{t1} / t_H / I / f_Q / f / L$

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-1 Parámetros de ingreso módulo embalse

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION
Vol	Numérico	Volumen del embalse
Cota	Numérico	Cota del embalse
Qout_tunel	Numérico	Caudal salida aguas abajo
H_disp_e	Numérico	Altura de agua disponible
Q_tunel_HE	Numérico	Caudal de salida a través de hidroeléctrica
Inf_Qfiltr	Numérico	Caudal estimado de infiltración
L	Numérico	Liberación máxima en función de la cota

8.4.1.2 Hoja: HidroClima.

Contiene los datos del Hidroclima

Esta hoja debe tener las siguientes columnas. En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-2: Parámetros de entrada módulo hidroclima

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
aaaa	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
M	Numérico	Mes de la información (1,2,...12)	Mes en 2 dígitos
temp	Numérico	temperatura	Grados centígrados
precip	Numérico	Precipitación	mm
Qmed	Numérico	Caudal medio	m ³ /S
Qmin	Numérico	Caudal mínimo	m ³ /s
Nivel	Numérico	Nivel del Embalse	m

8.4.1.3 Hoja: Et

Contiene los datos de Requerimientos de energía.

Esta hoja debe tener las siguientes columnas en su orden:

a /m /E

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-3: Parámetros de entrada módulo energía

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
aaaa	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
M	Numérico	Mes de la información (1,2,...12)	Mes en 2 dígitos
EnerRequ	Numérico	Requerimiento de energía del mes	

8.4.1.4 Hoja: ProdEnergia

Contiene los datos de Producción de energía.

Esta hoja debe tener las siguientes columnas en su orden:

V /C /E

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-4: Parámetros de entrada modulo Producción de enegía

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
Vol	Numérico	Volumen del embalse según cota	Mm3
Cota	Numérico	Cota de embalse	m
Prod	Numérico	Energía producida por el embalse	kwatt

8.4.1.5 Hoja Dt

Contiene los datos de Suministro de agua para consumo.

Esta hoja debe tener las siguientes columnas en su orden:

a / m / v

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-5: Parámetros de entrada módulo demandas de consumo

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
aaaa	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
mm	Numérico	Mes de la información	Mes en 2 dígitos
valor	Numérico	Valor de la demanda de agua para consumo	

8.4.1.6 Hoja Rt

Contiene los datos de demandas por Riego.

Esta hoja debe tener las siguientes columnas en su orden:

a / m / v

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-6: Parámetros de entrada módulo riego

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
aaaa	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
mm	Numérico	Mes de la información	Mes en 2 dígitos
valor	Numérico	Valor de la demanda por riego	

8.4.1.7 Hoja: Q_medio_mensual.

Esta hoja contiene los datos del caudal medio mensual.

Debe tener las columnas, en su respectivo orden:

Año/E /F /M /A /M //1 //1 /A /S /O /N /D

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-7: Parámetros de entrada módulo caudal medio mensual

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
Año	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
Enero	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Febrero	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Marzo	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Abril	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Mayo	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Junio	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Julio	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Agosto	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Septiembre	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Octubre	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Noviembre	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s
Diciembre	Numérico	Caudal medio mensual	m3/s

8.4.1.8 Hoja: N_medio_mensual.

Esta hoja contiene los datos del Nivel medio mensual del embalse.

Debe tener las columnas, en su respectivo orden:

Año/E /F /M /A /M //1 //1 /A /S /O /N /D

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-8: Nivel medio mensual

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
Año	Numérico	Año de la información	Año en 4 dígitos
Enero	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Febrero	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Marzo	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Abril	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Mayo	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Junio	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Julio	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Agosto	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Septiembre	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Octubre	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Noviembre	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m
Diciembre	Numérico	Nivel medio mensual del embalse	m

8.4.1.9 Hoja: Wt.

Esta hoja contiene los datos de requerimientos de agua para consumo

Debe tener las columnas, en su respectivo orden:

m / *v*

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-9: Demandas de consumo

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
mes	Numérico	Mes de la información	Numérico de 2 dígitos
valor	Numérico	Valor de	m

8.4.1.10 Hoja: Tmed.

Esta hoja contiene los datos de temperatura media mensual

Debe tener las columnas, en su respectivo orden:

m /v

En la siguiente tabla se describe cada uno de estos datos:

Tabla 8-10: Temperatura media mensual

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
mes	Numérico	Mes de la información	Numérico de 2 dígitos
valor	Numérico	Valor de	m

Después de seleccionar el archivo de Excel con los datos, WIIN muestra el siguiente mensaje el cual confirma la recepción exitosa del archivo



¡¡ Datos de Excel fueron leídos con Exito !!

Figura 8-11: Mensaje de lectura exitosa de datos

En caso de no aparecer este mensaje, se deben revisar cada uno de los componentes del archivo de Excel, según las especificaciones antes mencionadas y efectuar las correcciones del caso. Una vez este todo correcto, volver a intentar la incorporación del archivo. Hacer esto cuantas veces sea necesario hasta que el mensaje de lectura exitosa aparezca.

8.4.2 Módulo de Embalse.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Embalse”.

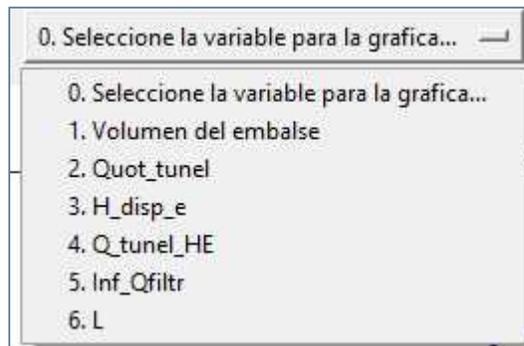


Figura 8-14: Menu desplegable, opciones modulo embalse

A continuación, se presenta un ejemplo con la variable 2. Quot_tunel:

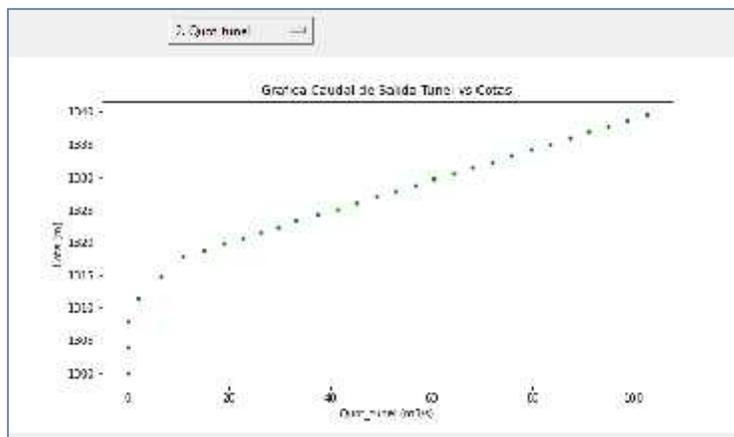


Figura 8-15: Gráfica caudal de salida del embalse por tunel inferior

8.4.3 Módulo de Información hidroclimática y caudales.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Información hidroclimática y caudales”.

Información hidroclimática y caudales

Figura 8-16: Botón de ingreso al módulo de información hidro climática

El sistema presenta la siguiente ventana:

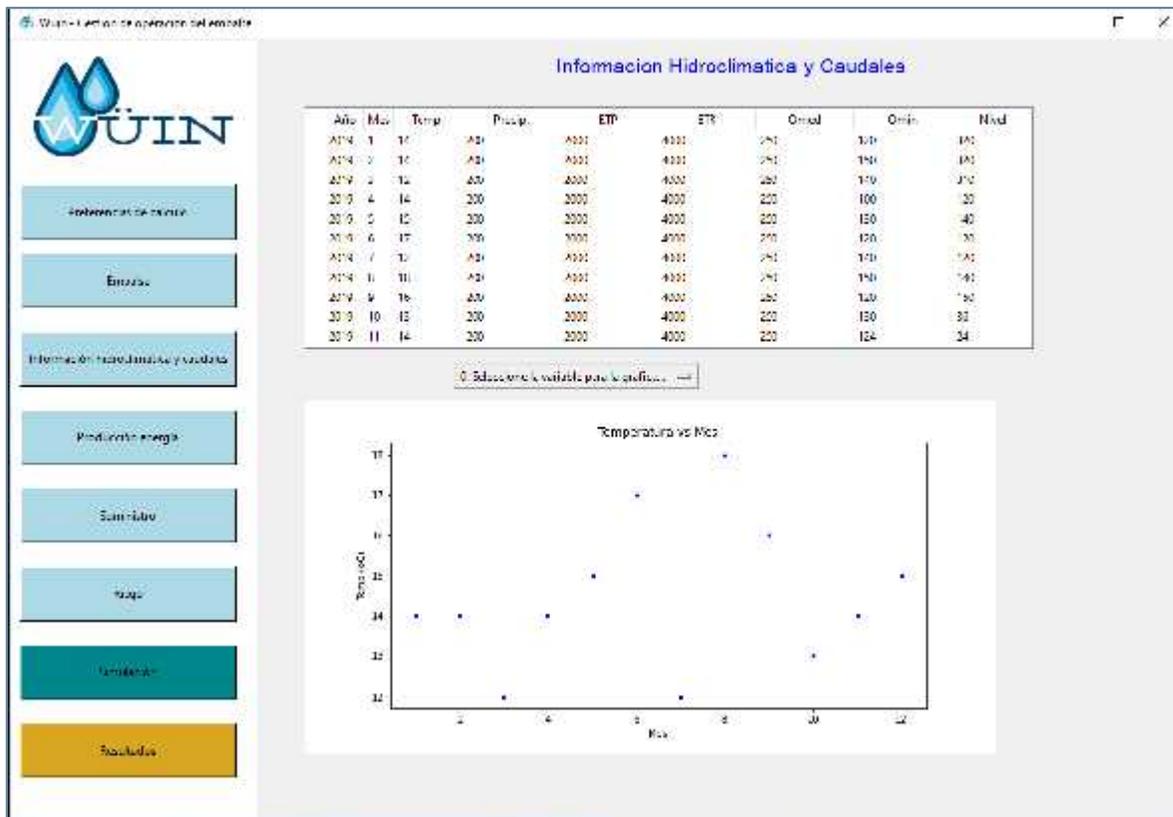


Figura 8-17: Módulo de información hidroclimática

La información aquí presentada corresponde a la contenida en la **Hoja HidroClima** del archivo de Excel seleccionado en el módulo de Preferencias de Cálculo.

A través del botón “Seleccione la variable para la gráfica”, se puede escoger entre varias opciones de variables, tal como se muestra en la siguiente imagen:

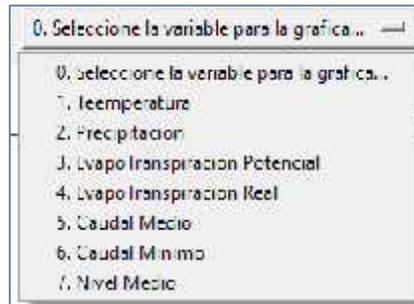


Figura 8-18: Menú desplegable módulo de información hidroclimática

A continuación, se presenta un ejemplo con la variable 1. Temperatura:

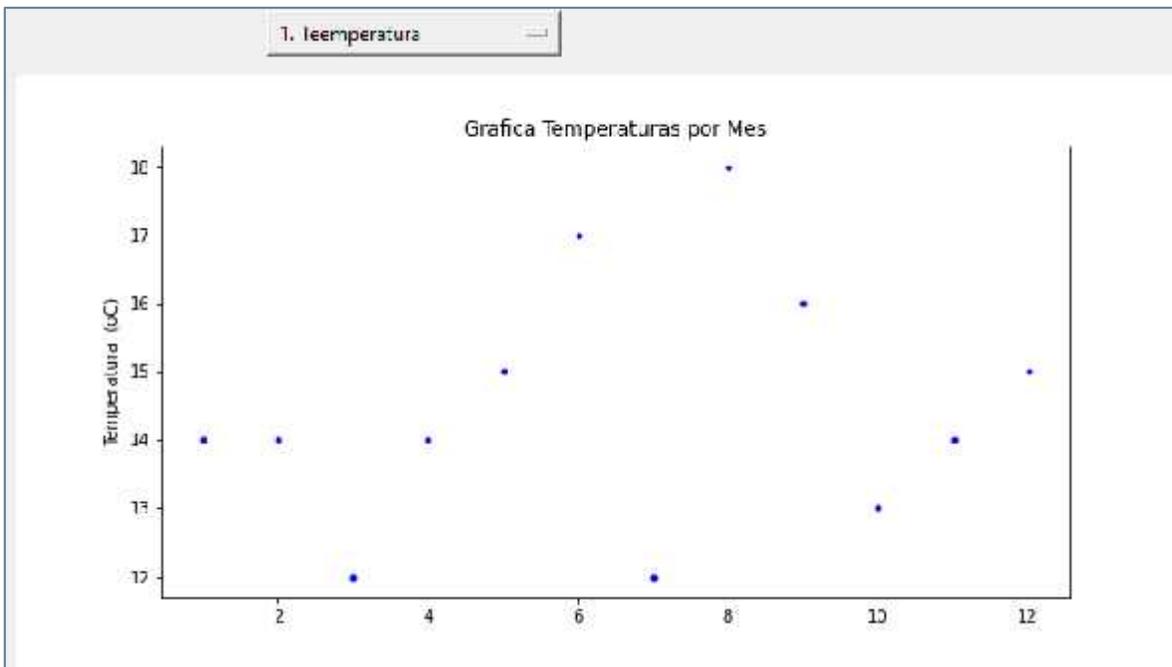


Figura 8-19: Grafica de representación de variables hidroclimáticas

8.4.4 Módulo de Producción de energía.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Producción de energía”.

Producción energía

Figura 8-20: Botón de ingreso al módulo de información de energía

El sistema presenta la siguiente ventana:

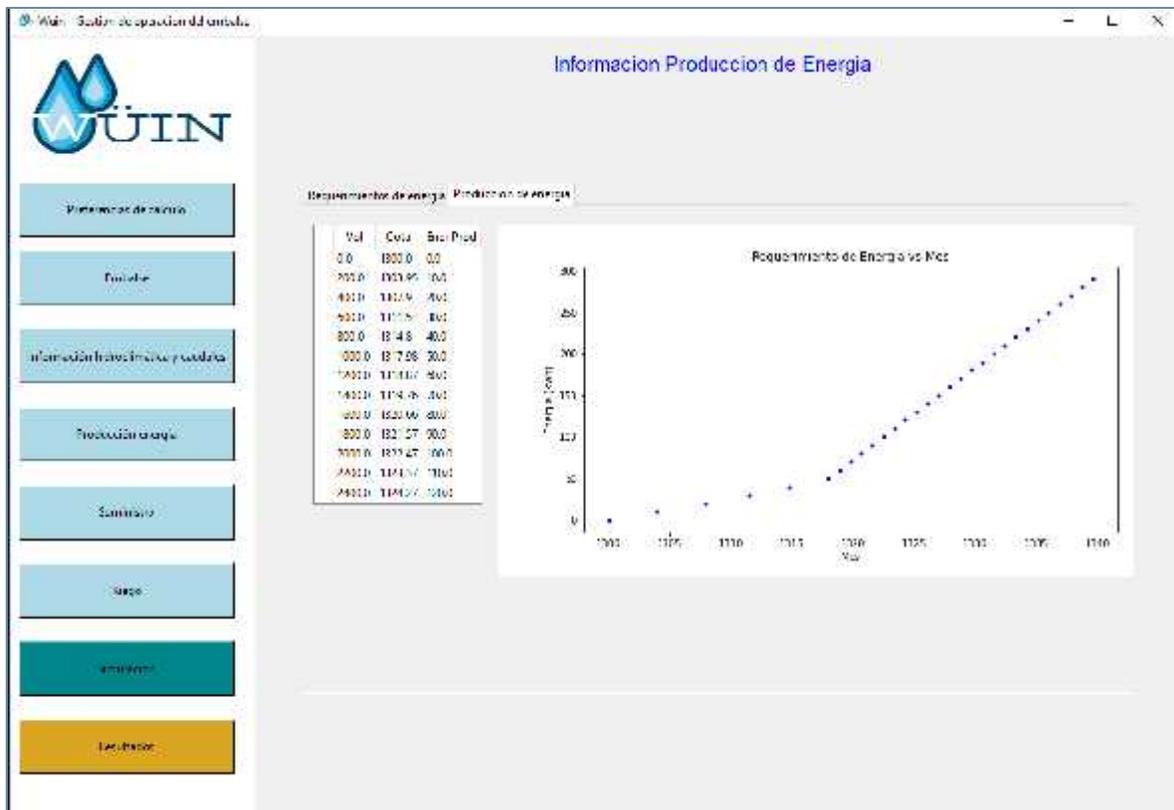


Figura 8-21: Módulo información requerimiento de energía

Este módulo presenta las carpetas “Requerimientos de energía” y “Producción de energía”.

La información presentada en la carpeta “Requerimientos de energía” corresponde a la contenida en la Hoja Et del archivo de Excel seleccionado en el módulo de Preferencias de Cálculo.

La información presentada en la carpeta “Producción de energía” corresponde a la contenida en la **Hoja ProdEnergia** del archivo de Excel seleccionado en el módulo de Preferencias de Cálculo.

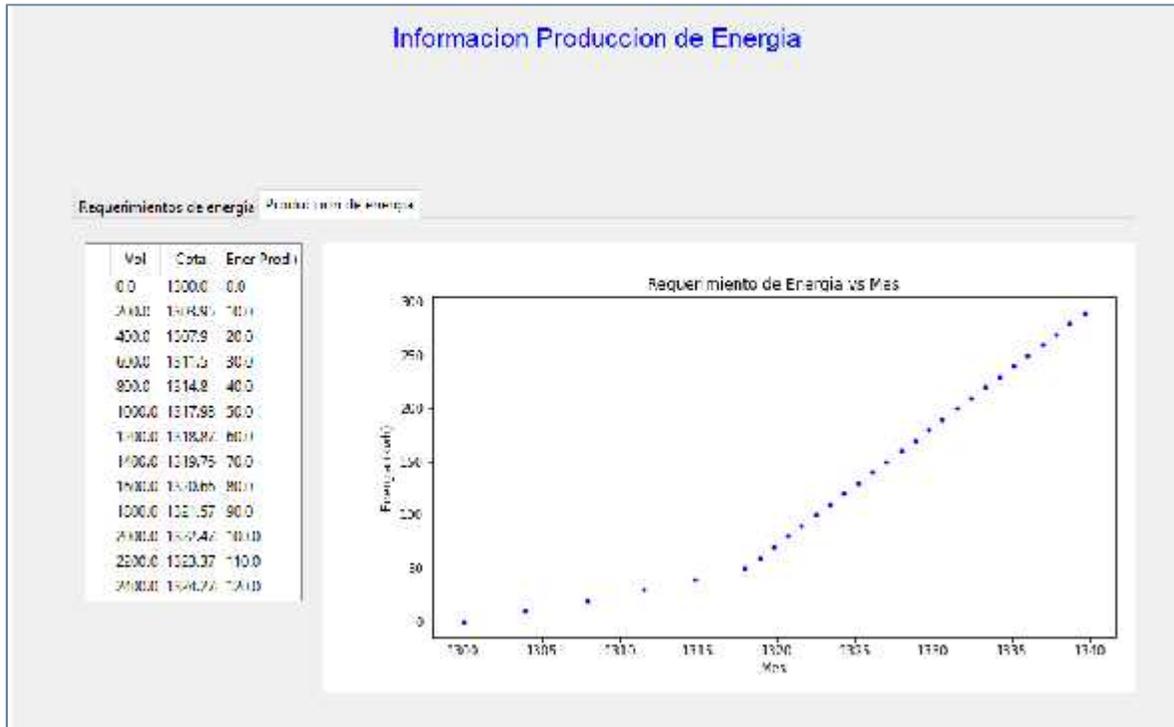


Figura 8-22: Representación gráfica de los requerimientos de energía

8.4.5 Módulo de Suministro.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Suministro”.



Figura 8-23: Botón de ingreso al módulo de suministro

El sistema presenta la siguiente ventana:

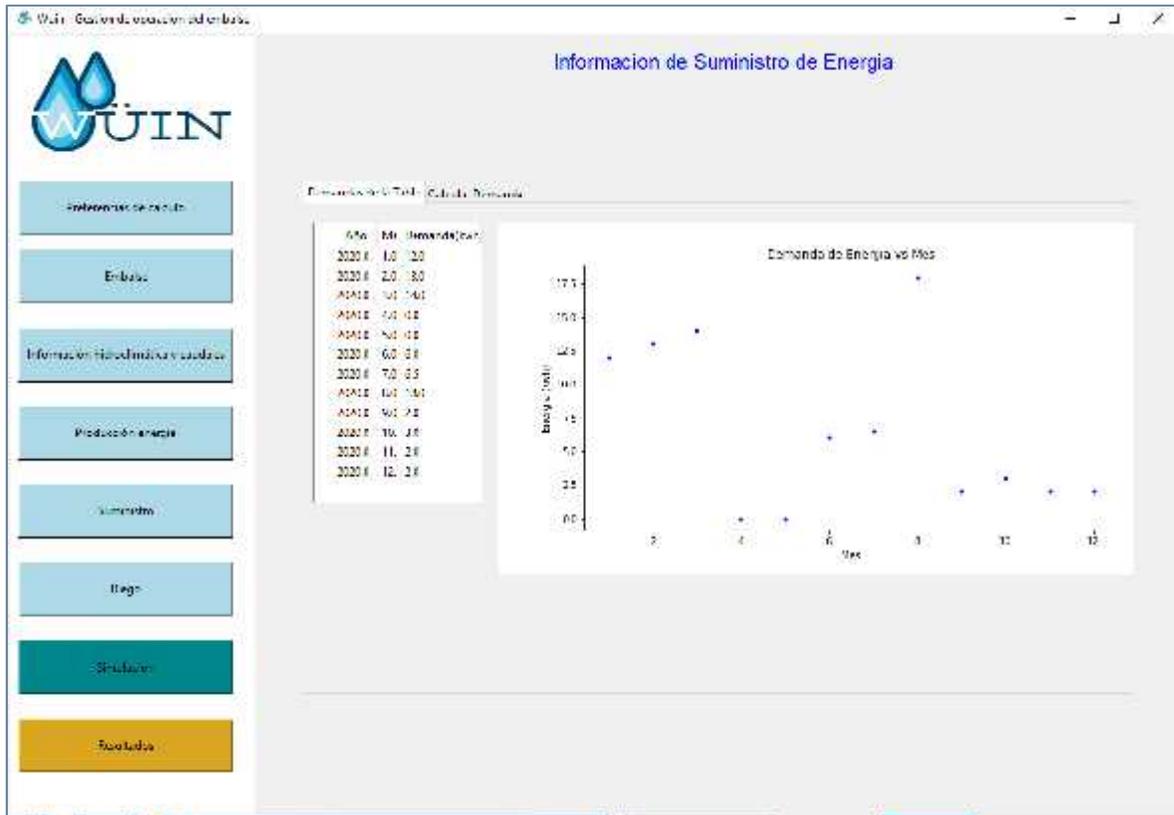


Figura 8-24: Representación gráfica de los datos del requerimiento de suministro

Este módulo presenta las carpetas “Demandas de la tabla” y “Calcular demanda”.

La información presentada en la carpeta “Demandas de la tabla”, corresponde a la contenida en la **Hoja Dt** del archivo de Excel seleccionado en el módulo de Preferencias de Cálculo.

Al dar clic en la carpeta “Calcular demanda”, se presenta la siguiente ventana:

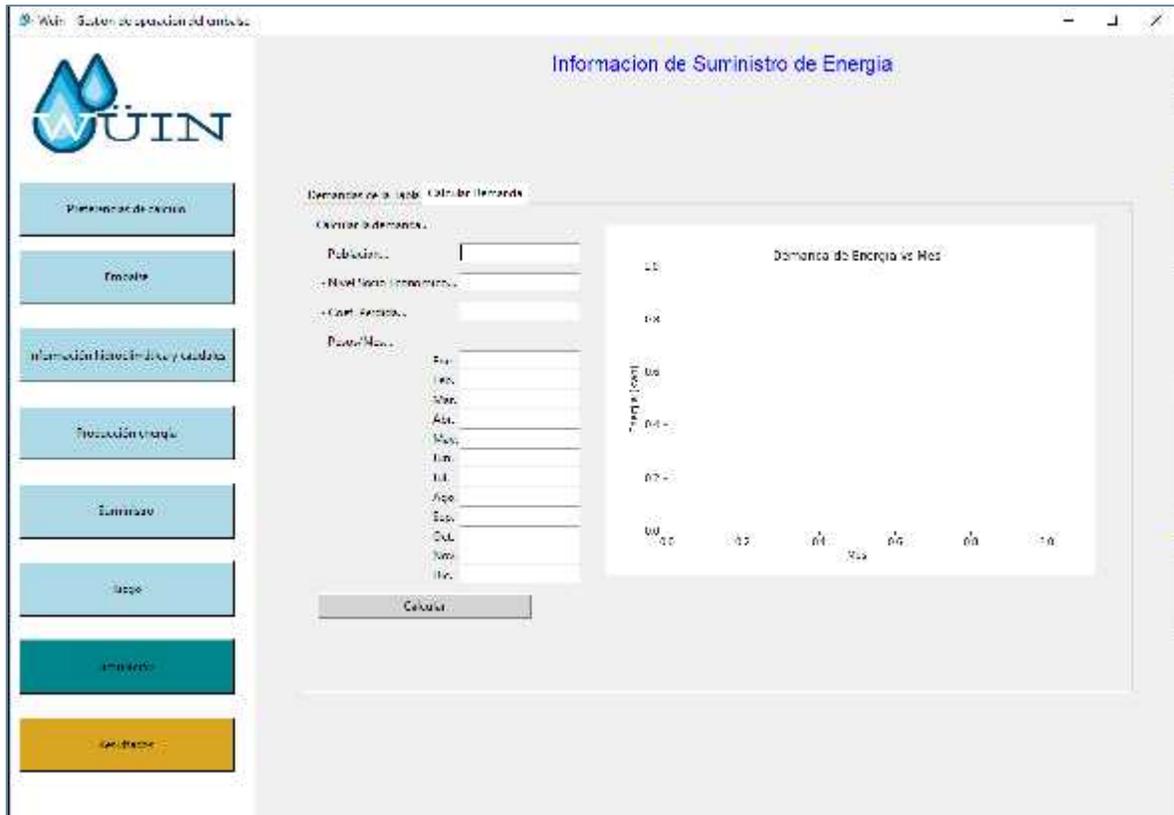


Figura 8-25: Módulo para estimar el caudal de suministro a partir de datos de población

Aquí se deben llenar los datos solicitados en la pantalla correspondientes

a:

Tabla 8-11: Datos requeridos para el cálculo de las necesidades de suministro

DATO	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
Población	Numérico	Año de la información	En número de habitantes
Nivel socio económico	Numérico	Nivel socio económico	
Coef. perdida	Numérico		
Peso/mes Ene	Numérico	Peso correspondiente al mes de enero	
Peso/mes Feb	Numérico	Peso correspondiente al mes de febrero	
Peso/mes Mar	Numérico	Peso correspondiente al mes de marzo	
Peso/mes Abr	Numérico	Peso correspondiente al mes de abril	

DATO	TIPO	DESCRIPCION	UNI.MED
Peso/mes May	Numérico	Peso correspondiente al mes de mayo	
Peso/mes Jun	Numérico	Peso correspondiente al mes de junio	
Peso/mes Jul	Numérico	Peso correspondiente al mes de julio	
Peso/mes Ago	Numérico	Peso correspondiente al mes de agosto	
Peso/mes Sep	Numérico	Peso correspondiente al mes de septiembre	
Peso/mes Oct	Numérico	Peso correspondiente al mes de octubre	
Peso/mes Nov	Numérico	Peso correspondiente al mes de noviembre	
Peso/mes Dic	Numérico	Peso correspondiente al mes de diciembre	

Luego al dar clic en el botón “Calcular”, WIIN efectúa los cálculos relacionados y presenta los resultados en la gráfica.

8.4.6 Módulo de Riego.

Para ingresar a este módulo se debe dar clic en el botón “Riego”.



Figura 8-26: Botón de ingreso al módulo de ingreso de parámetros de riego

El sistema presenta la siguiente ventana:

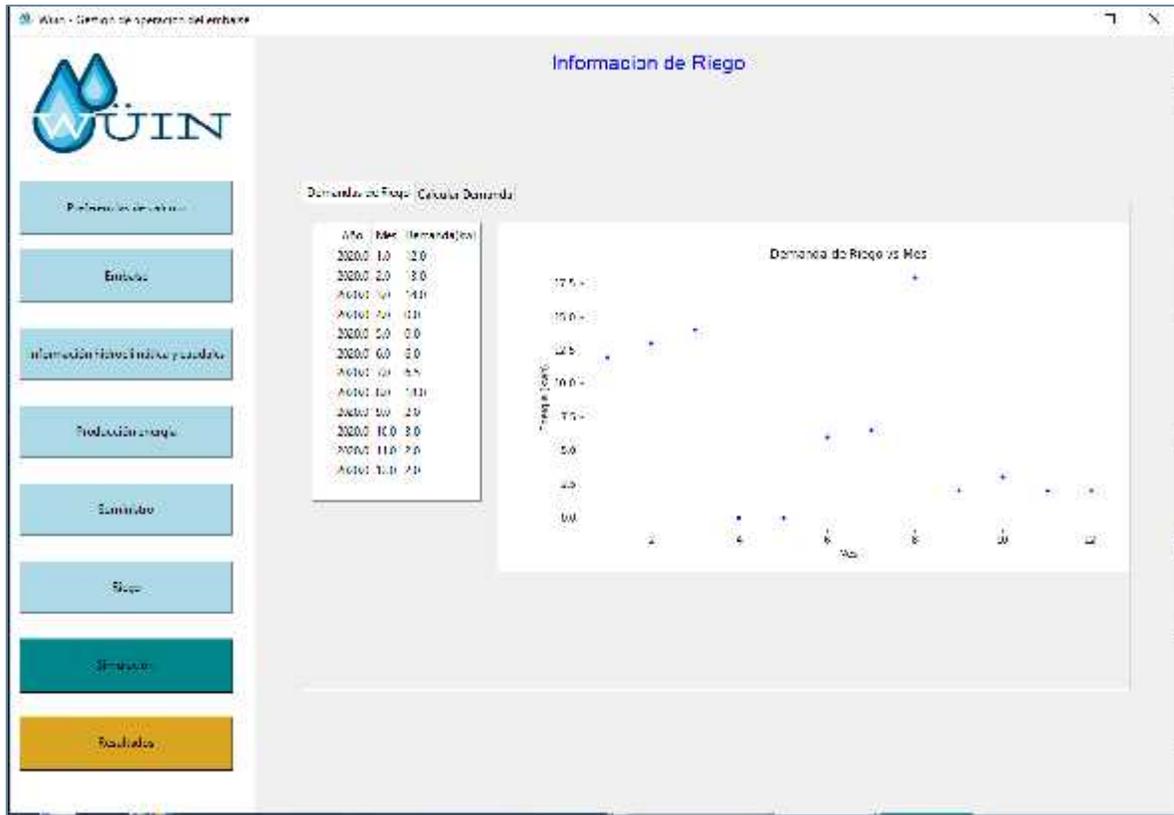


Figura 8-27: Módulo de requerimientos de riego

Este módulo presenta las carpetas “Demandas de Riego” y “Calcular demanda”.

La información presentada en la carpeta “Demandas de Riego”, corresponde a la contenida en la **Hoja Rt** del archivo de Excel seleccionado en el módulo de Preferencias de Cálculo.

Al dar clic sobre la carpeta “Calcular Demanda”, el sistema presenta la siguiente ventana.

9 CASO DE ESTUDIO

Proyecto multipropósito del río ranchería

El departamento de la Guajira tiene una extensión de 20848 km, está localizado a 1121 km al norte de Bogotá a 220 km al noreste de Barranquilla y 170 km de Santa Marta. Buena parte del departamento está conformado por una península, que se encuentra delimitada por una formación geológica que le sirve de barrera natural con el resto del país, la Sierra Nevada de Santa Marta y la estribación oriental origina una vertiente conocida como el Golfo de Venezuela. El departamento de la Guajira comienza su formación geomorfológica al final del periodo cretáceo, en el marco de la era mesozoica, cuando tras un evento geológico en el cual las placas tectónicas del Caribe y la Sudamericana chocan y se despliega la parte norte de la cordillera de los Andes conformando la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y la Península de la Guajira. La creación de dichos accidentes geográficos ha permitido la formación de diversos complejos hídricos, que apoyan los paisajes mediante procesos morfo dinámicos determinando la importancia y la gran variedad de ecosistemas presentes en dicha zona del país. Está bañada al oeste y norte por el mar Caribe al este por las aguas del Golfo de Venezuela la Guajira. El departamento está dividido en 15 municipios. Ríoacha (la capital), Dibulla, Barrancas, El Molino, Fonseca, Hato Nuevo, Maicao, Manaure, San Juan del Cesar, Uribia, Urumita, Villanueva, Albania distracción la jagua del Pilar y cuenta con 44 corregimientos 69 inspecciones de policía y numerosos caseríos y rancherías. (Corporación Autónoma Regional de la Guajira, 2011)

La cuenca del Río Ranchería está localizada en la parte baja de la Guajira, es decir, en la cabecera sur oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta, discurriendo por sus estribaciones hasta el corredor del Valledupar. Bordea las estribaciones de la Sierra Nevada hasta los montes de Oca y allí tomando rumbo norte hacia su desembocadura en el Caribe la región de la Guajira. Es importante resaltar que es una de las zonas más desérticas del país. Esta cuenca tiene su origen en el Cerro la Horqueta, ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta, realiza

un recorrido de ciento cincuenta kilómetros, y su nacimiento es aproximadamente a unos tres mil metros sobre el nivel del mar. Para el departamento de la Guajira es de suma importancia ya que es quien les surte del vital líquido.. En el año 2010 fue creada una represa en el río Ranchería la cual tenía como fin surtir de agua a ocho municipios ubicados en los alrededores de la zona, que son distracción, Fonseca, Manaure, Uribia, Maicao, Hato Nuevo, Barrancas y Albania y al distrito de San Juan del Cesar en un futuro generar energía eléctrica. Esta presa tiene una capacidad de 198 Mm³ de agua. (Corporación Autónoma Regional de la Guajira, 2011)

9.1 ANTECEDENTES DEL SISTEMA DEL EMBALSE

El proyecto multipropósito del Río Ranchería, declarado Proyecto Estratégico Nacional, representa una obra de infraestructura física con impacto en el desarrollo social y económico del Departamento de La Guajira, con trascendencia a nivel regional y nacional. La zona donde se localiza el proyecto de adecuación de tierras de Ranchería, se encuentra al sur oriente del Departamento de la Guajira en jurisdicción de los municipios de San Juan del Cesar, Fonseca, Barrancas y Distracción. El territorio está ubicado, sobre las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, en su vertiente sur oriental. (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)

La zona del Proyecto Ranchería se encuentra cerca de importantes centros de servicios y de consumo, está atravesada por una carretera pavimentada que la comunica por el norte con la ciudad de Riohacha, y por el sur con la ciudad de Valledupar. Es muy importante para el proyecto su cercanía con los puertos de Santa Marta, Cartagena, Barranquilla y el Proyecto de Puerto Brisas, situado en el municipio de Dibulla, a una hora y media de la zona del proyecto. (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)

La temperatura media anual de la zona es de 28.9° C, la precipitación media es de 948 mm con distribución del tipo mono modal, que presenta un periodo seco bien definido en los meses de diciembre a marzo; la humedad relativa media anual

es de 67%, la evaporación anual es de 1.802 mm, y la velocidad promedio del viento es de 4.3 m/s. El clima del área del proyecto se clasifica según Holdridge como cálido seco, con un verano entre diciembre y marzo.

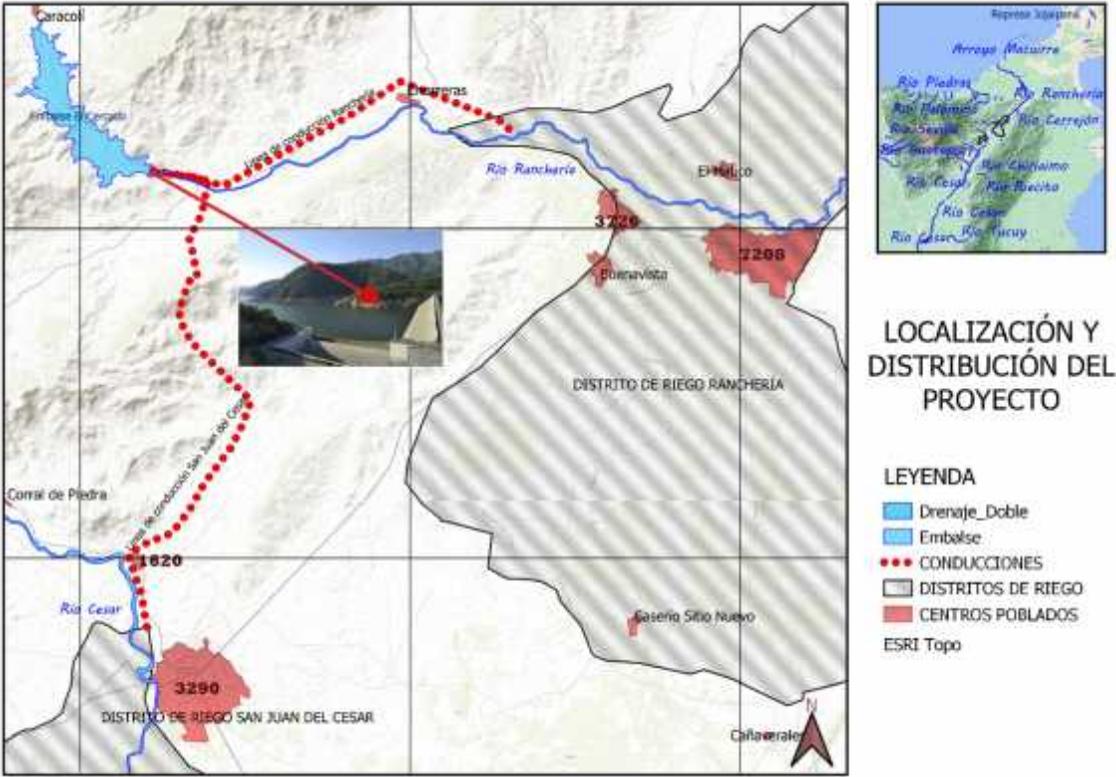


Figura 9-1: Localización y distribución del proyecto (Fuente: Elaboración propia)

Los principales antecedentes del proyecto Río Ranchería – La Guajira, ha tenido diversas etapas en su proceso de desarrollo. En la primera Etapa de Factibilidad, la firma Italiana IFAGRARIA s.p.a, desarrolló para el Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT un estudio de Factibilidad para el proyecto de uso múltiple de las aguas del río Ranchería, cuyo objeto era definir a través de un programa de investigaciones y estudios básicos la factibilidad y beneficios que el proyecto aportaría a un amplio sector de la Baja Guajira.

En el año 1994 – La firma consultora INGESTUDIOS Ltda. realizó para el Instituto Nacional de Adecuación de Tierras – INAT - la actualización del estudio de factibilidad del proyecto Ranchería, complementando los estudios hidrológicos originales de IFAGRARIA con información reciente, revisó y ajustó los estudios de demanda de agua para el distrito de riego. En el año de 1998, la firma Gómez Cajiao y Asociados, por la actualización y recomendaciones realizadas por los estudios adelantados por INGESTUDIOS Ltda., adelantó para el INAT, la revisión de la factibilidad de la presa El Cercado y los estudios geofísicos e hidrogeológicos del embalse y presa.

En 2019 fue entregado por la Agencia de Desarrollo Rural a FINDETER, el proyecto denominado “Actualización de estudios y diseños del Proyecto Multipropósito del Río Ranchería en el Departamento de la Guajira”, con el propósito de elaborar la actualización de los diseños para la terminación de la infraestructura del mismo, con el fin que se diera inicio al proceso precontractual para la contratación de los mismos. (FINDETER, 2019)

En la etapa de Construcción, desarrollada en los años 2006 a 2010, las obras multipropósito iniciaron el 10 enero de 2006 y finalizaron el 30 de noviembre de 2010. Comprendió la Construcción de la Presa El Cercado, conducciones Principales para las áreas de riego de los Distritos de Ranchería y San Juan del Cesar y obras complementarias. (FINDETER, 2019)

El proyecto multipropósito Río Ranchería fue concebido para el abastecimiento de agua cruda a los sistemas de acueductos de nueve municipios en el departamento de La Guajira, a los distritos de riego de Ranchería y San Juan del Cesar; y además la generación de energía eléctrica para esa zona del país. (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020) Mediante la elaboración del megaproyecto para el Río Ranchería se busca ejecutar dos fases que permitan la gestión y distribución del recurso hídrico en el departamento de la Guajira. Es importante aclarar que el departamento de la Guajira que es el mayor déficit hídrico

presenta en el país y por lo tanto la mega obra propuesta se planteó como de interés prioritario para la región. Para esto se plantearon dos fases del proyecto:

Fase I: Construcción de la presa El Cercado, sus obras anexas (Rebosadero, Túneles de Desvío y Toma, Estructura de Toma y otras, y las conducciones principales a las áreas de los Distritos de Riego de Ranchería y San Juan del Cesar.

Fase II: Construcción de las obras dentro del área de los Distritos de riego Ranchería y San Juan del Cesar (redes de distribución primarias, secundarias y terciarias y obras prediales).



Figura 9-2: Represa el Cercado, estado actual (Fuente: GoogleEarth)



Figura 9-3: Vista de la presa El Cercado (Fuente: ADR, 2020)

9.2 EMBALSE “EL CERCADO”

El embalse de El Cercado, a la cota 435,50 msnm (cota de la cresta del aliviadero), ocupa una superficie de 638 ha, encerrando un volumen de agua de 198 millones de m³.

El perímetro del embalse asciende a 35 km con 320 m. Si se toma el eje del cauce del río Ranchería, la longitud máxima del embalse es, aproximadamente, de 10 km con 406 m. La profundidad máxima del embalse se da junto a la presa, siendo de 107,50 m desde el cauce hasta la cresta del aliviadero.

El río Ranchería discurre por el Departamento de La Guajira en la República de Colombia. La Guajira es el departamento más septentrional de Colombia, limitando con el Mar Caribe al norte y Oeste, Venezuela al Este y el Departamento de Magdalena y Cesar al Sur.

El río nace en la Sierra Nevada de Santa Marta discurriendo en sentido Este-Oeste para luego girar en sentido Sur-Noreste y por último volver a girar en sentido Sur-Noroeste, desembocando en la ciudad caribeña de Riohacha.

El río en su parte media de la cuenca pasa por las localidades de Distracción, Fonseca, Barracas y Albania. La hoya tiene un total de aproximadamente 4.240 km² de área de drenaje y una longitud de cauce desde el nacimiento a la desembocadura de 150 km.

9.3 PRESA

La Presa del Cercado está construida en enrocado con cara de concreto, tiene una altura máxima de 110 m, y la capacidad útil de almacenamiento del embalse es de 198 millones de m³. Las cotas de agua del embalse oscilan entre 352 y 435 msnm.

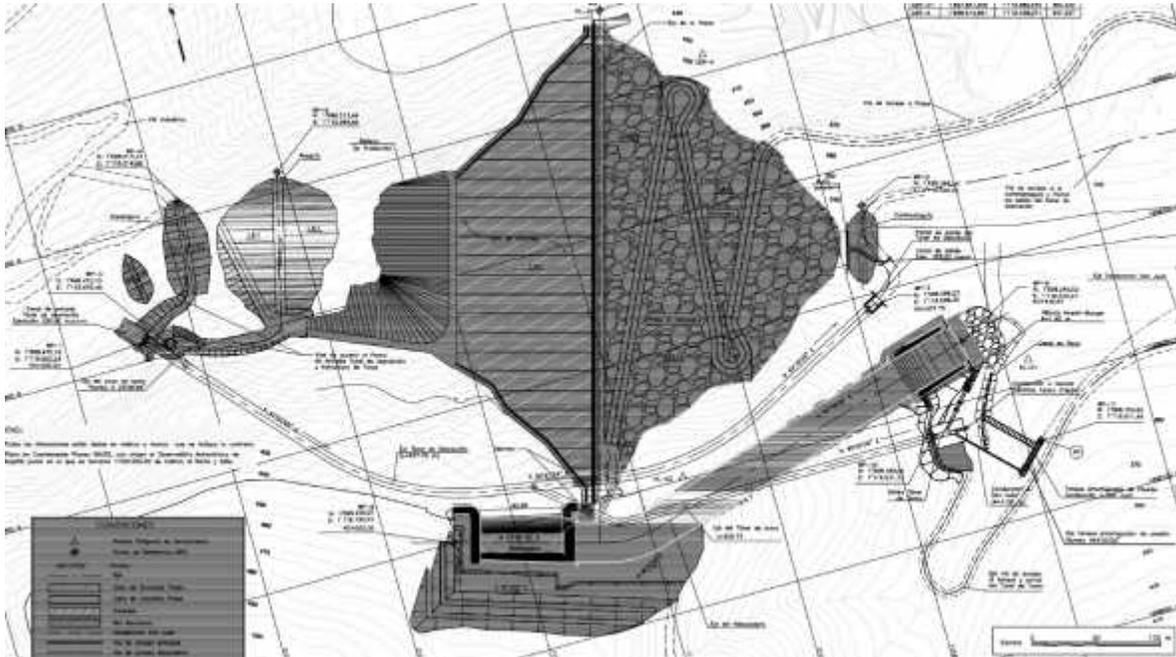


Figura 9-4: Diseño presa en planta (Fuente: ADR, 2020)

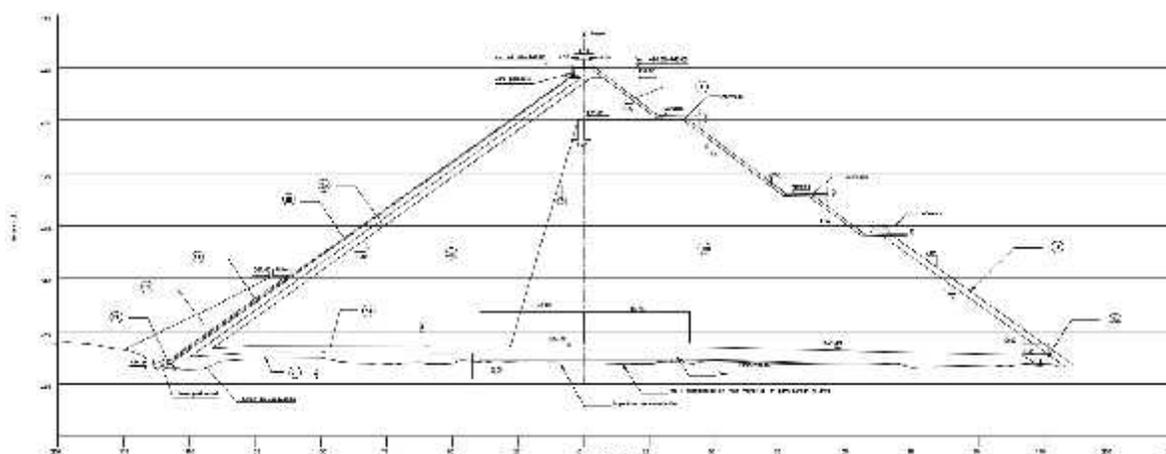


Figura 9-5: Diseño presa Perfil (Fuente: ADR, 2020)

Las características principales del cuerpo de presa son las que siguen:

Tabla 9-1: Características del cuerpo de la presa. Fuente: INCODER

CUERPO DE PRESA	
Tipología	Enrocado con cara de concreto
Altura desde la cota de cimentación	110,00 m
Cota de cimentación de la presa	325,50 msnm
Cota de coronación de la presa (sin pretil)	441,00 msnm
Longitud de coronación de la presa	378,00 m
Cota del cauce	328,00 msnm
Cota del Nivel Máximo Normal (NMN)	435,50 msnm
Cota del Nivel de Avenida de Proyecto (NAP)	440,25 msnm
Talud agua arriba y talud agua abajo	1,4:1 y 1,32:1
Volumen del cuerpo de presa (m ³ × 1.000)	2.995
Roca de cimentación	Basaltos, limolitas y grauvacas

9.4 DESCARGA DE FONDO

La conducción de descarga de fondo regulada por la válvula Howell-Bunger vierte el agua directamente al río y, por tanto, también cumple la función de aportar el agua demandada por el área de riego de Ranchería. Las características principales de la descarga de fondo son las siguientes

Tabla 9-2: Parámetros de la descarga de fondo. Fuente: INCODER

DESCARGA DE FONDO	
Número de desagües de la presa	2
Cota de la embocadura	335,00 msnm
Descarga principal	
Válvula de guarda	Mariposa VAG EKN 1.600 mm 16 bar
Válvula de regulación	Howell-Bunger VAG KSS 1.000 mm 24,52 m ³ /s al NMN
Descarga secundaria	
Válvula de guarda	Mariposa VAG EKN 800 mm 16 bar
Válvula de regulación	Anular VAG RIKO 800 mm 8,38 m ³ /s al NMN

Del embalse, por el interior de la presa, circulan dos conducciones. Una de mayor diámetro que sirve de toma principal y otra menor que transcurre por el túnel de desvío del río durante la construcción de la presa (hoy convertido acceso e inspección al interior). o en galería de gran diámetro de acceso e inspección al interior).

La toma principal es una conducción de 2.500 mm de diámetro regulada por una válvula de mariposa. A la salida de la presa llega a un edificio que actúa de bloque distribuidor. En ese bloque la conducción se divide en tres: la conducción del futuro riego al área de San Juan del Cesar regulada por una válvula anular, la toma de la central hidroeléctrica y el conducto de descarga de fondo regulado por una válvula Howell-Bunger.

La toma que discurre por el túnel de desvío está regulada por actualmente no cumple servicio alguno, si bien, se prevé en un futuro próximo que aporte el caudal

ecológico. La conducción de descarga de fondo regulada por la válvula Howell-Bunger vierte el agua directamente al río y, por tanto, también cumple la función de aportar el agua demandada por el área de riego de Ranchería.

9.5 ALIVIADERO

Posee un aliviadero de tipo lateral en el estribo derecho de la presa. Este aliviadero construido con concreto consta de embocadura, gola y tanque dissipador en su final como restitución al río.

Las características principales del aliviadero son:

Tabla 9-3: Parámetros del aliviadero. Fuente: INCODER

ALIVIADERO	
Número de aliviaderos de la presa	1
Número de vanos	1
Tipo de aliviadero	lateral
Cota de la cresta (NMN)	435,50 msnm
Tipo de regulación	Labio fijo
Tipo de perfil	Creager
Longitud de vertido	62,60 m
Ancho canal de descarga	30,00 m
Restitución al río	Cuenco con deflectores
Capacidad de alivio	1.250 m ³ /s al NAP (440,25 msnm)

9.6 PRESA DERIVADORA

Se trata de una presa de gravedad de planta recta, de baja altura, construida con concreto de labio fijo en cuyo estribo izquierdo se encuentra la toma al área de riego de ranchería regulada por dos compuertas Vagon. La descarga de fondo y el caudal ecológico se garantizan en la presa derivadora mediante una compuerta radial. La compuerta radial posee unos motores que permiten su izado.

La presa derivadora ubicada aguas abajo de la Presa El Cercado, que capta las aguas del río del Ranchería para entregarlas al canal de aducción. (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)



Figura 9-6: Presa derivadora. Imágenes captación (Fuente ADR, 2020)

9.7 DISTRITO RANCHERIA

El área bruta del distrito Ranchería es de 22.394 ha, de la cual se determinó una superficie neta beneficiada con riego de 15.530 ha. Los municipios de influencia del Distrito de riego Ranchería corresponden a Fonseca, Barrancas y Distracción en el Departamento de la Guajira. (FINDETER, 2019)

La conducción desde el embalse del Cercado hacia el distrito Ranchería, toma el agua mediante la presa derivadora, del cauce del Río Ranchería, la cual se encuentra localizada 1.2 km aguas abajo de la presa. (FINDETER, 2019)

De la presa derivadora sale un canal en concreto reforzado (canal de aducción), el cual cuenta con un ancho variable entre 5.7 m y 3.16 m y su longitud es de 11.76 m. Este canal entrega el agua a la tubería de distribución en su parte final. La cota del nivel del agua es 320.20 msnm y el nivel del fondo del canal en el punto de entrega a la tubería es 316.25 msnm. Se estima que las pérdidas de

cabeza a largo de la estructura de toma son iguales a 1.0 m, por esta razón la cabeza inicial de la conducción es igual a 319.2 m. Esta conducción transporta un caudal de 10.5 m³/s y tiene un diámetro de 2.20 metros.

La conducción al distrito Ranchería está compuesta por una tubería de acero American Pipe con revestimiento externo e interno de mortero de cemento, tiene un diámetro de 2.20 m y una longitud de 11.1 km hasta la cabecera del área de este distrito.

9.7.1 Canal del Aducción (Inicio de la conducción Ranchería)

Ubicado en la margen izquierda de la presa derivadora, está provisto de un sistema de control del caudal, mediante dos (2) compuertas tipo cortina para entregar el agua captada a la conducción del distrito de riego Ranchería. La abscisa K0 + 000 del canal de conducción se encuentra georreferenciada con las coordenadas N: 10°54'23,7" / W: 73°00'11,7", a una altura de 332 msnm. (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)



Figura 9-7: Canal de aducción de la conducción Ranchería

Tabla 9-4: Distribución de cultivos Distrito Ranchería (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)

PRODUCTOS	ÁREA SEMBRADA (Ha. Neta bajo riego)			
	SEMESTRES		TOTAL AÑO	
	A	B	No.	Porcentaje
AGRICULTURA	(Has.)	(Has.)	(Has.)	(%)
1. TRANSITORIOS				
ALGODÓN		800	800	3,90
ARROZ	1.500	1.500	3.000	14,63
MAÍZ	1.500	1.000	2.500	12,19
FRIJOL	1.000	900	1.900	9,26

PRODUCTOS	ÁREA SEMBRADA (Ha. Neta bajo riego)			
	SEMESTRES		TOTAL AÑO	
	A	B	No.	Porcentaje
FRUTALES (Melón y patilla)	600	400	1.000	4,88
HORTALIZAS (Pimentón, cebolla y ahuyama)	400	250	650	3,17
DESCANSO	480	630	1.110	5,41
SUBTOTAL	5.480	5.480	10.960	53,44
2. SEMIPERMANENTES				
BANANO	1.000	1.000	1.000	4,88
AJÍ	100	100	100	0,49
PANCOGER	120	120	120	0,59
YUCA	500	500	500	2,44
PAPAYA Y PIÑA	700	700	700	3,41
SUBTOTAL	2.420	2.420	2.420	11,80
3. PERMANENTES				
FRUTALES (Mango, cítricos y aguacate)	700	700	700	3,41
PALMA ACEITERA	1.900	1.900	1.900	9,26
SUBTOTAL	2.600	2.600	2.600	12,68
TOTAL AGRICULTURA	10.500	10.500	15.980	77,91
GANADERIA				
1. DOBLE PROPÓSITO Leche	2.560	2.560	2.560	12,48
Carne	2.560	2.560	2.560	12,48
2. DOBLE PROPÓSITO CON CEBA Leche	1.095	1.095	1.095	5,34
Carne	1.095	1.095	1.095	5,34
3. CEBA Carne	875	875	875	4,27
TOTAL GANADERIA	4.530	4.530	4.530	22,09
TOTAL PROYECTO	15.030	15.030	20.510	100,00

9.8 DISTRITO SAN JUAN DEL CESAR:

El área del Distrito de Riego San Juan del Cesar, con una superficie bruta de 4.112 ha y neta beneficiada de 3.000 ha, está ubicada en jurisdicción del municipio del mismo nombre, que dista 75 km de Valledupar y 168 km de Riohacha, capital del Departamento de la Guajira. La mayor parte del área, se ubica sobre la

margen derecha del río Cesar y el resto sobre la izquierda, al sur de la cabecera municipal. (FINDETER, 2019)

La conducción desde el embalse del Cercado hacia el distrito San Juan del Cesar, se inicia a partir de un tanque dissipador de energía ubicado aguas abajo de la presa, que cuenta con un caudal de diseño de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es regulado por una válvula de chorro hueco ubicada a la salida del tanque dissipador de presión.



Figura 9-8: Tanque de amortiguación K0+000

La conducción, con una longitud total de 18.1 km, está conformada por 5 tramos alternativos de tuberías y túneles:

- Tubería 1 con longitud de 3.0 km a partir del tanque dissipador de energía
- Túnel 1 con longitud de 1.5 km
- Tubería 2 con longitud de 0.3 km
- Túnel 2 con 0.7 km

- Tubería 3 con longitud de 12.6 km

La conducción hacia el distrito San Juan del Cesar es una tubería del tipo CCP, cilindro de acero con refuerzo de varilla y revestimientos externo e interno de mortero de cemento, con diámetro de 1.30 m y longitud de 18.1 km. Los túneles operan a flujo libre.



Figura 9-9: Bloque distribuidor (Deriva a la conducción San Juan-PCH-Descarga Válvula HB)

Tabla 9-5: Distribución de cultivos distrito San Juan (Agencia de Desarrollo Rural (ADR), 2020)

PRODUCTOS	ÁREA SEMBRADA (Ha. Neta bajo riego)			
	SEMESTRES		TOTAL, AÑO	
	A	B	No.	Porcentaje
	(Has.)	(Has.)	(Has.)	(%)
AGRICULTURA				
1. TRANSITORIOS				
ALGODÓN		200	200	5,10
MAÍZ	410	270	680	17,35

FRIJOL	250	150	400	10,20
FRUTALES (Melón)	120	90	210	5,36
HORTALIZAS (Pimentón y cebolla de bulbo)	400	250	650	8,93
DESCANSO	10	90	100	
SUBTOTAL	920	920	1.840	46,94
2. SEMIPERMANENTES				
PLATANO	160	160	160	4,08
PANCOGER (Plátano y yuca)	55	55	55	1,40
YUCA	125	125	125	3,19
PAPAYA	110	110	110	2,81
SUBTOTAL	450	450	450	11,48
3. PERMANENTES				
FRUTALES (Mango, cítricos y aguacate)	130	130	130	3,32
PALMA ACEITERA	580	580	580	14,80
SUBTOTAL	710	710	710	18,11
TOTAL AGRICULTURA	2.080	2.080	3.000	76,53
GANADERIA				
1. DOBLE PROPÓSITO	430	430	430	10,97
2. CEBA	490	490	490	12,50
TOTAL GANADERIA	920	920	920	23,47
TOTAL PROYECTO	3.000	3.000	3.920	100,00

9.9 DISTRIBUCIÓN PARA CONSUMO HUMANO (ACUEDUCTO)

El proyecto contempla el suministro de agua para dotar los acueductos de los municipios de San Juan del Cesar, Distracción, Fonseca, Barrancas, Hato Nuevo, Albania, Maicao, Uribía y Manaure, que beneficiarán una población aproximada de 400.000 habitantes. En julio del año 2017 se realizó la interconexión de los acueductos de los Municipios de Fonseca y Barrancas por medio de la planta de tratamiento de agua potable en el sector de Metesusto, la cual se encuentra en proceso de ampliación y optimización. De igual manera, el Municipio de San Juan del Cesar solicitó la información técnica y ambiental del embalse para solicitar la viabilidad del proyecto de diseño de una nueva planta de tratamiento de agua potable ante el Viceministerio de Agua Potable, que se conectaría a la conducción San Juan. La población total para abastecer es de alrededor de 400.000 habitantes.

9.10 USUARIO HIDROELÉCTRICO

9.10.1 Descripción de la central hidroeléctrica

Construcción de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) con Capacidad para Generar: 19.8 Megavatios, que beneficiará 3.000 viviendas. Tiene un salto neto de 106.9m. El aprovechamiento prevé una conducción forzada de acero de 2400mm de diámetro y 380 m de longitud hasta la casa de máquina. La generación estaría asegurada por dos grupos Francis vertical iguales. (Hidro-Proyectos, 2021)

9.11 RESUMEN DE INFRAESTRUCTURA

Con base en lo anterior se puede resumir la información de interés de la infraestructura construida y por construir en la siguiente tabla:

Tabla 9-6: Resumen Infraestructura Represa el Cercado

Componentes	Detalles	Cantidad
Represa el cercado tipo enrocado con cara de concreto	Altura	110 m
	Longitud	378 m
	Ancho de cresta	8 m
Embalse	Volumen total	198 m
	Caudal medio del río	7,76 m ³ /s
Rebosadero	Longitud	404 m
Conducciones	San Juan del Cesar	15941 m - D = 1,30m
	Ranchería	15941 m - D = 1,30m
	Túnel de desvío	638 m
	Túnel de toma	345 m
	Conducción San Juan del Cesar	2200 m
Red Eléctrica	Longitud	21,5 km en 19,8 KV

9.12 HIDROLOGÍA

9.12.1 Cuenca del Río Ranchería

El Río Ranchería discurre por el departamento de La Guajira. Nace en la sierra nevada de santa marta discurrendo Oeste-Este para luego girar en sentido Sur-Noreste y por ultimo volver a girar en sentido Este-Oeste, desembocando en la ciudad caribeña de Riohacha.

El río en su parte media de la cuenca pasa por las localidades de Distracción, Fonseca, Barrancas y Albania, entre otras.

La cuenca tiene un total de aproximadamente 4240 km² de área de drenaje y una longitud de cauce desde el nacimiento a la desembocadura de 150 km.

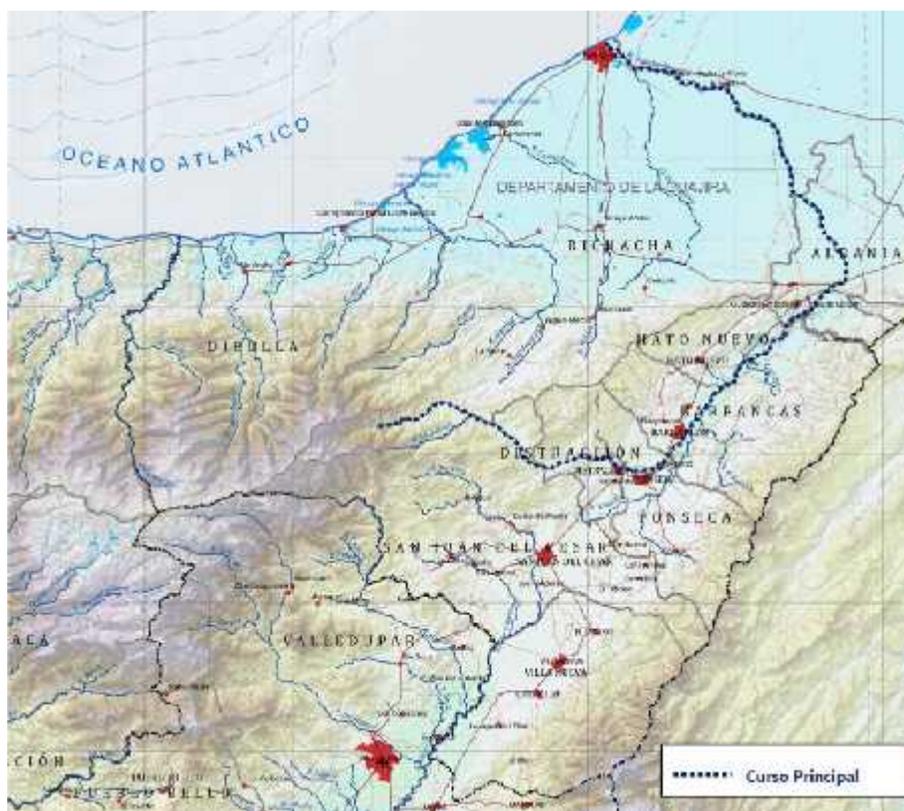


Figura 9-10 Poblaciones del río Ranchería. Fuente: Fundación Pro-Sierra Nevada de Santa Marta

9.12.1.1 Cuenca alta Río Ranchería

Correspondiente con el primer tramo de orientación Oeste-Este antes descrito, la parte alta de la hoya, aproximadamente hasta la población de Distracción, en el municipio del mismo nombre (12.000 habitantes) consta de dos zonas claramente diferenciadas. La primera es una zona muy montañosa que discurre desde el nacimiento del río en la laguna denominada “Chiriguaná” (3.875 msnm) hasta aproximadamente la unión del afluente Marocaso aguas abajo de la población de El Repaso. Esta primer zona está alimentada por un gran número de torrentes de montaña que bajan desde las altas cumbres de este valle en “V”; barrancos con altas pendientes debidas a la orografía de la cordillera de Santa Marta. Desde esta zona hasta la población de Distracción, el valle se abre considerablemente y aunque montañoso, ya presenta grandes áreas planas y en las que el cauce principal baja considerablemente la pendiente de su curso de agua.

9.12.1.2 Cuenca media del río Ranchería:

Correspondiente con el segundo tramo de orientación Sur- Noreste antes descrita, la parte media de la cuenca del río Ranchería discurre por zonas rurales y mineras de la Guajira. El río tiene un cauce más ancho (unos 20 metros) y una llanura aluvial extensa. Discurre por las localidades de Fonseca, municipio de Fonseca, 32000 habitantes; Barrancas, municipio del mismo nombre de habitantes). 22.000 habitantes y el municipio de Albania (21.000 En este último municipio es donde se localiza la mina de El Cerrejón. En esta parte media de la cuenca se incorporan al río Ranchería afluentes por su margen derecha que provienen de la Serranía de Perijá. Por la margen derecha de la cuenca media se incorporan desde aguas arriba hacia aguas abajo el arroyo La Quebradita y río Palomino, justo agua abajo de Barrancas, y ya en la última parte los arroyos Tabaco y Bruno. Todos estos cursos fluviales provienen de la Serranía de los Motilones y de los Montes de Oca, que componen la Serranía de Perijá. En la margen izquierda se incorporan el Arroyo Platanal, antes de la localidad de Barrancas, el arroyo Seco/arroyo Hondo, justo agua abajo de esta localidad y el arroyo Paladines en la zona más baja de la hoya media.

9.12.1.3 Cuenca con el punto de cierre en el punto de ubicación de la presa

El embalse el cercado a la cota 435.5 msnm ocupa una superficie de 638 ha, encerrando un volumen de agua de 198 millones de m³. El perímetro del embalse asciende a 35km con 320m. Si se toma el eje del cauce del río Ranchería, la longitud máxima de embalse es de 10.41 km.

La presa del embalse se ubica en el municipio de San Juan de Cesar con las coordenadas 10°54'32"N y 73°00'49"O. La primera zona homogénea de la cuenca vertiente hasta la presa el Cercado consta de un número bastante alto de arroyos que desembocan en el río Ranchería. EN la segunda parte homogénea de

la cuenca el cauce fluvial presenta un paisaje aun montañoso pero de menor profundidad.

Las principales características geomorfológicas de la cuenca se muestran a continuación:

Tabla 9-7 Características geomorfológicas del Rio Ranchería Fuente: INCODER

DIFERENCIAS ENTRE ESTUDIOS	TYPSA ¹
Área Vertiente: A(km ²)	352,57
Longitud de Cauce L(km)	55,88
Cota máxima (laguna de Chiriguaná) H _{max} (msnm)	3.875
Cota mínima. En las inmediaciones de la presa. H _{min} (msnm)	3+0,5
Longitud hidráulica desde el Control de la cuenca. L _g (km)	25,56
Altura media de la cuenca. H _m (msnm)	1.364,43
Pendiente media i. (m/m)	0,064

9.12.2 Estaciones de medición

Para el análisis de los parámetros hidrológicos se utilizan las estaciones tanto hidrológicas como pluviométricas más cercanas a la localización de la represa El Cercado, estas pertenecen al IDEAM y su ubicación geográfica se puede observar en la siguiente imagen

¹ Datos calculados por TYPSA dentro del estudio hidrológico de la Cuenca.

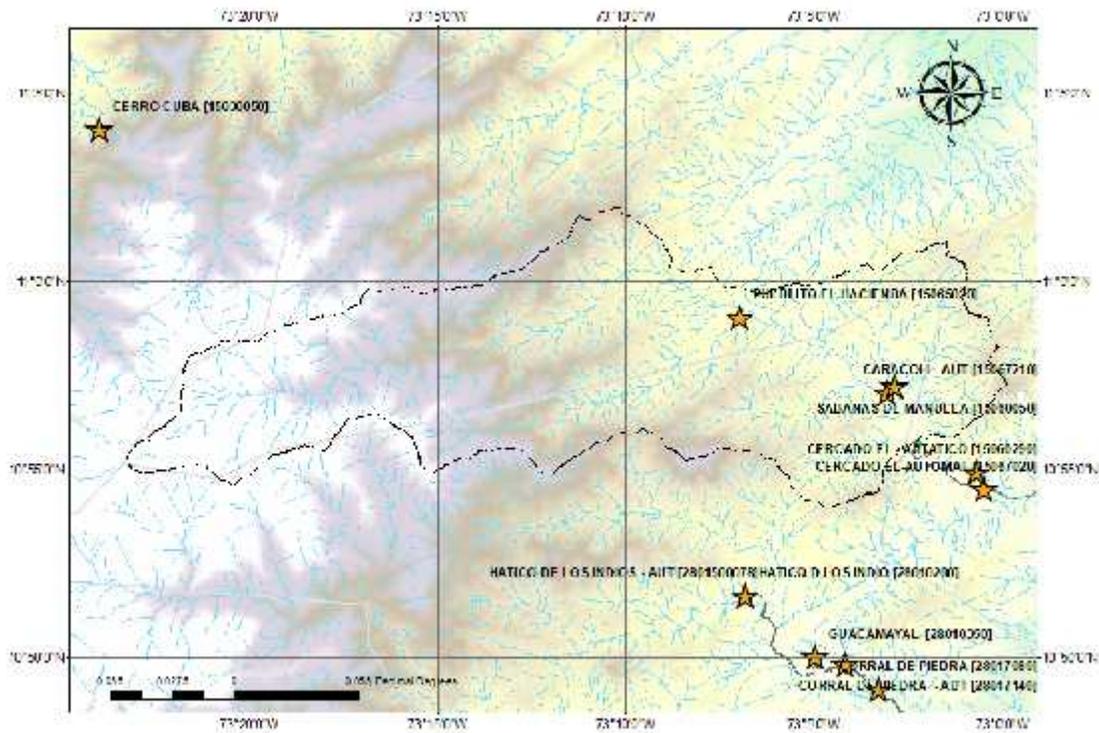


Figura 9-11: Localización estaciones

A partir de la información hidroclimática recopilada de las estaciones meteorológicas y climatológicas de la zona se procedió a hacer una caracterización sobre el comportamiento tipo de la precipitación en la zona para más adelante proceder con la aplicación de un modelo lluvia escorrentía que permitiera establecer los caudales de ingreso al embalse. La aplicación de dicho modelo se mostrará en el próximo capítulo. Las estaciones de monitoreo utilizadas en el análisis se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 9-8: Estaciones de medición

NOMBRE	TIPO	ELEVACIÓN (msnm)	PERIODO-REGISTRO
<i>Abajo Bocotoma</i>	Estacion Limnigráfica	90	1989-2000
<i>Cañaverales</i>	Estacion Pluviométrica	230	1963-2000
<i>Cuestecita</i>	Estacion Limnigráfica	110	1958-2000
<i>El Cercado</i>	Estacion Limnigráfica	400	1961-1999
<i>El Conejo</i>	Estacion Pluviométrica	350	1975-2000
<i>El Jugete</i>	Estacion Pluviométrica	350	1971-2000
<i>Fonseca</i>	Estacion Pluviométrica	180	1970-1980
<i>Hacienda Guamito</i>	Estacion Limnigráfica	100	1979-2000
<i>Hacienda La Cruz</i>	Estacion Pluviométrica	195	1971-1985
<i>Hatico de los Indios</i>	Estacion Pluviométrica	594	1970-2000
<i>La Paulina</i>	Climatológica Ordinaria	170	1970-1996
<i>Lagunitas</i>	Estacion Pluviométrica	900	1971-2000
<i>Las Lomitas</i>	Estacion Pluviométrica	300	1971-1996
<i>Sabanas de Manuela</i>	Estacion Pluviométrica	420	1963-2000
<i>San Juan del Cesar</i>	Estacion Pluviométrica	300	1971-2000

9.12.3 Caudales afluentes al embalse (at)

Se muestran algunas características de las series históricas de los afluentes al embalse at, basados en la información histórica de la estación Caracolí (15067210) y Cercado Automático (15067020) ubicadas aguas arriba y aguas abajo del embalse, respectivamente. La información de estas estaciones se utilizó como medio de calibración para la aplicación del modelo lluvia escorrentía.

Caracolí (15067210)

En la tabla a continuación se muestran las series históricas para la estación Caracolí, de caudales medios. En el rango de años de 1964 a 2006

Tabla 9-9: Serie histórica caudales medios mensuales Caracolí

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1960	4.84	4.27	3.99	5.14	8.79	10.02	6.89	11.42	10.37	11.16	9.37	17.86
1961	4.75	4.01	3.86	4.08	7.22	9.22	4.42	5.84	9.55	16.62	28.87	9.81
1962	5.97	4.37	4.41	5.65	8.01	10.8	5.96	5.48	10.92	17.51	12.92	8.76
1963	4.28	3.89	3.92	7.34	14.12	10.94	7.31	5.24	6.76	10.77	12.49	7.93
1964	4.74	5.42	2.97	4.17	6.47	8.67	6.82	6.46	5.35	7.75	7.54	6.42
1965	4.96	3.74	2.73	2	8.1	7.32	5.61	4.56	9.69	12.4	13.63	12.56
1966	10.28	8.14	3.57	11.17	11.07	51.61	21.62	7.89	8.61	16.11	32.05	42.65
1967	7.24	3.34	2.22	5.44	3.94	6.33	5.52	4.19	5.14	7.1	11.37	4.69
1968	11.22	11.41	8.75	19.72	27.06	43.33	42.65	17.71	26.71	31.47	21.74	16
1969	6.08	5.47	3.46	9.47	8.91	14.26	7.36	15.23	22.27	30.1	47.54	16.93
1970	22.7	4.4	4.93	4.22	12.99	11.07	5.96	7.4	12.61	13.84	24.46	51.12
1971	7.73	4.29	3.18	3.13	7.06	6.02	4.13	7.37	6.83	19.13	17.75	6.08
1972	4.94	3.41	4.4	19.61	23.63	19.01	7.14	5.54	8.58	10.74	5.44	3.64
1973	2.82	2.55	2.36	3.36	2.85	4.59	3.15	5.32	12.89	20.28	40.51	7.89
1974	3.76	2.76	2.19	3.49	18.51	6.36	4.09	4.74	12	14.16	22.87	8.19
1975	4.83	3.54	3.16	2.74	4.09	4.78	7.27	6.71	8.35	13.42	20.71	32.4
1976	9	5.13	4.12	4.7	4.39	6.12	3.16	3.21	3.54	9.81	12.04	4.6
1977	3.48	2.74	2.36	2.71	7.78	13.03	5.59	5.78	5.57	11.63	17.35	5.07
1978	3.31	2.86	2.72	15.25	9.4	8.87	5.4	4.5	8.01	11.81	10.93	5.04
1979	3.18	2.78	2.72	4.52	9.82	11.84	6.53	5.74	14.88	19.95	20.7	11.02
1980	6.81	5.83	3.83	4.31	6.28	5.35	4.49	6.2	5.52	7.87	11.44	5.5
1981	4.44	5.26	5.22	24.11	27.85	15.64	9.27	9.38	11.22	14.74	14.47	7.11
1982	4.79	4.01	3.35	3.68	15.46	9.33	5.99	4.96	5.8	16.8	5.62	6.6
1983	3.97	3.83	3.9	13.86	17.79	12.07	4.76	5.27	6.09	9.16	11.55	6.18
1984	4.3	3.8	2.9	3.13	2.75	3.94	4.69	4.78	11.22	11.88	14.08	8.55
1985	5.47	4.47	4.1	5.35	12.46	8.29	5.41	5.51	6.72	16.92	14.72	16.41
1986	6.43	4.77	4.36	8.2	15.23	12.37	5.33	5.32	8.11	13.47	8.28	5.11
1987	3.88	2.97	2.7	7.64	13.44	10.51	6.25	6.28	6.35	20.14	17.98	8.54
1988	4.4	2.88	2.2	4.08	5.26	7.69	4.53	8.76	15.95	24.95	18.84	9.33
1989	5.88	4.86	3.95	2.86	5.87	4.66	3.97	3.9	8.59	6.4	6.25	7.41
1990	3.45	2.92	1.78	8.99	14.1	8.78	6.44	6.67	8.64	19.46	16.91	10.53
1991	4.01	3.31	3.52	3.99	6.09	4.48	3.54	3.53	6.54	9.12	9.57	6.51
1992	3.59	2.99	2.75	3.05	9.86	6.65	4.46	4.29	7.21	5.72	5.12	3.92
1993	2.78	2.44	2.67	5.36	10.92	6.12	3.35	3.73	4.77	4.62	7.38	4.59
1994	2.71	2.3	2.06	2.79	4.42	2.72	2.08	2.04	5.14	14.65	8.89	4.09
1995	4.12	2.87	3.59	4.72	8.82	7.43	4.48	10.99	11.6	14.15	6.97	4.58
1996	3.4	2.76	2.86	3.1	6.265	7.95	3.88	6.855	9.12	9.93	10.49	10.76
1997	5.7	4.44	3.32	3.64	3.71	8.47	3.28	2.72	5.81	8.06	6.71	3.1
1998	1.39	2.42	1.35	11.11	13.12	5.99	5.7	4.3	4.63	6.31	4.57	6.71
1999	6.71	4.61	3.66	6.01	7.28	7.96	8.21	6.52	10.35	16.28	14.48	20.24
2000	6.71	7.8	5.24	4.2	6.13	3.7	3.41	2.98	4.92	10.48	5.37	4.2
2001	5.89	4.5	4.06	3.42	7.94	5.41	4.04	3.9	4.26	7.12	6.68	4.44
2002	1.86	1.11	1.32	3.89	4.43	7.15	3.16	2.76	4.31	6.49	5.22	4.05
2003	1.94	1.33	1.2	5.21	3.8	3.99	2.45	3.42	6.63	9.49	11.42	6.98
2004	3.84	2.44	1.76	5.2	9.06	6.47	4.06	5.12	7.53	10.37	16.86	7.92
2005	5.41	3.83	3.7	5.66	11.1	17.34	11.26	6.52	6.25	12.48	18.91	9.26
2006	4.86	3.65	3.53	5.31	8.89	16.41	9.87	6.54	8.19	11.13	16.74	9.06
Prom. mes	5.29	3.98	3.34	6.40	9.84	10.24	6.49	6.03	8.73	13.28	14.59	10.22
10%	2.804	2.44	1.948	2.974	4.03	4.546	3.232	3.336	4.86	6.856	5.548	4.156
25%	3.675	2.865	2.685	3.565	6.11	6.07	4.05	4.295	5.805	9.325	7.91	5.055
75%	5.93	4.485	3.935	6.675	12.725	11.005	6.675	6.605	10.36	16.45	17.865	10.17
90%	7.436	5.44	4.404	12.246	16.392	15.948	8.634	9.008	12.722	20.026	23.506	17.302
MAX	22.7	11.4	8.8	24.1	27.9	51.6	42.7	17.7	26.7	31.5	47.5	51.1
MIN	1.4	1.1	1.2	2.0	2.8	2.7	2.1	2.0	3.5	4.6	4.6	3.1

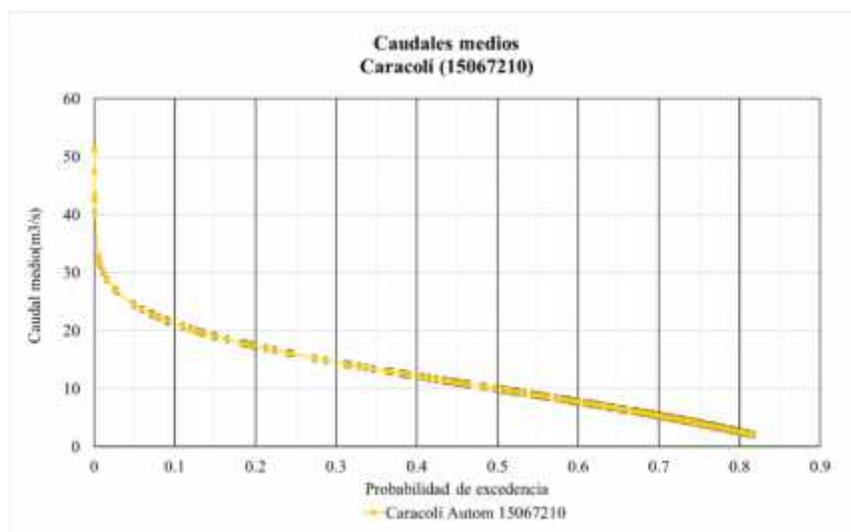


Figura 9-14: Curva de duración de caudales

El Cercado Automática (15067210)

En la tabla a continuación se muestran las series históricas para la estación El Cercado, de caudales medios. En el rango de años de 2011 a 2015

Tabla 9-10:

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	11.22	7.61	3.23	11.2	34.05	36.01	17.89	14.13	22.28	22.93	22.37	26.93
2012	7.94	8.12	16.48	7.31	8.68	5.83	6.95	7.48	7.09	19.34	22.54	16.06
2013	2.71	1.82	1.68	2.03	2.45	2.77	5.12	4.88	5.85	5.23	4.74	3.3
2014	3.27	3.17	2.6	2.89	2.47	2.39	2.42	2.83	3.62	3.07	2.48	2.18
2015	3.82	3.27	2.73	2.12	2.51	2.1	1.86	1.66	1.28	2.81	1.37	1.02
Prom. mes	5.79	4.80	5.34	5.11	10.03	9.82	6.85	6.20	8.02	10.68	10.70	9.90
10%	2.934	2.36	2.048	2.066	2.458	2.216	2.084	2.128	2.216	2.914	1.814	1.484
25%	3.27	3.17	2.6	2.12	2.47	2.39	2.42	2.83	3.62	3.07	2.48	2.18
75%	7.94	7.61	3.23	7.31	8.68	5.83	6.95	7.48	7.09	19.34	22.37	16.06
90%	9.908	7.916	11.18	9.644	23.902	23.938	13.514	11.47	16.204	21.494	22.472	22.582
MAX	11.2	8.1	16.5	11.2	34.1	36.0	17.9	14.1	22.3	22.9	22.5	26.9
MIN	2.7	1.8	1.7	2.0	2.5	2.1	1.9	1.7	1.3	2.8	1.4	1.0

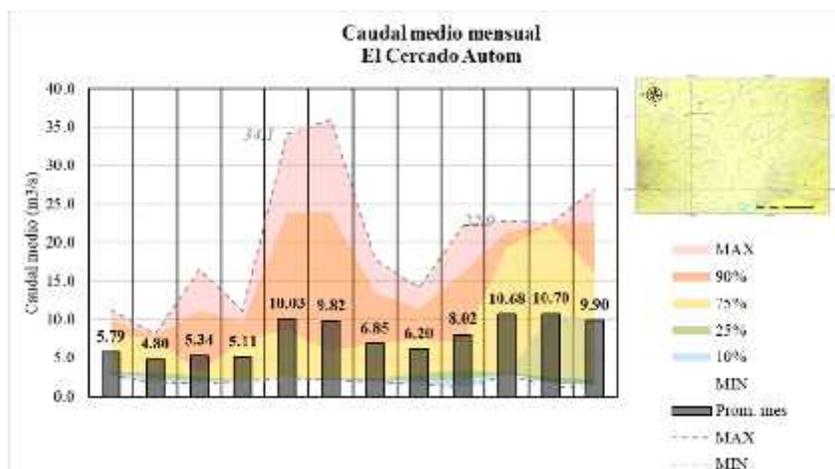


Figura 9-15: serie de caudal medio mensual multianual

Por otro lado, se puede obtener a partir de la información histórica de caudales la variación del régimen hidrológico respecto al promedio anual ht.

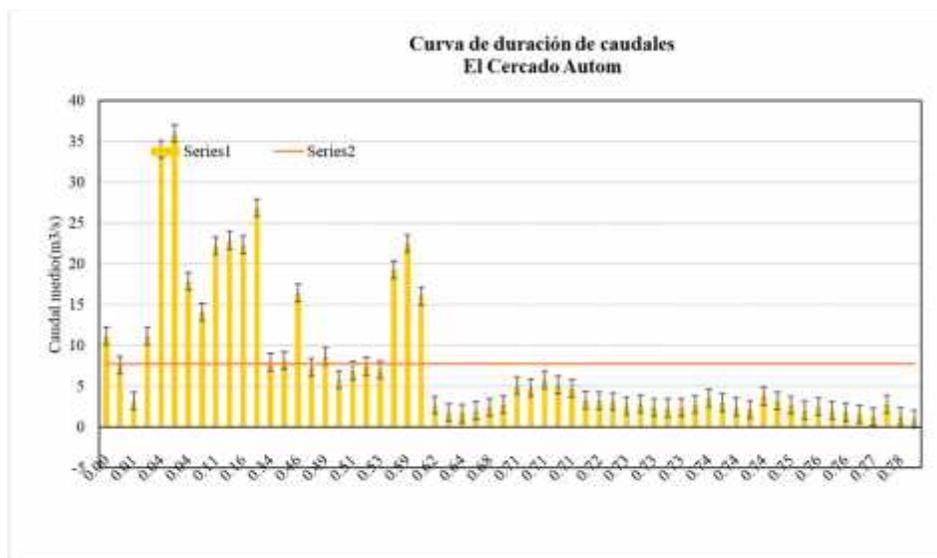


Figura 9-16: Serie histórica de caudales

Se construyó adicionalmente la curva de duración de caudales a partir de las series históricas de las dos estaciones en estudio.

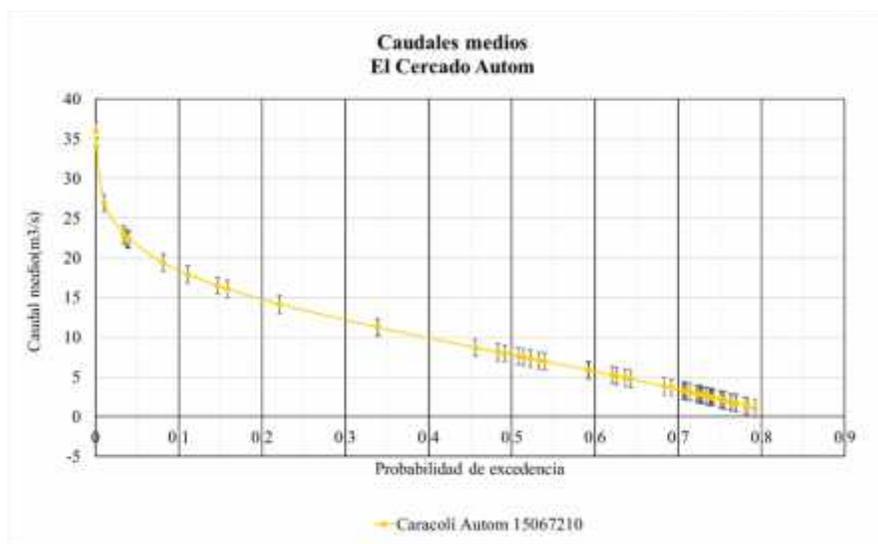


Figura 9-17: Curva de duración de caudales

Se realizó un análisis de la homogeneidad de los datos de los caudales como se muestra a continuación:

Tabla 9-11: Datos de caudales en la estación El Cercado

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	P anual	MEDIO
1971	11,86	14,26	20,74	19,76	23,85	34,10	21,23	16,55	12,14	2,84	11,58	19,25	208,16	17,35
1972	11,64	14,03	14,34	17,84	17,13	19,36	22,79	20,63	19,99	19,70	25,53	19,36	222,34	18,53
1973	14,15	14,19	19,39	19,47	29,53	17,72	22,11	16,68	1,86	4,19	18,06	19,31	196,66	16,39
1974	14,00	14,00	19,39	20,84	11,60	20,57	28,92	18,04	11,03	2,72	0,23	14,47	175,81	14,65
1975	14,10	13,95	19,38	29,55	17,06	8,12	13,36	16,25	11,55	0,97	3,80	13,61	161,70	13,48
1976	14,12	13,98	20,02	21,84	6,64	19,94	28,65	15,75	9,07	5,17	10,74	18,85	184,77	15,40
1977	14,11	14,05	19,91	26,71	27,98	28,59	28,05	21,00	16,14	6,47	0,31	16,00	219,32	18,28
1978	14,11	13,99	17,88	9,02	21,91	27,91	21,68	16,72	15,90	10,66	2,98	18,19	190,95	15,91
1979	14,11	14,01	17,77	16,69	18,00	11,04	25,55	16,01	8,92	0,01	6,70	15,23	164,04	13,67
1980	14,11	9,25	19,76	20,92	18,34	30,34	18,91	11,76	3,61	13,62	7,15	12,92	180,69	15,06
1981	11,93	13,79	19,66	20,00	8,58	14,44	25,40	11,95	6,20	0,39	3,30	14,89	150,53	12,54
1982	14,10	13,58	19,78	18,48	4,11	20,50	28,49	26,50	23,83	23,97	25,44	19,36	238,14	19,85
1983	14,15	14,25	18,98	21,76	19,71	16,81	23,14	17,93	14,16	7,33	16,84	19,20	204,26	17,02
1984	14,14	13,24	19,34	24,59	34,14	32,63	19,07	17,26	2,88	5,38	6,15	17,19	206,01	17,17
1985	14,10	13,96	19,90	19,93	11,22	27,58	23,55	25,11	10,09	12,92	24,98	15,78	219,12	18,26
1986	14,13	12,85	17,35	12,72	3,96	23,26	28,46	17,74	14,22	6,39	22,55	19,20	192,83	16,07
1987	14,14	13,96	11,87	15,26	9,87	12,43	26,59	16,06	6,51	0,00	0,68	3,34	130,71	10,89
1988	14,05	13,96	18,32	13,22	12,39	19,03	27,30	12,30	10,51	9,12	10,91	9,66	170,77	14,23
1989	14,12	14,04	20,28	24,21	21,92	33,92	30,09	13,98	9,95	6,62	0,98	4,30	194,41	16,20
1990	13,14	13,97	19,79	16,22	24,28	29,15	20,06	13,28	11,03	0,00	0,00	1,23	162,15	13,51
1991	13,60	13,95	18,97	27,10	21,56	17,83	23,72	22,37	9,02	13,14	24,40	18,95	224,61	18,72
1992	14,15	14,05	20,45	30,72	16,09	18,84	18,15	15,23	6,90	2,14	11,34	18,94	187,00	15,58

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	P anual	MEDIO
1993	14,14	14,01	20,23	20,68	16,85	7,80	26,69	5,66	7,08	5,44	14,03	19,26	171,87	14,32
1994	13,09	12,20	19,97	18,67	31,64	29,83	28,71	20,60	15,47	10,07	12,25	19,08	231,58	19,30
1995	11,91	14,00	17,45	22,36	17,37	17,38	21,07	11,48	18,49	8,40	24,66	14,78	199,35	16,61
1996	14,14	14,12	18,83	19,22	6,95	11,31	20,71	17,32	11,83	5,47	16,89	18,34	175,13	14,59
1997	14,14	13,97	19,99	26,07	14,03	18,09	29,10	20,99	9,16	15,32	11,46	19,21	211,53	17,63
1998	14,15	14,03	18,96	19,99	13,86	25,71	16,96	12,06	4,43	4,90	7,00	14,27	166,32	13,86
1999	14,14	14,00	19,39	27,09	14,12	8,96	25,36	20,36	4,01	12,39	13,19	11,39	184,40	15,37
2000	14,14	14,05	20,26	29,68	21,43	33,05	26,75	20,19	7,02	16,35	23,58	13,40	239,90	19,99
2001	14,15	14,06	14,80	19,81	18,93	24,54	24,61	16,74	12,84	3,34	0,35	13,46	177,63	14,80
MEDIO	13,74	13,73	18,81	20,98	17,26	21,32	24,04	16,92	10,51	7,59	11,55	15,24	191,70	15,97
MINIMO	11,64	9,25	11,87	9,02	3,96	7,80	13,36	5,66	1,86	0,00	0,00	1,23	130,71	10,89
MAXIMO	14,15	14,26	20,74	30,72	34,14	34,10	30,09	26,50	23,83	23,97	25,53	19,36	239,90	19,99
DESVESTACION	0,78	0,91	1,93	5,02	7,54	7,84	4,13	4,23	5,07	5,94	8,65	4,85	26,10	2,18

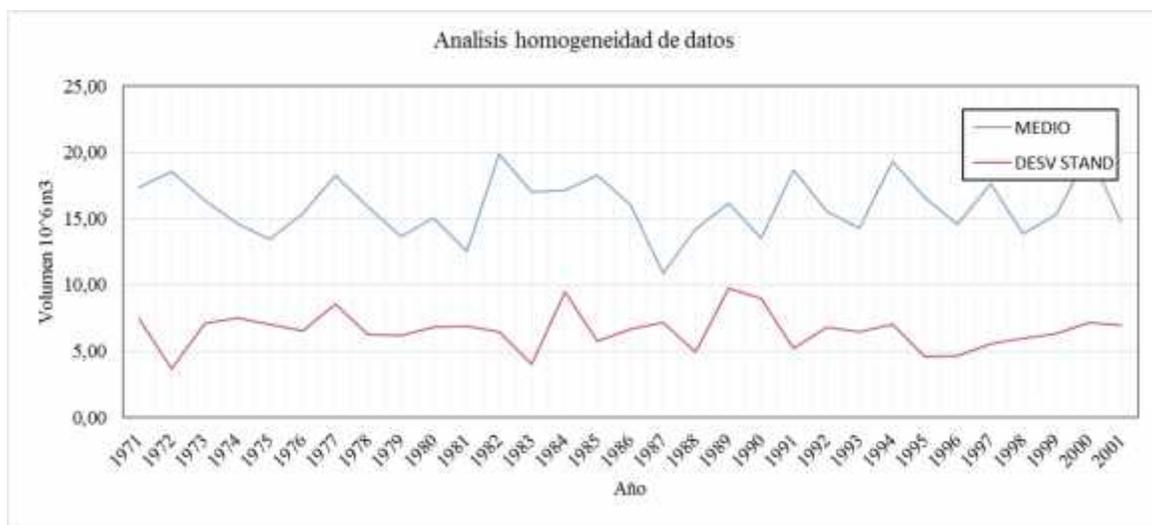


Figura 9-18: Análisis de homogeneidad de datos

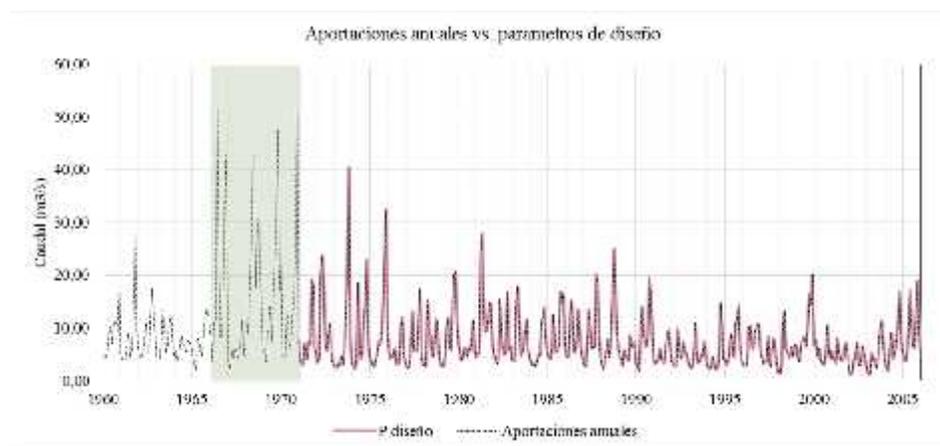


Figura 9-19 Aportaciones anuales

9.12.4 Precipitación

En cuanto a la precipitación se delimitó en primer lugar el área de influencia del embalse mediante el software Arcgis a partir de un modelo digital de elevación DEM proveniente de la misión STRM (Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución de 30m. Producto de la delimitación se establece el área (Cuenca de drenaje) que se muestra a continuación.

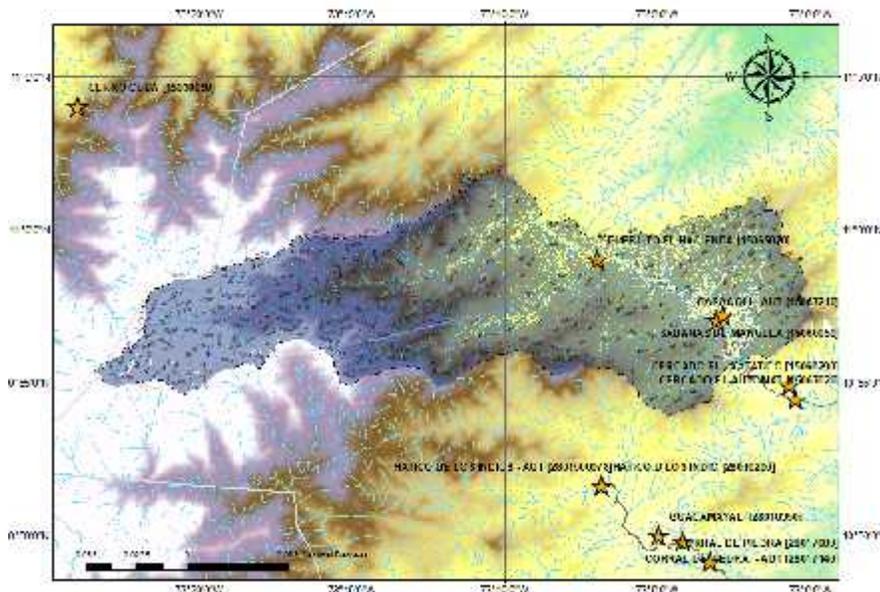


Figura 9-20: Área de influencia

Las estaciones pluviométricas más cercanas al embalse son las siguientes:

Tabla 9-12: Estaciones pluviométricas

Estaciones Pluviométricas					
CodigoEstacion	NombreEstacion	Latitud	Longitud	Altitud	Estado
15065020	Pueblito El Hacienda	10.98	-73.11	585	Suspendida
15060050	Sabanas de Manuela	10.95	-73.04	420	Activa
15060290	El Cercado Automatico	10.92	-73.01	400	Suspendida

De la cual se decide priorizar a la estación Sabanas de Manuela [15060050] ya que es la que mejor información y ubicación presenta respecto a la cuenca aguas arriba del embalse.

Del análisis de los datos históricos de precipitación se obtiene que la precipitación media de la zona es de 979.4 mm/año con un comportamiento bimodal, con máximos en los meses de Mayo y Septiembre y un mínimo importante en el mes de enero en el que el valor medio se ubica muy por debajo del promedio anual. Estos meses se caracterizan por fuertes sequía y alta demanda del recurso hídrico, especialmente para cultivo.

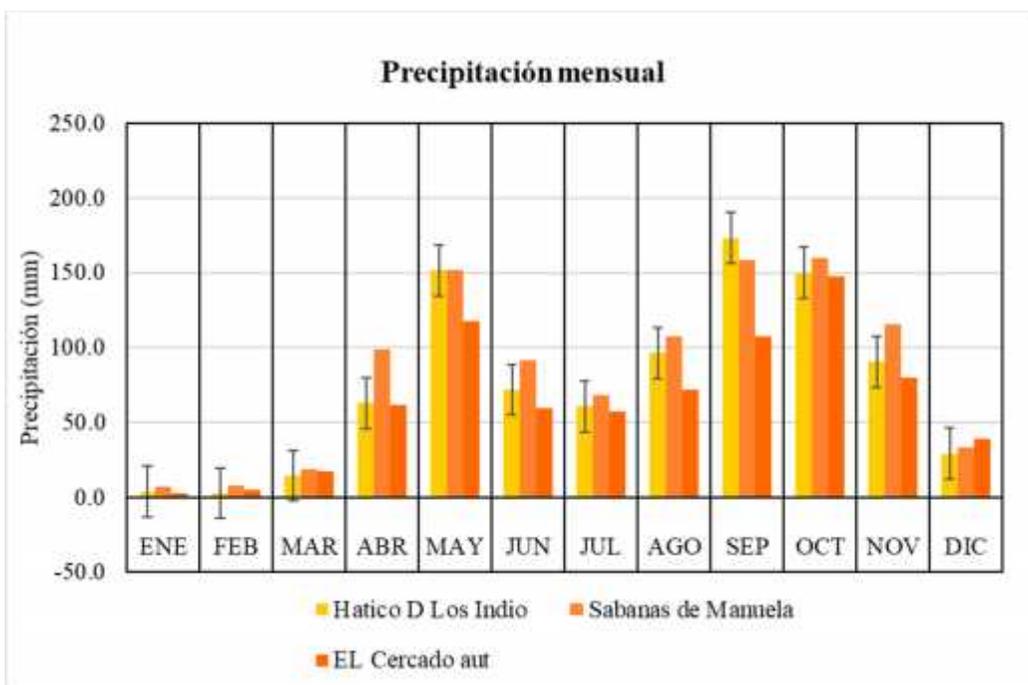


Figura 9-21: Serie de precipitaciones mensuales

En cuanto a los demás parámetros climatológicos se tiene a partir de las mismas estaciones la siguiente información:

9.12.5 Temperatura

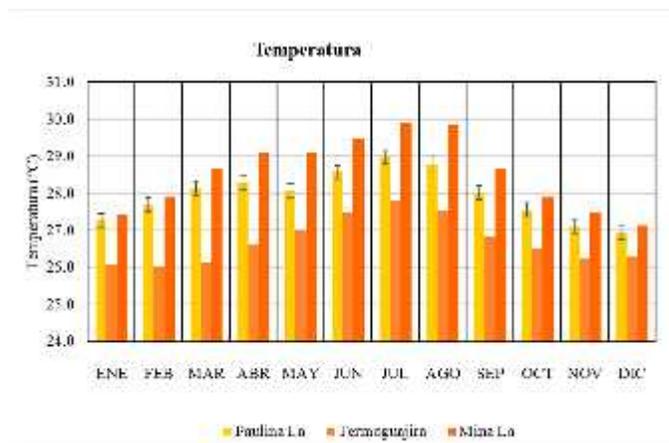


Figura 9-22: Serie anual de temperatura

9.12.6 Brillo solar

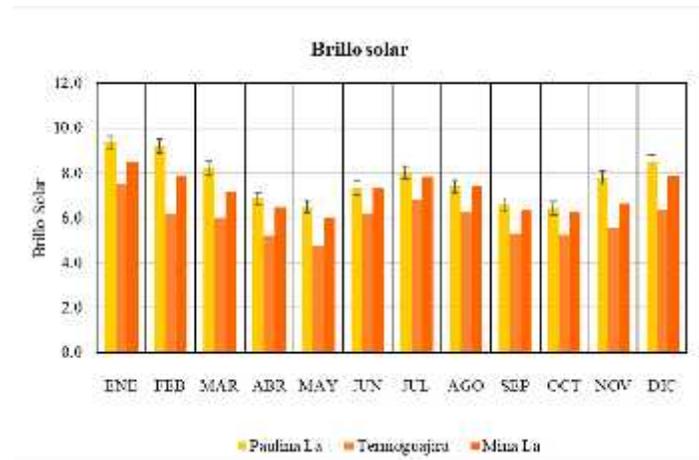


Figura 9-23: Serie anual de brillo solar

9.12.7 Humedad Relativa

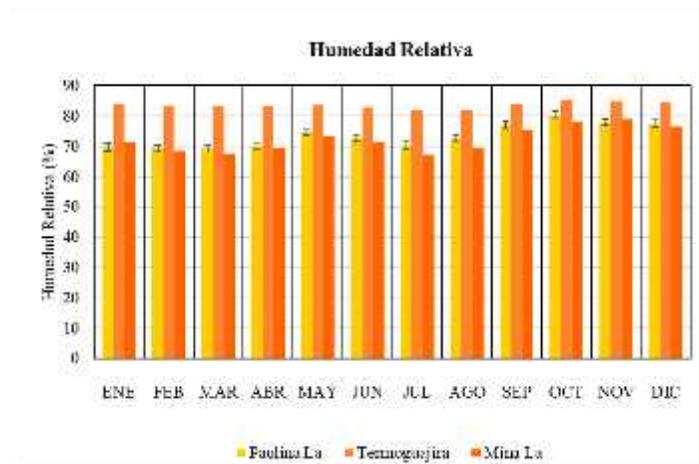


Figura 9-24: Serie anual de humedad relativa en el sitio del embalse

9.12.8 Evaporación

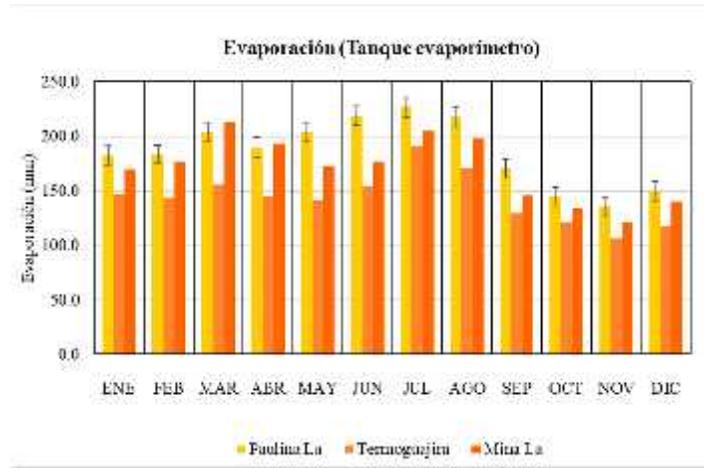


Figura 9-25., Serie anual de evaporación medida con tanque evaporímetro tipo A

9.12.9 Evapotranspiración potencial

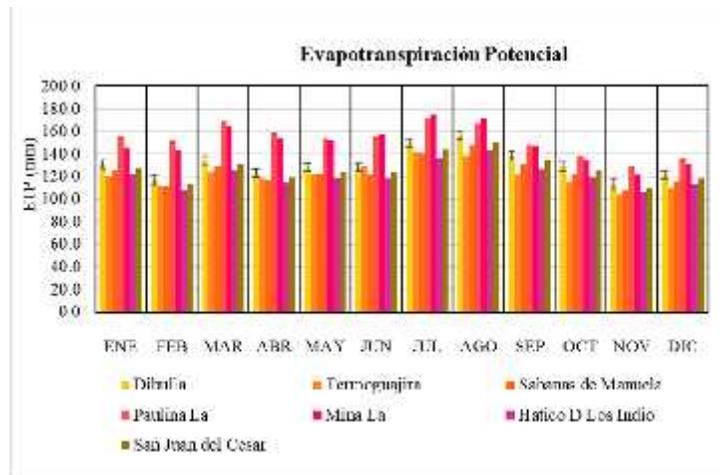


Figura 9-26: Variación mensual de la evapotranspiración potencial en las estaciones más cercanas, estimada a partir del método de Thornwaite

10 APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1 PARAMETROS DE ENTRADA

Para la modelación de las políticas de operación del embalse multipropósito del Río Ranchería, se deben tener en cuenta los parámetros tanto hidroclimáticos como las curvas características y las preferencias de modelación de la presa. De este modo y utilizando el software desarrollado Wüin se pueden establecer las políticas óptimas de manejo del almacenamiento en el embalse. A continuación se presentan los parámetros de entrada utilizados para la modelación.

10.1.1 Parámetros hidrológicos

10.1.1.1 Precipitación

En cuanto a la precipitación se utilizó información de las estaciones del IDEAM ubicadas en la zona de estudio tal y como se mostró en el capítulo anterior. En el estudio hidrológico del proyecto, se estudiaron 16 estaciones ubicadas en inmediaciones de la presa. La estación pluviométrica a la que se le dio prioridad por su información y localización es la estación Sabanas de Manuela la cual se utilizó como insumo base para la obtención de los hietogramas de diseño y la aplicación de un modelo lluvia escorrentía que permitiera hacer una estimación del comportamiento de los caudales en el ingreso del embalse.

La estación Sabanas de Manuela es de tipo convencional y se encuentra instalada en el municipio de Caracolí desde 1963. Las precipitaciones máximas anuales de 24h se presentan a continuación:

Tabla 10-1: Máxima precipitación diaria de cada año de Sabanas de Manuela. Fuente: INCODER

AÑO	Pmax 24h (mm)	AÑO	Pmax 24h (mm)
1963	80	1988	70
1964	87	1989	70
1965	85	1990	92
1966	93	1991	73.2
1967	50	1992	51
1968	92	1993	60
1969	94	1995	50
1970	98	1996	60
1971	67	1997	50
1972	140	1998	70
1973	60	1999	38
1974	106	2000	25
1975	70	2001	48
1976	69	2002	60
1977	55	2003	95
1978	114	2004	40
1979	60	2005	70
1980	92	2006	61
1981	82	2007	70
1982	93	2008	86
1983	65	2009	89
1984	92	2010	118
1985	116	2011	110
1986	85	2012	61
1987	68.8		

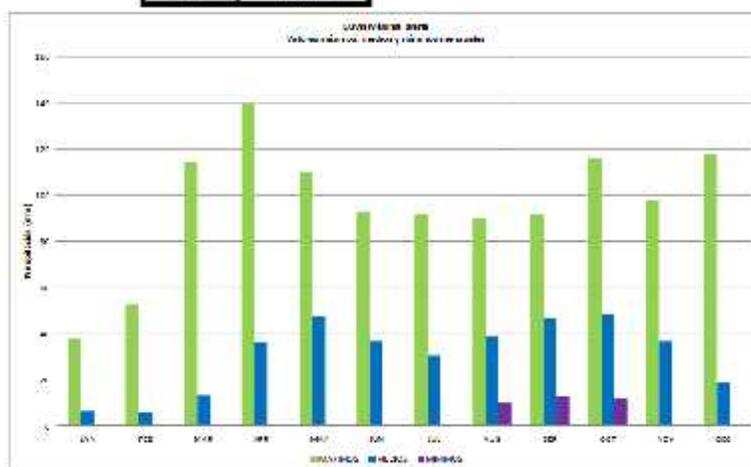


Figura 10-1 Lluvia máxima diaria. Valores máximos, medios y mínimos multianuales

En la tabla siguiente se muestra los registros de precipitaciones máximas correlacionados con el reporte de fenómenos de variabilidad climática Niño o Niña

Valor Máximo anual de P24 (mm)	Observaciones	Valor Máximo anual de P24 (mm)	Observaciones
140	NIÑA NIÑO	70	NIÑA
118	NIÑA	70	NIÑO-NIÑA
116	POST NIÑA	70	NIÑA
114	POST NIÑO	70	NIÑA
110	POST NIÑA	69	NIÑA
106	NIÑA	68.1	NIÑO
98	NIÑA	67	NIÑA
95	--	65	NIÑO-NIÑA
94	NIÑO	61	PRE NIÑO
93	--	61	POST NIÑA
93	NIÑO	60	NIÑA
92	NIÑO	60	--
92	--	60	--
92	PRE NIÑA	60	--
92	--	60	NIÑA
89	--	55	NIÑO
87	NIÑA	51	NIÑO
86	NIÑA	50	--
85	NIÑO	50	--
85	NIÑO	50	NIÑO
82	--	48	--
80	NIÑO	40	PRE NIÑO
73.2	NIÑO	38	NIÑA
70	NIÑA	25	NIÑA
70	NIÑA		

Figura 10-2: Precipitaciones relacionadas con fenómenos niño y niña

Para la modelación lluvia escorrentía se consider una unica subcuenca a modelar con el software HEC-HMS, tomando como tormenta de diseño, aquella obtenida a partir de los datos anteriores y ajustada a la distribución de Gumbel. El Hietograma de diseño se muestra a continuación

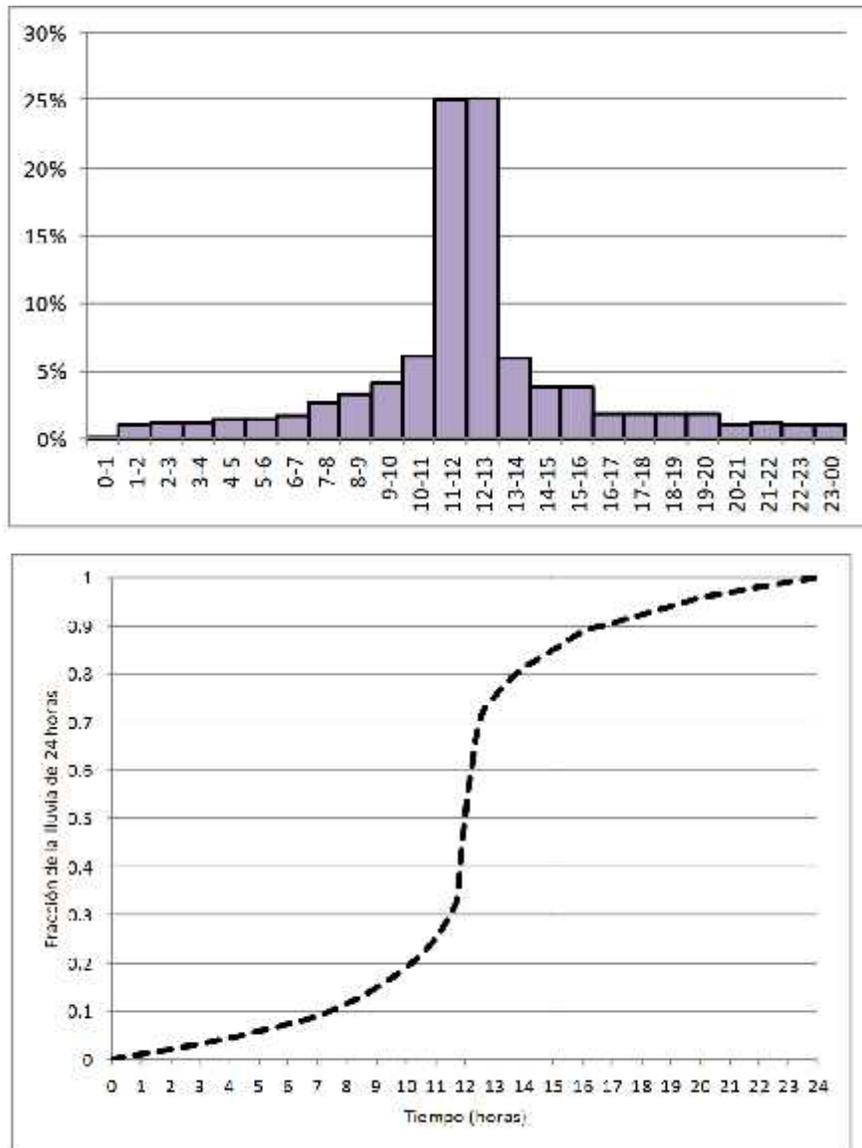


Figura 10-3: Hietograma de lluvia de 24 horas. Fuente: INCODER

10.1.1.2 Infiltración

Para establecer la tasa de infiltración de la cuenca en la que se encuentra ubicado el embalse se utilizar el método del número de curva o del *Soil Conservation Service*, tomando como datos de entrada a la metodología los hietogramas de

monzonita. E cuanto a la descripción del relieve realizada en el capítulo anterior se puede extraer que la zona se caracteriza por terrenos de altas pendientes de laderas.

De éste modo se puede caracterizar el suelo como sigue

Tabla 10-2: Clasificación del número de curva del terreno

Parámetro	Valor	Observación
Grupo hidrológico	C	
Condiciones hidrológicas	Altas	Se selecciona alta porque representa el caso más crítico en cuanto a escorrentía
Valor de la curva CN	86	CN(III)

10.1.1.3 Caudales

La estimación de caudales se realizó a partir de los datos de precipitación previamente mencionados y utilizando como modelo lluvia escorrentía una modelación en HEC HMS. A partir de los datos recopilados de las estaciones hidrológicas de monitoreo podemos obtener los parámetros de ingreso al modelo de caudales para el establecimiento del set de referencia.

En el proyecto se estableció un caudal medio de 7.73m³/s en el periodo de 1971 al 2001. De la información de caudales medios de la estación El Cercado se conforma el set de referencia de ingresos de caudales

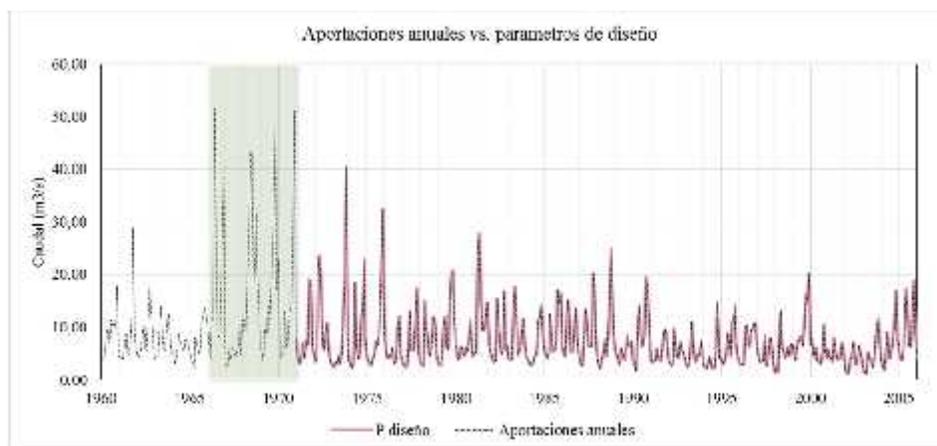


Figura 10-6: Serie de aportación de caudales utilizada en la modelación

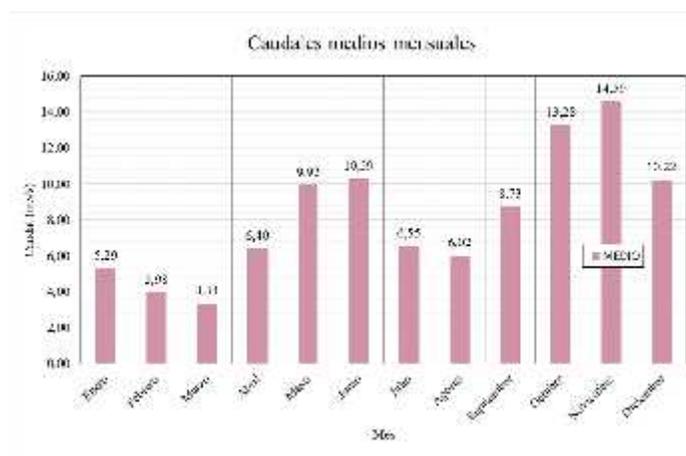


Figura 10-7: Caudales medios mensuales

Tabla 10-3: Serie de valores medios represa El Cercado

AÑO/MES	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1960	1.81	1.27	3.88	5.11	8.78	10.02	6.89	11.42	10.37	11.18	8.37	17.88
1961	4.75	4.01	2.00	4.00	7.22	9.22	4.42	5.05	9.25	10.42	28.87	9.01
1962	5.97	1.37	4.11	5.65	8.01	10.50	5.97	5.18	10.92	17.51	12.92	8.75
1963	4.20	3.09	1.92	7.34	14.12	10.94	7.31	5.24	0.76	10.77	12.49	7.93
1964	4.74	5.47	7.87	4.17	5.47	8.67	6.87	6.46	5.55	7.75	7.54	6.47
1965	1.88	3.71	2.73	2.00	8.10	7.32	5.81	4.58	8.88	12.40	13.63	12.58
1966	10.28	8.14	2.57	11.17	15.09	21.01	21.62	7.89	0.01	10.11	32.05	42.25
1967	7.74	3.34	7.77	5.44	3.94	6.33	5.57	4.79	5.14	7.10	11.37	4.50
1968	11.22	11.41	0.75	19.72	21.00	43.33	42.63	17.71	20.71	21.47	21.74	10.30
1969	5.08	5.47	3.47	9.47	8.91	14.78	7.35	15.73	22.77	30.10	47.54	16.33
1970	22.70	4.40	4.83	4.77	12.89	11.07	5.96	7.40	12.51	13.84	24.46	51.17
1971	7.73	4.29	3.80	3.13	7.06	6.02	4.13	7.37	0.03	19.13	17.75	16.00
1972	4.94	3.41	4.40	19.61	23.63	19.01	7.14	5.54	8.58	10.74	5.44	3.65
1973	2.80	2.60	2.40	3.37	2.90	4.58	3.10	5.32	12.89	20.28	40.51	7.30
1974	3.75	7.78	7.85	3.49	18.51	6.76	4.09	4.74	12.30	14.16	27.87	8.10
1975	4.83	3.54	3.96	7.74	4.09	4.78	7.77	6.71	8.55	13.47	20.71	32.43
1976	9.00	5.13	4.12	1.71	4.38	6.12	3.16	3.27	3.51	8.81	12.01	4.50
1977	3.48	7.74	7.86	7.71	7.78	13.03	5.59	5.78	5.57	11.63	17.35	5.07
1978	3.31	2.86	2.72	15.25	9.40	8.87	5.40	4.50	8.01	11.81	10.83	5.01
1979	3.79	2.70	2.72	4.52	9.82	11.34	6.53	5.74	14.30	15.85	20.70	11.32
1980	5.81	5.83	3.83	4.31	5.70	6.35	4.49	6.70	5.57	7.87	11.44	5.50
1981	1.15	5.28	5.22	21.11	27.85	15.81	8.27	9.38	11.22	11.74	14.47	7.11
1982	4.79	4.01	3.25	3.68	15.40	5.07	5.99	4.95	5.00	10.40	5.62	5.00
1983	3.87	3.83	3.80	13.88	17.79	12.07	4.77	5.27	6.09	8.18	11.55	8.19
1984	4.39	3.00	2.90	3.13	2.75	3.94	4.69	4.78	11.22	11.88	14.08	8.33
1985	5.47	4.47	4.11	5.35	12.40	0.29	5.41	5.57	0.72	10.92	14.72	16.41
1986	8.13	1.77	4.36	8.20	15.23	12.37	5.33	5.32	8.11	13.47	8.28	5.11
1987	3.88	2.57	2.70	7.64	13.44	10.51	6.25	5.28	0.25	20.14	17.98	8.34
1988	4.40	7.88	7.70	4.08	5.78	7.66	4.53	8.76	15.75	24.95	18.84	9.53
1989	5.88	4.00	3.85	2.85	5.87	4.00	3.97	3.90	0.29	6.40	6.25	7.41
1990	3.45	2.92	1.78	8.99	14.10	0.78	6.44	5.57	0.04	19.48	16.91	10.50
1991	4.07	3.31	3.87	3.99	5.05	4.48	3.54	3.53	6.54	5.13	9.57	6.51
1992	3.58	2.95	2.75	3.05	8.80	0.05	4.47	4.29	7.21	5.72	5.72	3.92
1993	7.78	7.44	7.67	5.35	10.87	6.17	3.35	3.73	4.77	4.67	7.38	4.50
1994	2.77	2.30	2.06	2.78	7.12	2.72	2.08	2.01	5.11	11.65	8.88	11.09
1995	4.73	2.07	3.15	4.72	9.82	7.42	4.48	11.00	11.90	14.15	5.97	4.30
1996	3.41	7.78	7.86	3.10	10.03	10.50	6.59	6.05	0.17	5.93	10.49	10.75
1997	5.71	1.11	3.92	3.81	3.71	8.17	3.28	2.72	5.81	8.07	8.71	3.10
1998	1.30	2.47	1.35	11.11	13.12	5.05	5.70	4.30	4.63	6.31	4.57	6.71
1999	5.80	3.10	2.00	1.70	8.10	6.90	7.20	5.20	8.50	15.50	13.80	18.50
2000	5.708	7.0	10.207	4.180	5.10	2.702	2.407	2.977	4.910	10.40	5.72	4.2
2001	5.893	4.475	4.064	3.473	7.935	5.406	4.035	3.896	4.751	7.12	6.681	4.635
2002	1.855	1.111	1.317	3.887	4.131	7.117	3.157	2.758	7.306	6.182	5.218	4.079
2003	1.938	1.020	1.205	5.289	3.797	2.993	2.453	3.418	0.031	9.457	11.42	6.979
2004	3.81	2.139	1.757	5.189	8.055	8.773	4.063	5.121	7.532	10.37	16.88	7.927
2005	5.405	3.031	3.080	5.65	11.1	17.34	11.26	6.516	0.240	12.40	18.91	9.259
2006	4.864	3.632	3.220	5.312	8.880	10.41	9.886	6.945	0.184	11.12	16.74	9.000

10.1.2 Parámetros del embalse

Teniendo en cuenta las características físicas y de ña infraestructura del embalse, se toma su curva característica como parámetro de entrada al modelo. La curva característica del embalse se presenta a continuación

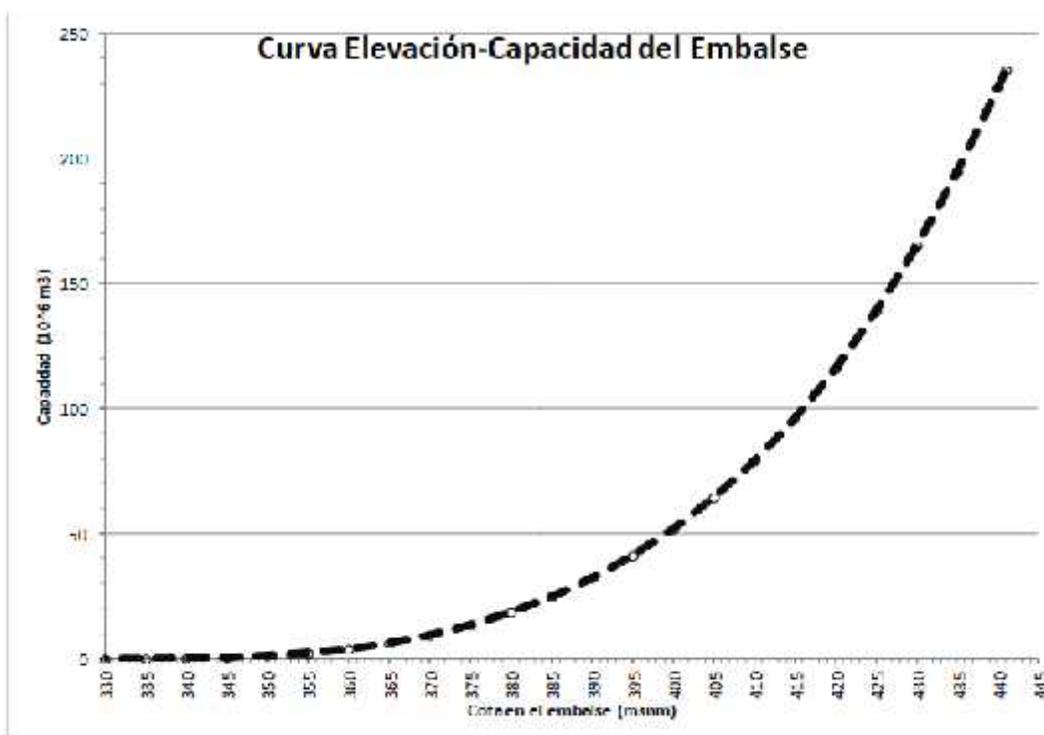


Figura 10-8: Curva Elevación-Volumen. Fuente: INCODER

10.1.3 Demandas

En cuanto a las demandas de la presa, estas se toman con base en lo establecido en la resolución 4360 del 5 de diciembre de 2005 y lo planteado en el estudio de amortiguación y regulación del embalse así:

Tabla 10-4: Demandas futuras embalse El Cercado Fuente: TYPESA

• Caudal Ecológico	1,06 m ³ /s
• Caudal Concesionado distrito Ranchería	4,57 m ³ /s
• Caudal Concesionado distrito San Juan del Cesar	1,16 m ³ /s
• Caudal Concesionado Acueductos	0,455 m ³ /s
• Caudal Concesionado uso agroindustrial	0,051 m ³ /s
• Caudal Concesionado para ganadería	0,033 m ³ /s
• Total Caudal concesionado fase de operación	7,329 m³/s
• Tiempo de concesión: Cincuenta (50) años	

En el estudio hidrológico se plantean los valores concesionados y de requerimientos de riego de los distritos, y que son utilizados en la conformación del set de referencia para la modelación:

Tabla 10-5: Volúmenes de agua para futuros riegos. Fuente: INCODER

FUTUROS DISTRITOS DE RIEGO RIO RANCHERÍA Y SAN JUAN DEL CESAR REQUERIMIENTOS DE AGUA MENSUALES Y ANUALES DE CULTIVOS PARA EL PERÍODO DE REGISTRO DE PRECIPITACIÓN 1971 - 2001 (m ³ * 10 ⁶)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1971	11.86	14.26	20.74	19.76	23.85	34.10	21.23	16.55	12.14	2.84	11.58	10.25	238.14
1972	11.64	14.03	14.34	17.84	17.13	19.76	22.79	20.63	19.99	19.70	25.53	18.36	272.35
1973	14.15	14.19	19.39	19.47	29.53	17.72	22.11	16.68	1.86	4.19	18.06	19.31	196.65
1974	14.00	14.00	19.39	20.84	11.62	20.57	28.92	18.04	11.03	2.72	0.23	14.47	175.82
1975	14.10	13.95	19.38	29.55	17.05	8.12	13.36	16.25	11.55	0.97	3.80	13.61	161.71
1976	14.12	13.96	20.02	21.84	6.64	19.94	28.65	16.75	9.07	5.17	10.74	16.66	184.79
1977	14.11	14.05	19.91	26.70	27.99	28.59	28.05	21.00	15.14	6.47	0.31	16.00	219.32
1978	14.11	13.99	17.86	9.02	21.91	27.97	21.68	16.72	15.90	10.65	2.98	16.19	191.01
1979	14.11	14.01	17.77	16.69	16.00	11.04	25.55	16.01	8.92	0.01	6.71	15.23	164.06
1980	14.11	9.25	19.76	20.92	18.34	30.34	18.91	11.76	3.61	13.62	7.15	12.92	180.67
1981	11.93	13.79	19.65	20.00	8.56	14.44	25.40	11.95	6.20	0.39	3.30	14.89	150.52
1982	14.10	13.56	19.79	18.48	4.11	20.50	28.49	26.50	23.83	23.97	25.44	19.36	238.16
1983	14.15	14.25	18.96	21.76	19.71	16.81	23.14	17.93	14.16	7.33	16.84	19.20	294.27
1984	14.14	13.24	19.34	24.59	34.14	32.03	19.07	17.96	2.80	5.30	6.15	17.19	390.02
1985	14.10	13.96	19.90	19.93	11.22	27.58	23.55	25.11	10.09	12.92	24.98	15.78	219.13
1986	14.13	12.85	17.35	12.72	3.96	23.25	28.46	17.74	14.22	6.39	22.55	19.20	192.82
1987	14.14	13.96	11.87	15.26	9.87	12.43	26.59	16.08	6.51	0.00	0.68	3.34	180.73
1988	14.05	13.96	18.32	13.72	12.39	19.08	27.30	12.90	10.54	9.12	10.94	9.66	170.62
1989	14.12	14.04	20.26	24.21	21.92	33.92	30.09	13.98	9.95	6.62	0.98	4.30	194.41
1990	13.14	13.97	19.79	16.22	24.29	29.15	20.06	13.28	11.03	0.00	0.00	1.23	162.13
1991	13.60	13.95	18.97	27.10	21.95	17.03	23.72	22.37	9.02	13.14	24.40	10.95	224.60
1992	14.15	14.05	20.45	30.72	10.09	10.04	16.15	15.23	6.90	2.14	11.34	10.94	137.01
1993	14.14	14.01	20.23	20.69	15.85	7.80	26.69	5.66	7.09	5.44	14.03	19.26	171.87
1994	13.09	12.20	19.97	18.67	31.64	29.88	28.71	20.60	15.47	10.07	12.25	19.08	231.63
1995	11.91	14.00	17.45	22.36	17.37	17.36	21.07	11.48	18.49	8.40	24.68	14.78	193.36
1996	14.14	14.12	18.83	19.22	6.95	11.31	20.71	17.32	11.83	5.47	16.89	18.34	175.12
1997	14.14	13.97	19.99	26.07	14.03	18.09	29.10	20.99	9.16	15.32	11.46	19.21	211.53
1998	14.15	14.03	18.96	18.99	13.85	25.71	16.96	12.08	4.43	4.90	7.00	14.27	166.34
1999	14.14	14.00	19.39	27.09	14.12	0.95	25.35	20.36	4.01	12.39	13.19	11.39	194.39
2000	14.14	14.05	20.26	29.69	21.43	33.05	26.25	20.19	7.02	16.35	23.58	13.40	239.90
2001	14.15	14.06	14.80	19.81	18.93	24.54	24.61	16.74	12.84	3.34	0.35	13.46	177.63
PROMEDIO	13.74	13.73	18.81	20.98	17.25	21.32	24.04	16.92	10.51	7.60	11.55	15.24	191.71

Por lo tanto teniendo como referencia la información previamente planteada se establecen para un año tipo las demandas futuras del embalse que tienen como valor medio un caudal de 7.329m³/s

Tabla 10-6: Demandas futuras presa El Cercado. Fuente: TYPESA

MES	Demanda en la presa		Demandas aguas abajo de la presa El Cercado				TOTAL
	Riego Dist. San Juan (m ³ /s)	Riego Dist. Rancheria (m ³ /s)	Acueductos (m ³ /s)	Agroindustrial (m ³ /s)	Ganadería (m ³ /s)	Caudal ecológico (m ³ /s)	
ENE	1.26	3.58	0.455	0.051	0.033	1.060	6.439
FEB	1.43	3.92	0.455	0.051	0.033	1.060	6.949
MAR	1.95	4.67	0.455	0.051	0.033	1.060	8.219
ABR	1.81	5.52	0.455	0.051	0.033	1.060	9.229
MAY	1.13	4.94	0.455	0.051	0.033	1.060	7.669
JUN	1.07	6.68	0.455	0.051	0.033	1.060	9.349
JUL	1.17	7.28	0.455	0.051	0.033	1.060	10.049
AGO	0.78	5.17	0.455	0.051	0.033	1.060	7.549
SEP	0.52	3.3	0.455	0.051	0.033	1.060	5.419
OCT	0.45	2.22	0.455	0.051	0.033	1.060	4.269
NOV	0.88	3.32	0.455	0.051	0.033	1.060	5.799
DIC	1.48	3.91	0.455	0.051	0.033	1.060	6.969

10.2 ESCENARIOS DE CÁLCULO

Se plantearon para el procedimiento de modelación 9 diferentes escenarios que se analizarán de manera conjunta para caracterizar el comportamiento de la regulación del embalse.

Tabla 10-7: Escenarios de modelación

	Año seco	Año promedio	Año húmedo
Sin priorizar ningún requerimiento	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 3
Priorizando requerimientos de suministro	Escenario 5	Escenario 4	Escenario 6
Priorizando requerimientos de producción de energía	Escenario 8	Escenario 7	Escenario 9

El primer escenario de modelación corresponde a una situación media en la que se contemplan parámetros hidrológicos promedio tales como precipitación media, caudales de ingreso medio, etc.

El segundo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño.

El tercer escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña.

El cuarto escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica promedio en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta todos los años del registro pero en este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

El quinto escenario modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

El sexto escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

El séptimo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica promedio en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta todos los años del registro pero en este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste..

El octavo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en

cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

El noveno escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

10.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Partiendo de las curvas del embalse, obtenidas a partir de la información sobre la infraestructura de ésta así como los requerimientos del sistema se puede plantear un problema paretiano en el que, como se evidencia en la gráfica, se puede generar un sistema de gestión en el embalse considerado un valor mínimo de salida equivalente a las pérdidas $I(t)$, en la gráfica Inf_Qfiltr , inevitables producto de la infiltración y la evapotranspiración y un máximo $L(t)$ limitado por las estructuras hidráulicas propias del embalse.

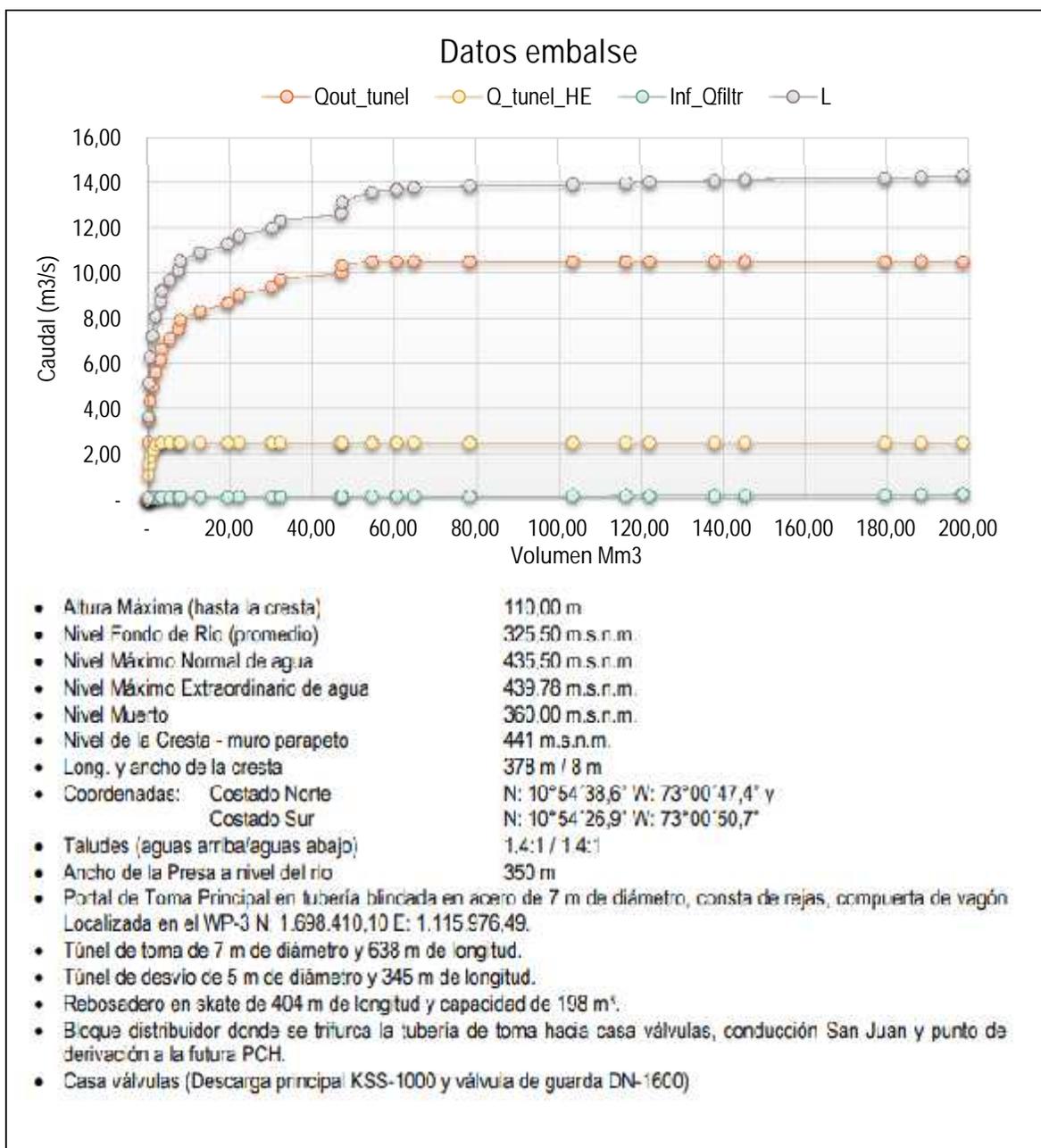


Figura 10-9: Datos de entrada del embalse

Teniendo en cuenta los 9 escenarios de modelación establecidos previamente, se procedió a realizar la modelación de los datos de cada uno de dichos escenarios tomando en cuenta una reducción del caudal del 68.48% para

representar los años secos y un aumento del caudal del 270% para representar los años húmedos, esto según la variabilidad de los datos de caudales históricos.

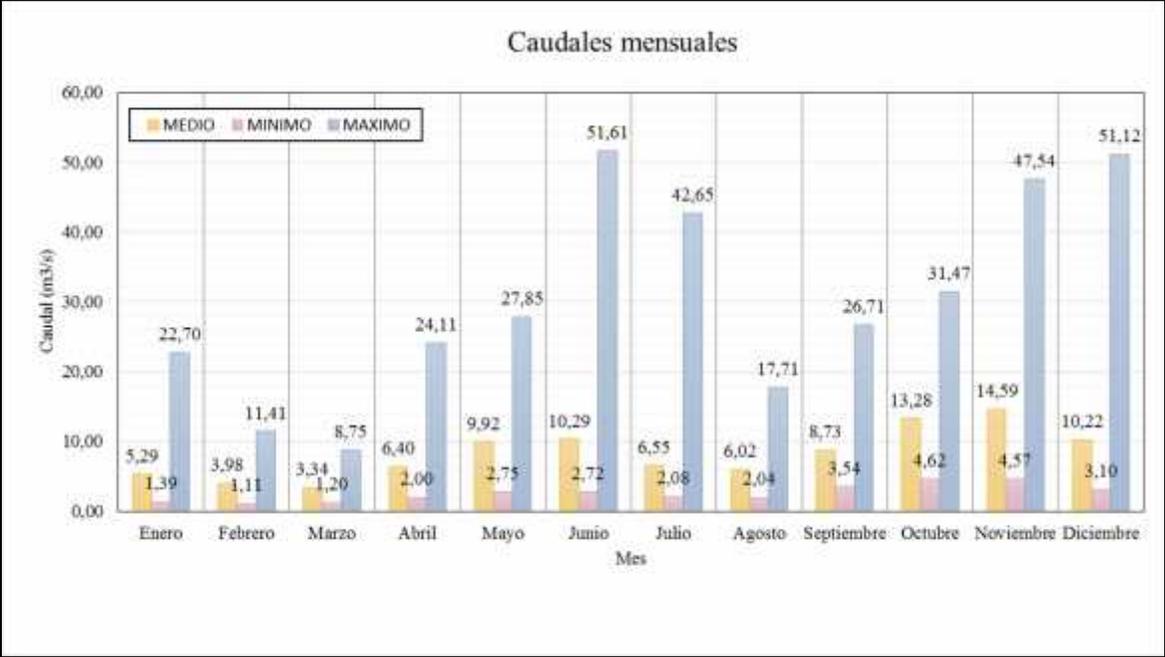


Figura 10-10: Caudales medios, maximos y minimos mensuales

En la modelación todos los escenarios presentaron un comportamiento similar en cuanto a los meses críticos y de descenso. Teniendo comportamientos similares en años secos, años medio y años niña. En los años secos se presenta la condición más critica dado que las condiciones de sequía son extremas por lo que el cumplimiento de los requerimientos tiene dificultades en general, y en los años secos no hay un escenario en el que se pueda dar satisfacción del 100% a alguno de los requerimientos aun sacrificando por completo el contrario, lo que significará situaciones de estrés hídrico en la región.

Se presenta en la gráfica a continuación los porcentajes de garantía de cumplimiento de los requerimientos óptimos según la aplicación del algoritmo Minimax:

Tabla 10-8: Valores de los parámetros r y s obtenidos en la modelación de los 9 escenarios

Escenario	Porcentaje de satisfacción óptimo	
	Energía - r	Suministro - s
1	60,5%	70,4%
2	58,0%	20,1%
3	80,0%	84,2%
4	15,0%	90,5%
5	15,0%	32,6%
6	47,5%	100,0%
7	100,0%	46,5%
8	80,0%	5,0%
9	100,0%	67,0%

De los resultados anteriores se puede evidenciar como al incluir en la modelación el parámetro de energía se genera un déficit en el suministro. De los escenarios modelados, ninguno garantiza una satisfacción total de ambos requerimientos por lo que se debe elegir en la gestión del embalse la priorización de alguno de ellos.

En las reglas de gestión actuales del embalse no se incluye el requerimiento energético puesto que la hidroeléctrica no ha sido puesta en marcha por lo que las garantías de satisfacción que actualmente presenta son más altas. Como se muestra en la siguiente tabla proveniente de los estudios de diseño del embalse:

Tabla 10-9: Escenarios de modelación originales del diseño del embalse.

Serie Analizada	Escenario 1 (Referencia)	Escenario 2
1961-2006	92.32%	92.08%
1986-2006	83.17%	82.64%
1971-2001	93.21%	92.86%

- Escenario 1. Nivel de Referencia: Se considera como nivel que debe alcanzar el embalse la 435,5 msnm. Nivel Máximo Normal.
- Escenario 2. Crecientes: se pretende mantener el embalse a la cota 430,61 msnm durante los meses de Abril - Mayo - Junio y Septiembre-Octubre-Noviembre y Diciembre. Los meses restantes el embalse puede recuperar el Nivel Máximo Normal si dispone de caudal disponible para hacerlo una vez procedido a satisfacer la demanda.

Al incluir la variable energía que crea un requerimiento opuesto al suministro, se presenta un conflicto entre los objetivos del embalse por lo que se debe recurrir a un mecanismo de optimización como el planteado en el presente trabajo.

También se puede evidenciar el efecto que tienen las variables de objetivos opuestos dentro de los porcentajes de satisfacción mediante la construcción de sus frentes de Pareto.

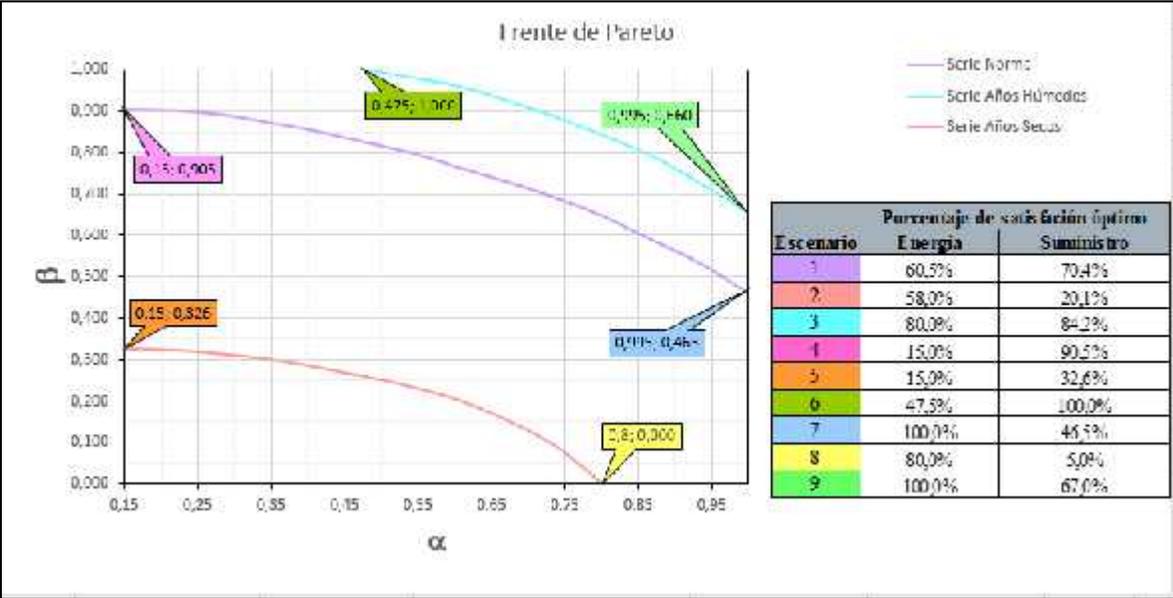


Figura 10-11: Frente de Pareto

De la gráfica anterior se puede ver como en solo 3 escenarios podemos lograr una satisfacción del 100% de alguno de los requerimientos mientras que en la mayoría de los escenarios la satisfacción de los requerimientos aun cuando no se cumple al 100% es superior del 50%. El escenario más general presenta una satisfacción del 60.5% en energía y del 70.4% en suministro. Si tomamos en cuenta que el algoritmo Minimax presenta una minimización del déficit para el peor escenario se puede concluir que se garantiza en condiciones medias de caudales que al menos se van a suministrar estos porcentajes en la satisfacción de los requerimientos, por lo que la mayoría del tiempo la satisfacción estará por encima de estos niveles.

Analizando de manera individual cada uno de los 9 escenarios de modelación planteados podemos establecer políticas de gestión del embalse tomando en cuenta diferentes parámetros como se muestra a continuación

10.3.1 Primer escenario

El primer escenario de modelación corresponde a una situación media en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos promedio tales como precipitación media, caudales de ingreso medio, etc.

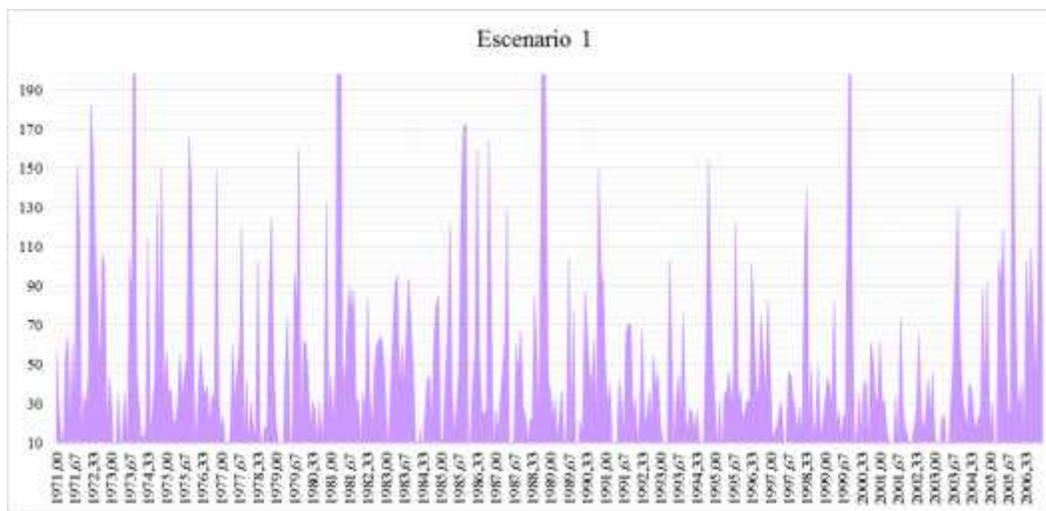


Figura 10-12: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 1

En el escenario de modelación 1 se tiene un comportamiento medio, el embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 4 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 14 ocasiones. Este escenario presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 60.5% para las demandas de energía y de 70.4% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego. Cualquier aumento del grado de satisfacción de una de las variables causará un empeoramiento de las condiciones de la otra. El algoritmo Minimax, tal como se describió minimiza el déficit conjunto de los objetivos opuestos para el peor escenario posible por lo que en una serie de condiciones

hidrológicas normales como la serie histórica utilizada y sin darle prelación a ninguno de los requerimientos se puede garantizar que no habrá un fallo mayor a los porcentajes calculados.

10.3.2 Segundo escenario

El segundo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño.

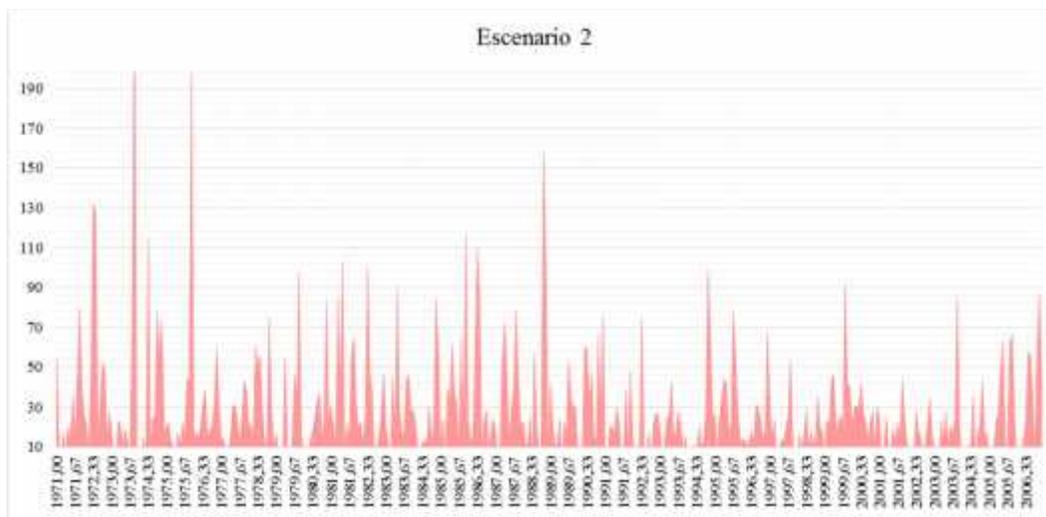


Figura 10-13: Volúmenes embalsados (Gráfica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 2

En el escenario de modelación 2 se tiene un comportamiento hidrológico de mínimos (Años Niño), el embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 2 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 34 ocasiones., pero más del 80% de su vida útil se mantendría en un nivel por debajo del 50% de su capacidad. Este escenario presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 58% para las demandas de energía y de 20.1% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego. Cualquier aumento del grado de satisfacción de una de las variables causará un empeoramiento de las condiciones de la otra. En una serie de condiciones

hidrológicas mínimas como la serie histórica utilizada y sin darle prelación a ninguno de los requerimientos se puede garantizar que no habrá un fallo mayor a los porcentajes calculados.

10.3.3 Tercer escenario

El tercer escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña.

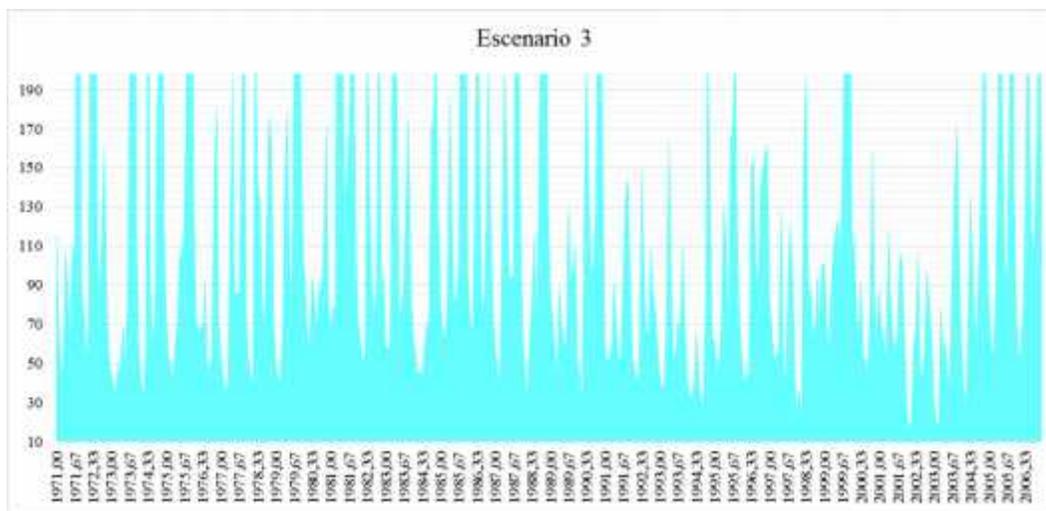


Figura 10-14: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 3

En el escenario de modelación 3 se tiene un comportamiento hidrológico de máximos (Años Niña), el embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 32 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, no se alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento, pero más del 70% de su vida útil se mantendría en un nivel por encima del 70% de su capacidad. Este escenario presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 80% para las demandas de energía y de 84.2% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego. Cualquier aumento del grado de satisfacción de una de las variables causará un empeoramiento de las condiciones de la otra. En una serie de condiciones hidrológicas máximas como la

serie histórica utilizada y sin darle prelación a ninguno de los requerimientos se puede garantizar que no habrá un fallo mayor a los porcentajes calculados.

10.3.4 Cuarto escenario

El cuarto escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica promedio en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta todos los años del registro pero en este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

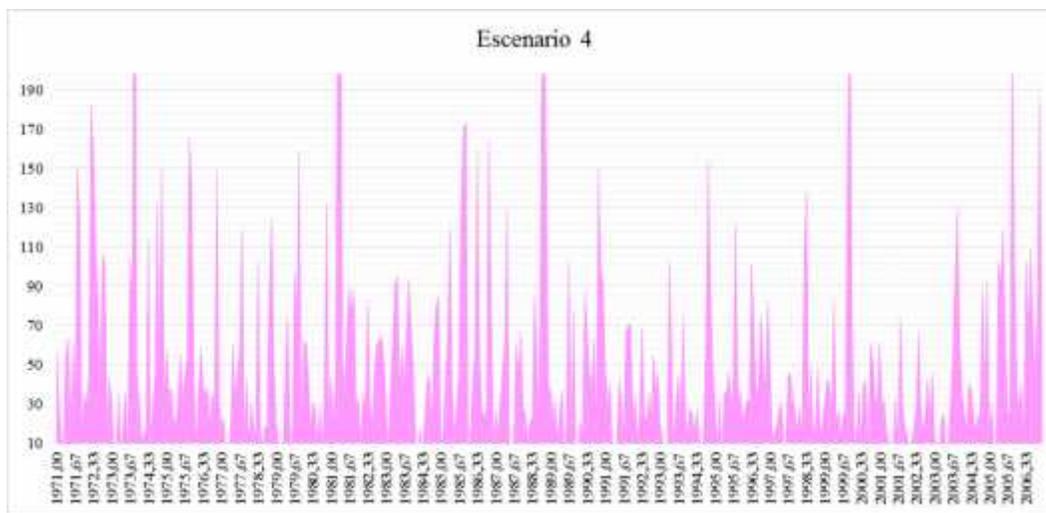


Figura 10-15: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 4

En el escenario de modelación 4 se tiene un comportamiento medio similar al presentado en el escenario de modelación 1. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 4 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 14 ocasiones. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de suministro, por lo que maximizando β aun a costa de perjudicar a α presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 15.0% para las demandas de energía y de 90.5% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

10.3.5 Quinto escenario

El quinto escenario modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

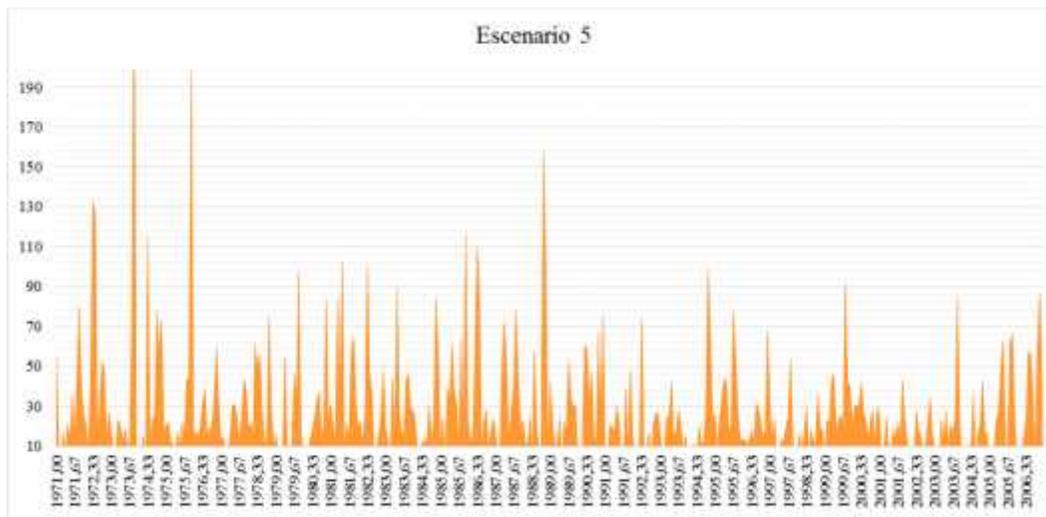


Figura 10-16: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 5

En el escenario de modelación 5 se tiene un comportamiento hidrológico de mínimos (Años Niño), y similar al comportamiento del escenario 2. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 2 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 34 ocasiones., pero más del 80% de su vida útil se mantendría en un nivel por debajo del 50% de su capacidad. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de suministro, por lo que maximizando aun a costa de perjudicar a presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 15.0% para las demandas de energía y de 32.6% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

10.3.6 Sexto escenario

El sexto escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de suministro buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

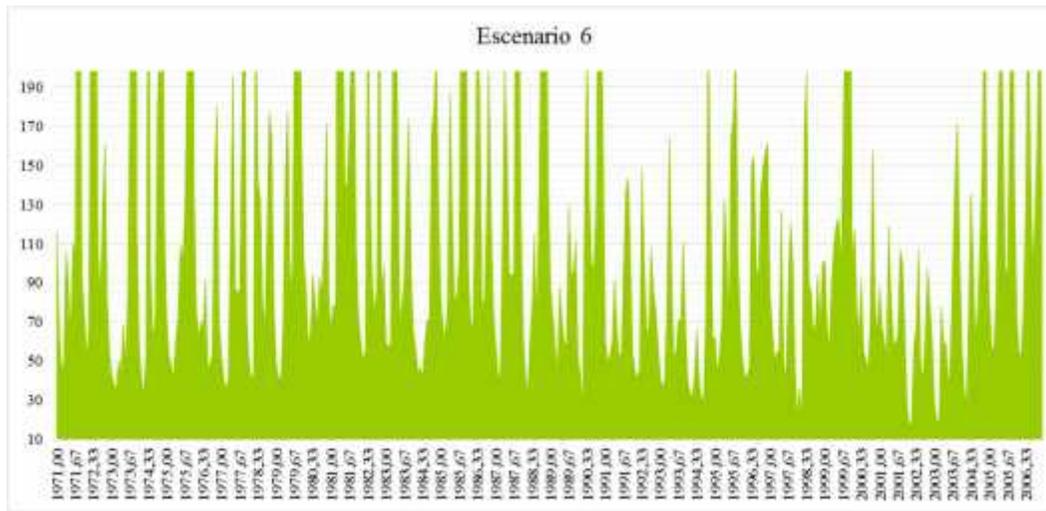


Figura 10-17: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 6

En el escenario de modelación 6 se tiene un comportamiento hidrológico de máximos (Años Niña), similar al presentado en el escenario 3. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 32 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, no se alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento, pero más del 70% de su vida útil se mantendría en un nivel por encima del 70% de su capacidad. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de suministro, por lo que maximizando aun a costa de perjudicar a presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 47.5% para las demandas de energía y de 100% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

10.3.7 Séptimo escenario

El séptimo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica promedio en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta todos los años del registro pero en este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

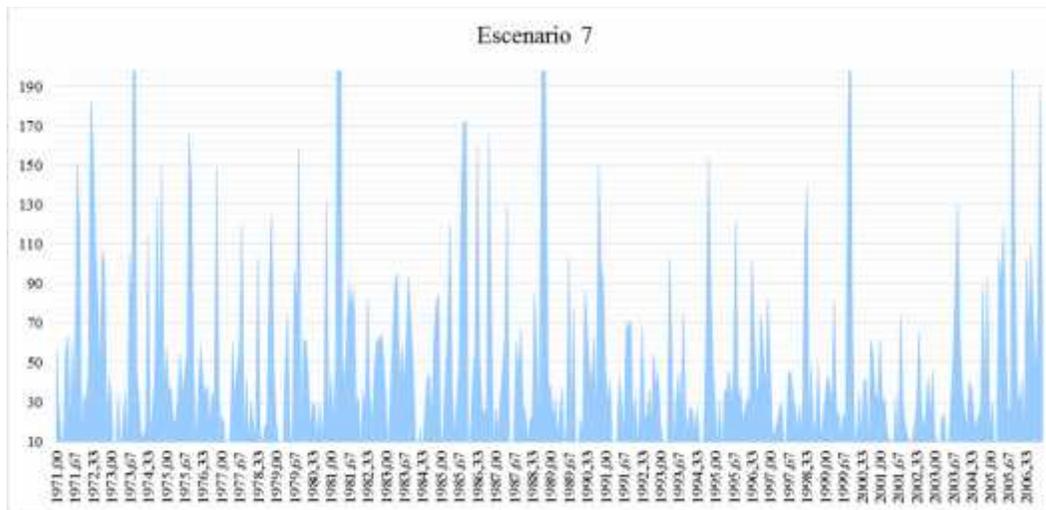


Figura 10-18: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 7

En el escenario de modelación 7 se tiene un comportamiento medio similar al presentado en el escenario de modelación 1. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 4 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 14 ocasiones. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de energía, por lo que maximizando aun a costa de perjudicar a presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 100% para las demandas de energía y de 46.5% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

10.3.8 Octavo escenario

El octavo escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica seca en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno del niño. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

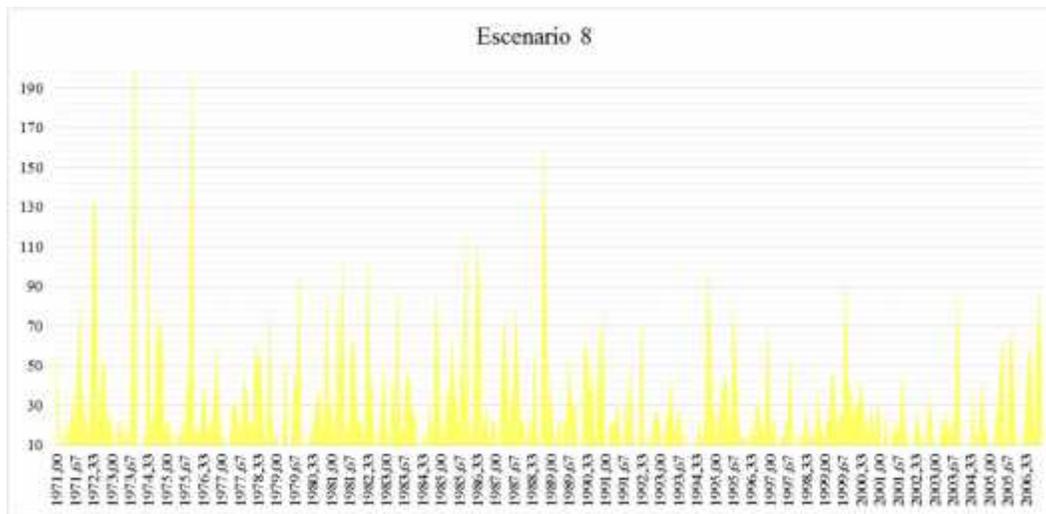


Figura 10-19: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 8

En el escenario de modelación 8 se tiene un comportamiento hidrológico de mínimos (Años Niño), y similar al comportamiento del escenario 2. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 2 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento en 34 ocasiones., pero más del 80% de su vida útil se mantendría en un nivel por debajo del 50% de su capacidad. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de producción energética, por lo que maximizando aún a costa de perjudicar a presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 80% para las demandas de energía y de 5% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

10.3.9 Noveno escenario

El noveno escenario de modelación corresponde a una condición hidrológica húmeda en la que se contemplan parámetros hidroclimáticos estimados tomando en cuenta solo los años en los que ha habido fenómeno de la niña. En este escenario se busca priorizar el requerimiento de energía buscando dar el máximo cumplimiento a éste.

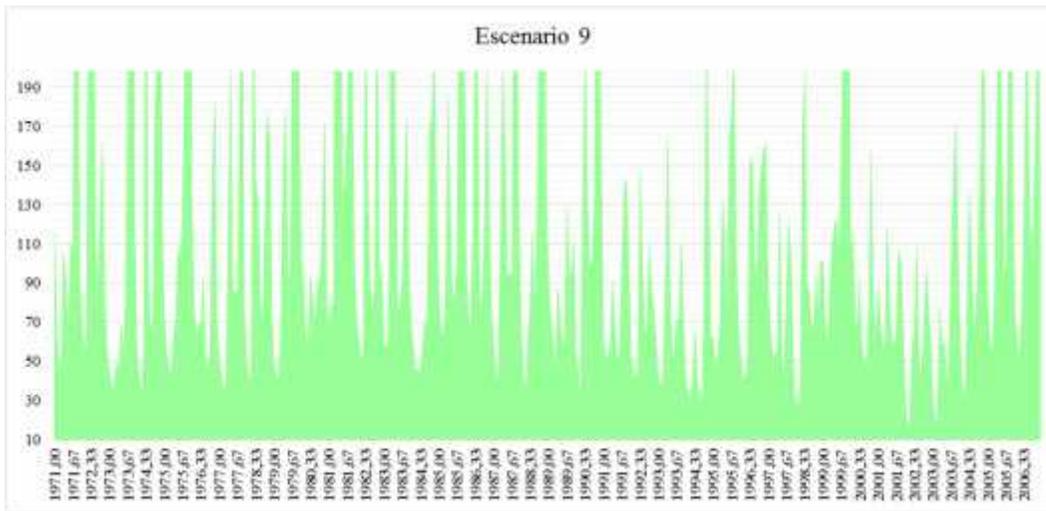


Figura 10-20: Volúmenes embalsados (Grafica Año vs Volúmen Mm3) - Escenario 9

En el escenario de modelación 6 se tiene un comportamiento hidrológico de máximos (Años Niña), similar al presentado en el escenario 3. El embalse presentará fallos por exceso de volumen de agua almacenado en 32 ocasiones considerando la serie de datos histórica utilizada como parámetro de modelación y para dicha serie, no se alcanzará en nivel mínimo de almacenamiento, pero más del 70% de su vida útil se mantendría en un nivel por encima del 70% de su capacidad. En este escenario se busca darle la máxima prelación a la satisfacción de los requerimientos de energía, por lo que maximizando aun a costa de perjudicar a presenta un grado de satisfacción óptimo de sus requerimientos de 100% para las demandas de energía y de 67% para las demandas de suministro incluyendo acueductos y riego.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a. En muchos lugares, especialmente en latino América y en los países en via de desarrollo el estrés hídrico es un problema que afecta de manera importante y frecuente a un buen porcentaje de la población contando con muy poco apoyo estatal por lo tanto generar políticas de gestión que permitan optimizar la distribución del recurso disminuyendo justamente el déficit, es una muy buena alternativa para abordar el desarrollo de la gestión. Aquí se evidencia entonces, la oportunidad que se tiene al utilizar un algoritmo como el MINIMAX.
- b. Los principios de la teoría de juegos son extraíbles a cualquier problema real donde se requiera resolver un problema multiobjetivo, siendo no habitualmente utilizados en la gestión de recursos hídricos, sin embargo, el presente trabajo muestra como este tipo de algoritmos pueden ser implementados y dan muy buenos resultados en sistemas que requieran optimización de recursos.
- c. El software aquí creado tiene la ventaja de ser muy sencillo en su utilización y manejo, lo que facilita el acceso a diferentes actores involucrados en la toma de decisiones, un siguiente paso para la mejora o implementación de programa Wüin sería implementar otros algoritmos similares al MinMax fortaleciendo su capacidad de optimización.
- d. En este caso se realizó la modelación a partir de datos históricos pero se podría complementar el software implementando modelos lluvia escorrentía que permitan la generación de series de caudales sin utilización de otros software, ya que uno de los principales problemas en la construcción de un embalse es justamente la alteración de lagunas variables hidrológicas y generalmente la escasa información histórica disponible.
- e. Una buena adición al programa Wüin sería la adición de una tercera variable que permita separar los requerimientos de riego de aquellos de acueductos, dado que así se le podría dar prelación a una de estas dos variables, igualmente sería una buena mejora considerar un embalse con requerimientos de

regulación de caudales para control de inundaciones. En una adición de módulos se podría agregar estos parámetros adicionales potenciando las capacidades del software.

- f. Finalmente para estudios futuros se buscaría plantear escenarios de cambio climático y no sólo de variabilidad climática en la modelación para contemplar un mejor espectro de escenarios factibles en el embalse.

12 REFERENCIAS

- Agencia de Desarrollo Rural (ADR). (2020). *LICITACION PUBLICA PROYECTO MULTIPROPÓSITO DEL RIO RANCHERIA*. Bogotá: ADR.
- Anghileri, D. (2013). *Managment of multi-purpose reservoir under climate change: impact assesment ans adaptatios strategies*. Milano: Politecnico di Milano.
- Bertel, M., & Cárdenas & Henríquez, J. (2013). *Informe de salida de ampo de calidad de agua (Visita a la Represa del Rio Ranchería, Aforo Químico puntual cpn micromolinetete y con flotador en acequia natallón y Rio Ranchería*. Facultad de ingeniería ambiental Universidad de la Guajira.
- Branche, E. (2015). *Multipurpose water uses of hydropower reservoirs: SHARING THE WATER USES OF MULTIPURPOSE HYDROPOWER RESERVOIRS: THE SHARE CONCEPT*.
- Bravo, J., Collischonn, W., Pilar, J., & Depettris, C. (2006). Técnica de Parametrización, Simulación y Optimización para Definición en Represas. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad del Nordeste* .
- Celeste, A., Curi, W., & Curi, R. (2009). Implicit Stochastic Optimization for Deriving Reservoir Operating Rules in Semiarid Brazil. *Pesquisa Operacional*, 223–234.
- Corporación Autónoma Regional de la Guajira. (2011). *POMCA Rio Ranchería*. Riohacha: CORPOGUAJIRA.
- Doria, C., & Vivas, L. (2016). *Fuentes terrestres de contaminación en la zona costera de La Guajira, Colombia*. Riohacha.
- FINDETER. (2019). ESTUDIO PREVIO PARA LA CONTRATACIÓN. “VERIFICACIÓN, COMPLEMENTACIÓN, ACTUALIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS DETALLADOS PARA LA

CULMINACIÓN DEL PROYECTO ESTRATÉGICO DE ADECUACIÓN DE TIERRAS DE GRAN ESCALA DEL RIO RANCHERÍA, DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA.”. Bogotá D.C.

Hidro-Proyectos. (05 de 2021). *HIDROPROYECTOS DANS LE MONDE*. Obtenido de <http://hidroproyectos.com/Projets.php>

IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. En M. Gonzalez, G. Saldarriega, & O. Jaramillo, *Estimación de la demanda de agua*. Bogotá.

Kiombo, J. (2012). *Modelo de gestión óptima multiobjetivo para la cuenca del rio Kwanza*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.

Kivuva, M. (2009). Game playing in artificial intelligence. Eastern Africa.

Labadie, J. (2014). Optimal operation of multireservoir systems: state of the art review. *Journal of water resources planning and management*.

M. S. Hossain and A. El-shafie. (2013). *Intelligent systems in optimizing reservoir operation policy: a review,*”. *Water Resources Management*.

Myo Lin, N., & Rutten, M. (2016). Optimal Operation of a Network of Multi-urpose Reservoir: A Review. Delft: 12th International Conference on Hydroinformatics.

Nardini, A., & Montoya , D. (1998). Remarks on a min.max optimization technique for the managment of a single multiannual reservoir aimedat hydroelectric generation an water supply.

Nardini, A., & Montoya, D. (1993). *Planteamiento de un modelo decisional para la gestión integrada del sistema Lago La Laja (Respecto al proyecto La Laja-Digullin)*. Santiago de Chile.

Organización de las Nacione Unidas. (11 de 10 de 2020). *Paz, dignidad e igualdad*. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

-
- Otero Cortés, A. (2013). Rio Ranchería, entre la economía, la biodiversidad y la cultura. En *Documentos de trabajo sobre economía regional*. Bogotá: Banco de la Republica.
- Otero, A. (2013). *Rio Ranchería: Entre la economía, la biodiversidad y la cultura*. Banco de la republica.
- Rani, D., & Moreira, M. (2006). Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resources Management*, 861–878.
- Sancho Caparrini, F. (24 de octubre de 2019). *Minimax: Juegos con adversario*. Obtenido de <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=107>
- Scola, L., Ricardo, H., Takahashi, Sergio, A., & Cerqueira, G. (2015). *1. Multipurpose Water Reservoir Management: An Evolutionary Multiobjective Optimization Approach*.
- Soloaga, A. (19 de 10 de 2018). *Akademus IEBSCHOOL*. Obtenido de <https://www.akademus.es/blog/programacion/principales-usos-python/>
- Toston-Sarmiento, M. P. (2013). El río ranchería: Pérdido en el desierto. Bogotá: Reino de los países bajos.
- (s.f.). *Water Resources Managemen*.
- Witt, A. (2015). The economic benefits of multipurpose reservoirsin the United states-federal hydropower fleet. Oak: Oak Ridge National Laboratory.
- Zecchin, A., Maier, H., Simpson, A., Roberts, A., Berrisford, M., & Leonard, M. (2015). Max.Min ant system applied to water distribution system optimization. Adelaide.
