

Maestría en Ingeniería Civil

**Algoritmos de inteligencia artificial y MiniMax para la optimización en
operación de embalses Multipropósito, Caso de estudio embalse El Cercado
- la Guajira**

Néstor Yair Ávila Herrera



Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Bogotá, D.C., 31 de enero de 2023

**Algoritmos de inteligencia artificial y MiniMax para la optimización en
operación de embalses Multipropósito, Caso de estudio embalse El Cercado
- la Guajira**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos
Hidráulicos y medio Ambiente**

**Ph.D. Germán Ricardo Santos Granados
Director**



Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Bogotá, D.C., 31 de enero de 2023

La tesis de maestría titulada “Aplicación de algoritmo artificial en proceso de optimización para la operación de embalses con sistemas de riego, acueductos, energía y control de caudal ambiental, caso de estudio embalse El Cercado - la Guajira.”, presentada por Néstor Yair Ávila Herrera, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recurso hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis
Ph.D. Germán Ricardo Santos Granados

Jurado
Ing. Carlos Alfredo Tami Riveros

Jurado
Ing. Lilibian Marcela Rojas Troncoso

Bogotá, D.C., 31 de enero de 2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi esposa Luz Adriana y a mis hijas Ana María y Laura Mariana quienes con su apoyo incondicional me motivan incesantemente a alcanzar mis metas y éxitos profesionales.

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería por la oportunidad de formación académica y crecimiento Profesional; al Doctor Germán Santos por su gran aporte en conocimientos compartidos y su valioso tiempo para el desarrollo de este trabajo; a los Ingenieros Carlos Tami e Ingeniera Liliana Rojas, por su apoyo en la profundización de sus proyectos de grado.

También agradezco a la Ingeniera Esperanza Guarnizo por brindar su aporte y conocimiento sobre este proyecto, también a la Agencia de Desarrollo Rural - ADR, por la oportunidad de laborar en este proyecto estratégico, por toda la información suministrada y aportes adicionales en el presente trabajo.

RESUMEN

El presente estudio propone reglas de operación para el embalse El Cercado en el Departamento de la Guajira – Colombia que optimicen el uso del recurso hídrico aguas abajo de la presa (generación hidroeléctrica, riego agropecuario y servicio de agua para acueductos). Como es un embalse multipropósito y fue construido para tal fin, se emplea un enfoque multiobjetivo, con el uso de algoritmos de optimización y funciones de redes neuronales artificiales (RNA) y método MiniMax, para establecer las reglas de operación más efectivas de acuerdo con la necesidad del servicio y las condiciones hidroclimatológicas de la zona.

Los modelos de operación propuestos se desarrollaron con la información disponible en un periodo comprendido de enero de 2016 a julio de 2022, a nivel diario: caudales de entrada y salida controlada del embalse, caudal ecológico, caudal para riego, caudal para generación eléctrica y caudal para acueductos del área de influencia. Con estos parámetros se establecieron las funciones de aproximación, así como las restricciones de descarga, límites de operación del embalse y descargas de emergencia (Rebose por vertedero de excesos). Sobre los modelos de operación se aplicaron los siguientes algoritmos de optimización: el Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) y Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D), de la librería JMETALPY, y el Algoritmo MiniMax, entornos de optimización multiobjetivo desarrollados en Python, para obtener una regla de operación óptima.

Una vez analizados los resultados obtenidos mediante el proceso de modelación, se evidencia que se puede reducir sustancialmente la descarga del embalse de acuerdo con las necesidades del servicio, aplicando las reglas de operación obtenidas de la optimización de los modelos de operación, los cuales se corroboran en los picos del hidrograma de descarga.

Los modelos de operación de embalses se pueden parametrizar adecuadamente empleando funciones de aproximación como son las Redes Neuronales, que permiten efectuar una regulación del recurso hídrico de acuerdo con las demandas para la cual fue diseñado. Los resultados de la optimización de todos los modelos demuestran que la Redes Neuronales artificiales tiene un mejor desempeño a diferencia de otros métodos. Siendo el NSGAI el algoritmo de optimización que mejor se adapta al caso analizado en términos de tiempo computacional y resultados entregados, por cuanto a su eficiencia y series de tiempo diarias que permiten efectuar un mejor análisis del comportamiento del embalse en su proceso de operación.

PALABRAS CLAVES: *Optimización, operación, embalses, Regulación, La Guajira, Río Ranchería, El Cercado.*

ABASTRAC

This study proposes operating rules for the El Cercado reservoir in the Department of La Guajira - Colombia that optimize the use of water resources downstream of the dam (hydroelectric generation, agricultural irrigation, and water service for aqueducts). Since it is a multipurpose reservoir and was built for that purpose, a multiobjective approach is used, with the use of optimization algorithms and artificial neural network functions (ANN) and MiniMax method, to establish the most effective operation rules according to the need of the service and the hydroclimatological conditions of the area.

The proposed operation models were developed with the information available for a period from January 2016 to July 2022, at a daily level: controlled inflow and outflow of the reservoir, ecological flow, irrigation flow, flow for electricity generation and flow for aqueducts in the area of influence. With these parameters, approximation functions were established, as well as discharge restrictions, reservoir operating limits, and emergency discharges (overflow through excess spillway). The following optimization algorithms were applied to the operation models: the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D), from the JMETSALPY library, and the MiniMax Algorithm, multiobjective optimization environments developed in Python, to obtain an optimal operation rule.

Once the results obtained through the modeling process have been analyzed, it is evident that the reservoir discharge can be substantially reduced according to the service needs, applying the operation rules obtained from the optimization of the operation models, which are corroborated in the peaks of the discharge hydrograph.

The reservoir operation models can be adequately parameterized using approximation functions such as Neural Networks, which allow the regulation of the water resource according to the demands for which it was designed. The results of the optimization of all the models show that the artificial Neural Networks have a better performance than other methods. Being the NSGAI the optimization algorithm that best suits the case analyzed in terms of computational time and results delivered, in terms of its efficiency and daily time series that allow a better analysis of the behavior of the reservoir in its operation process.

Key Words: *Optimization, operation, reservoirs, Regulation, La Guajira, Ranchería River, El Cercado.*

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	13
1.1.	Planteamiento del problema	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo General	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
3.1.	Optimización de Embalses	17
3.2.	Algoritmos de optimización	19
3.2.1.	Optimización Multiobjetivo.....	19
3.2.2.	Algoritmos Genéticos	19
3.2.3.	NSGA II.....	20
3.2.4.	Funciones de Aproximación	22
4.	METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO	25
4.1.	Metodología	25
4.1.1.	Información y Análisis del Sistema.....	25
4.1.2.	Procesamiento y Análisis de la Información.	25
4.1.3.	Regla de Operación Actual del Embalse.....	26
4.1.4.	Objetivos del Sistema.....	27
4.1.5.	Construcción de los Modelos de Operación	28
4.1.6.	Optimización	29
4.1.7.	Selección de la Regla de Operación Óptima	30
4.2.	CASO DE ESTUDIO	30
4.2.1.	Descripción del sistema del embalse multipropósito de la Represa Ranchería ...	31
4.3.	Descripción del problema	35
5.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	36
5.1.	Información y Análisis del Sistema.....	36
5.1.1.	Infraestructura del proyecto	36
5.2.	Procesamiento y Análisis de la Información	47
5.3.	Construcción del Modelo de Operación	49
5.3.1.	Redes neuronales artificiales (RNA)	49
5.3.2.	Modelo de operación.....	51
5.3.3.	Funciones de aproximación.....	57
5.3.4.	Estimación de la demanda de agua para riego	58
5.3.5.	Determinación del área de riego.....	59

5.3.6.	Determinación de los caudales de riego	61
5.3.7.	Estimación de la demanda de agua para Acueductos.....	62
5.3.8.	Cálculo de la potencia generada por turbinado PCH El Cercado	63
5.4.	Optimización del embalse	65
5.4.1.	Ensamble del modelo de operación en JMETALPY	65
5.4.2.	Funciones objetivo en la modelación.....	66
5.4.3.	Escogencia de los parámetros del algoritmo de optimización.....	66
5.4.4.	Escogencia de la mejor regla de operación óptima	67
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	69
6.1.	Frente de Pareto	69
6.1.1.	Modelo de operación con RNA desarrollado en NSGAII	69
6.1.2.	Modelo de Operación con MOEA/D.....	73
6.1.3.	MINIMAX	78
6.2.	Comparación de resultados de los modelos analizados	83
6.2.1.	Selección y validación de la regla de operación óptima	86
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
8.	BIBLIOGRAFIA:.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Características del cuerpo de la presa.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 2: Parámetros de la descarga de fondo.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3: Parámetros del aliviadero.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4: Resumen Infraestructura Represa El Cercado.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5: Registro Mensual de Caudales Represa El Cercado.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6: Registro Mensual de precipitación Cuenca Rio Ranchería.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 7: Registro Mensual de Temperatura Cuenca Rio Ranchería.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8: Registro Mensual de Evaporación Presa El Cercado.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 9: Indicadores de MSE y MAE para las diferentes configuraciones de RNA evaluadas.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 10: Distribución de cultivos Distrito Ranchería.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 11: Distribución de cultivos Distrito San Juan del Cesar.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12. Demandas Riego Proyecto Multipropósito Rio Ranchería (m3/s).....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 13 Proyecciones, nivel de complejidad y dotación de Acueductos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 14. Demandas de agua para acueductos.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 15: Parámetros de los algoritmos de optimización NSGAI y MOEA/D.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 16: Mejores soluciones para cada uno de los objetivos de los modelos con RNA y el algoritmo NSGAI.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 17: Mejores soluciones para los objetivos de los modelos con RNA y el algoritmo MOEA/D.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 18: Parámetros de ingreso módulo embalse.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 19: Parámetros de ingreso módulo Hidroclima.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 20: Parámetros de ingreso módulo energía.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 21: Parámetros de ingreso módulo Producción de energía.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 22: Parámetros de ingreso módulo Suministro.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 23: Parámetros de ingreso módulo Riego.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 24: Caudales de Reglas de Operación tomados de los resultados de los algoritmos NSGAI, MOEAD y MiniMax.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 25: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 26: Coeficiente de eficiencia Nash – Sutcliffe (NSE).</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 27: Comparativo de Caudales medios mensuales entre operación actual, operación simulada NSGAI, demanda Multipropósito y Déficit Hídrico.</i>	<i>87</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Árbol del problema del proyecto.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2. Flujograma para la aplicación de Algoritmo Genético.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Proceso de individuos del NSGA II</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Flujograma para la aplicación de MOEA/D.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Flujograma entorno JMETALPY</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6. Esquema de una Red Neuronal Artificial.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7. Operación interna en las neuronas de la Red Neuronal Artificial</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8. Representación modelo MiniMax</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología de investigación establecida</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10. Flujograma optimización en JMETALPY</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11. Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12. Localización y distribución del proyecto.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13. Represa El Cercado al 2021.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 14. Vista de la presa El Cercado frontal.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15. Metodología para el análisis de información.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 16. Vista de la presa El Cercado.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17. Vista de la válvula anular de descarga de fondo.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18. Vista del aliviadero.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19. Presa derivadora.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 20. Canal de aducción de la conducción Ranchería</i>	<i>40</i>
<i>Figura 21. Tanque de amortiguación conducción San Juan del Cesar.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 22. Sistema distribuidor (Deriva a la conducción San Juan. PCH y Descarga Howell Bunger.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 23. Caudales Mensuales Rio Ranchería.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 24. Precipitación Mensual Rio Ranchería.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 25. Temperatura Mensual Rio Ranchería</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Evaporación Mensual Presa El Cercado</i>	<i>47</i>
<i>Figura 27. Caudales de entrada y de salida del embalse El Cercado para el periodo enero 2016 a julio 2022.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Nivel vs Volumen del embalse El Cercado</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29. Nivel del embalse El Cercado para el periodo de enero de 2016 a julio de 2022.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30. Configuración final de RNA para las reglas de operación actuales del embalse</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31. Hidrograma de caudales de descarga del embalse obtenido para la prueba de validación del modelo final de RNA de 4 Neuronas.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 32. Curva de vertimiento.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 33. Evaporación diaria del embalse.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34. Sistema de medición de infiltración en embalse El Cercado.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 35. Curva de infiltración</i>	<i>55</i>
<i>Figura 36. Flujograma de los modelos de operación construidos para el embalse El Cercado (Modelo Mejorado (Tami, 2020))</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37. Configuración de la RNA propuestas para los modelos de operación.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 38. Curva de riego en el tiempo para el periodo de enero de 2016 a julio de 2022.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 39. Caudal de Acueductos Proyecto Multipropósito.</i>	<i>63</i>

<i>Figura 40 Eficiencia de las turbinas en función del caudal de flujo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 41. Caudal turbinado en el tiempo.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 42. Introducción del problema en JMETALPY.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 43. Espacio de Pareto que iguala o mejora la regla de operación actual.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 44. Frente Pareto RNA 4N empleando el algoritmo NSGAI.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 45. Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado NSGA II FO1 vs FO3.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 46. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado de RNA NSGAI.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 47. Hidrograma de descarga del embalse sin riego para el modelo optimizado de RNA NSGAI.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 48. Hidrograma de descarga del embalse con riego para el modelo optimizado de RNA NSGAI.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 49. Frente Pareto RNA 4N empleando el algoritmo MOEA/D.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 50. Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado MOEAD FO1 vs FO3.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 51. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado de RNA MOEA/D.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 52. Hidrograma de descarga del embalse sin riego para el modelo optimizado de RNA MOEAD.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 53. Hidrograma de descarga del embalse con riego para el modelo optimizado de RNA MOEAD.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 54. Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 55. Pantalla de selección de preferencias de cálculo.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 56. Pantalla de selección de Simulación.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 57. Pantalla de Resultados.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 58. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado MiniMax tomado de un segmento de año (2021).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 59. Hidrograma de descarga del embalse para los modelos optimizados NSGAI y MOEA/D.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 60. Hidrograma de descarga del embalse de todos los modelos optimizados periodo de análisis (2021).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 61. Hidrograma de descarga del embalse para los modelos optimizado NSGAI (optimización seleccionada).....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 62. Generación de energía por modelo NSGAI.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 63 Demanda actual del embalse El Cercado. (ADR A. d., 2021).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 64 Demanda Futura del embalse El Cercado. (ADR A. d., 2021).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 65. Comparativo Caudal optimizado y Caudal deficitario del embalse El Cercado.....</i>	<i>89</i>

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El departamento de la Guajira es el territorio con mayor índice de escasez hídrica en Colombia, por tal motivo en esta zona, la gestión eficiente de los recursos hídricos es de vital importancia para la conservación de las comunidades que habitan allí. Es un departamento de altas divergencias, en algunos casos presentan importantes inundaciones en la temporada invernal seguido de largas y extenuantes sequías, este último presentándose mayormente durante el año (SINC, 2018); además tiene muy bajos índices de acceso al agua potable, donde la población debe realizar en el peor de los casos largos recorridos para conseguir el líquido vital. Estos factores, sumados a entornos multiculturales en el departamento, conllevan a ser un lugar de alta vulnerabilidad por la baja disponibilidad de recurso hídrico. (SINC, 2018).

En dicha área de influencia, se han evidenciado los impactos del cambio climático, los cuales se han provocado veranos más secos, temperaturas altas e inundaciones en casi todos los municipios del departamento; la alta escasez del recurso hídrico en la alta Guajira y los incendios forestales que se han registrado recientemente en los municipios de Dibulla, Fonseca y Villanueva se derivan de este fenómeno (Corpoguajira, www.corpoguajira.gov.co, 2018).

De acuerdo con las situaciones presentadas, se requiere generar una política integral de gestión del recurso hídrico sobre una de las fuentes más importantes del departamento de la Guajira, como lo es el Río Ranchería, en el cual se busca el acceso y aprovechamiento equilibrado a todas las comunidades de la región mediante el sistema de almacenamiento más importante, la Presa El Cercado (ADR A. d., 2021). La construcción de esta obra de infraestructura fue realizada con el fin de poner en marcha los distritos de riego de Ranchería y San Juan del Cesar, que beneficiarán los municipios de Distracción, Barrancas, Hato Nuevo y San Juan del Cesar, poblaciones que ejercen actividades agrícolas y pecuarias diversificadas y de alta productividad a pesar de sus difíciles condiciones climatológicas y geológicas dentro del departamento (ADR A. d., 2021).

Adicionalmente, con este proyecto de inversión, se busca abastecer de agua en bloque a los acueductos municipales de Albania, Barrancas, Fonseca, Hatonuevo, Maicao, Manaure y Uribia y la creación de una hidroeléctrica pequeña (PCH), que generaría entre cuatro y cinco 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 (ADR A. d., 2021). Además, 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 Cortés, 2013.)

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 Río 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 (Corpoguajira, POMCA Río Ranchería, 2011) y 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 y solventar un punto de vista para que el 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 (ADR A. d., 2021).

Uno de los problemas más significativos que se presenta en una presa como la del caso de estudio es el control del embalse, debido a que es necesario regular sus caudales de tal manera que sea utilizado de una manera óptima en su servicio; el manejo adecuado de sus caudales permitirá establecer las reglas de operación óptimas de acuerdo con las necesidades de la demanda y el servicio requerido (ADR A. d., 2021).

Las variaciones climáticas presentadas en los últimos años en el departamento de la Guajira obligan a tomar medidas para gestionar el agua del embalse, regulando los niveles de acuerdo con las condiciones meteorológicas, su necesidad del servicio y en algunas ocasiones se efectúan racionamientos del recurso hídrico como medida de control de emergencia (Corpoguajira, POMCA Río Ranchería, 2011). Bajo estas condiciones es necesario tomar decisiones sobre la cantidad de agua para generación de energía, sistemas de riego, servicio de acueductos y el nivel de reserva de agua del embalse, las cuales buscan optimizar la operación de las presas como un medio de regulación integral (Corpoguajira, POMCA Río Ranchería, 2011).

Respecto a la regulación de embalses, se han realizado múltiples estudios y aproximaciones a la solución del problema de manejo y optimización de estos, donde se realiza una aproximación a través de algoritmos; sin embargo, la investigación al respecto aún continúa ya que no existe una solución única al problema (Branche, 2016). Debido a las variables climáticas, se realizará un enfoque de solución que busca 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 (Anghileri, 2013).

La problemática que se busca enfrentar es la regulación u óptima planeación de un embalse con requerimientos diferentes, un problema de regulación de embalses se caracteriza por ser una dificultad de optimización multiobjetivo y por requerir una optimización dinámica dada la independencia de múltiples variables cada instante de tiempo (Rani, 2006), como por ejemplo regulación del embalse ante eventos hidrológicos extremos vs la demanda de un acueducto, un distrito de riego y la generación de energía en el tiempo planteado en el árbol de problemas de la Figura 1.

De este modo la gestión del recurso hídrico a través de la utilización de un embalse multiobjetivo no es una labor sencilla, puesto que se parte de un problema que requiere del análisis y evaluación de todas y cada una de las variables involucradas, por lo que se requiere optimizar la información de cada variable, para lograr un buen resultado que permita beneficiar todos los requerimientos del servicio (Labadie, 2004).

Con dicho resultado se busca mitigar los impactos socioeconómicos en la población y su necesidad de mejorar la eficiencia en la gestión de los sistemas de recursos hídricos existentes mediante el manejo óptimo del embalse para reducir el impacto ante estos eventos.

El objetivo de estudio del presente trabajo es efectuar la optimización de la operación del embalse a través de la utilización de un algoritmo en el análisis del problema multiobjetivo, para esto se propone la resolver los siguientes planteamientos.

- i) ¿Se puede desarrollar un sistema de regulación del embalse El Cercado que permita optimizar el riego, el servicio de acueductos, y maximizar la generación de energía mediante la utilización de un algoritmo de inteligencia artificial?
- ii) ¿Se puede establecer si existe déficit del recurso hídrico de acuerdo con las condiciones Multipropósito, una vez se cuente con una regla de operación eficiente para la regulación del embalse?
- iii) ¿Le acciones se deben tomar por parte de la Agencia de Desarrollo Rural -ADR, en cuanto a las demandas establecidas en el servicio del embalse si se llegase a presentar déficit del recurso hídrico en el proceso de operación del embalse?

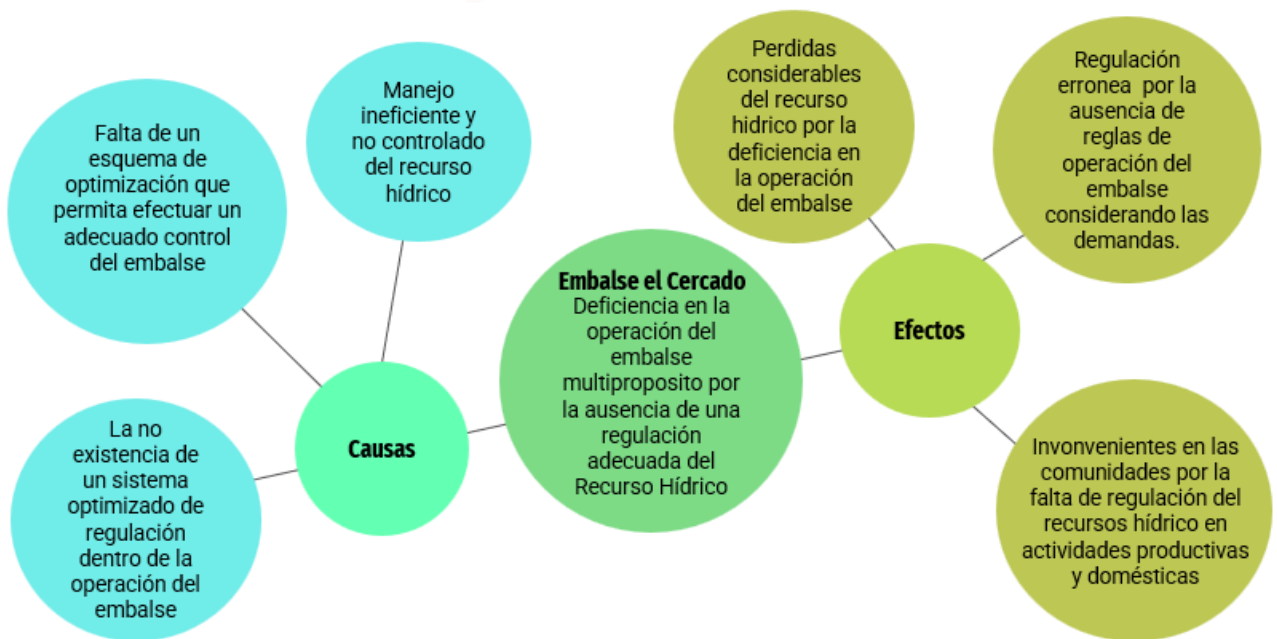


Figura 1. Árbol del problema del proyecto

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Definir un proceso de optimización eficiente para mejorar el control del recurso hídrico en un embalse, aplicado al caso de estudio (Embalse El Cercado).

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las falencias en la operación actual del embalse El Cercado.
- Construir un modelo de operación para el embalse El Cercado utilizando modelos matemáticos de aproximación a partir de los componentes físicos del sistema y compararlos con modelos aplicados en otros trabajos.
- Optimizar el proceso de operación de los modelos propuestos para el cumplimiento de las metas de suministro de agua para irrigación, acueductos, caudal ambiental exigido por la autoridad ambiental y generación de energía.
- Modelar el proceso de operación propuesto y realizar su comparación con la operación actual del sistema.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Optimización de Embalses

La optimización es un procedimiento matemático utilizado para ajustar las variables de decisión que permite determinar una solución con excelente resultado en las funciones objetivo. Los modelos de optimización se dividen en determinísticos y estocásticos según el mecanismo de optimización seleccionado, las características de las variables utilizadas y el tipo de reglas de operación se efectúa su clasificación. (Kiombo, 2012). Los métodos de optimización estocástica explícita se concentran directamente en la información estadística y las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias implicadas, mientras los métodos de optimización estocástica implícita son métodos deterministas (Rani, 2006).

Ambos métodos se fundamentan en valores históricos generados o previstos de las entradas mediante el uso del análisis de series temporales y requieren de un modelo de pronóstico para dichas operaciones en tiempo real; la dificultad de los métodos deterministas es que las reglas de operación óptimas que se usan para llevar a cabo las operaciones del sistema en tiempo real se fundamentan en las series temporales estimadas, requiriendo una gran cantidad de tiempo computacional (Kiombo, 2012).

Celeste (2019) y sus colaboradores, utilizaron el método de optimización estocástica implícito para determinar reglas de operaciones mensuales de un sistema de embalses en el Noroeste Brasileño, examinando el resultado de los datos de la operación óptima, desarrollando curvas guía que sirvieron de referencia a los operadores de embalses para poder tomar decisiones sobre el volumen de agua que sería dado en cada periodo de tiempo.

El proceso de simulación permite tomar de referencia el comportamiento del sistema real y experimentar con modelos antes de su implementación, tras el desarrollo de una etapa de prueba y las decisiones adoptadas para el caso a analizar. En otras palabras, permite recopilar datos referentes al comportamiento del sistema de embalses y poner a prueba numerosas hipótesis (Kiombo, 2012).

La optimización multiobjetivo hace referencia a problemas que implican 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 estos problemas se pueden aplicar diferentes puntos de vista como fueron resumidos por Kiombo (2012).

La operación de un embalse está sujeta al cumplimiento de uno o varios objetivos como son el suministro de agua para una población, la irrigación de cultivos, la generación de energía eléctrica o el control de inundaciones; de los embalses existentes en el mundo que operan con el único propósito de controlar inundaciones es menor respecto a los que operan para irrigación de cultivos y centrales hidroeléctricas que son más comunes. (Research, 2010).

Sin embargo, en embalses multipropósito existentes, los intereses en la regulación influyen en la toma de decisiones para la operación de un embalse, por lo que busca encontrar un equilibrio o acuerdo entre las diferentes partes involucradas no es una tarea sencilla (Kiombo, 2012). En el caso

de los sistemas donde el propósito principal es el control de inundaciones se genera un conflicto con la generación energética o el suministro de agua, de allí parte la importancia de buscar políticas de operación óptimas para la gestión de embalses multipropósito. (Labadie, 2004)

Dentro de las políticas de operación de un embalse se debe definir como se debe realizar la operación del embalse para cumplir con los objetivos o propósitos específicos para el sistema; por lo general las reglas de operación son representadas mediante curvas de referencia donde los caudales de descarga se definen en función del nivel de almacenamiento del embalse (Labadie, 2004) y también pueden ser representadas mediante funciones matemáticas o parametrizaciones (Castelletti, 2011).

La búsqueda de políticas de operación óptimas de embalses ha sido una de las áreas de mayor estudio dentro de los sistemas de recursos hidráulicos, donde básicamente se centra en la búsqueda de las reglas de operación óptimas que permitan cumplir con los objetivos planteados de la mejor forma posible (Momtahan, 2007). La optimización de embalses ha sido un tema que ha tenido un gran interés de muchos investigadores en las últimas décadas (Ritter, 2016), debido a que su aplicación contribuye enormes beneficios, ahorros y extiende la utilidad de los embalses (Labadie, 2004). dentro de la literatura se desarrollan nuevos marcos y metodologías que permiten especificar las reglas de operación que establezcan un mejor uso a gran escala del agua disponible en las cuencas hídricas mejorando sustancialmente su aprovechamiento.

A pesar de que, a través del tiempo, las soluciones a problemas de optimización de embalses han sido abordadas bajo diferentes enfoques o metodologías desarrolladas por varios autores. Una de las más utilizadas es la optimización estocástica implícita (OEI), la cual utiliza un modelo de optimización determinístico para encontrar los caudales óptimos de salida en el tiempo (vector de resultados), y mediante una función de regresión o un modelo de aprendizaje obtienen las reglas de operación del embalse como el utilizado por Raman (1996) a partir de series de caudales históricos de entrada.

Dentro de estos enfoques están los modelos de Programación lineal (PL), donde el método Simplex es uno de los más usados y requiere que todas las ecuaciones del problema sean lineales. Hiew (1987) aplicó el OEI utilizando PL para el proyecto Colorado-Big Thompson compuesto por ocho embalses y en el cual utilizó un historial de 30 años de caudales de entrada mensuales, resultando en un problema con 12.613 variables y 5.040 restricciones para producir las curvas guía óptimas utilizando el análisis de regresión lineal.

Así mismo, en diversos problemas de optimización de embalses que implican primordialmente la producción de energía eléctrica, se han utilizado modelos de programación no lineal (PNL) debido a la complejidad de los patrones o modos de operación que éstos pueden llegar a tener; uno de estos modelos es la Programación Lineal Sucesiva (PLS) el cual ha sido aplicado ampliamente en hidroeléctricas como el planteamiento desarrollado por Barros (2003), con resultados satisfactorios tanto en precisión como en eficiencia computacional.

Los métodos de algoritmos genéticos (AG) efectúan una búsqueda aleatoria basada en los mecanismos de la evolución y selección natural (Loucks, 2017), estos métodos son utilizados habitualmente para resolver problemas de búsqueda y optimización; actúan sobre una población de posibles soluciones generada aleatoriamente para un determinado problema en donde cada

individuo de dicha población recibe una ponderación en razón a la solución que representa (medida conocida como adaptación) (Branche, 2016).

Así entonces, se buscó la optimización del embalse El Cercado haciendo énfasis en el propósito de optimización del recurso hídrico dado los problemas antes expuestos y tratándose de un embalse multipropósito, este problema no podría haber sido abordado teniendo en cuenta un solo objetivo de operación, siendo indispensable analizar todos los propósitos bajo un enfoque multiobjetivo (Celeste, 2009).

Para establecer una política óptima de manejo en un embalse se pueden utilizar diferentes técnicas de optimización y aproximación a problemas multiobjetivo desde las más clásicas y sencillas a funciones de alta complejidad; se busca desarrollar un algoritmo que plantee una alternativa para la regulación de un embalse multipropósito como es el caso del Algoritmo MiniMax (Rojas Troncoso, 2021).

Al ser un embalse multipropósito, el problema es planteado con un enfoque multiobjetivo donde se estudia el uso de algoritmos evolucionarios (optimizadores), junto con funciones de aproximación de Redes Neuronales artificiales (Modelos de operación paramétricos) para la búsqueda directa de las reglas de operación del embalse obtenidas a partir de los Frentes de Pareto generados (Tami, 2020).

3.2. Algoritmos de optimización

Esta subsección describe las herramientas computacionales que se utilizaran en el presente estudio, partiendo de los métodos multiobjetivo y los algoritmos genéticos hasta llegar al entorno de desarrollo empleado para su aplicación MiniMax, así mismo, se describen las familias de funciones utilizadas para los modelos de operación del embalse para las funciones de redes neuronales artificiales y método MiniMax.

3.2.1. Optimización Multiobjetivo

La optimización es un procedimiento matemático que se utiliza para ajustar las variables de decisión hasta establecer la solución con mejor resultado 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 escogidas se realiza su clasificación.

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).

3.2.2. Algoritmos Genéticos

Son métodos de búsqueda basados en los mecanismos de la evolución y selección natural (Loucks & van Beek, 2017), estos métodos son utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización actuando sobre un determinado problema para encontrar una solución como se presenta en el planteamiento establecido en la Figura 2.

Con el fin de alcanzar este objetivo es necesario regular la cantidad de agua que sale del embalse para garantizar un equilibrio de las necesidades actuales de acuerdo con su capacidad.

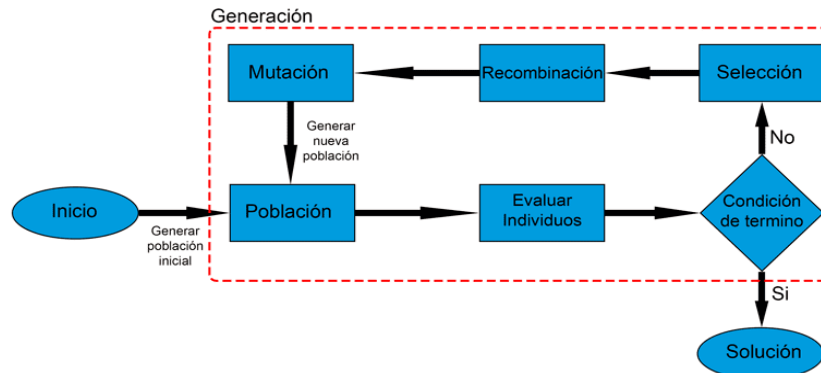


Figura 2. Flujograma para la aplicación de Algoritmo Genético

3.2.3. NSGA II

En este algoritmo se crea una población descendiente a partir de la generación anterior mediante un algoritmo de optimización como los algoritmos Genéticos, para cada individuo de la población de padres y descendientes se calcula la distancia de apiñamiento (“crowding distance”), la cual es la distancia promedio de cada individuo a los individuos que lo rodean dentro del espacio de la variable de decisión, determinando el número de individuos dominantes (Ritter, 2016).

En este algoritmo, la población descendiente Q_t (tamaño N) es creada en primer lugar con la población de padres P_t (tamaño N); después de este proceso, las dos poblaciones son combinadas para formar R_t de tamaño $2N$; una vez efectuadas las dos condiciones anteriores y mediante un ordenamiento no dominado se clasifica la población R_t en diferentes frentes de Pareto. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha culminado, la nueva población es creada a partir de las distribuciones de los frentes no dominados; esta nueva población se construye con el mejor frente no dominado (F_1) y continúa con las soluciones del segundo frente (F_2), luego el tercero (F_3) y así sucesivamente. Como la población R_t es de tamaño $2N$ y solamente existen N configuraciones que conforman la población descendiente, no todas las configuraciones de los frentes pertenecientes a la población R_t podrán ser acomodados en la nueva población como lo muestra la Figura 3. Aquellos frentes que no pueden ser acomodados desaparecen (Correa, Bolaños, & Molina, 2008).

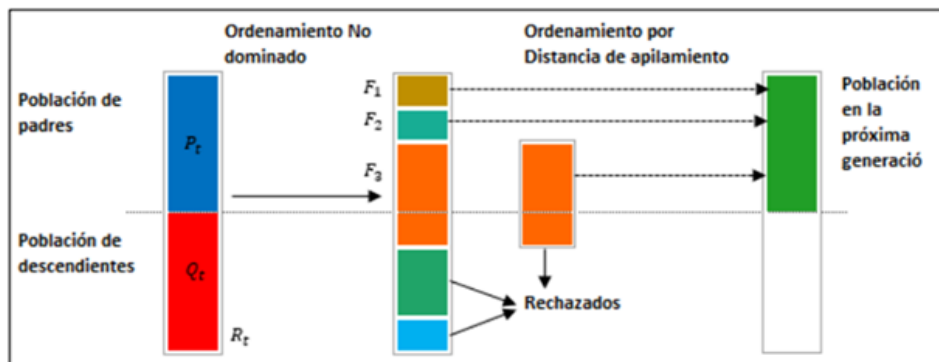


Figura 3. Proceso de individuos del NSGA II
Fuente: (Correa, Bolaños, & Molina, 2008).

2.1.1.1. MOEA/D

Es un algoritmo de optimización multiobjetivo de propósito general el cual descompone el problema en subproblemas de un objetivo (o problemas de optimización simples), y cada uno de estos es optimizado simultáneamente utilizando información de sus subproblemas vecinos (Zhang, 2007). Los subproblemas establecidos son parametrizados mediante un vector de pesos orientando la búsqueda dentro de una cierta zona del espacio de Pareto. La población correspondiente a cada generación se conforma de la mejor solución que se encuentra para ese momento en cada subproblema.

La principal característica de MOEA/D es manejar un problema multiobjetivo como una colección de un gran número de problemas de un solo objetivo, el cual introduce un nuevo algoritmo de optimización multiobjetivo basado en descomposición (MOEA/D) como un algoritmo multiobjetivo nuevo y capaz de obtener cobertura parámetros de regla en un sistema de yacimientos múltiples; Explícitamente el MOEA/D descompone el MOP en subproblemas de optimización escalar. (Taghian, Abid, & Ahmadianfar, 2015), dicha aplicación se puede evidenciar en la *Figura 5*.

Una de las ventajas de este algoritmo dentro del proceso de optimización multiobjetivo es por su baja complejidad computacional en cada generación, dado que no requiere ningún proceso de clasificación de Pareto (Reyes-Hernández, Ponsich, & Hoyos-Reyes, 2018).

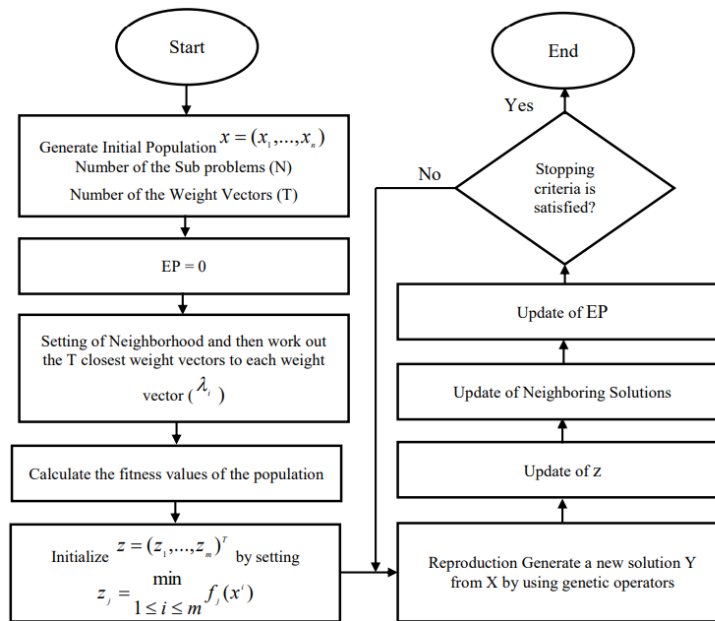


Figura 4. Flujograma para la aplicación de MOEA/D
Fuente: (Taghian, Abid, & Ahmadianfar, 2015).

2.1.1.2. JMETALPY

Es un entorno de optimización multiobjetivo desarrollado en Python, el cual aplica diferentes algoritmos metaheurísticos y otros métodos computacionales para la solución de problemas de optimización (tanto multiobjetivo como de un objetivo). El ambiente de JMETALPY consta de

múltiples módulos que permiten aplicar diferentes técnicas de optimización, entre ellas los tres algoritmos mencionados (algoritmos genéticos, NSGAI1 y MOEA/D), al igual que un conjunto de aplicaciones para la visualización de resultados, frentes de Pareto y análisis de procesos en tiempo real junto con un diverso conjunto de propiedades relacionadas con la generación automática de datos estadísticos (Tami, 2020).

Para dar una impresión intuitiva del algoritmo evolutivo, un breve marco de algoritmo en JMETALPY es el siguiente (Paso A, B y C) de la *Figura 5*.

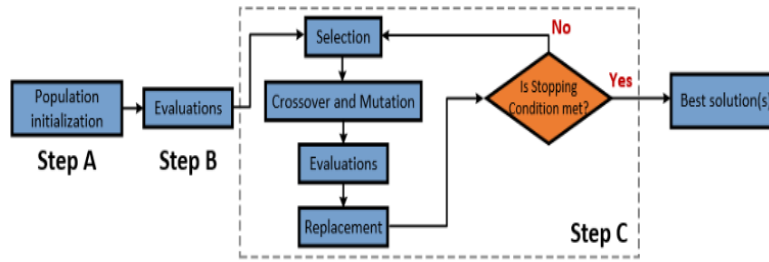


Figura 5. Flujograma entorno JMETALPY
Fuente: (Yongfeng, 2020)

3.2.4. Funciones de Aproximación

3.2.4.1. Redes neuronales Artificiales

Las RNA son técnicas de modelación computacional basadas en el funcionamiento del sistema nervioso humano, ampliamente utilizadas para modelar sistemas no lineales gracias a su capacidad de ajustarse a estructuras, tendencias o patrones complejos. El Perceptrón multicapa (PMC) es uno de los modelos de RNA más empleados, el cual pertenece al grupo de redes con conexiones “fedforward” (Hilera & Martínez, 2000), se caracterizan por arquitecturas en niveles y conexiones realizadas hacia adelante; sus unidades de procesamiento se conocen como neuronas y están organizadas en capas, cada capa es un conjunto de neuronas cuya información siempre proviene de la misma fuente y cuya salida siempre se dirige al mismo destino.

La red neuronal tiene una capa de entrada con las neuronas en donde se introducen los datos, las capas ocultas en donde estos son procesados, y la capa de salida en donde se generan los resultados, el cual se representa en la *Figura 6*. La *Figura 7* corresponde a un PMC con una capa oculta en donde cada neurona recibe información de las neuronas de la capa de entrada y emiten un dato de salida; la salida de cada una de las neuronas corresponde a la sumatoria de cada uno de los productos entre cada valor de entrada (I_t) y cada uno de los valores de conexión (c_i), más el bias, teniendo en cuenta que además el resultado anterior debe ser procesado mediante una función de activación que genera el dato de salida, estas funciones pueden ser la función sigmoide, función de tangente hiperbólica, función ReLU o función Softmax entre otras. La siguiente ecuación es la representación típica de las RNA, siendo u_k la salida de la Red.

$$u_k = a + \sum_{i=1}^N b_i \psi_i(I_t \cdot C_i + d_i)$$

En donde:

N es el número de neuronas
 $\psi(\cdot)$ es la función de activación de las neuronas
 I_t es el vector de entradas de la red
 a, b_i, c_i, d_i son los parámetros de la RNA.

El número de variables de decisión corresponde a $n\theta = N(M+2) + 1$, siendo M el número de variables de entrada al modelo (Tami, 2020).

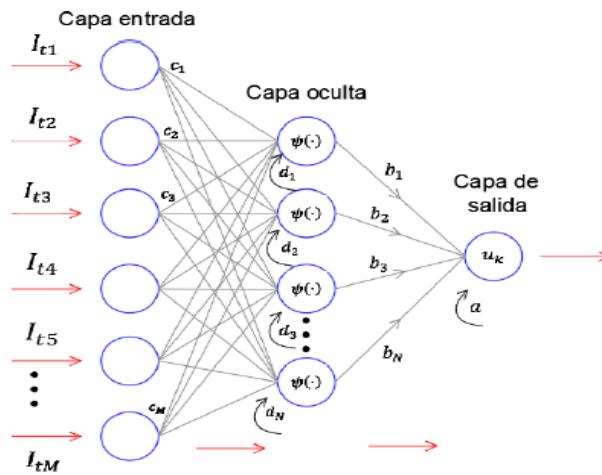


Figura 6. Esquema de una Red Neuronal Artificial
Fuente: (Tami, 2020)

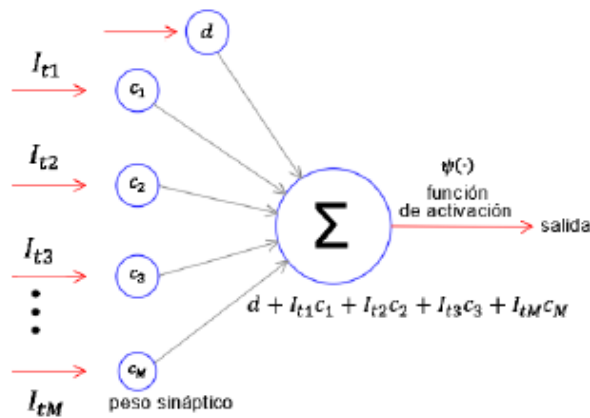


Figura 7. Operación interna en las neuronas de la Red Neuronal Artificial
Fuente: (Tami, 2020)

3.2.4.2. Algoritmo Mini-Max

MiniMax es un método de decisión utilizado para reducir la pérdida máxima esperada en juegos con un contrincante y con información perfecta (para maximizar la ganancia mínima esperada). Este resultado establece que para los juegos bipersonales de suma cero (lo que gana un jugador lo pierde el otro), además de que 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 (Rojas Troncoso, 2021).

En MiniMax los dos contendores se denominan minimizador y maximizador; el minimizador intenta obtener la puntuación más baja posible mientras que el maximizador intenta obtener la puntuación más alta posible. Si el maximizador va ganando, la puntuación del tablero va a ser un valor positivo, pero si el minimizador va ganado en el tablero se verá un valor negativo y estos valores del tablero son calculados mediante algunas ecuaciones heurísticas que son únicas para cada tipo de juego (Lima, 2022).

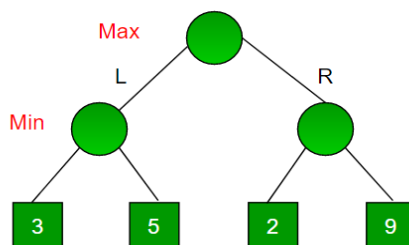


Figura 8. Representación modelo MiniMax
Fuente: (Lima, 2022)

4. METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO

4.1. Metodología

Dentro de este capítulo se presenta la metodología empleada dentro de esta investigación y el contenido de esta tal como se establece en la Figura 9.

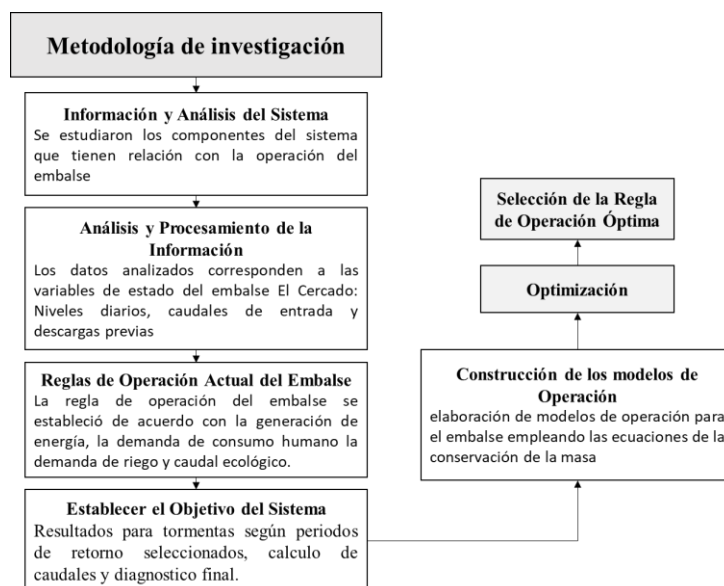


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología de investigación establecida

4.1.1. Información y Análisis del Sistema.

Se estudiaron los componentes del sistema que tienen relación con la operación del embalse tal como caudales de entrada, niveles, y caudales de salida correspondientes a los datos disponibles de la operación del embalse El Cercado en un periodo comprendido entre enero de 2016 a julio de 2022; la información fue suministrada por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR, la cual tiene lecturas de niveles diarios, caudales de entrada y salida controlada del embalse, caudal ecológico, caudal para riego, caudal para generación eléctrica y caudal para acueductos del área de influencia. Con esta información se establecieron las funciones de aproximación, así como las restricciones de descarga, límites de operación del embalse y descargas de emergencia (Rebose por vertedero de excesos).

4.1.2. Procesamiento y Análisis de la Información.

Los datos analizados corresponden a las variables de estado del embalse El Cercado: Niveles diarios, caudales de entrada y descargas previas (Válvula de fondo, Válvula Howell Bunger, PCH y vertedero las cuales fueron analizados para evaluar la mejor condición de operación del embalse; por tal motivo se aplicaron análisis de correlación entre los anteriores datos y los caudales de descarga, los cuales permitieron conocer las variables de entrada con mayor incidencia para la toma de decisiones en la operación actual del embalse y poder establecer las reglas de operación futuras de acuerdo con la aplicación de modelos de aprendizaje.

4.1.3. Regla de Operación Actual del Embalse.

La regla de operación del embalse se estableció de acuerdo con las siguientes condiciones de servicio:

4.1.3.1. Generación de energía.

La utilización del agua en generación de energía se registra como un componente de la demanda, teniendo en cuenta tres premisas que determinan la condición de uso en un momento dado:

- a. La caracterización del uso del agua en actividades de generación eléctrica como uso industrial (Decreto 3930 de 2010, Cap. IV, Art. 16).
- b. El almacenamiento en periodos de tiempo prolongados en embalses y otros reservorios no naturales requeridos para mantener los estándares de generación.
- c. La calidad del agua y la variación en el régimen hidrológico que retorna incluyendo las restricciones de uso frente a otras demandas en competencia.

Para el cálculo del consumo de agua en el proceso de generación de energía se establece a partir del volumen de agua utilizado en los sistemas convencionales de generación hidráulica, sistemas combinados para la generación térmica o el uso de agua en generación de energía por hidroeléctrica. Para este último, utilizan el agua como fuerza hidráulica, donde se trabaja con el volumen efectivo utilizado y no con el volumen total que es sacado del sistema hídrico y que se almacena en represas, durante un periodo de tiempo dado. (Rojas Troncoso, 2021).

Para el cálculo del volumen de agua utilizada se consideran los siguientes conceptos de esta información:

- **Volumen útil diario:** Es el volumen almacenado por encima del nivel mínimo técnico, reportado diariamente por los agentes (según acuerdo Nro. 294 del CON), se expresa en GWh /día y en Mm³ /día.
- **Volumen máximo técnico:** Es 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.
- Relación entre el volumen (Mm³) y el volumen máximo técnico del embalse expresado en porcentaje.
- **Volumen mínimo técnico:** Es el volumen máximo técnico menos el volumen útil del embalse.

4.1.3.2. Demandas de Consumo Humano.

El cálculo de la demanda de agua para uso doméstico se constituye a partir de la estimación del consumo que un habitante necesita para su requerimiento fundamental en un día; el cálculo del uso del agua en el sector doméstico se establece a partir de la definición de los siguientes 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 (dotación).

- 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 (Resolución No. 330 del 08 de junio de 2017).

Dichas demandas fueron tomadas de la actualización de los estudios y diseños efectuada por la Agencia de Desarrollo Rural-ADR y se detallan en el numeral 5.3.4 del presente documento.

4.1.3.3. Demandas de Riego.

Concernientes a la cantidad de agua y al momento de su aplicación en un cultivo con el fin de compensar el déficit de humedad del suelo durante un periodo vegetativo, se determinan a partir de la evapotranspiración del cultivo (ETc) menos el agua aportada por las precipitaciones del lugar; Cuando la precipitación efectiva es mayor que el requerimiento de riego en el cultivo, la demanda o riego bruto es igual a cero, en el caso que la precipitación efectiva sea menor al uso consuntivo del cultivo, la demanda se establece con la diferencia entre la ETc y el agua que se aporta por precipitación (IDEAM, 2015).

Dichas demandas fueron tomadas de la actualización de los estudios y diseños efectuada por la Agencia de Desarrollo Rural-ADR y se detallan en el numeral 5.3.4 del presente documento.

4.1.3.4. Caudal Ecológico.

De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 (modificado por el Decreto 050 de 2018) artículo 2.2.3.3.1.3, el caudal ambiental es el “Volumen de agua por unidad de tiempo, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos, en términos de régimen y calidad”.

De acuerdo con la definición anterior, el caudal ambiental corresponde a un insumo para la estimación de la oferta hídrica disponible sobre los cuerpos de agua y por lo tanto todos los instrumentos que involucran la estimación de la oferta hídrica disponible deberán armonizarse y sincronizarse hacia el futuro en un marco de prioridades acorde con las realidades regionales (Minambiente, 2022).

4.1.4. Objetivos del Sistema

El embalse será utilizado para la generación hidroeléctrica, para el suministro de agua para riego, acueductos y para el control de caudal ecológico; estos propósitos fueron evaluados mediante funciones para evaluar su cumplimiento. Para tal fin, se emplearán funciones de poder como las utilizadas por Castelletti, et al. 2011.

4.1.4.1. Suministro de Agua para Riego

$$J_{min}^{hyd} = \sum_{t=0}^T (g_t^{sum}) \tag{1}$$

$$g_t^{sum} = \begin{cases} 0 & \text{si } q_t^{sum} > w_t \\ (w_t - q_t^{st})^2 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

En donde J_{min}^{hyd} es la función objetivo para suministro de agua para riego la cual se buscó minimizar, g_t^{sum} es la función para el déficit en el suministro de agua en cada paso de tiempo t , w_t es la

demanda diaria de agua para riego, q_t^{st} es la descarga del embalse, T es el total de los pasos de tiempo evaluados. t es el periodo de tiempo de análisis actual.

4.1.4.2. Suministro de Agua para Acueductos

$$J_{min}^{acd} = \sum_{t=0}^T (g_t^{sum\ acd}) \quad (2)$$

$$g_t^{sum\ acd} = \begin{cases} 0 & \text{si } q_t^{sum\ acd} > w_{t\ acd} \\ (w_{t\ acd} - q_t^{st})^2 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

En donde J_{min}^{acd} es la función objetivo para suministro de agua para acueductos la cual se buscó minimizar, $g_t^{sum\ acd}$ es la función para el déficit en el suministro de agua en cada paso de tiempo t , $w_{t\ acd}$ es la demanda diaria de agua para acueductos, q_t^{st} es la descarga del embalse, T es el total de los pasos de tiempo evaluados. t es el periodo de tiempo de análisis actual.

4.1.4.3. Generación Eléctrica

$$P_{max}^{ener} = \sum_{t=0}^T (g_t^{turb}) \quad (3)$$

$$g_t^{turb} = \begin{cases} 0 & \text{si } r_t \leq q_t^{min} \\ \min(r_t, q^{max}) & \text{de otra manera} \end{cases}$$

En donde P_{ener}^{max} es la función objetivo de maximización de la potencia generada por turbinado, g_t^{turb} es el caudal turbinado en el tiempo t , r_t es la descarga del embalse, q^{max} es el caudal máximo que puede salir por turbinado, q^{min} es la descarga mínima que puede salir a través de las turbinas.

4.1.5. Construcción de los Modelos de Operación

Consiste en la elaboración de modelos de operación para el embalse empleando las ecuaciones de la conservación de la masa (balance hídrico) para cada paso de tiempo del periodo de análisis y considerando los componentes físicos y restricciones propias del sistema del embalse. Para la construcción de estos modelos de operación se tomaron los datos de caudales de entrada para el periodo de análisis del embalse de enero de 2016 a julio de 2022, los datos de evaporación media diaria del embalse, para los balances hídricos se tomó la batimetría del embalse que relaciona nivel, volumen y superficie.

Para el cálculo de los caudales de salida se empleó los datos obtenidos del proceso de medición en la descarga del embalse creando un modelo de operación mediante Redes Neuronales Artificiales y MiniMax. Este modelo considera las variables de entrada utilizadas en los modelos de aprendizaje para identificación de las reglas de operación del sistema; para las descargas se tiene en cuenta los caudales máximos y mínimos que pueden salir por la turbina, válvulas de desfogue de fondo, Válvula Howell Bunger o por el vertedero en función del nivel del embalse.

Los modelos de operación fueron construidos en Python, que es un lenguaje de escritura ágil, escalable, fuerte y de código abierto, perfecto para la construcción de aplicaciones matemáticas y de ingeniería, que permite plasmar ideas complejas con unas pocas líneas de código lo que no es posible con otros lenguajes para ser integrados directamente en el módulo de optimización JMETALPY para Redes Neuronales Artificiales y algoritmo MiniMax mediante el aplicativo WUIN.

4.1.6. Optimización

Para efectuar la optimización, inicialmente fue necesario acoplar el modelo de operación a los algoritmos de optimización NSGAI y MOEA/D, donde se eligen los parámetros de su funcionamiento para luego ser incluidos dentro del paquete JMETALPY y realizar su respectivo procesamiento; los pasos que efectúa JMETALPY se evidencian en la

Figura 10.

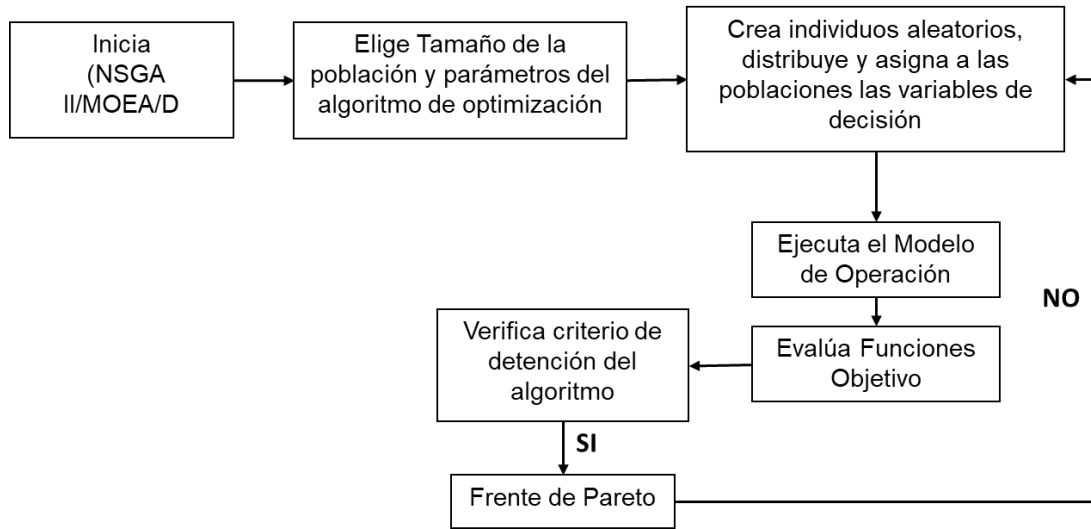


Figura 10. Flujograma optimización en JMETALPY

Para el tercer método el algoritmo MiniMax se incluyen dentro del proceso codificación Python, donde a partir de la inclusión de la información en formato Excel, se usa el aplicativo WUIN desarrollado por (Troncoso Rojas, 2021), donde se efectuar la corrida de los parámetros descritos en la Figura 11.

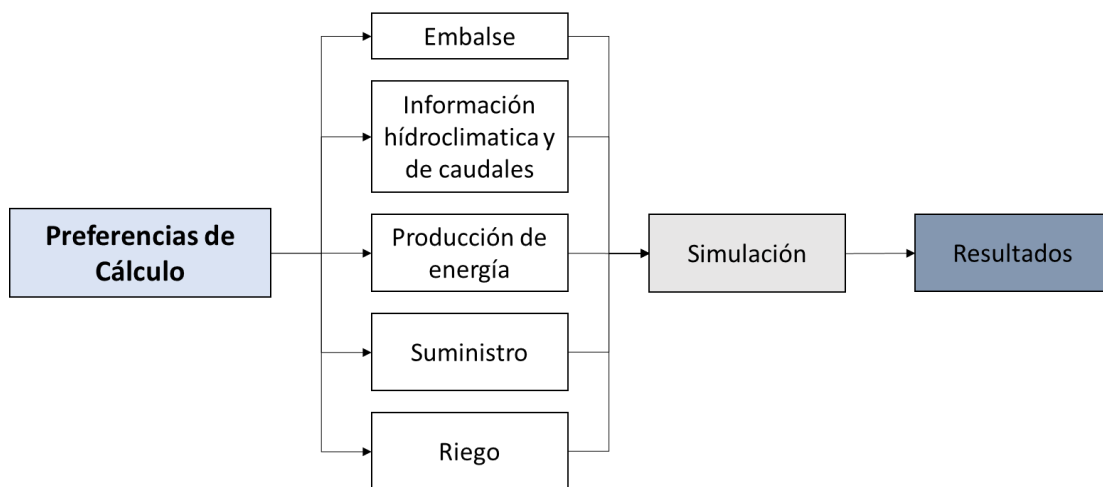


Figura 11. Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin
Fuente: (Troncoso Rojas, 2021)

4.1.7. Selección de la Regla de Operación Óptima

Para establecer el mejor modelo de operación a partir de los modelos de optimización, se efectúa la comparación con el proceso de operación inicial del embalse y los algoritmos NSGA II y MOEA/D, el cual nos permite determinar el mejor frente de Pareto entre estas para luego realizar comparativo con el algoritmo MiniMax, donde se seleccionan las reglas de operación que se consideran más adecuadas respecto a los intereses u objetivos del presente estudio.

4.2. CASO DE ESTUDIO

El departamento de la Guajira tiene una extensión de 20.848 km, está localizado a 1.121 km al norte de Bogotá a 220 km al noreste de Barranquilla y 170 km de Santa Marta; gran parte del departamento está conformado por una península 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 inicia su formación geomorfológica al final del periodo cretáceo, en el marco de la era mesozoica, luego de un evento geológico donde las placas tectónicas del Caribe y la Sudamericana chocan, desplegando la parte norte de la cordillera de los Andes y 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. La Guajira se encuentra situada en el extremo norte de Colombia en la parte más septentrional de la América del Sur y localizado entre los 10 y 12º de latitud norte y los 71 y 73º de longitud oeste, cerca de la mitad corresponde a la península de la Guajira. 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. Riohacha (la capital), Dibulla, Barrancas, El Molino, Fonseca, Hato Nuevo, Maicao, Manaure, San Juan del Cesar, Uribia, Urumita, Villanueva, Albania, distracción, la jagua del Pilar. (Corpoguajira, POMCA Río Ranchería, 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 de 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; esta cuenca tiene su origen en el Cerro la Horqueta, ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta y realiza un recorrido de ciento cincuenta kilómetros desde su nacimiento aproximadamente a unos 3.000 metros sobre el nivel del mar, es importante resaltar que es una de las zonas más desérticas del país.

La cuenca del Río Ranchería es de suma importancia para el municipio 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 el riego

a los distritos de Ranchería y San Juan del Cesar, además de surtir de agua a ocho municipios ubicados en el área de influencia, que son Distracción, Fonseca, Manaure, Uribia, Maicao, Hato Nuevo, Barrancas y Albania y en un futuro generar energía eléctrica; según Corpoguajira la presa tiene una capacidad de ciento noventa y ocho millones de metros cúbicos de agua. (Corpoguajira, POMCA Río Rancheria, 2011)

4.2.1. Descripción del sistema del embalse multipropósito de la Represa Ranchería

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 (ver Figura 12). 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 y la precipitación media de la zona 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 (Corpoguajira, POMCA Río Rancheria, 2011).

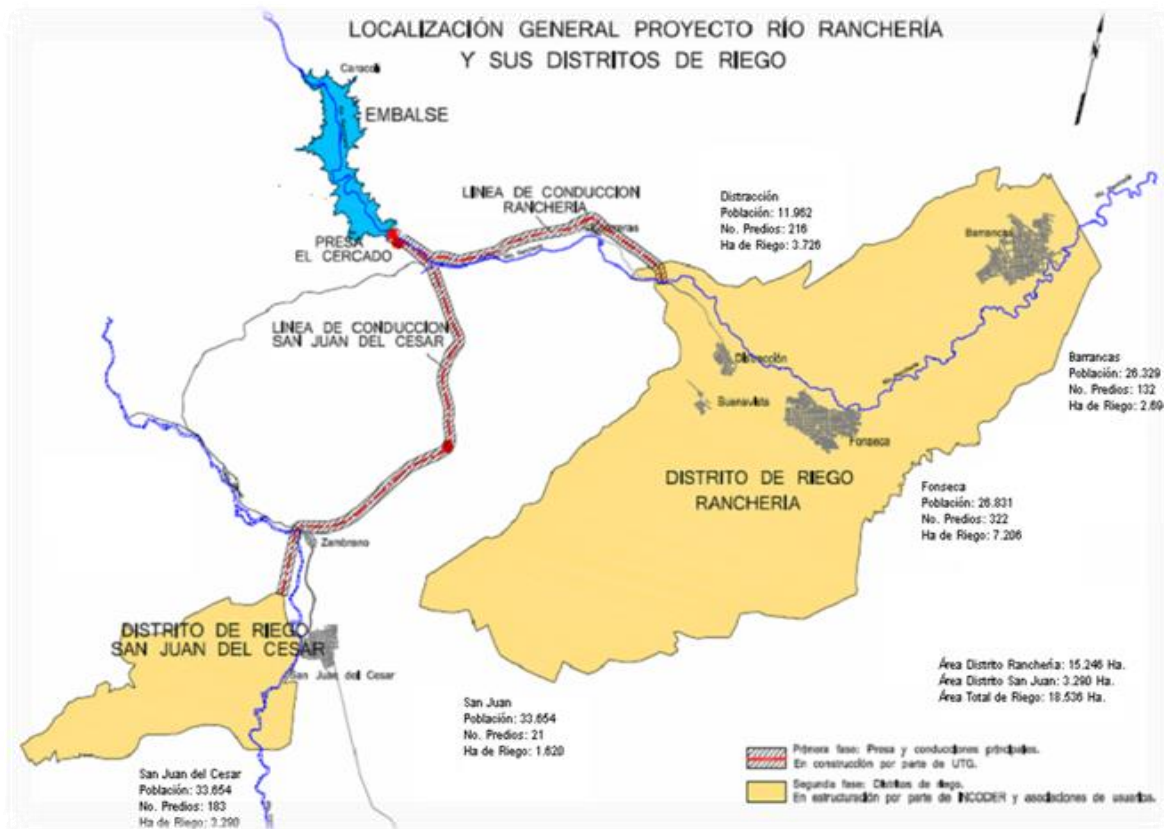


Figura 12. Localización y distribución del proyecto.
Fuente: (ADR A. d., 2021)

Los principales antecedentes del proyecto Río Ranchería – La Guajira se centran en sus cuatro etapas del proceso de desarrollo que se describen a continuación:

4.2.1.1. Etapa de Factibilidad

Como antecedentes primarios entre los años 1.985 a 1.987, 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 1.994 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, la cual revisó y ajustó los estudios de demanda de agua para el distrito de riego. (FINDETER, 2020)

En el año de 1.998 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 El Guanábano; por problemas de estanqueidad se descartó el embalse de El Guanábano detectados en el vaso, por lo cual se seleccionó el sitio de El Cercado (ADR A. d., 2021).

4.2.1.2. Diseños Iniciales.

Los diseños detallados del proyecto Río Ranchería iniciaron el 11 de enero de 2.002 y finalizaron el 18 de febrero de 2.005; estos incorporaron el diseño de las obras multipropósito y los distritos proyectados de Ranchería y San Juan del Cesar; los estudios y diseños fueron ejecutados por la Unión Temporal Guajira dentro del objeto del contrato INAT No. 140 de 2001 (ADR A. d., 2021).

4.2.1.3. Construcción de una primera fase del proyecto

En el año 2.005 fue declarada la importancia estratégica de la primera fase del proyecto multipropósito, la cual consistió en la construcción de la presa El Cercado y las conducciones principales hacia las áreas de los distritos de riego proyectados de Ranchería y San Juan del Cesar, quedando disponibles los diseños de los sistemas de riego, drenaje y vías a nivel principal, secundario y predial para que se llevara a cabo su construcción en fases posteriores.

Esta declaratoria de importancia estratégica se dio a través del documento CONPES 3362 del 14 de julio de 2.005 con lo cual fueron adelantadas las obras de construcción de la primera fase entre el 12 de enero de 2.006 y el 30 de noviembre 2.010 (ADR A. d., 2021).

4.2.1.4. Transición:

Con la terminación de la construcción de la presa El Cercado, las conducciones principales para las áreas de riego de los distritos proyectados de Ranchería y San Juan del Cesar, así como de las demás obras complementarias en noviembre de 2010, el proyecto se encuentra en una etapa de transición correspondiente a la ejecución de actividades continuas de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) y seguimiento y control a las obras ejecutadas en la fase I administrado por el INCODER hasta el 2.015.

El INCODER dentro de su proceso de liquidación entregó a la ADR el proyecto multipropósito Río Ranchería, según Acta de Entrega y Recibo No. 0098 del 30 de noviembre de 2016, protocolizada mediante el Acta No. A18 del 5 de diciembre de 2.016. Es así como la Agencia de Desarrollo Rural (ADR) debió asumir la responsabilidad de continuar con la AOM de la infraestructura del proyecto construida en la Fase I (ADR A. d., 2021).

4.2.1.5. Actualización de diseños.

En el año 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 de este, con el fin que se diera inicio al proceso precontractual para la contratación de estos (FINDETER, 2020).

4.2.1.6. Objetivo del proyecto

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; 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 buscaba 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 (ver Figura 13 y Figura 14).
- **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 13. Represa El Cercado al 2021.
Fuente: Google Earth*



*Figura 14. Vista de la presa El Cercado frontal.
Fuente: (ADR A. d., 2021)*

4.3. Descripción del problema

Un embalse es un sistema de almacenamiento que permite realizar la regulación de un caudal para la prestación de un servicio, sea un acueducto, un distrito de riego, controlar zonas de inundación y generación de energía dentro de su proceso de operación. Lo que se pretende es establecer un modelo de optimización que nos permita establecer las condiciones de servicio óptimas de operación, bajo parámetros técnicos que nos permita escoger la mejor decisión de operación y comportamiento a mediano y largo plazo.

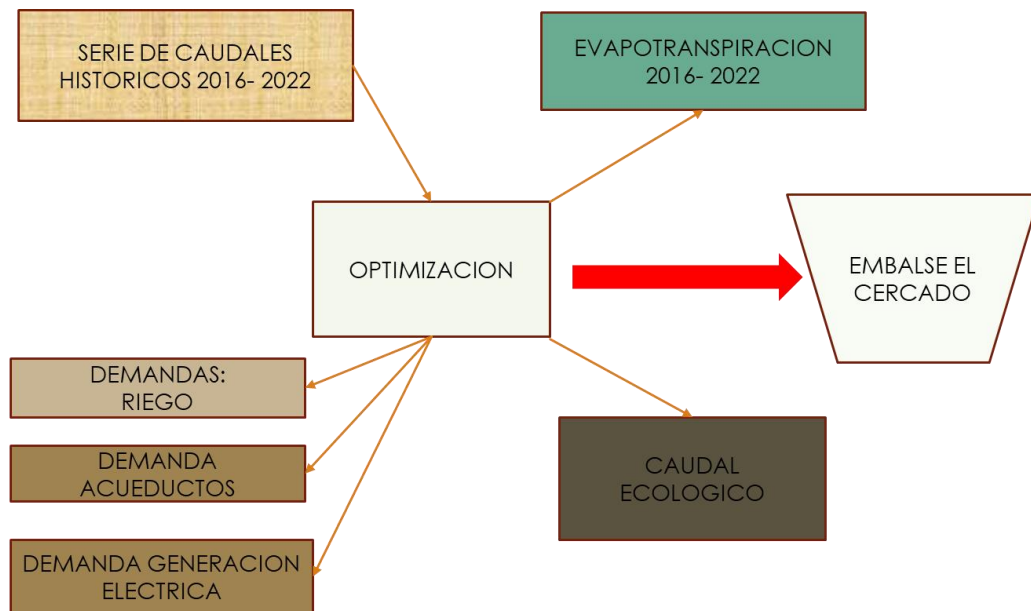


Figura 15. Metodología para el análisis de información

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

5.1. Información y Análisis del Sistema

5.1.1. Infraestructura del proyecto

Las obras principales obras que componen el proyecto son según FINDETER: (FINDETER, 2020)

Presa El Cercado:

La Presa El 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 16. Vista de la presa El Cercado.
Fuente: (ADR A. d., 2021)

Cuerpo de Presa:

Las características principales del cuerpo de presa se presentan en la Tabla 1.

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 grauvas

Tabla 1: Características del cuerpo de la presa.
Fuente: (ADR A. d., 2021)

Descarga de Fondo

La conducción de descarga de fondo es regulada por la válvula Howell-Bunger, la cual vierte el agua directamente al río Ranchería. Cumple la función de aportar el agua demandada por el área de riego de Ranchería; las características principales de la descarga de fondo se presentan en la Tabla 2:

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

Tabla 2: Parámetros de la descarga de fondo.
Fuente: (ADR A. d., 2021)



Figura 17. Vista de la válvula anular de descarga de fondo.
Fuente: (Avila, 2021)

Del embalse, por el interior del cuerpo de presa, transitan 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 Figura 17. Vista de la válvula anular de descarga de fondo., 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 clausurada actualmente y 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- Bungler 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 (ADR A. d., 2021).

Aliviadero

Cuenta con 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 como se muestra en la Figura 18.

Las características principales del aliviadero se presentan en la Tabla 3 :

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)

Tabla 3: Parámetros del aliviadero.
Fuente: (ADR A. d., 2021)



Figura 18. Vista del aliviadero.
Fuente: (Avila, 2021)

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 vagón. 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. (ADR A. d., 2021)



*Figura 19. Presa derivadora.
Fuente: (Avila, 2021)*

Distrito de riego Ranchería

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 del área de influencia del Distrito de riego Ranchería corresponden a Fonseca, Barrancas y Distracción en el Departamento de la Guajira. (FINDETER, 2020)

La conducción desde el embalse El 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, 2020)

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 tiene una capacidad de transportar 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. (ADR A. d., 2021)

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 20. Canal de aducción de la conducción Ranchería
Fuente: (Avila, 2021)*

Distrito de riego San Juan del Cesar

El área del Distrito de Riego San Juan del Cesar cuenta con una superficie bruta de 4.112 ha y neta beneficiada de 3.000 Ha. Está ubicada en jurisdicción del municipio del mismo nombre y 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, 2020)

La conducción desde el embalse El 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 21. Tanque de amortiguación conducción San Juan del Cesar.
Fuente: (ADR A. d., 2021)*

La conducción cuenta 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.



Fuente: (Avila, 2021)

Figura 22. Sistema distribuidor (Deriva a la conducción San Juan. PCH y Descarga Howell Bunger.

Distribución de agua 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 ser abastecida es de alrededor de 400.000 habitantes. (FONADE, 2015)

5.1.1.1. Descripción de la central hidroeléctrica

Se proyecta la construcción de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) con una capacidad de generar: entre 4 a 5 Megavatios dependiendo de las condiciones de caudal (demandas de riego y acueducto) el cual pretende beneficiar aproximadamente entre 2.000 y 3.000 viviendas. Se consideró la cota 326 m.s.n.m como nivel de las turbinas, dato fundamental para la obtención de la cabeza bruta de generación, empleando turbinas tipo Francis. (FONADE, 2015)

Resumen de infraestructura

Con base en lo anterior, se muestra la siguiente tabla donde se presenta el resumen de la infraestructura construida y por construir:

COMPONENTES	DETALLES	CANTIDAD
Represa El Cercado tipo enrocado con cara de concreto	Altura	110 m
	Longitud	378 m
	Ancho de cresta	8 m
	Volumen total	198 m ³
Embalse	Caudal medio del río	7,76 m ³ /s
Rebosadero	Longitud	404 m
	San Juan del Cesar	15941 m - D =1,30m
	Ranchería	15941 m - D = 1,30m
Conducciones	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

Tabla 4: Resumen Infraestructura Represa El Cercado

5.1.1.2. Hidroclima

Caudales aportantes

Las características de la serie histórica de los afluentes del embalse El Cercado, están basados en mediciones diarias de caudal ingresado realizado por la Agencia de desarrollo Rural – ADR del periodo de enero 2016 a julio de 2022, tomados directamente del embalse, mediante telemedición.

Para los demás caudales del periodo 1971 al 2006 fueron tomados información histórica de la estación Caracolí (15067210) y Cercado Automático (15067020) ubicadas aguas arriba y aguas abajo del embalse, respectivamente y del 2006 al 2015, esta información fue obtenida de los registros históricos de caudales tomados por el Instituto Colombiano de Desarrollo Rural-INCODER (Entidad Liquidada).

CAUDALES MENSUALES HISTORICO EN LA ENTRADA DEL EMBALSE													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
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	7.73
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	9.67
1973	2.80	2.60	2.40	3.37	2.90	4.59	3.10	5.32	12.89	20.28	40.51	7.90	9.06
1974	3.75	2.76	2.19	3.49	18.51	6.36	4.09	4.74	12.00	14.16	22.87	8.19	8.59
1975	4.83	3.54	3.16	2.74	4.09	4.78	7.27	6.71	8.35	13.42	20.71	32.40	9.33
1976	9.00	5.13	4.12	4.71	4.39	6.12	3.16	3.21	3.54	9.81	12.04	4.60	5.82
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	6.92
1978	3.31	2.86	2.72	15.25	9.40	8.87	5.40	4.50	8.01	11.81	10.93	5.04	7.34
1979	3.19	2.78	2.72	4.52	9.82	11.84	6.53	5.74	14.88	19.95	20.70	11.02	9.47
1980	6.81	5.83	3.83	4.31	6.29	5.35	4.49	6.20	5.52	7.87	11.44	5.50	6.12
1981	4.45	5.26	5.22	24.11	27.85	15.64	9.27	9.38	11.22	14.74	14.47	7.11	12.39
1982	4.79	4.01	3.35	3.68	15.46	9.33	5.99	4.96	5.80	16.80	5.62	6.60	7.20
1983	3.97	3.83	3.90	13.86	17.79	12.07	4.77	5.27	6.09	9.16	11.55	6.19	8.20
1984	4.30	3.80	2.90	3.13	2.75	3.94	4.69	4.78	11.22	11.88	14.08	8.55	6.33
1985	5.47	4.47	4.11	5.35	12.46	8.29	5.41	5.51	6.72	16.92	14.72	16.41	8.82
1986	6.43	4.77	4.36	8.20	15.23	12.37	5.33	5.32	8.11	13.47	8.28	5.11	8.08
1987	3.88	2.97	2.70	7.64	13.44	10.51	6.25	6.28	6.35	20.14	17.98	8.54	8.89
1988	4.40	2.88	2.20	4.08	5.26	7.69	4.53	8.76	15.95	24.95	18.84	9.33	9.07
1989	5.88	4.86	3.95	2.86	5.87	4.66	3.97	3.90	8.59	6.40	6.25	7.41	5.38
1990	3.45	2.92	1.78	8.99	14.10	8.78	6.44	6.67	8.64	19.46	16.91	10.53	9.06
1991	4.01	3.31	3.52	3.99	6.09	4.48	3.54	3.53	6.54	9.13	9.57	6.51	5.35
1992	4.72	3.93	3.62	4.01	12.96	8.74	5.86	5.63	9.47	7.51	6.72	5.14	6.53
1993	3.65	3.20	3.51	7.04	14.34	8.04	4.41	4.90	6.27	6.06	9.70	6.03	6.43
1994	3.56	3.02	2.71	3.66	5.81	3.57	2.73	2.68	6.75	19.24	11.68	5.37	5.90
1995	5.42	3.77	4.72	6.20	11.58	9.76	5.88	14.45	15.24	18.59	9.15	6.02	9.23
1996	4.48	3.63	3.76	4.07	11.84	4.78	5.75	5.07	11.98	13.04	13.78	14.13	8.03
1997	7.49	5.83	4.36	4.78	4.88	11.12	4.31	3.57	7.64	10.59	8.81	4.07	6.45
1998	1.82	3.17	1.77	14.59	17.23	7.87	7.49	5.65	6.08	8.29	6.00	8.82	7.40
1999	7.36	4.07	2.63	6.17	8.01	9.06	9.46	6.83	12.48	20.36	17.86	26.01	10.86
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	5.43
2001	6.04	3.81	3.28	2.23	8.93	5.25	3.15	2.89	3.42	7.75	7.36	8.33	5.20
2002	2.44	1.46	1.73	5.10	5.82	9.38	4.15	3.62	5.65	8.52	6.85	5.32	5.00
2003	2.54	1.74	1.58	6.84	4.99	5.24	3.22	4.49	8.71	13.06	14.99	9.16	6.38
2004	3.84	2.44	1.76	5.20	9.06	6.47	4.06	5.12	7.53	10.37	16.86	7.92	6.72
2005	5.41	3.83	3.69	5.66	11.10	17.34	11.26	6.52	6.25	12.48	18.91	9.26	9.31
2006	4.86	3.65	3.53	5.31	8.89	16.41	9.87	6.55	8.19	11.13	16.74	9.06	8.68
2011	15.23	8.70	5.39	9.56	31.63	33.94	11.62	11.90	19.85	21.86	26.43	35.21	19.28
2012	9.66	5.87	5.94	13.29	17.38	10.02	6.27	8.04	8.68	20.35	18.74	13.04	11.44
2013	5.49	3.77	5.95	6.70	14.76	7.95	6.43	5.32	9.16	8.61	9.47	4.95	7.38
2014	3.49	2.87	2.71	3.60	4.46	3.04	2.58	5.13	6.86	10.38	8.04	6.68	4.99
2015	3.93	3.32	2.81	3.31	3.46	4.15	3.08	3.64	4.50	9.35	6.63	4.17	4.36
2016	3.37	2.30	2.15	6.54	15.21	11.01	5.04	7.92	9.00	12.10	20.81	10.04	8.79
2017	6.21	4.92	8.00	8.11	35.02	11.57	9.07	7.47	10.35	13.36	26.80	8.54	12.45
2018	5.96	3.79	2.95	4.25	9.45	4.17	3.62	5.05	6.43	19.60	8.61	4.55	6.54
2019	3.46	2.68	2.33	3.55	6.47	6.91	3.04	4.52	5.62	8.40	4.79	3.15	4.58
2020	2.88	2.09	1.98	1.74	4.90	6.96	3.45	4.18	5.21	12.50	20.06	7.30	6.10
2021	4.47	3.45	3.12	4.80	7.75	5.07	5.00	13.74	10.40	12.63	7.72	5.37	6.96
2022	3.79	3.19	3.60	8.35	10.49	10.67	6.08						6.60
Media	4.98	3.78	3.41	6.43	11.10	8.87	5.44	5.90	8.22	13.37	13.76	8.80	7.86
Mínimos	1.82	1.46	1.58	1.74	2.75	3.04	2.58	2.68	3.42	6.06	4.79	3.15	4.36
Máximos	15.23	8.70	8.00	24.11	35.02	33.94	11.62	14.45	19.85	24.95	40.51	35.21	19.28
Mediana	4.47	3.63	3.28	4.80	9.40	8.04	5.04	5.32	8.06	12.49	12.90	7.21	7.38
Media 1971-2006	4.76	3.73	3.25	6.52	10.33	8.62	5.45	5.57	8.39	13.31	13.58	8.63	7.68

Tabla 5: Registro Mensual de Caudales Represa El Cercado

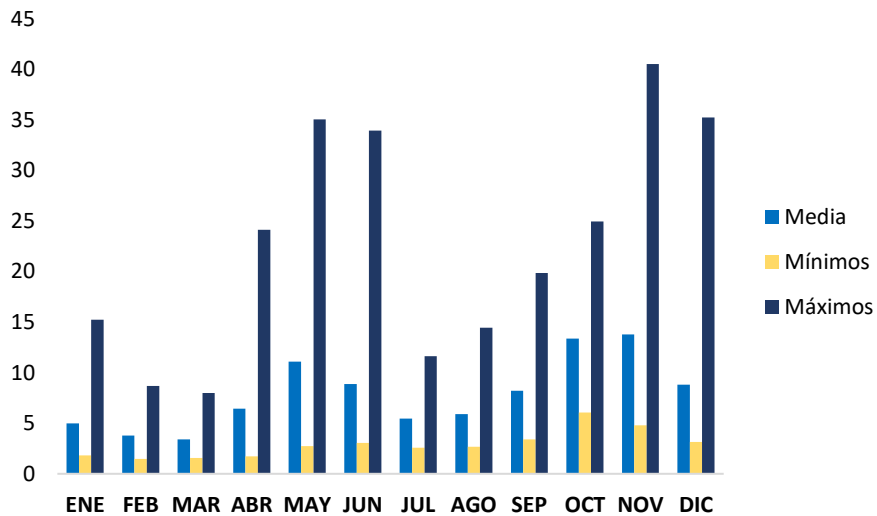


Figura 23. Caudales Mensuales Rio Ranchería.

Precipitación

Para el análisis se consideran los datos históricos de precipitación de 16 estaciones los cuales fueron tomados del proyecto. (ADR A. d., 2021)

Precipitación media mensual y anual													
ESTACIÓN	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VALOR ANUAL
Sabanas de Manuela	6.65	9.21	20.54	94.39	163.32	93.56	71.72	112.51	148.57	156.48	111.63	35.1	1023.68
Cañaverales	8.04	9.42	31.85	115.75	169	105.67	93.99	133.23	149.53	194.69	113.75	39.41	1164.33
Guacamayo	4.67	2.45	14.29	72.6	140	74.27	52.66	102.77	138.34	140.84	91.32	35.65	869.86
El Ejemplo	2.49	10.66	2.98	92.87	98.66	52.22	75.16	98.61	122.94	125.18	78.49	37.48	797.74
Hda El Palmar	10.43	12.26	5.96	77.27	140.03	95.68	63.43	56.92	69.37	98.26	46.72	39.02	715.35
Hda La Esperanza	7.91	12.17	9.15	66.29	89.57	68.74	40.37	93.61	134.79	149.22	135.64	58.84	866.3
Hda San Francisco	11.11	22.27	12.28	86.76	89.9	88.03	54.79	148.83	185	148.37	131.57	68.56	1047.47
Hda Pajonales	8.11	5.06	5.66	87.74	114.76	58.37	64.88	83.25	133.57	124.71	88.17	45.81	820.09
La Gloria	11.36	5.58	20.46	83.34	127.5	59.67	44.51	100.82	174.61	186.21	155.8	62.09	1031.95
Roche	7.51	3.1	13.57	66.85	116.74	82.48	62.29	106.72	124.28	120.83	133.25	44.02	881.64
La Paulina	6.93	1.91	13.65	78.96	92.97	88.45	68.24	96.84	125.23	109.76	89.38	24.94	797.26
Camp Intercor	14.2	15.25	4.51	92.88	136.27	73.73	51.87	101.98	155.21	177.9	161.73	53.92	1039.45
Hda La Cruz	9.4	5.95	11.21	71.87	103.03	46.58	38.48	88.21	123.28	127.22	108.36	40.59	774.18
Laguna de Oxidación	2.53	4.96	11.37	73.23	123.05	61.72	54.19	61.32	146.96	161.1	123.23	31.59	855.25
La Mina	10.56	5.07	11.38	64.42	118.51	49.1	55.1	89.77	155.33	153.43	154.96	58.57	926.2
Apto Almirante Padilla	3.8	1.46	4.91	27.65	72.64	46.78	16.05	48.2	135.32	143.94	81.37	32.98	615.1
Media	7.86	7.92	12.11	78.30	118.50	71.57	56.73	95.22	138.90	144.88	112.84	44.29	889.12
Mínimos	2.49	1.46	2.98	27.65	72.64	46.58	16.05	48.20	69.37	98.26	46.72	24.94	615.10
Máximos	14.20	22.27	31.85	115.75	169.00	105.67	93.99	148.83	185.00	194.69	161.73	68.56	1164.33
Mediana	7.91	5.95	11.38	78.30	118.50	71.57	55.10	96.84	138.34	144.88	112.84	40.59	869.86

Tabla 6: Registro Mensual de precipitación Cuenca Rio Ranchería

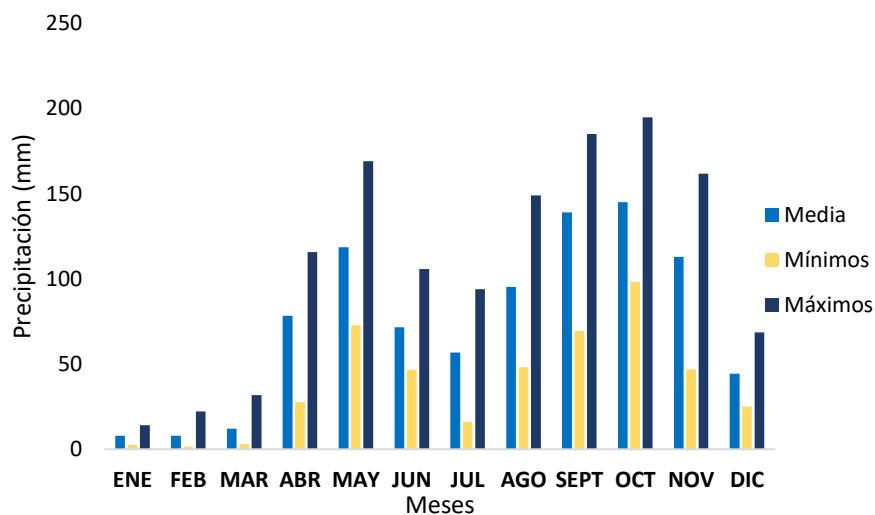


Figura 24. Precipitación Mensual Rio Ranchería.

Temperatura

Para el análisis se consideran los datos históricos de Temperatura los cuales fueron tomados del proyecto. (ADR A. d., 2021)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MED	26.89	27.34	28.00	28.23	27.92	28.44	28.89	28.62	27.70	27.01	26.83	26.68	27.74
MAX	37.00	38.40	40.00	40.00	37.60	40.40	39.60	39.20	38.50	38.00	39.00	39.00	40.40
MIN	16.40	16.00	16.00	15.60	15.40	12.40	17.00	19.00	17.60	17.00	16.00	17.00	12.40

Tabla 7: Registro Mensual de Temperatura Cuenca Rio Ranchería

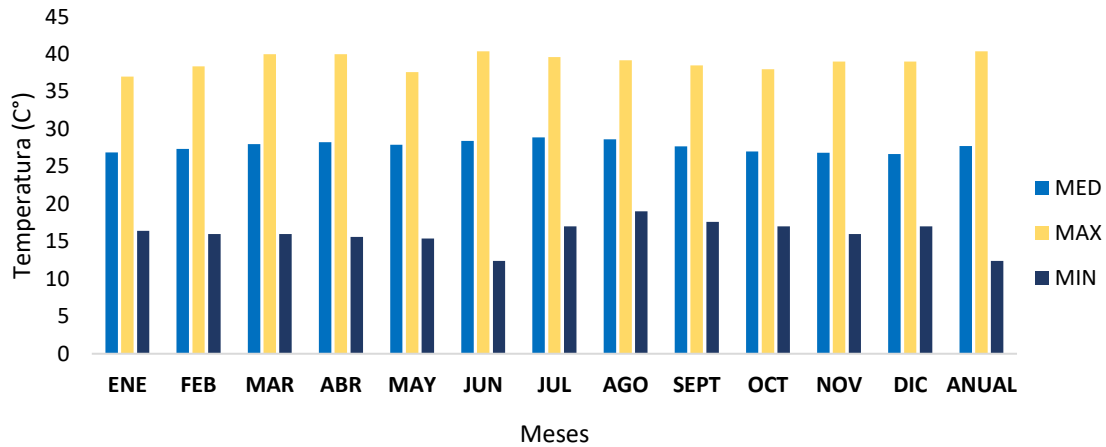


Figura 25. Temperatura Mensual Rio Ranchería

Evaporación

Para el análisis se consideran los datos históricos de Evaporación los cuales fueron tomados del proyecto. (ADR A. d., 2021)

EVAPORACION MENSUAL (EN EVAPORIMETRO mm)												
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2016	202	224	251	180	175	196	197	172	157	115	120	145
2017	187	194	195	169	138	135	173	187	113	123	119	155
2018	176	216	230	188	164	160	219	193	148	112	146	189
2019	205	217	235	215	160	164	226	202	148	123	163	193
2020	212	229	257	233	198	158	200	179	145	138	90	164
2021	196	213	240	173	187	148	220	195	146	136	123	192
2022	204	221	248	211	194	144	226					
MED	197	216	237	196	174	158	209	188	143	125	127	173
MAX	212	229	257	233	198	196	226	202	157	138	163	193
MIN	176	194	195	169	138	135	173	172	113	112	90	145

Tabla 8: Registro Mensual de Evaporación Presa El Cercado

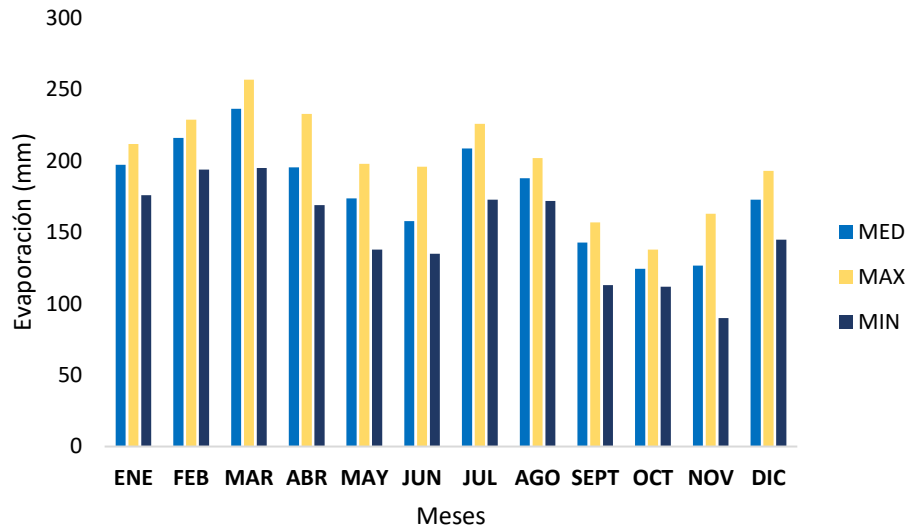


Figura 26. Evaporación Mensual Presa El Cercado

5.2. Procesamiento y Análisis de la Información

Los datos utilizados en el presente estudio están relacionados con la operación del embalse El Cercado, en el periodo comprendido entre enero de 2016 y julio de 2022 a nivel diario. Se tiene información disponible de caudales de entrada y salida controlada del embalse, caudal ecológico, caudal para riego, caudal para generación eléctrica y caudal para acueductos del área de influencia. Con estos parámetros se establecieron las funciones de aproximación, así como las restricciones de descarga, límites de operación del embalse y descargas de emergencia (Rebose por vertedero de excesos). Esta información fue suministrada por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR. En la Figura 27 se muestra los valores de caudales de entrada y salida para el embalse dentro del periodo de análisis (enero de 2016 a julio de 2022).

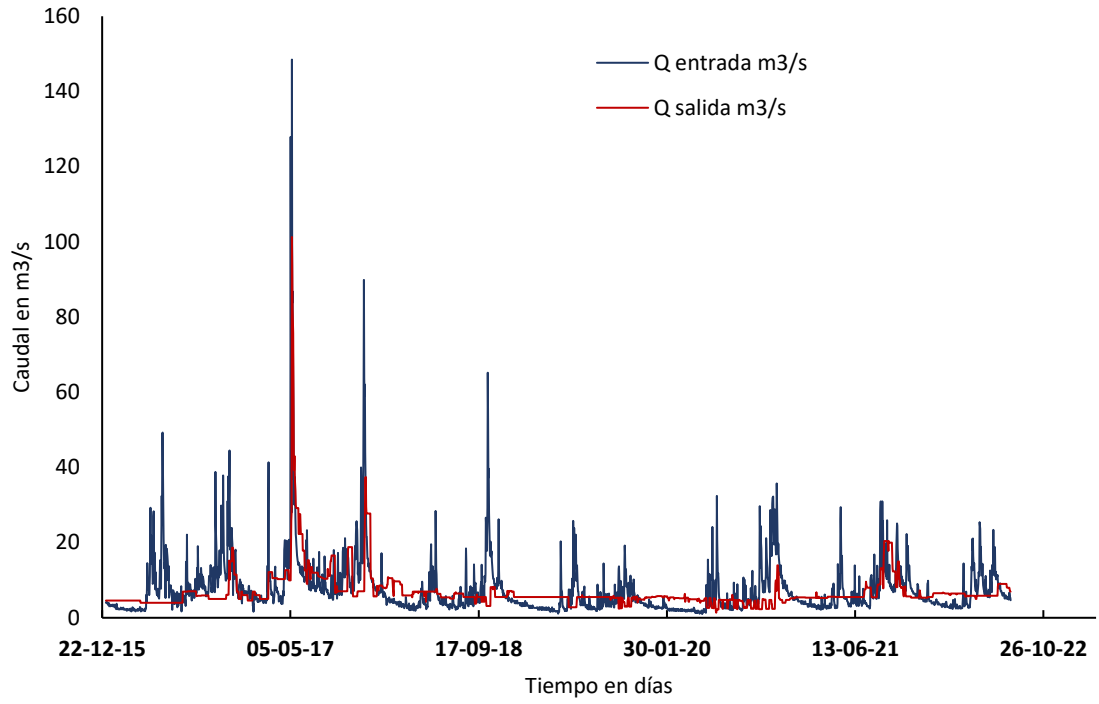


Figura 27. Caudales de entrada y de salida del embalse El Cercado para el periodo enero 2016 a julio 2022

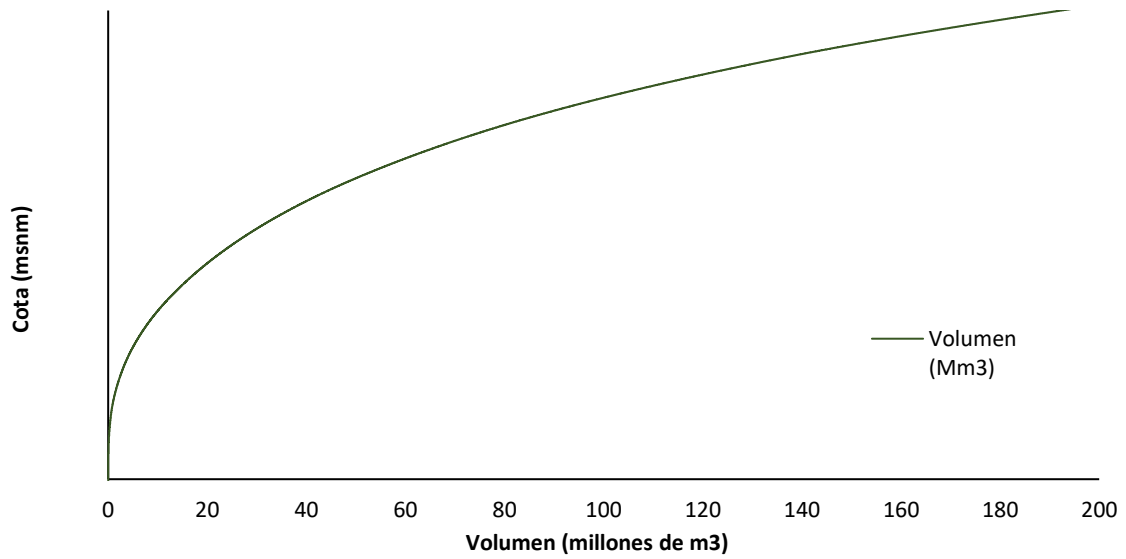


Figura 28. Nivel vs Volumen del embalse El Cercado

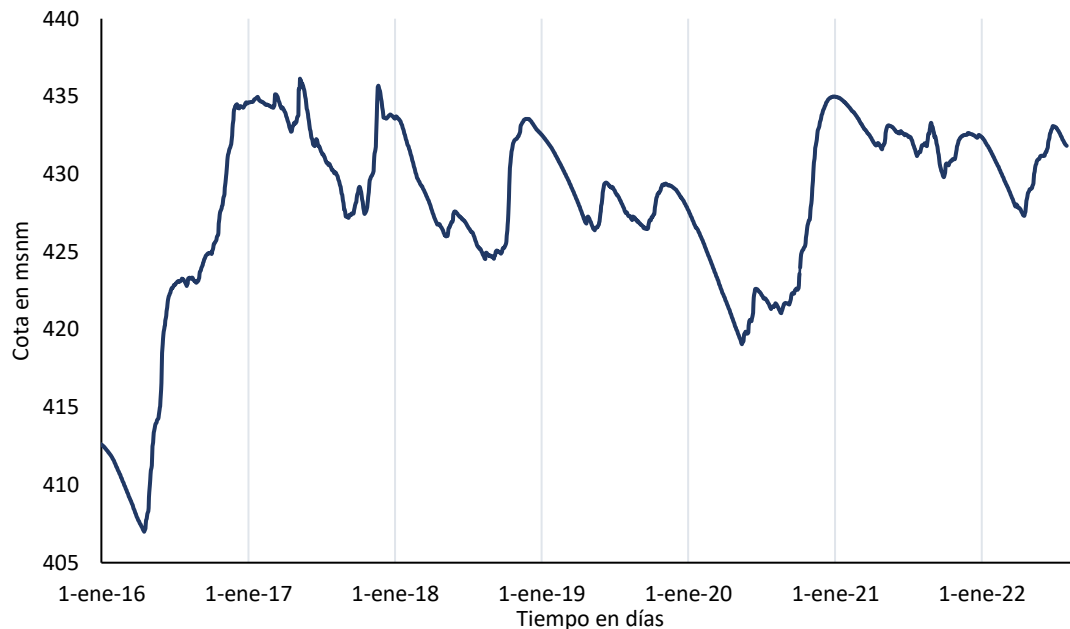


Figura 29. Nivel del embalse El Cercado para el periodo de enero de 2016 a julio de 2022

5.3. Construcción del Modelo de Operación

Partiendo de la información suministrada por la Agencia de Desarrollo Rural- ADR, se definen las variables de entrada que se ajusten con la información de salida. Dichas reglas de operación pueden presentarse mediante funciones o parámetros que permiten encontrar los caudales de descarga en una línea de tiempo que para nuestro caso es de enero de 2016 a julio de 2022.

Para lo anterior se utilizaron modelos de aprendizaje con Redes Neuronales Artificiales (RNA) buscando replicar los caudales de salida del embalse a partir de los datos de entrada, datos de salida y niveles del embalse.

5.3.1. Redes neuronales artificiales (RNA)

El modelo utilizado corresponde al Perceptrón multicapa (PMC), donde la construcción de la Red Neuronal artificial se realizó con los valores de entrada una estandarización con el fin de restringir los datos de salida dentro de un rango en donde la función de activación aplique (Emanueli Gandara, 2017).

Adicionalmente, se empleó el método de puntuación estándar el cual tiene en cuenta la desviación estándar y el promedio de la serie de tiempo a analizar.

$$X_n = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

Donde X es el valor de la variable sin normalizar, μ es el promedio de la serie de tiempo y σ es el valor de la desviación estándar de la serie de tiempo.

Se ha encontrado que, en estudios similares, una capa oculta es suficiente para llegar a una aproximación óptima en el entrenamiento de una red, por lo que se empleó una arquitectura conformada por una capa oculta, probando diferentes números de neuronas para esta capa. (Tami, 2020). Para el entrenamiento de la red se utilizó el 80% de los datos de las series de tiempo, el cual corresponde a los 1923 datos iniciales del periodo de análisis. Por su parte, para la prueba de la red se empleó el 20 % restante correspondiente a los 481 datos finales.

La función de activación empleada para las neuronas fue la sigmoide, y el solucionador (solver) para encontrar los pesos óptimos fue el Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (lbfgs), el cual es un método de optimización que pertenece a la familia de los Métodos quasi-Newton. Esta función fue tomada dentro del proceso de análisis en el proyecto de (Tami, 2020), el cual el embalse analizado se encuentra dentro de la zona caribe en similares condiciones.

Para evaluar el desempeño de la red neuronal se emplearon el error cuadrático medio (MSE) y el error absoluto medio (MAE).

En la Figura 30, se puede observar la arquitectura de la Red Neuronal con los mejores resultados obtenidos en la prueba, para determinar esta configuración fueron evaluados numerosas arquitecturas con diferentes cantidades de neuronas. En donde Q_{et-2} corresponde a los caudales de entrada al embalse para un tiempo de retraso de 2 días y Q_{et-1} para 1 día. N_{t-2} corresponde a los niveles del embalse para un tiempo de retraso de 2 días y N_{t-1} para 1 día. Q_{st-2} corresponde a los caudales de salida del embalse para un tiempo de retraso de 2 días, Q_{st-1} para 1 día y Q_{st} es el valor de la descarga para el periodo actual.

Estas variables fueron replicadas en el presente trabajo, de acuerdo con el proceso de arquitectura de la red neuronal desarrollado por (Tami, 2020), donde se muestra como es el comportamiento dentro de una serie de tiempo los caudales de entrada, retardos de los caudales de salida y niveles del embalse, estableciéndose que dichos parámetros son eficientes para arquitectura de la red neuronal.

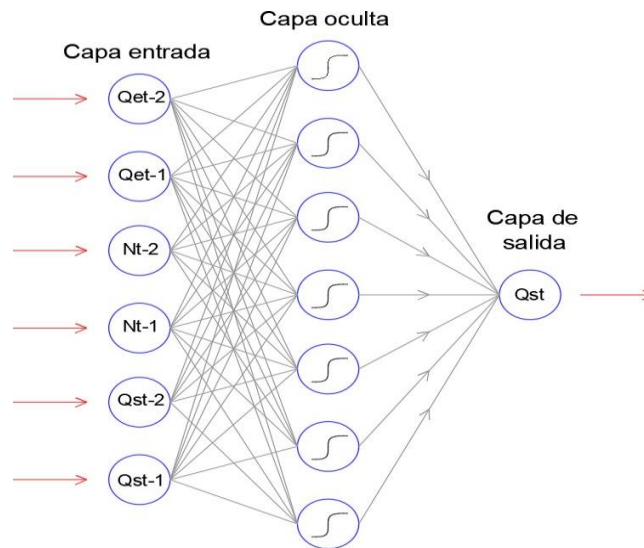


Figura 30. Configuración final de RNA para las reglas de operación actuales del embalse
Fuente: (Tami, 2020)

En la Tabla 9: Indicadores de MSE y MAE para las diferentes configuraciones de RNA evaluadas se presenta el resumen de los valores del MSE, MAE, para cada una de las configuraciones evaluadas, encontrándose que la red neuronal que mejor se ajusta al proceso de entrenamiento es la de 4 neuronas, la cual se usará dentro del proceso de optimización. La Figura 31 muestra el hidrograma obtenido para la serie de prueba (test) de la red de 4 neuronas.

Número de Neuronas	MSE	MAE	Párametros
3	0,0225	0,0588	25
4	0,0225	0,0647	33
5	0,0235	0,0723	41
6	0,0364	0,0852	49
7	0,0339	0,0902	57
8	0,0236	0,0648	65
9	0,0313	0,0971	73
10	0,0585	0,0912	81

Tabla 9: Indicadores de MSE y MAE para las diferentes configuraciones de RNA evaluadas

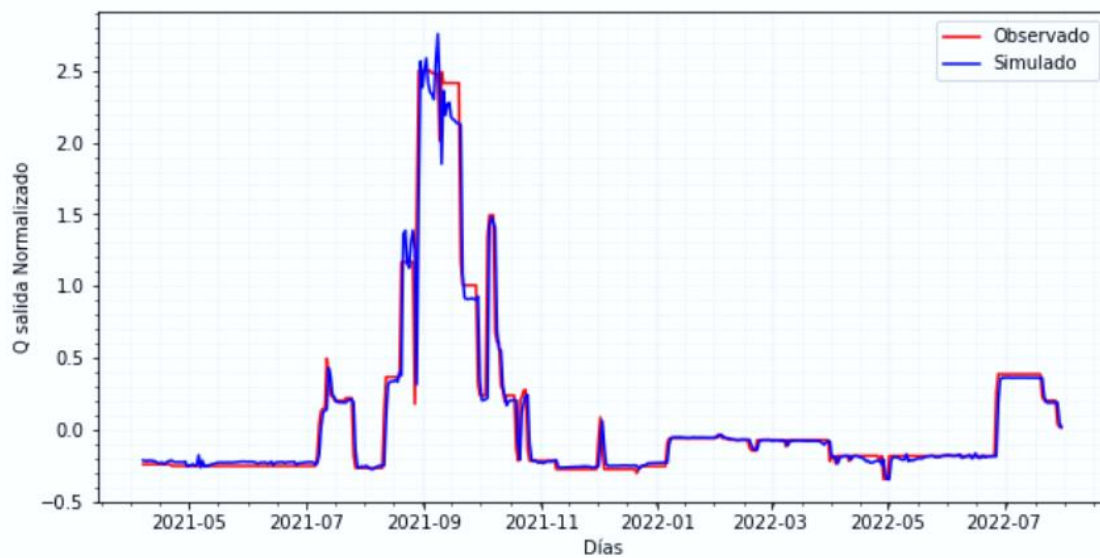


Figura 31. Hidrograma de caudales de descarga del embalse obtenido para la prueba de validación del modelo final de RNA de 4 Neuronas

5.3.2. Modelo de operación

Para el presente caso de estudio, el proceso de simulación del embalse se realiza teniendo en cuenta la ecuación de la conservación de la masa, el cual considera los componentes y restricciones físicas del sistema del embalse, calculando los caudales de descarga controlados mediante reglas de operación, los cuales son definidos mediante funciones matemáticas.

Se planteó un modelo de operación para el embalse con fundamento en la siguiente función matemática de aproximación:

- Redes Neuronales artificiales (RNA)

Para la preparación de los modelos de operación se usaron los datos de la batimetría del embalse, las series de caudales de entrada para el periodo de estudio de enero de 2016 a julio de 2022, los datos de evaporación diario de la zona de estudio, datos diarios de infiltración y la función de descarga del vertedero elaborada a partir del nivel del embalse El Cercado.

Para calcular el volumen del embalse El Cercado para cada paso de tiempo (escala diaria) se emplea la ecuación de balance hídrico descrita a continuación:

$$S_{t+1} = S_t + V_{et} - V_{st} - EVP - Inf \quad (5)$$

En donde S_{t+1} es el volumen de almacenamiento del embalse para el siguiente paso de tiempo; S_t es el volumen de almacenamiento del embalse para el periodo actual. V_{et} es el volumen de entrada del embalse para el periodo actual; V_{st} corresponde al volumen de salida calculado para el periodo actual; EVP corresponde al volumen de evaporación para el periodo actual e Inf corresponde al volumen de infiltración para el periodo actual.

El modelo de operación arranca con un valor inicial del volumen de almacenamiento del embalse donde se estima su nivel y el área superficial utilizando la batimetría establecida para el embalse El Cercado. Los caudales de descarga controlados se calculan a través de la función de aproximación Red Neuronal Artificial bajo proceso de optimización NSGA II y MOEA/D y también empleando el algoritmo MiniMax. Para efectuar un buen ejercicio de modelación se introducen las restricciones para descarga mínima y descarga máxima del embalse.

Estas restricciones que se incluyen dentro de la modelación son:

- **Descarga mínima:** Caudal de salida que es el caudal ecológico regulado por la Corporación Autónoma Regional de la Guajira - Corpoguajira, el cual corresponde a un valor de 1.06 m³/s, establecida mediante la Resolución 4360 de 2005 expedida por Corpoguajira, en Licencia Ambiental.
- **Descarga Máxima:** Es la suma entre la capacidad máxima de salida por turbinado que equivale a un valor de 10 m³/s, la capacidad máxima de salida por las válvulas de desfogue de fondo que equivale a 5.5 m³/s, Válvula de desfogue aérea Howell Bunger 23.5 m³/s y la Conducción San Juan que equivale a 2 m³/s, para una capacidad máxima total controlada de 41 m³/s. (ADR A. d., 2021)

Definidos los caudales de salida controlados, se realiza la validación si se generan descargas por vertimiento. Cuando el nivel del embalse es inferior a 435.5 m.s.n.m no presenta vertimiento, pero si el nivel supera esta cota se estima el vertimiento sobre la estructura de vertido.

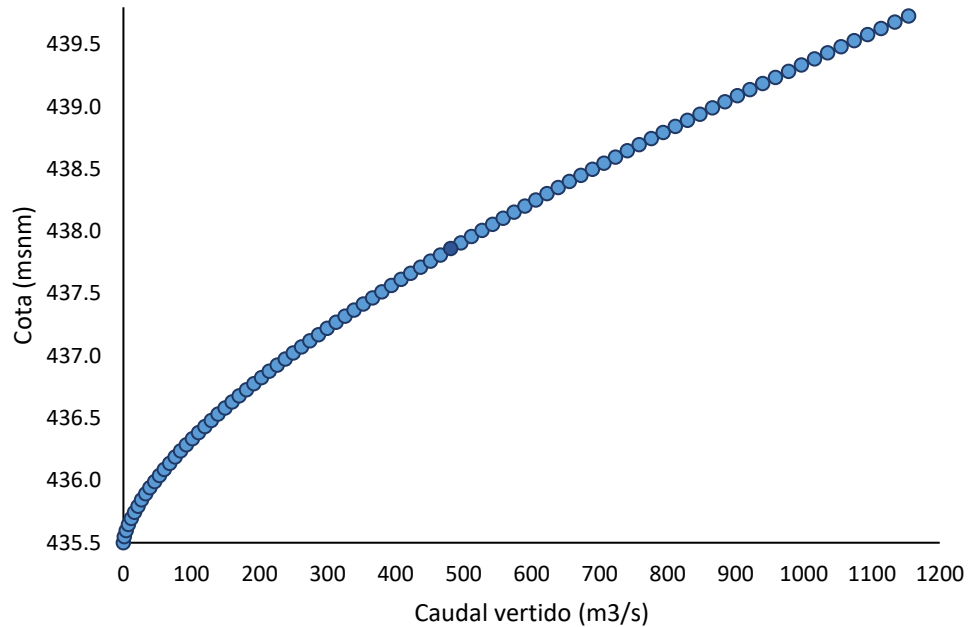


Figura 32. Curva de vertimiento

El cálculo de caudal fue establecido mediante la siguiente ecuación en función de la altura sobre la cresta del vertedero y los registros reales de descargas por vertimiento del embalse y los respectivos niveles presentados establecida por el Consorcio Guajira 2021 en la Figura 32. *Curva de vertimiento*. (ADR A. d., 2021).

$$Q_{ver} = 132.646336 * H^{1.5} \quad (6)$$

Donde Q_{ver} es el caudal de salida por el vertedero del embalse en metros cúbicos por segundo. Y H es la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero del embalse en metros.

Las descargas totales del embalse Q_{St} serán entonces la suma de las descargas controladas más las descargas por vertimiento.

Para la estimación de las pérdidas por evaporación se utilizan los valores de evaporación diarios registrados en la zona. Estos valores se obtienen del registro del evaporímetro proporcionado por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR empleando los valores diarios de evaporación del tanque clase A. (ADR A. d., 2021)

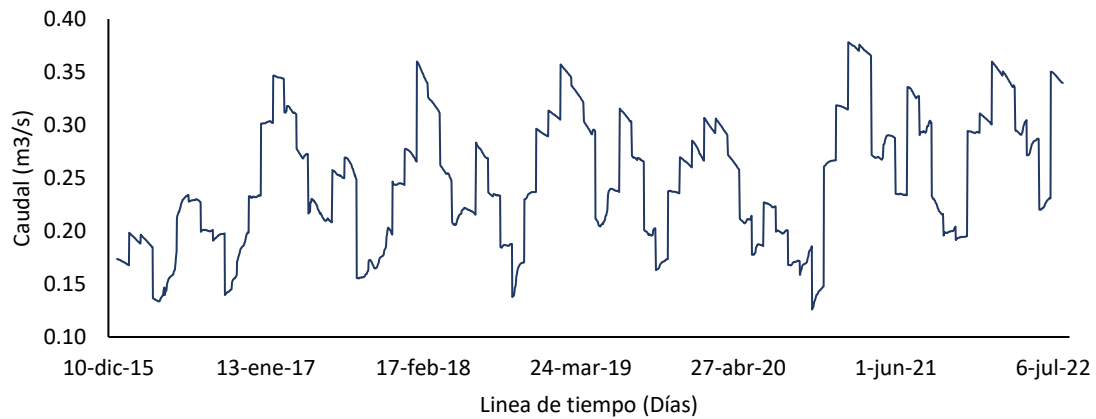


Figura 33. Evaporación diaria del embalse.

Este valor se multiplica por el área superficial de la lámina de agua del embalse El Cercado, obtenido de la batimetría para conocer el volumen evaporado en cada paso de tiempo. En la Figura 33 se presentan los valores de evaporación diaria del embalse tomadas para su cálculo.

Para la estimación de las pérdidas por infiltración se utilizan los valores de infiltración diarios registrados en la zona. Estos valores se obtienen del registro de medición de caudal mediante un canal triangular instalado en presa por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR empleando los valores diarios arrojados por este dispositivo en la Figura 34. (ADR A. d., 2021)



*Figura 34. Sistema de medición de infiltración en embalse El Cercado.
Fuente: (Avila, 2021)*

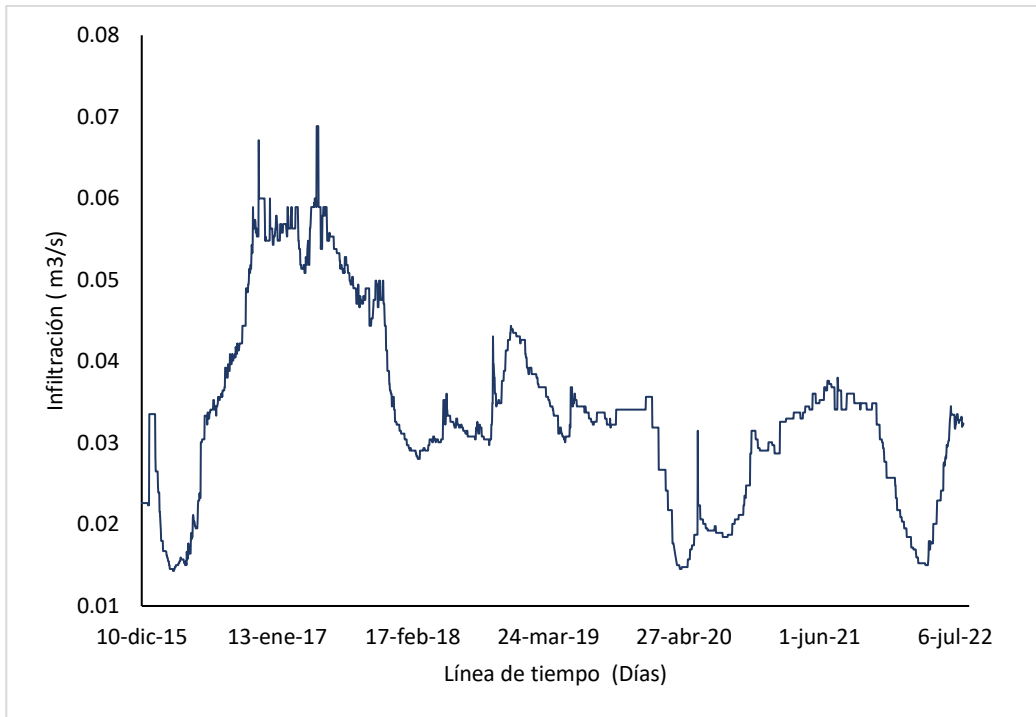


Figura 35. Curva de infiltración

En la Figura 35 se presentan los valores de infiltración diaria del embalse tomadas para su cálculo.

Con la información total de los valores de los caudales de las entradas y salidas del embalse para el paso de operación actual t , se efectúa el balance hídrico para conocer el volumen efectivo del embalse El Cercado, para el siguiente paso de tiempo $t + 1$. Este proceso se repite hasta llegar al último paso del periodo de análisis T .

El flujograma de los modelos de operación se simplifica en la Figura 36, los cuales fueron plasmados en lenguaje Python.

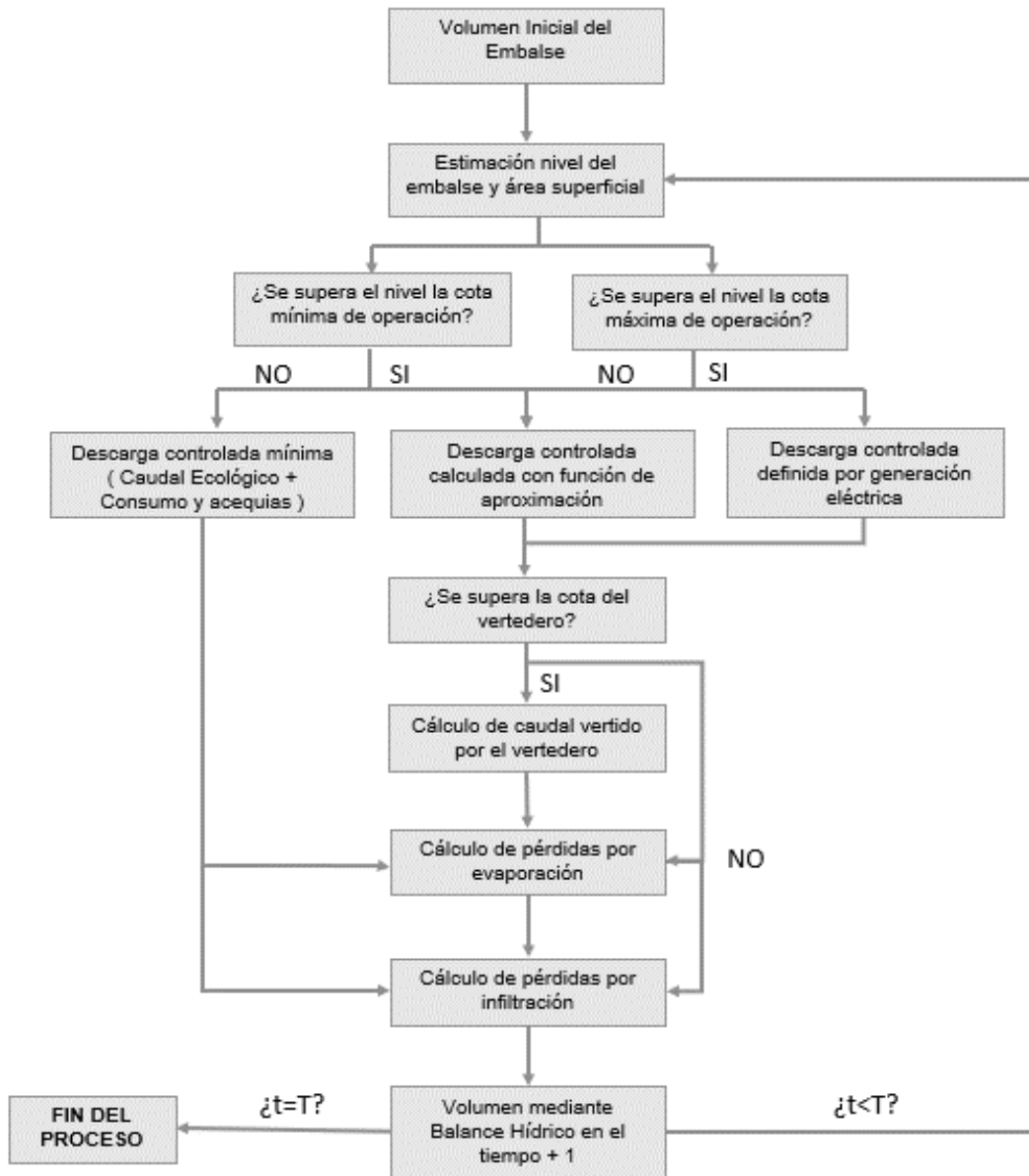


Figura 36. Flujograma de los modelos de operación construidos para el embalse El Cercado (Modelo Mejorado (Tami, 2020))

5.3.3. Funciones de aproximación

Las funciones de aproximación simulan las descargas controladas del embalse para cada paso de tiempo de acuerdo con lo mencionado en la sección 5.3.2.

La función que sirve de base para los modelos de operación se describe a continuación:

Redes neuronales artificiales

Para establecer las descargas controladas del embalse El Cercado, se utilizó la función de aproximación Red Neuronal artificial (RNA), el cual es un modelo que permite una alta flexibilidad en su forma (Giuliani, M. , Castelletti, A., Pianosi, F., Mason, E., & Reed, P. M. , 2016), en otras palabras, puede generar un patrón, forma o señal compleja que normalmente no pueden ser construidas por otras funciones.

Para el modelo de operación construido con la función RNA se utilizó la misma configuración de las Redes de aprendizaje de la sección 4.1.3 Regla de Operación Actual del Embalse., es decir, PMC de tres niveles (una capa oculta), función de activación sigmoide y las variables de entrada Q_{et-2} , Q_{et-1} , N_{t-2} , N_{t-1} , Q_{st-2} y Q_{st-1} son estandarizadas empleando el método de puntuación estándar.

Las funciones de Redes Neuronales empleadas en los modelos de operación se pueden expresar de la siguiente forma:

$$u_t = (I_t)$$

$$u_t = f(Q_{et-2}, Q_{et-1}, N_{t-2}, N_{t-1}, Q_{st-2}, Q_{st-1})$$

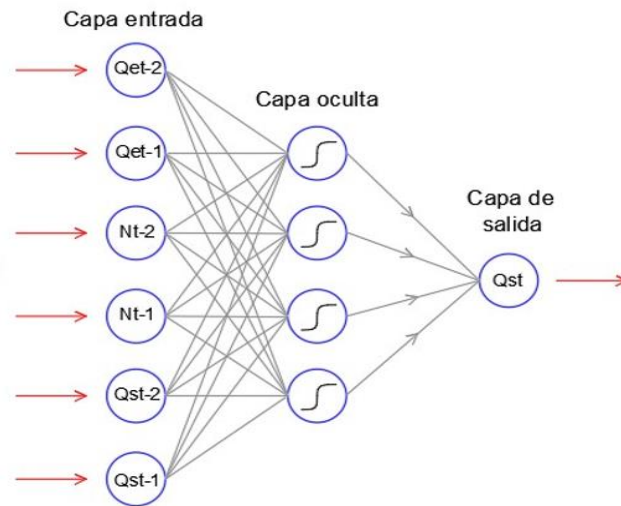
$$u_k = a + \sum_{i=1}^N b_i \psi_i(I_t \cdot c_i + d_i)$$

$$\psi_i = \frac{1}{1 + e^{-(I_t \cdot c_i + d_i)}}$$

Donde u_t es el valor de la descarga controlada en el tiempo t ; N es el número de neuronas; (\cdot) es la función sigmoide para la activación de cada neurona, es decir, la función sigmoide, I_t es el Vector de entradas de la red neuronal artificial; $I_t = Q_{et-2}, Q_{et-1}, N_{t-2}, N_{t-1}, Q_{st-2}, Q_{st-1}$; a, b_i, c_i, d_i son los parámetros de la red neuronal artificial (pesos de conexiones y sesgos), siendo M el número de variables de entrada al modelo. (Tami, 2020).

Para el modelo de operación con función RNA se desarrolló su construcción utilizando 4 neuronas en la capa oculta, empleando los pesos de las conexiones y sesgos generados para un dominio en forma aleatoria $-1 \leq a, b_i, c_i, d_i \leq 1$, este procedimiento se ciñe a la metodología desarrollada por (Tami, 2020).

La Figura 37 presenta una sola configuración de RNA empleadas en el modelo operacional.



Fuente: (Tami, 2020)

Figura 37. Configuración de la RNA propuestas para los modelos de operación.

En la Figura 37 cada línea gris representa un parámetro de peso o conexión entre las neuronas, y cada neurona de la capa oculta tiene un parámetro sesgo d_i . La neurona de salida también tiene un sesgo a . Por lo tanto, el número total de parámetros, es decir, pesos de conexiones y sesgos es $n_{\theta} = (M + 2) + 1$, estos parámetros serán las variables de decisión para los algoritmos de optimización del próximo paso de la metodología (Sección 4). Siendo M el número de variables de entrada al modelo. (Tami, 2020).

5.3.4. Estimación de la demanda de agua para riego

El propósito Principal del embalse El Cercado es el suministro de agua para riego para los distritos de Ranchería y San Juan del Cesar, especialmente para el cultivo de algodón, arroz, maíz frijol, melón y hortalizas, como cultivos permanentes y semipermanentes, el plátano, la yuca, palma aceitera y pastos mejorados (ADR A. d., 2021). El embalse suministra agua para el riego de aproximadamente 15030 Ha de cultivos en Ranchería y de 3.000 Ha de cultivos en San Juan del Cesar.

Para la estimación de la demanda de riego es importante conocer el Plan de Desarrollo Agropecuario, donde se establece la superficie de riego, los ciclos de los cultivos en el año, las épocas de siembra, los coeficientes del cultivo y los factores climáticos de la zona. Para efectos del presente estudio, y conociendo el requerimiento hídrico por cultivo en la zona de estudio se estableció la demanda total de riego. Teniendo en cuenta el proceso estacional de los cultivos de acuerdo con su ciclo de producción, se calculó su demanda de riego correspondiente al periodo de análisis, es decir demandas mensuales multianuales para el periodo enero 2016 a julio de 2022. Por lo tanto, para cada año se repiten los mismos valores de demanda de riego en cada mes. Dicha demanda fue transformada en caudales diarios para ser implementados en el modelo de operación.

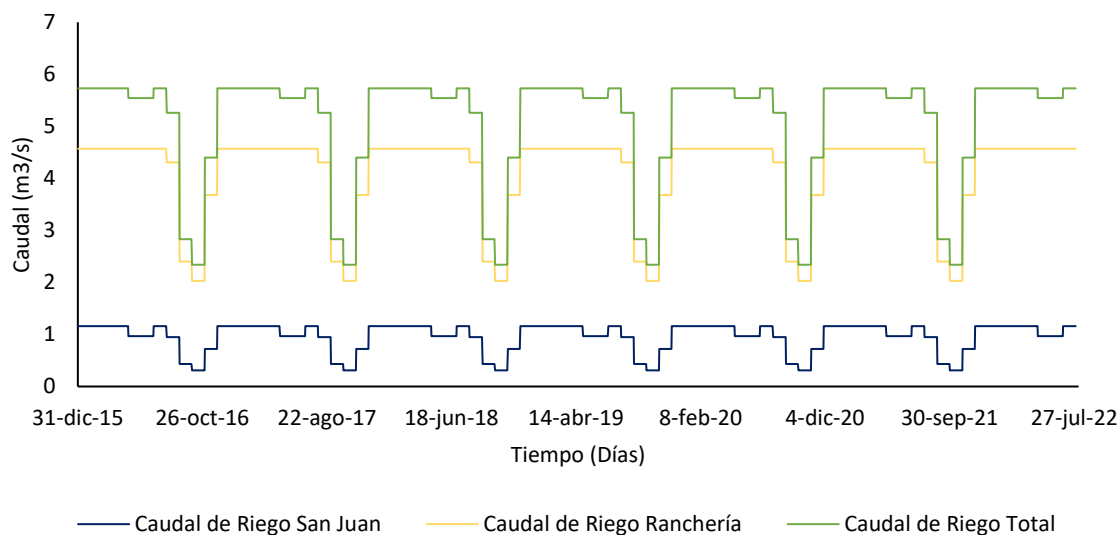


Figura 38. Curva de riego en el tiempo para el periodo de enero de 2016 a julio de 2022.

5.3.5. Determinación del área de riego

Las áreas de riego establecidos para los dos distritos se acudieron a los estudios elaborados por Agencia de desarrollo Rural – ADR (ADR A. d., 2021), en donde se establecen dentro del Plan de Desarrollo Agropecuario las áreas de servicio de riego, de acuerdo con las condiciones del suelo para 14 productos agrícolas.

Ranchería

PRODUCTOS	AREA SEMBRADA (ha.) 2*			
	SEMESTRE		TOTAL, AÑO	
	A	B	No.	%
AGRICULTURA				
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
MELÓN 3*	600	400	1.000	4,88
HORTALIZAS 4*	400	250	650	3,17
DESCANSO	480	630	1.110	5,41
SUBTOTAL	5.480	5.480	10.960	53,44
SEMIPERMANENTES				
BANANO	1.000	1.000	1.000	4,88
AJÍ	100	100	100	0,49
PANCOGER 5*	120	120	120	0,59
YUCA	500	500	500	2,44
PAPAYA 6*	700	700	700	3,41

PRODUCTOS	AREA SEMBRADA (ha.) 2*			
	SEMESTRE		TOTAL, AÑO	
	A	B	No.	%
SUBTOTAL	2.420	2.420	2.420	11,80
PERMANENTES				
FRUTALES 7*	700	700	700	3,41
PALMA ACEITERA	1900	1900	1900	9,26
SUBTOTAL	2600	2600	2600	12,68
TOTAL, AGRICULTURA	10.500	10.500	15.980	77,91
GANADERIA				
DOBLE PROPÓSITO Leche	2.560	2.560	2.560	12,48
DOBLE PROPÓSITO CON CEBA Leche	1.095	1.095	1.095	5,34
Carne	1.095	1.095	1.095	
CEBA	875	875	875	4,27
Carne				
TOTAL, GANADERIA	4.530	4.530	4.530	22,09
TOTAL, PROYECTO	15.030	15.030	20.510	100,00
1* Etapa de Pleno desarrollo de proyecto.				
2* Área neta bajo riego.				
3* Corresponde a melón e incluye Patilla.				
4* Representado por pimentón, incluye cebolla y ahuyama.				
5* Incluye maíz. Plátano y yuca.				
6* Representado por papaya incluye piña.				
7* Representado por mango. incluye cítricos y aguacate				

Tabla 10: Distribución de cultivos Distrito Ranchería
Fuente: (ADR A. d., 2021)

San Juan del Cesar:

PRODUCTOS	AREA SEMBRADA (ha.)			
	SEMESTRE		TOTAL, AÑO	
	A	B	No.	%
AGRICULTURA				
CULTIVOS TRANSITORIOS				
Algodón		200	200	5,10%
Maíz	410	270	680	17,35%
Frijol	250	150	400	10,20%
Melón	120	90	210	5,36%
Hortalizas 1*	130	120	250	6,38%
Descanso	10	90	100	2,55%
SUBTOTAL	920	920	1.840	46,94%
CULTIVOS SEMIPERMANENTES				
Plátano	160	160	160	4,08%
Pancoger 2*	55	55	55	1,40%

PRODUCTOS	AREA SEMBRADA (ha.)			
	SEMESTRE		TOTAL, AÑO	
	A	B	No.	%
Yuca	125	125	125	3,19%
Papaya	110	110	110	2,81%
SUBTOTAL	450	450	450	11,48%
CULTIVOS PERMANENTES				
Frutales 3*	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%
GANADERÍA				
Doble propósito pastos riego	430	430	430	10,97%
Ceba pastos riego	490	490	490	12,50%
SUBTOTAL GANADERÍA	920	920	920	23,47%
TOTAL, PROYECTO	3.000	3.000	3.920	100,00%
1*Representado por pimentón, incluye cebolla de bulbo.				
2*Incluye maíz. Plátano y yuca.				
3* Representado por mango. incluye cítricos y aguacate				

Tabla 11: Distribución de cultivos Distrito San Juan del Cesar
Fuente: (ADR A. d., 2021)

5.3.6. Determinación de los caudales de riego

Los caudales de riego abastecidos por el embalse para los dos distritos se acudieron a la actualización de los estudios elaborados por Agencia de desarrollo Rural – ADR (ADR A. d., 2021), en donde se establecen dentro del Plan de Desarrollo donde, se determinaron las demandas de agua brutas a nivel decadal, para cada uno de los cultivos, de acuerdo con el plan de siembras, desarrollo del cultivo y cosecha, de acuerdo con las condiciones del suelo para 14 productos agrícolas.

	Distrito San Juan	Distrito Ranchería	TOTAL
Mes	m3/s	m3/s	m3/s
ENE	1,16	4,57	5,73
FEB	1,16	4,57	5,73
MAR	1,16	4,57	5,73
ABR	1,16	4,57	5,73
MAY	0,97	4,57	5,54
JUN	0,97	4,57	5,54
JUL	1,16	4,57	5,73
AGO	0,95	4,31	5,26
SEP	0,43	2,4	2,83
OCT	0,31	2,03	2,34
NOV	0,72	3,68	4,4
DIC	1,16	4,57	5,73

Tabla 12. Demandas Riego Proyecto Multipropósito Rio Ranchería (m3/s)
Fuente: (ADR A. d., 2021)

5.3.7. Estimación de la demanda de agua para Acueductos

La demanda de agua para Acueductos, fueron establecidos dentro de la actualización de los estudios elaborados por Agencia de desarrollo Rural – ADR (ADR A. d., 2021), donde se realizó con base a lo dispuesto por las normas del RAS en cuanto a proyecciones de población, dotaciones y distribución espacial de la demanda de agua para 6 municipios aguas debajo del embalse El Cercado.

Municipio	Población a 2045	Nivel de Complejidad	Dotación L/Hab-día
1. Distracción	21.696	Media Alto	135
2. Fonseca	43.199	Media Alto	135
3. Barrancas	46.024	Media Alto	135
4. Hatonuevo	30.138	Media Alto	135
5. Albania	41.216	Media Alto	135
6. San Juan de Cesar	50.081	Media Alto	135

Tabla 13 Proyecciones, nivel de complejidad y dotación de Acueductos
Fuente: (ADR A. d., 2021)

Una vez analizadas las proyecciones se establece la demanda de agua para los municipios, estableciendo como capacidad hídrica para los acueductos, lo manifestado en la resolución 4360 del 5 de diciembre de 2005 otorgada por la Corporación Autónoma Regional de la Guajira – Corpoguajira.

Municipio	Caudal m3/s (2016)	Caudal m3/s (2045)
1. San Juan de Cesar	0.08	0.11
2. Fonseca	0.06	0.09
3. Distracción	0.02	0.04
4. Barrancas	0.04	0.09
5. Hatonuevo	0.03	0.06
6. Albania	0.04	0.08

Tabla 14. Demandas de agua para acueductos.
Fuente: (ADR A. d., 2021)

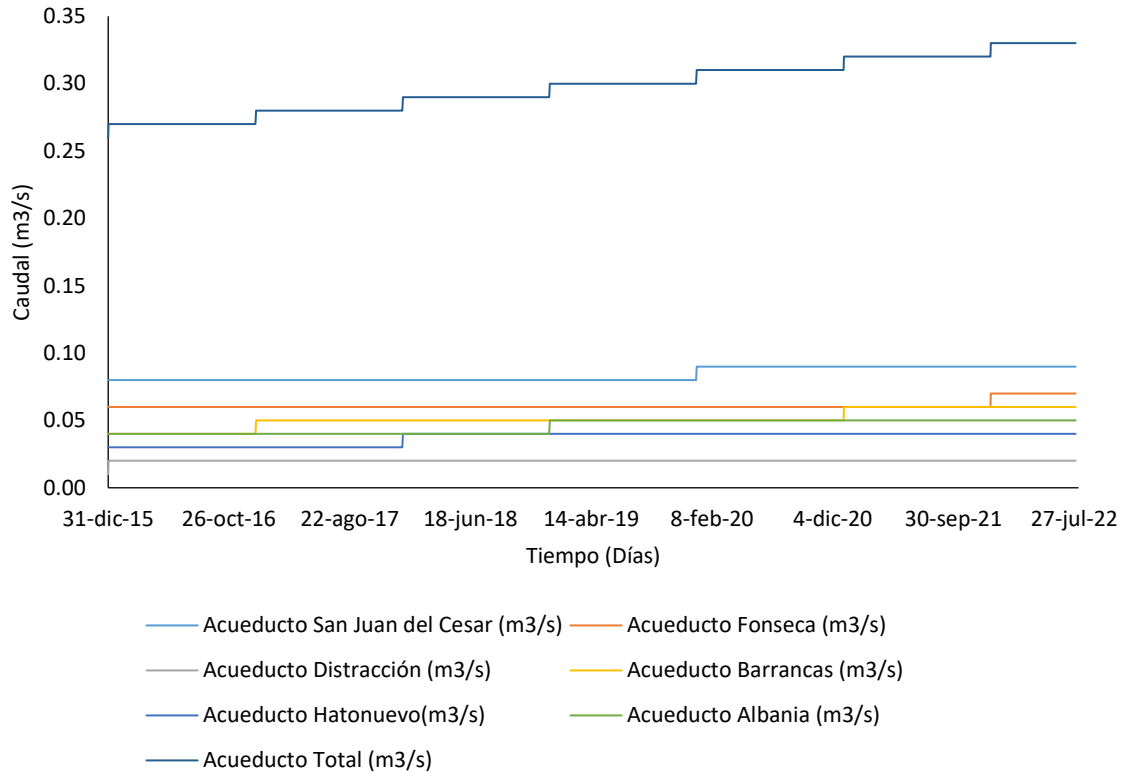


Figura 39. Caudal de Acueductos Proyecto Multipropósito.

5.3.8. Cálculo de la potencia generada por turbinado PCH El Cercado

Aparte del suministro de agua para los acueductos, el riego y el caudal ecológico, el embalse El Cercado tiene proyectado la construcción de una Pequeña Central Hidroeléctrica PCH, ubicada aproximadamente 500 m aguas abajo de la presa, la cual aprovecharía los caudales demandados por el distrito de Riego Ranchería.

Para el cálculo de la potencia generada por turbinado se considera el tiempo de servicio en el modelo de operación mediante la siguiente expresión en KW:

$$P_t = \eta * \gamma * H_t * q_t^{Turbinado}$$

Donde η es la eficiencia de la turbina, γ es el peso específico de agua (9.81KN/ m3), H_t es la cabeza hidráulica (diferencia entre el nivel del agua del embalse y el nivel del eje de la turbina del sistema).

El caudal turbinado $q_t^{Turbinado}$ está en función del caudal de descarga controlada del embalse El Cercado; si el caudal de descarga es mayor que la capacidad máxima de turbinado, el caudal turbinado se toma igual a esta capacidad, de lo contrario el caudal turbinado es equivalente a la descarga controlada del embalse $q_t^{Turbinado} = Q_{st}$

El esquema hidroeléctrico del proyecto Multipropósito Ranchería en total, aprovecha los caudales del distrito de riego Ranchería, más los caudales para consumo humano de las poblaciones del acueducto regional (No se incluye el municipio de San Juan de Cesar) y el caudal ecológico que debe quedar remanente en el río Ranchería.

Para nuestro caso de estudio se establece como caudal de diseño del sistema de generación hidroeléctrica lo siguiente:

$$Q_{\text{diseño}} = Q_{\text{ranchería}} + Q_{\text{ecológico}} + Q_{\text{acueducto}}$$

$$Q_{\text{diseño}} = 4,57 \text{ m}^3/\text{s} + 1,06 \text{ m}^3/\text{s} + 0,47 \text{ m}^3/\text{s} = 6,10 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para determinar el tamaño y características del aprovechamiento, se empleó el modelo anteriormente descrito, con la adición del análisis de la variación de la cabeza de generación para cada periodo. Igualmente, se consideró la cota 326 m.s.n.m. como nivel de las turbinas, dato fundamental para la obtención de la cabeza bruta de generación, el cual se establece H la altura neta de generación en 85 m. (FONADE, 2015).

La eficiencia de la turbina se define en función del caudal turbinado, dicha eficiencia es tomada del gráfico de eficiencias para turbinas, (FONADE, 2015) de donde se toma la curva para la turbina Francis como se muestra en Figura 40 con un valor en conjunto del 85%.

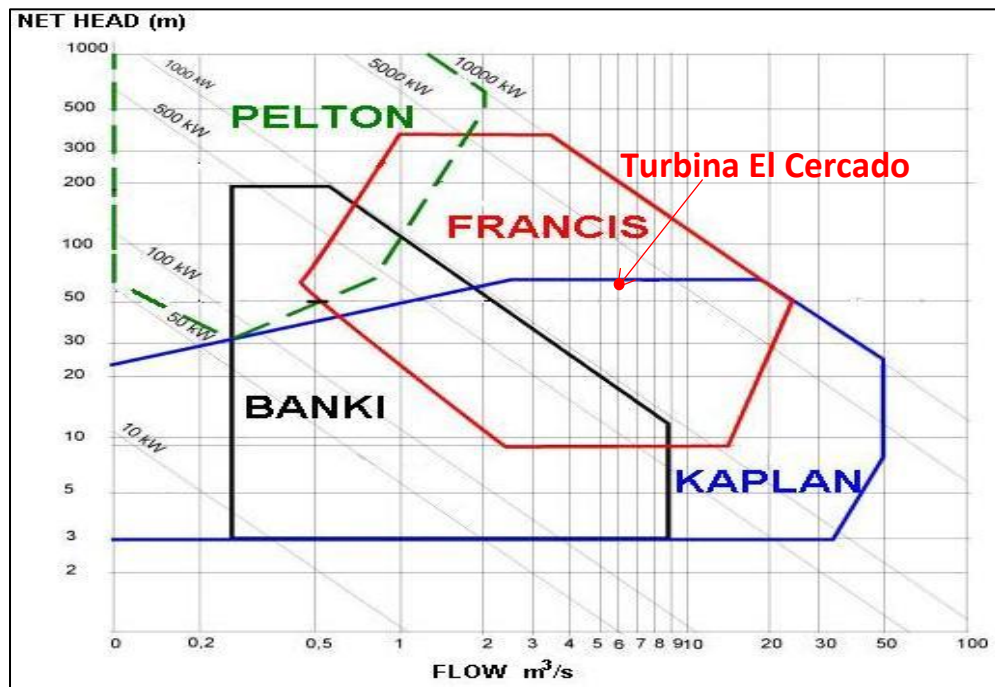


Figura 40 Eficiencia de las turbinas en función del caudal de flujo

Con lo anterior, se obtiene una potencia de 4,25 MW aproximadamente.

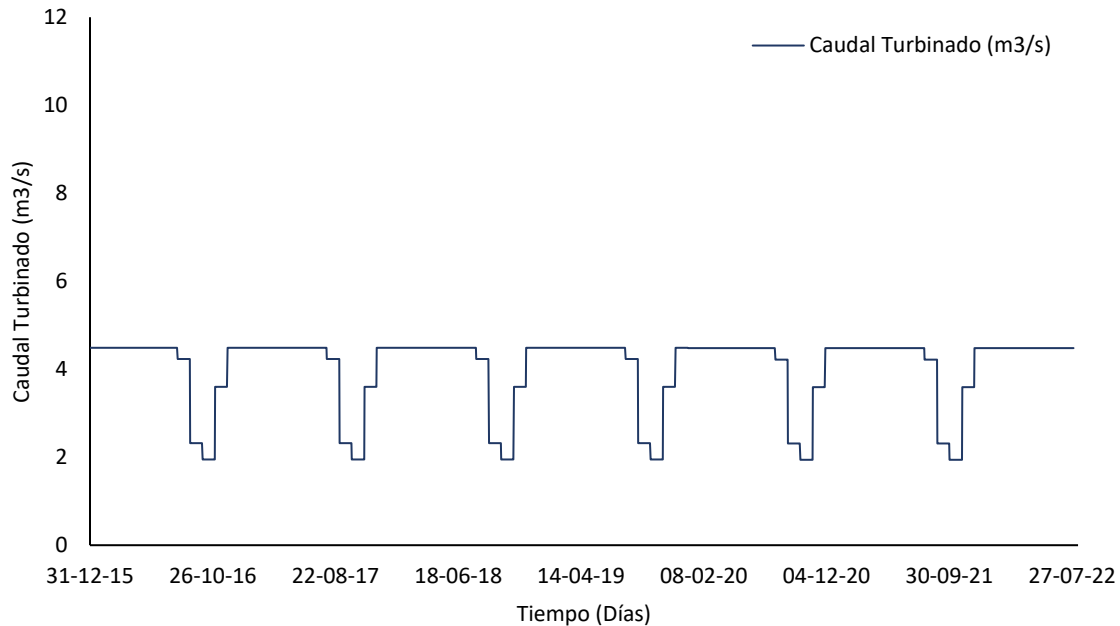


Figura 41. Caudal turbinado en el tiempo

En resumen, se genera un modelo de operación a partir de los resultados de la optimización, desarrollados por medio de redes neuronales artificiales mediante JMETALPY y bajo el algoritmo MiniMax en la siguiente sección.

5.4. Optimización del embalse

En la presente sección se muestran los procedimientos realizados para la optimización del modelo operacional del embalse El Cercado, mediante la aplicación de los algoritmos de optimización (módulo JMETALPY de Python), luego la selección de los parámetros y aplicación de los algoritmos para obtener como resultado los frentes de Pareto.

5.4.1. Ensamble del modelo de operación en JMETALPY

El modelo de operación construido es acoplado a JMETALPY para su procesamiento. En la Figura 42 se muestra un ejemplo para la introducción de nuevos problemas al entorno JMETALPY (Nebro, 2018):

```

from jmetal.algorithm import NSGAI
from jmetal.operator import Polynomial, SBX, BinaryTournamentSelection
from jmetal.component import RankingAndCrowdingDistanceComparator

from jmetal.util import FrontPlot
from jmetal.problem import ZDT1

problem = ZDT1(rf_path='resources/reference_front/ZDT1.pf')

algorithm = NSGAI(
    problem=problem,
    population_size=100,
    max_evaluations=25000,
    mutation=Polynomial(probability=1.0/problem.number_of_variables, distribution_
    ←index=20),
    ←crossover=SBX(probability=1.0, distribution_index=20),
    ←selection=BinaryTournamentSelection(comparator=RankingAndCrowdingDistanceComparator()
    )

algorithm.run()
front = algorithm.get_result()

pareto_front = FrontPlot(plot_title='NSGAI-ZDT1', axis_labels=problem.obj_labels)
pareto_front.plot(front, reference_front=problem.reference_front)
pareto_front.to_html(filename='NSGAI-ZDT1')

```

Figura 42. Introducción del problema en JMOTALPY

De la figura anterior, para la introducción de los modelos operacionales se debe sustituir la clase ZDT1 (el cual es el ejemplo) por el modelo de operación y los parámetros y variables de decisión.

5.4.2. Funciones objetivo en la modelación

El objetivo del presente estudio es encontrar las reglas de operación para el embalse El Cercado, que permitan mejorar el control del recurso hídrico, sin afectar su uso en la generación hidroeléctrica, el suministro de agua para los distritos de riego, el suministro de agua para acueductos y control del caudal ecológico, bajo un enfoque multiobjetivo. De acuerdo con su enfoque multiobjetivo se establecieron tres propósitos, los cuales fueron determinados en el numeral 4.1.4 Objetivos del Sistema:

- Suministro de agua para riego (Función Objetivo No. 1)
- Suministro de agua para acueductos (Función Objetivo No. 2)
- Generación eléctrica (Función Objetivo No. 3)

5.4.3. Escogencia de los parámetros del algoritmo de optimización

Los algoritmos de optimización utilizados en el presente estudio son el NSGAI y MOEA/D, los cuales están implementados en la librería JMOTALPY. También se utiliza el modelo MiniMax, el cual fue desarrollado dentro de la implementación de su trabajo de grado por (Rojas Troncoso, 2021). La elección de los valores para el tamaño de la población y parámetros individuales en los algoritmos heurísticos de optimización depende en gran medida del problema (Ritter, 2016).

Para la selección del tamaño de la población utilizando NSGA II y MOEA/D, se realizaron pruebas en diferentes rangos de poblaciones, y se encontró que la convergencia era baja para las poblaciones por encima de 100 individuos. Por otro lado, para otros parámetros, para que JMOTALPY confluya ágilmente, también se utilizó prueba y error en un grupo pequeño (hasta 50 individuos).

En el caso de estudio, los parámetros utilizados en los algoritmos heurísticos fueron tomados del análisis en el proyecto de (Tami, 2020), en un embalse con similares condiciones dentro de la zona Caribe, así mismo se muestra en la Tabla 15.

Algoritmo	Parámetro	Descripción	Valor
NSGAI	population_size	Tamaño de la población	100
	offspring_population_size	Tamaño de la población descendiente	100
	Mutation probability	Probabilidad de mutación	1
	distribution_index	índice de distribución	20
	Crossover probability	Probabilidad de cruce	1
	distribution_index	índice de distribución	20
MOEA/D	population_size	Tamaño de la población	100
	Crossover	CR	1
		F	0.5
	Mutation	Probabilidad	1
		índice de distribución	20
	neighbor_size	Tamaño de vecindario	20
	neighbourhood_selection_probability	Probabilidad de selección del vecindario	0.9
max_number_of_replaced_solutions	número máximo de soluciones reemplazadas	2	

Fuente: Adaptado por autor (Tami, 2020)

Tabla 15: Parámetros de los algoritmos de optimización NSGAI y MOEA/D

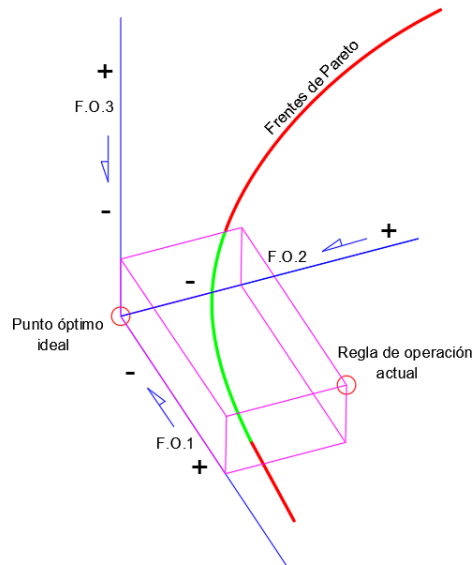
El proceso de optimización se desarrolló en una computadora con 12 GB de RAM y 8 núcleos a 2,10 GHz. La ejecución del código JMETALPY implementa el módulo MultiprocessEvaluator, que permite que la máquina realice cálculos más rápidos. Esto significa que los individuos de una generación se pueden calcular en paralelo (en un algoritmo de optimización).

Con el MiniMax se calcula el valor de los nodos superiores a partir del valor de los inferiores de acuerdo con los valores de los parámetros utilizados en el algoritmo de optimización. Según el nivel si es Max o es Min se optarán los valores mínimos y máximos representando los movimientos del jugador y del oponente, de ahí el nombre de "MiniMax".

Usando el módulo de visualización, se obtienen los frentes de Pareto para cada optimización, es decir, se genera un frente diferente para el modelo, y se optimiza de forma independiente mediante los algoritmos NSGAI y MOEA/D.

5.4.4. Escogencia de la mejor regla de operación óptima

Una vez conseguidos los Frentes de Pareto para el modelo operativo, el cual se utiliza dos optimizadores, se valoran los mejores resultados, que se acerque al punto óptimo ideal. Un ejemplo se muestra en la Figura 43, el esquema 3D que representa el frente de Pareto y el punto ideal óptimo, donde la línea roja resaltada corresponde al resultado óptimo porque está más cerca del punto óptimo ideal. Este ejemplo es tomado del proyecto de grado de (Tami, 2020), el cual explica la mejor condición de análisis de los frentes de Pareto.



Fuente: (Tami, 2020)

Figura 43. Espacio de Pareto que iguala o mejora la regla de operación actual

Las reglas óptimas de operación se obtienen a partir de los puntos que constituyen los Frentes de Pareto óptimos. Cada punto del Frente de Pareto corresponde a una regla de operación del embalse. Luego, se realiza una selección preliminar de puntos que igualan o mejoran la operación actual del embalse durante el período de enero de 2016 a julio de 2022. Cabe señalar que, como ya se mencionó, para efectos de este estudio, prevalecen las reglas operativas que permitan mejorar el control del recurso hídrico del embalse El Cercado, sin afectar significativamente otros propósitos.

La mejor regla de operación optimizada será comparada con la regla de operación del embalse actual, con el fin de probar su desempeño. Para averiguar en qué parte del frente de Pareto se encuentra la ley operativa del yacimiento durante el período de análisis, solo se calculan tres valores objetivos determinados a partir de los datos operativos reales. Mediante la simulación de las condiciones de operación, se calcula la descarga del embalse correspondiente durante el período de estudio (enero de 2016 a julio de 2022).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. Frente de Pareto

En el presente numeral se muestran los resultados obtenidos realizados durante el proceso de optimización del modelo de operación para el embalse El Cercado en cuanto a los tres objetivos planteados. Inicialmente se exponen los resultados obtenidos mediante el algoritmo NSGAI, algoritmo MOEA/D y el modelo algoritmo MiniMax. Finalmente se hace un análisis comparativo de los diferentes métodos.

6.1.1. Modelo de operación con RNA desarrollado en NSGAI

En la Figura 44 se presenta el frente de Pareto 3D adquiridos para el modelo de operación utilizando redes neuronales artificiales RNA optimizado por el algoritmo NSGAI. Se observa los resultados para el modelo de 4N, para los cuales se observó que varios miembros de la gráfica de Pareto igualan o superan las reglas de operación actual del embalse, encontrándose valores más bajos para los objetivos FO1 (suministro de agua para riego) y FO2 (suministro de agua para acueductos) y más altos para el FO3 (Maximizar generación de energía). Para la función objetivo FO3, la cual se debe maximizar, se empleó una función de multiplicada por un factor de conversión -1, puesto que los módulos utilizados por JMETALPY en el presente estudio están desarrollados para minimizar objetivos.

El tiempo computacional fue aproximadamente de 8 horas para el modelo operacional ajustado.

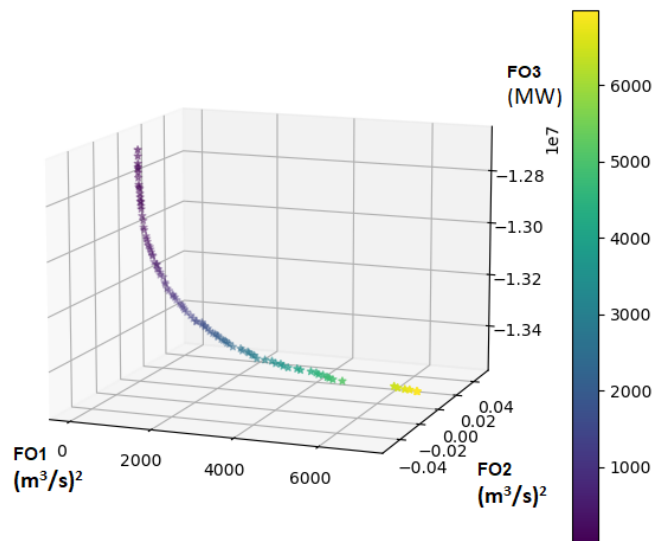


Figura 44. Frente Pareto RNA 4N empleando el algoritmo NSGAI.

Cada punto en la Figura 44 corresponde a una regla de operación conseguida por el optimizador para el manejo del embalse a partir de los tres objetivos planteados. De estos resultados se puede observar claramente que los valores para los objetivos de suministro de riego (FO1), los objetivos de suministro de acueducto (FO2) y el objetivo de maximización en la generación hidroeléctrica (FO3), presenta conflicto entre funciones objetivo (FO1) y (FO3), esto quiere decir que entre mayor

sea la generación de energía mayor déficit de riego. En el caso de suministro para acueductos si se garantiza la distribución se servicio en el periodo analizado.

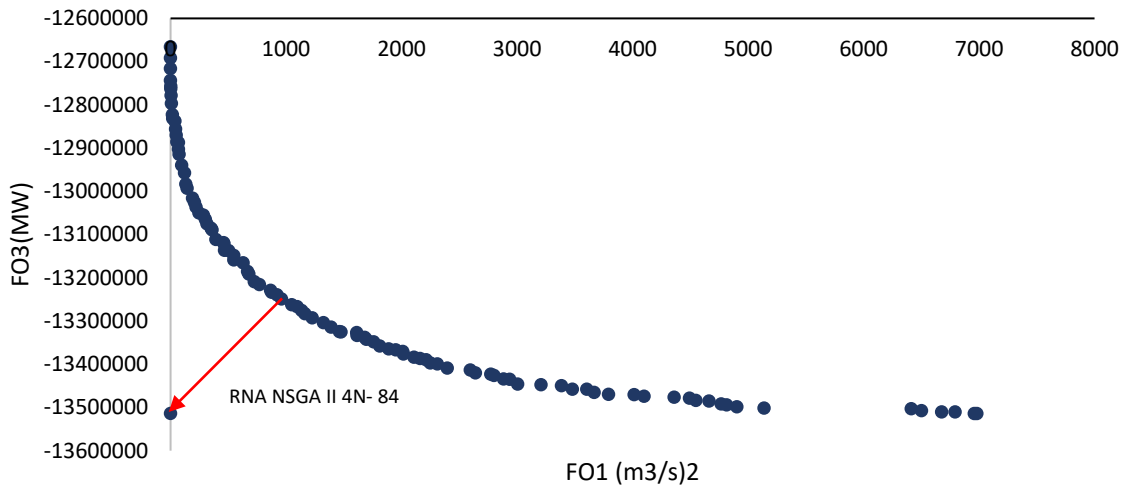


Figura 45. Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado NSGA II FO1 vs FO3.

En la Figura 45. Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado NSGA II FO1 vs FO3. Se muestra claramente que en los dos objetivos FO1 vs FO3, están en conflicto, esto quiere decir que entre mayor sea la potencia generada en el embalse, mayor déficit de riego. Para este caso, de las 100 soluciones o reglas obtenidas, se seleccionó el que tiene mejor balance que para este caso es la solución 84, por tener una alta eficiencia en la generación de energía (FO3) con un menor déficit de riego (FO1).

MODELO OPERACIONAL	Mejores Soluciones para cada objetivo			Porcentaje mejora		
	FO1	FO2	FO3	FO1	FO2	FO3
Operación Actual	1219	0	8487	%	%	%
4 N	875	0	13329	Reduce a 72%	0%	Aumenta el 157%

Tabla 16: Mejores soluciones para cada uno de los objetivos de los modelos con RNA y el algoritmo NSGAI

La Tabla 16 muestra la mejora de cada objetivo, de la FO1, es considerablemente menor, por cuanto se evidencia una optimización del recurso hídrico, respecto a la FO3 es mayor, por cuanto muestra una alta eficiencia en el proceso de generación de energía en un 157% con respecto a las políticas de operación actual. Así mismo se reduce en un 72% el déficit de riego con esta solución.

6.1.1.1. Hidrograma reglas de operación del embalse

En la Figura 46 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA encontrada en la Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado NSGA II FO1 vs FO3., de acuerdo, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (enero 2016 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color rojo la operación actual y en color azul el caudal optimizado mediante modelo RNA NSGAI.

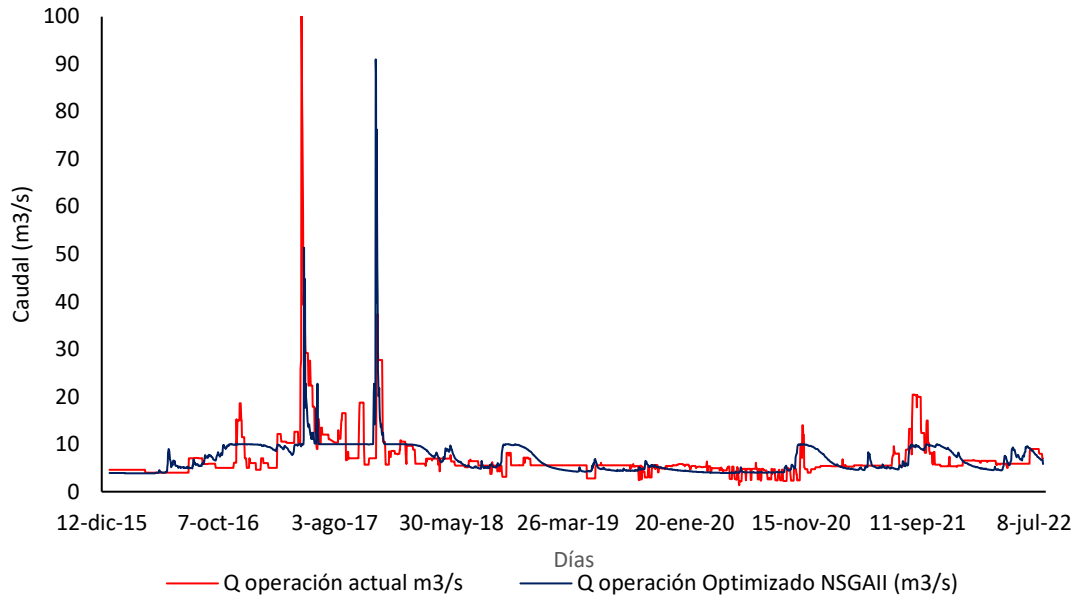


Figura 46. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado de RNA NSGAIL.

También se evidencia en la Figura 46, que la regla de operación real del embalse presenta caudales inferiores en el proceso de descarga, lo cual indica que en la actualidad solo se está vertiendo caudales por encima del caudal ecológico y contando que los distritos de riego no se encuentran en funcionamiento. En cuanto a la operación del embalse optimizado se evidenció que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de $6.99 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual indica su comportamiento entrando en operación los distritos de riego Ranchería y San Juan de Cesar, el suministro a los acueductos de la zona y el Caudal ecológico, donde se muestra que existe déficit del recurso hídrico en algunos periodos analizados en comparación a la demanda fijada por la Agencia de desarrollo Rural – ADR para la sostenibilidad multipropósito que es de $7.33 \text{ m}^3/\text{s}$, por la cual se realiza análisis para el periodo del 1 de enero de 2021 a 31 de julio de 2022 y establecer el caudal deficitario en este último periodo operativo del embalse, donde se analiza las condiciones de operación sin riego (condicional actual) con riego (condición simulada).

6.1.1.2. Hidrograma regla de operación condiciones actuales (sin riego)

Con el fin de evaluar las condiciones de operación del embalse sin riego, se realiza un análisis preliminar de la información durante el periodo del 1 de enero de 2021 al 31 de julio de 2022. Es importante precisar que el análisis desarrollado en este numeral obedece a que no se encuentra construida la Fase II del proyecto y sólo se realiza proceso de Administración, operación y mantenimiento (AOM) por parte de la Agencia de Desarrollo Rural – ADR.

En la Figura 46 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (1 enero 2021 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color azul la operación actual y en color naranja el caudal optimizado mediante modelo RNA NSGAIL.

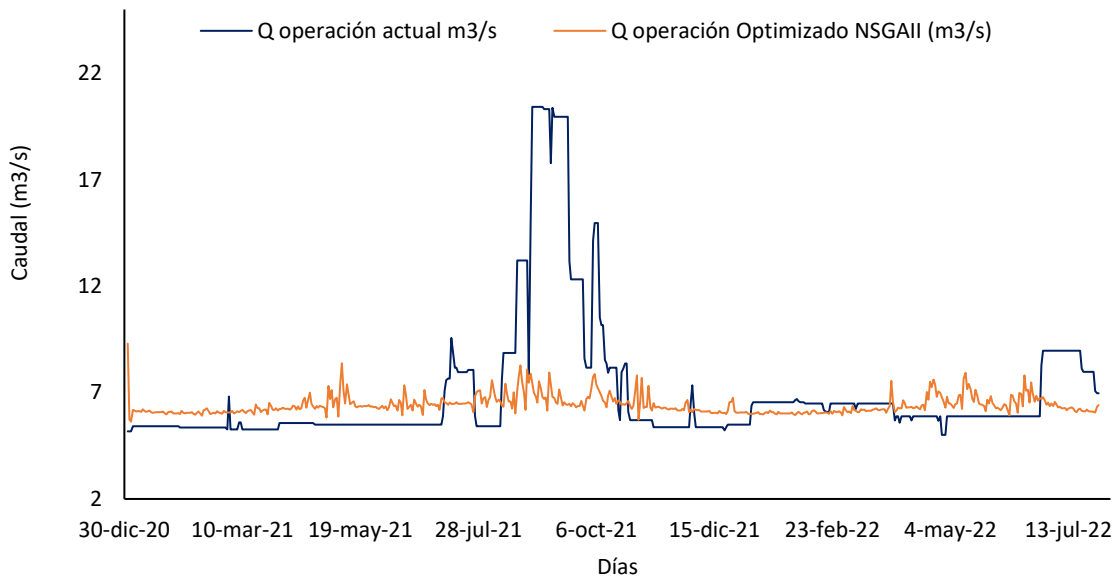


Figura 47. Hidrograma de descarga del embalse sin riego para el modelo optimizado de RNA NSGAI.

Dentro del periodo analizado se evidencia en la Figura 47, que la regla de operación real del embalse comparada con la regla de operación simulada del embalse, presenta caudales inferiores en el proceso de descarga en el primer semestre del año 2021, en el último bimestre del 2021 y segundo y tercer bimestre del 2022, lo que se muestra un almacenamiento del recurso hídrico en estos periodos, garantizando el servicio de acueductos y caudal ecológico aguas abajo con una descarga promedio de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a la operación del embalse optimizado se demostró que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de $6.40 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual indica que no afecta el comportamiento en el proceso de caudal ecológico y acueductos.

6.1.1.3. Hidrograma regla de operación condiciones actuales (Con riego)

Con el fin de evaluar las condiciones de operación del embalse con riego, se realiza un análisis preliminar de la información durante el periodo del 1 de enero de 2021 al 31 de julio de 2022. Para este caso específico se tiene en cuenta las demandas de los dos distritos de riego Ranchería y San Juan del Cesar, cuya información se toma de los estudios y diseños elaborados por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR.

En la Figura 48 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (1 enero 2012 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color azul la operación actual y en color verde el caudal optimizado mediante modelo RNA NSGAI.

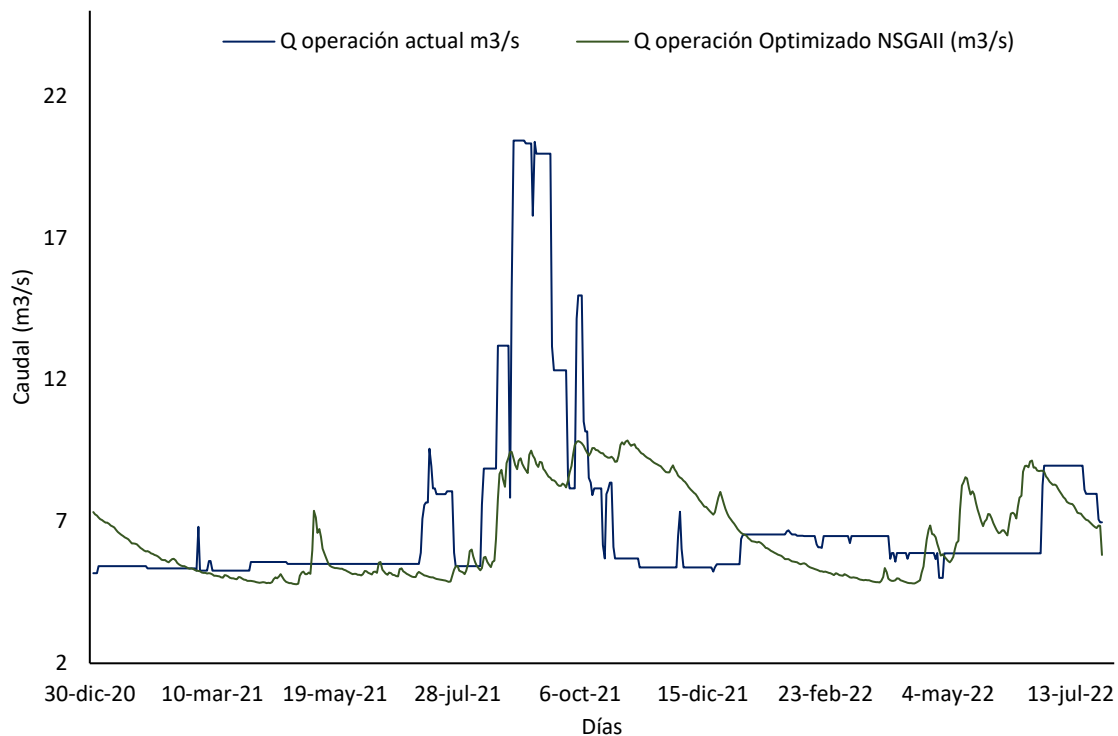


Figura 48. Hidrograma de descarga del embalse con riego para el modelo optimizado de RNA NSGAI.

Dentro del periodo analizado se evidencia en la Figura 48, que la regla de operación real del embalse comparada con la regla de operación simulada del embalse, presenta caudales inferiores en el proceso de descarga en el primer semestre del año 2021, en el último bimestre del 2021 y segundo y tercer bimestre del 2022, lo que se muestra que se continua con un almacenamiento del recurso hídrico en estos periodos y garantizando el servicio de acueductos y caudal ecológico aguas abajo con una descarga promedio de $6.94 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a la operación del embalse optimizado se demostró que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de $6.57 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual indica que no afecta el comportamiento en el proceso de caudal ecológico y acueductos, pero con un déficit de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ para el suministro de riego en los dos distritos y observándose prioridad dentro de la regla de operación le generación energética al mantenerse los picos de caudal en varias series de tiempo en $10 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.

6.1.2. Modelo de Operación con MOEA/D

El modelo de operación con RNA también fue corrido con el algoritmo MOEA/D de JMETALPY, con la finalidad de poder compararlos con los resultados obtenidos mediante la modelación NSGAI. En la Figura 49 se muestran el frente de Pareto 3D obtenidos con MOEA/D, el tiempo computacional fue de aproximadamente 9 horas para cada uno de los modelos operacionales ejecutados.

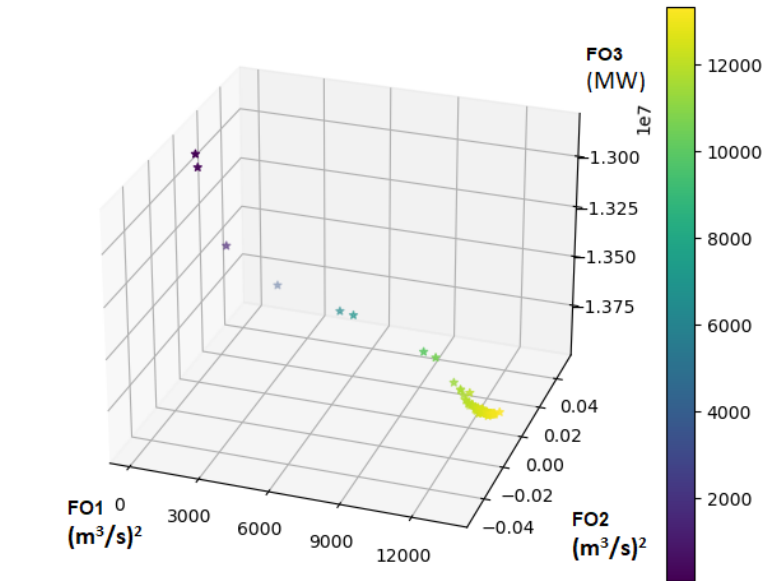


Figura 49. Frente Pareto RNA 4N empleando el algoritmo MOEA/D.

En la Figura 50 se evidencia que se continúa presentando conflicto entre funciones objetivo FO1 y FO3), aunque se garantiza los intereses de la generación hidroeléctrica, pero no se garantiza para la distribución de riego. En el caso de suministro para acueductos si se garantiza la distribución de servicio en el periodo analizado al tener valores en cero.

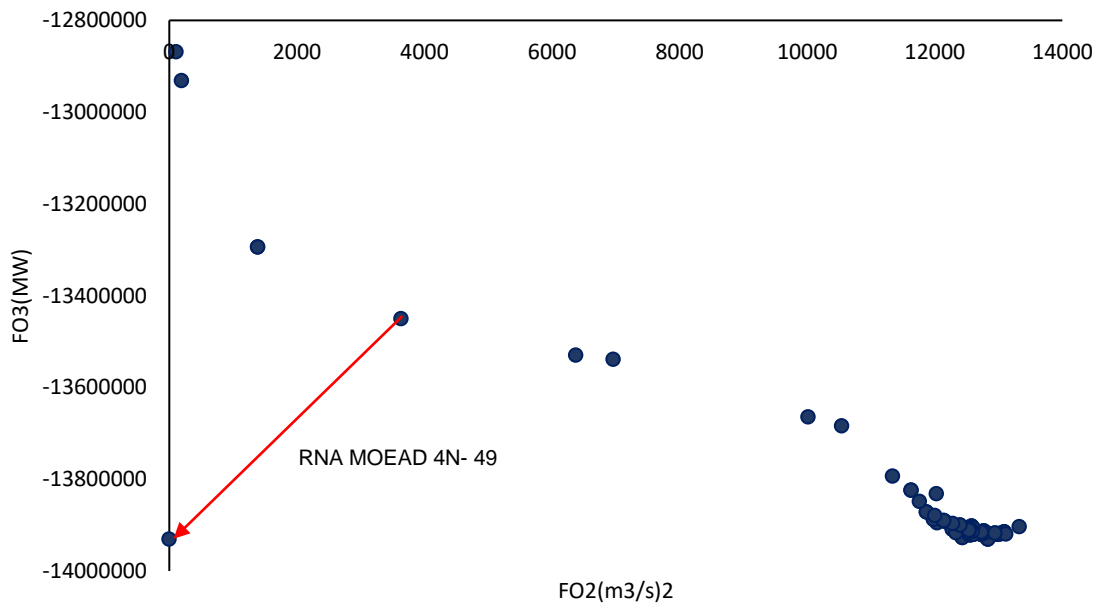


Figura 50. Frente de Pareto 2D para el modelo de operación optimizado MOEAD FO1 vs FO3.

En la Figura 50 se muestra claramente que en los dos objetivos FO1 vs FO3, están en conflicto, esto quiere decir que entre mayor sea la potencia generada en el embalse, mayor déficit de riego. Para este caso, de las 100 soluciones o reglas obtenidas, se seleccionó el que tiene mejor balance que para este caso es la solución 49, por tener una alta eficiencia en la generación de energía (FO3) con un menor déficit de riego (FO1).

MODELO OPERACIONAL	Mejores Soluciones para cada objetivo			Porcentaje mejora		
	FO1	FO2	FO3	FO1	FO2	FO3
Operación Actual	1219	0	8487	%	%	%
4 N	13113	0	13923	Aumenta en 1076%	0%	Aumenta el 164%

Tabla 17: Mejores soluciones para los objetivos de los modelos con RNA y el algoritmo MOEA/D

La Tabla 17 muestra la desmejora del objetivo FO1, por cuanto se evidencia que la optimización del recurso hídrico no se cumplió. Respecto a la FO3 es mayor, por cuanto muestra una alta eficiencia en el proceso de generación de energía en un 164% con respecto a las políticas de operación actual. Así mismo se aumenta en un 1076% el déficit de riego con esta solución.

6.1.2.1. Hidrograma regla de operación

En la Figura 51 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (enero 2016 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color rojo la operación actual y en color verde el caudal optimizado mediante modelo RNA MOEA/D.

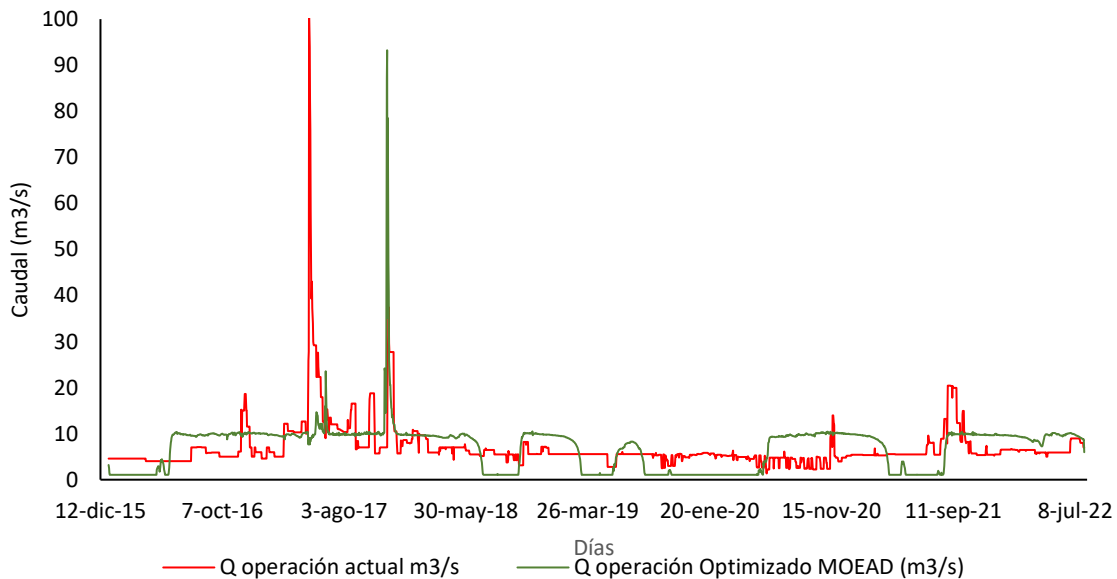


Figura 51. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado de RNA MOEA/D.

También se evidencia en la Figura 51, que la regla de operación real del embalse presenta caudales inferiores en el proceso de descarga, el cual indica que en la actualidad solo se está vertiendo caudales por encima del caudal ecológico, contando que los distritos de riego no se encuentran en funcionamiento. En cuanto a la operación del embalse optimizado se evidenció que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de 7.03 m³/s, lo cual indica su comportamiento entrando en operación los distritos de riego Rancheria y San Juan de Cesar, el suministro a los acueductos de la zona y el Caudal ecológico, donde se muestra que existe déficit del recurso hídrico de 0.30 m³/s en algunos periodos analizados en comparación a la demanda fijada por la Agencia de desarrollo Rural – ADR para la sostenibilidad multipropósito que es de 7.33 m³/s, por la cual se realiza análisis para el periodo del 1 de enero de 2021 a 31 de julio de 2022 y establecer el caudal deficitario en este último periodo operativo del embalse, donde se analiza las condiciones de operación sin riego (condicional actual) con riego (condición simulada).

6.1.2.2. Hidrograma regla de operación condiciones actuales (sin riego)

Con el fin de evaluar las condiciones de operación del embalse sin riego, se realiza un análisis preliminar de la información durante el periodo del 1 de enero de 2021 al 31 de julio de 2022. Es importante precisar que el análisis desarrollado en este numeral obedece a que no se encuentra construida la Fase II del proyecto y sólo se realiza proceso de Administración, operación y mantenimiento (AOM) por parte de la Agencia de Desarrollo Rural – ADR.

En la Figura 52 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (1 enero 2011 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color azul la operación actual y en color naranja el caudal optimizado mediante modelo RNA MOEAD.

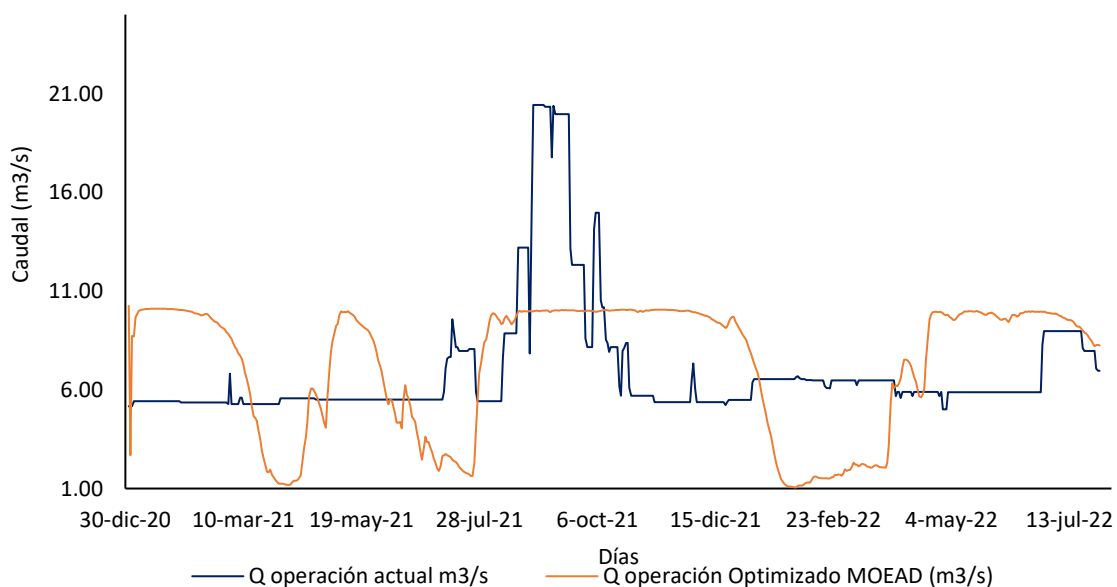


Figura 52. Hidrograma de descarga del embalse sin riego para el modelo optimizado de RNA MOEAD.

Dentro del periodo analizado se evidencia en la Figura 52, que la regla de operación real del embalse comparada con la regla de operación simulada del embalse, presenta caudales inferiores en el proceso de descarga en el primer semestre del año 2021, en el último bimestre del 2021 y tercer bimestre del 2022, lo que se muestra un almacenamiento del recurso hídrico en estos periodos, garantizando el servicio de acueductos y caudal ecológico aguas abajo con una descarga promedio de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a la operación del embalse optimizado se demostró que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de $7.70 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual indica que se podría descargar $2.70 \text{ m}^3/\text{s}$ más que la operación actual, sin afectar el comportamiento en el proceso de caudal ecológico y acueductos. Sin embargo, presenta diferencias considerables entre la operación actual y la simulada, por cuanto se presenta periodos donde solo descarga el caudal ecológico, donde se concluye que no es un modelo eficiente.

6.1.2.3. Hidrograma regla de operación condiciones actuales (Con riego)

Con el fin de evaluar las condiciones de operación del embalse con riego, se realiza un análisis preliminar de la información durante el periodo del 1 de enero de 2021 al 31 de julio de 2022. Para este caso específico se tiene en cuenta las demandas de los dos distritos de riego Ranchería y San Juan del Cesar, cuya información se toma de los estudios y diseños elaborados por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR.

En la Figura 53 muestra el hidrograma de salida del embalse que genera la regla de operación obtenida a partir del modelo con RNA, el cual, fue simulado para el periodo de análisis (1 enero 2021 a julio de 2022). Con el fin de representar la relación del hidrograma con las reglas de operación, se estableció en color azul la operación actual y en color verde el caudal optimizado mediante modelo RNA NSGAIL.

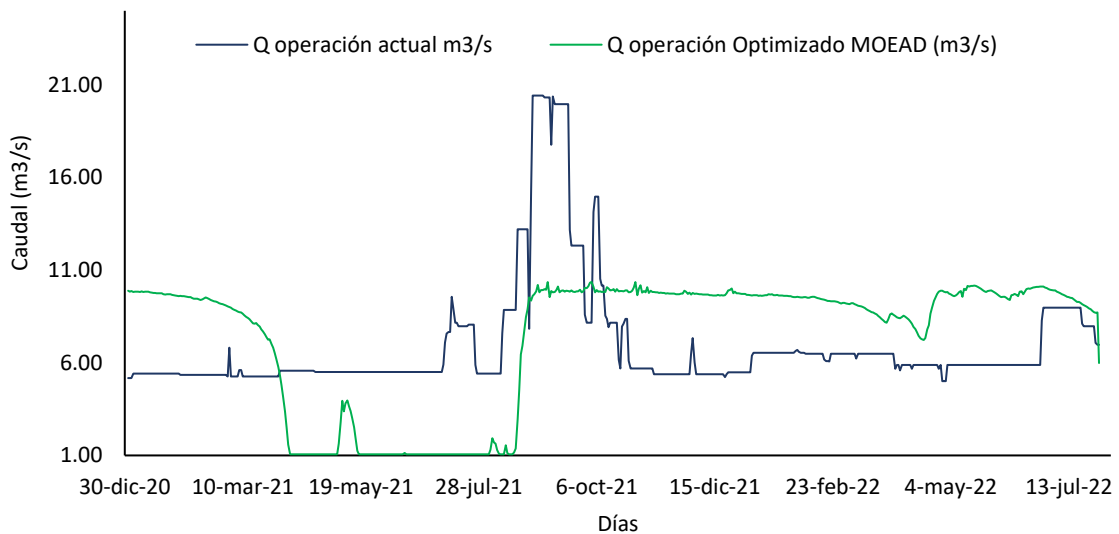


Figura 53. Hidrograma de descarga del embalse con riego para el modelo optimizado de RNA MOEAD.

Dentro del periodo analizado se evidencia en la Figura 53, que la regla de operación real del embalse comparada con la regla de operación simulada del embalse, presenta caudales inferiores en el proceso de descarga los primeros dos bimestres del año 2021, en el último semestre del 2021 y

segundo y tercer bimestre del 2022, lo que se muestra que se continua con un almacenamiento del recurso hídrico en estos periodos y garantizando el servicio de acueductos y caudal ecológico aguas abajo con una descarga promedio de 5 m³/s. En cuanto a la operación del embalse optimizado se demostró que se mantiene durante el periodo analizado una descarga promedio de 7.42 m³/s, el cual indica que se puede descargar 2.42 m³/s más que la operación actual, sin afectar el comportamiento en el proceso de caudal ecológico y acueductos. Sin embargo, no es eficiente el modelo por observarse que en el periodo analizado no se garantiza el servicio de riego para los dos distritos en el segundo bimestre de 2021.

6.1.3. MINIMAX

El modelo de operación fue corrido en algoritmo MiniMax, mediante aplicación interactiva desarrollada en Python con la finalidad de satisfacer las demandas del recurso hídrico de la manera óptima, dependiendo de las prioridades. Dicho proceso interactivo fue desarrollado por (Troncoso Rojas, 2021), el cual consiste en en analizar las entradas de información representadas por la topografía del embalse, representada en las curvas Volumen/Área/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.

Como primera medida 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 tenida 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 en ejecución.

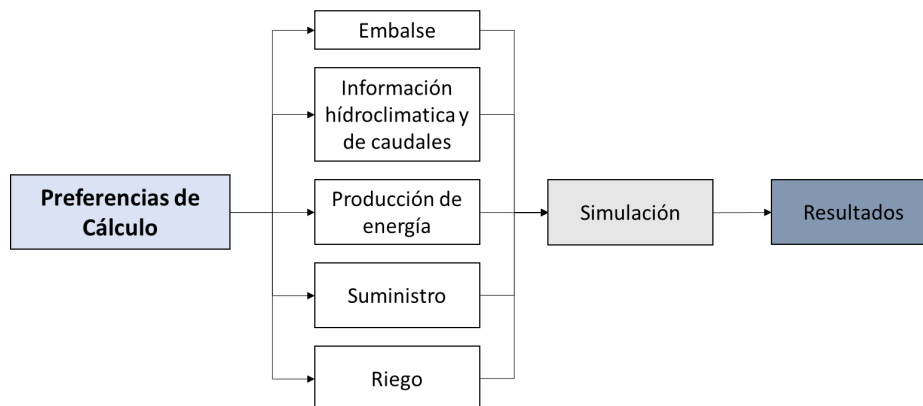


Figura 54. Diagrama de bloques de arquitectura de Wuin
Fuente: (Troncoso Rojas, 2021)

Se establece los siguientes módulos para su análisis:

- Módulo de Preferencia de Calculo:

Se establece el sistema de medida y la precisión de la información.

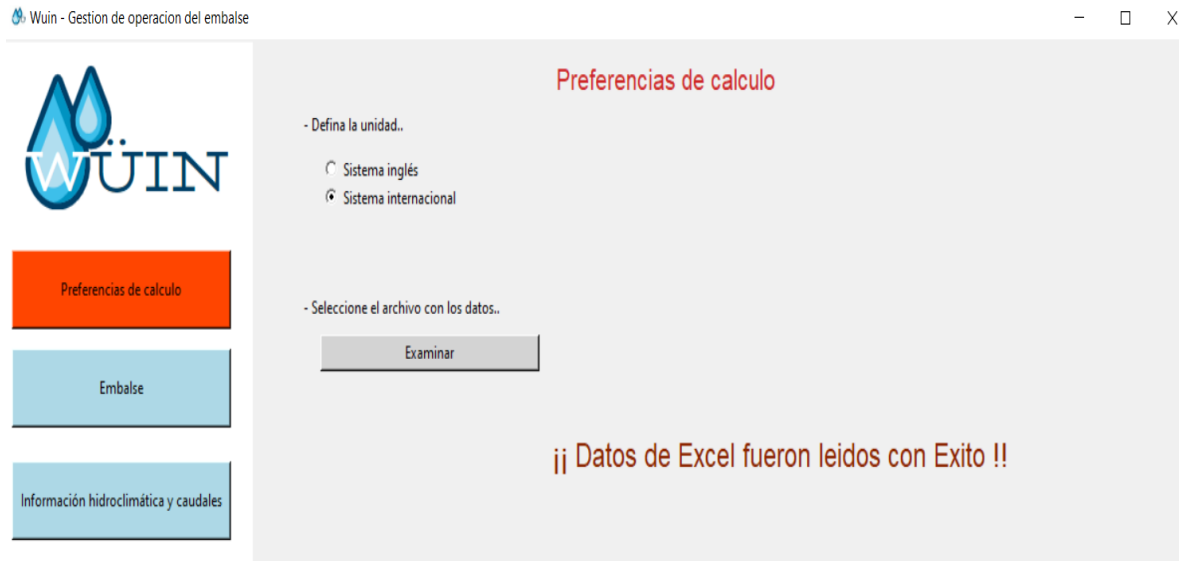


Figura 55. Pantalla de selección de preferencias de cálculo

Se selecciona el sistema internacional y la precisión de la información con 4 decimales (0.0001).

Luego se carga el archivo en Excel y debe cumplir con todas las características de cifrado para que sea la lectura exitosa.

Módulo del Embalse:

Se ingresa los parámetros de volumen, cotas caudales, altura de agua disponible, caudal de salida en PCH, caudal estimado por infiltración y liberación máxima de descarga de acuerdo con la cota del embalse.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

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

Tabla 18: Parámetros de ingreso módulo embalse

Módulo de Información Hidroclimática y de caudales:

Se ingresa los parámetros de año de información, mes de información, temperatura, precipitación caudales medios caudales mínimos y nivel del embalse.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
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	m3/s
Qmin	Numérico	Caudal mínimo	m3/s
Nivel	Numérico	Nivel del Embalse	m

Tabla 19: Parámetros de ingreso módulo Hidroclima

Módulo de Requerimiento de Energía:

Se ingresa los parámetros de año de la información, mes de la información y requerimiento de energía en el mes.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
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	

Tabla 20: Parámetros de ingreso módulo energía

Módulo de Producción de Energía:

Se ingresa los parámetros de Volumen, cota y energía producida en el embalse.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
Vol	Numérico	Volumen del embalse según cota	Mm3
Cota	Numérico	Cota de embalse	m
Prod	Numérico	Energía producida por el embalse	kwatt

Tabla 21: Parámetros de ingreso módulo Producción de energía

Módulo de Suministro de Recurso Hídrico

Se ingresa los parámetros de año de información, mes de la información y valor de la demanda para consumo.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
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	

Tabla 22: Parámetros de ingreso módulo Suministro

Módulo de Riego

Se ingresa los parámetros de año de información, mes de la información y valor de la demanda para riego.

En este módulo carga la información de la siguiente manera:

COLUMNA	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
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	

Tabla 23: Parámetros de ingreso módulo Riego

Módulo de Simulación

Se realiza el proceso de simulación de acuerdo con la información ingresada.

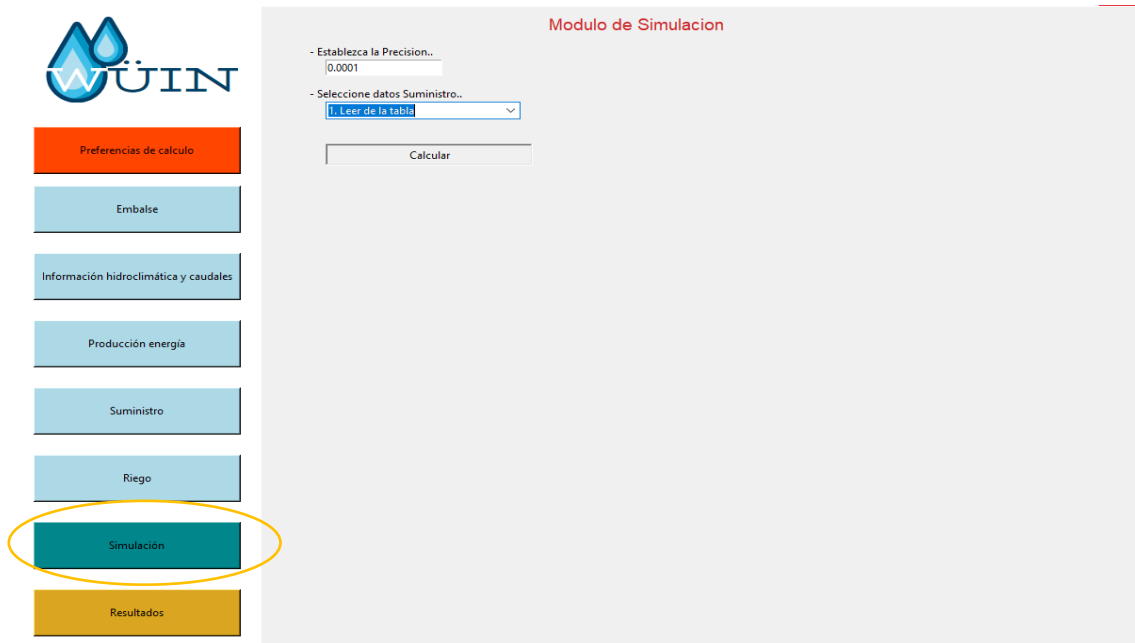


Figura 56. Pantalla de selección de Simulación

Se procede a aplicar la simulación del algoritmo MiniMax.

Módulo de Resultados

Se realiza la presentación de los Resultados de acuerdo con la información ingresada.

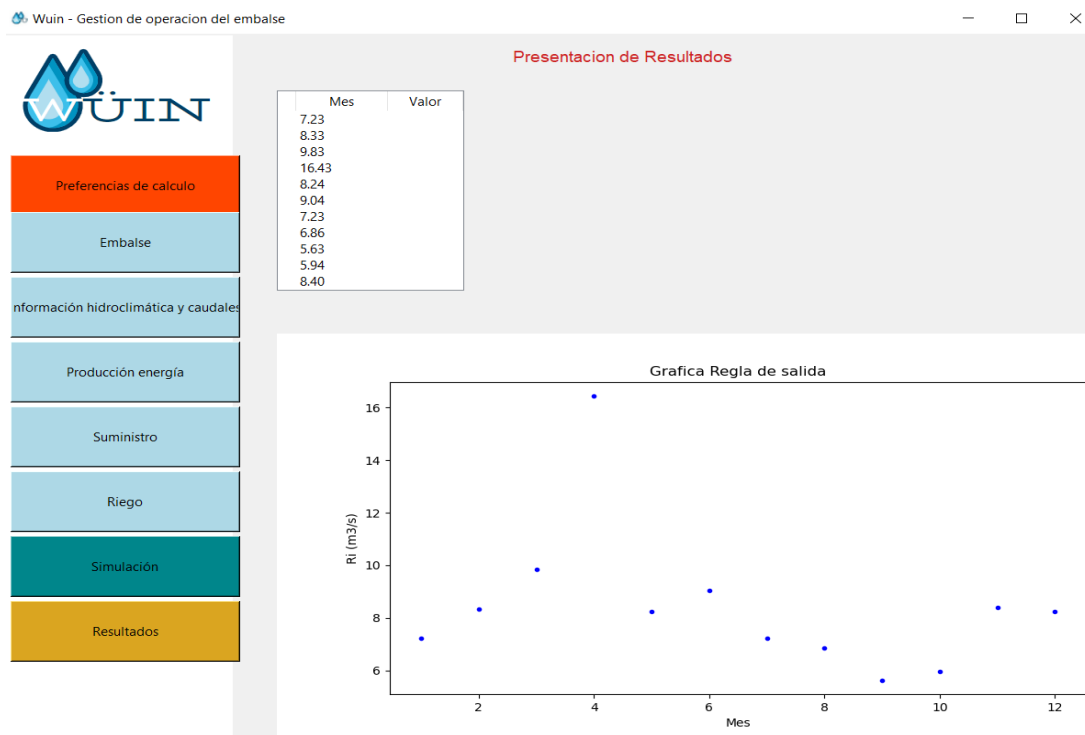


Figura 57. Pantalla de Resultados

6.1.3.1. Actualización de datos e información Complementaria

De acuerdo con la información inicial tomada del trabajo de grado de (Troncoso Rojas, 2021), se actualiza la información de caudales de ingreso mensuales medios, temperatura, precipitación, valores de caudales de riego actualizados y se efectuó ajuste de la batimetría de acuerdo con la actualización de los estudios y diseños realizados por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR en el año 2021.

6.1.3.2. Hidrograma regla de operación

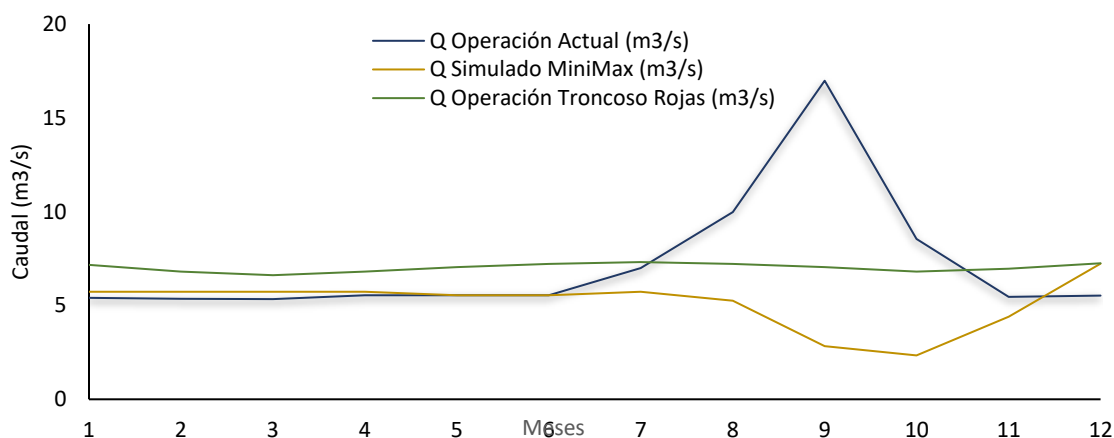


Figura 58. Hidrograma de descarga del embalse para el modelo optimizado MiniMax tomado de un segmento de año (2021)

Se evidencia en la Figura 58 que la regla de operación real del embalse presenta caudales similares en relación al caudal optimizado MiniMax, para el primer semestre del 2021 y para el segundo semestre del 2021 presenta una diferencia entre el caudal actual y el simulado MiniMax, esto obedece a que dentro de ese periodo se realizó proceso de descarga hasta de 11 m³/s, como consecuencia de del funcionamiento de la válvula Howell Bunger y la válvula de fondo en procesos de operación. Sin embargo, con el caudal simulado, se presenta una mejor regulación, debido a que ya entra en funcionamiento los dos distritos de riego y la generación de energía. Con este modelo se está garantizando el recurso hídrico para el proceso multipropósito en el año analizado 2021.

En cuanto a la comparación de la información entre las modelaciones de desarrolladas por (Rojas Troncoso, 2021) y las elaboradas en el presente trabajo, presentan un comportamiento similar, mostrando un buen proceso de optimización con la información actualizada a julio de 2022, evidenciando que el algoritmo MiniMax desarrolla un buen proceso de optimización.

6.2. Comparación de resultados de los modelos analizados

En la Figura 59 se presentan los hidrogramas de descarga para todas las reglas de operación generadas en el proceso de optimización de todos los modelos de operación NSGAI y MOEAD, simulados para el periodo de análisis de (enero 2016 a julio 2022).

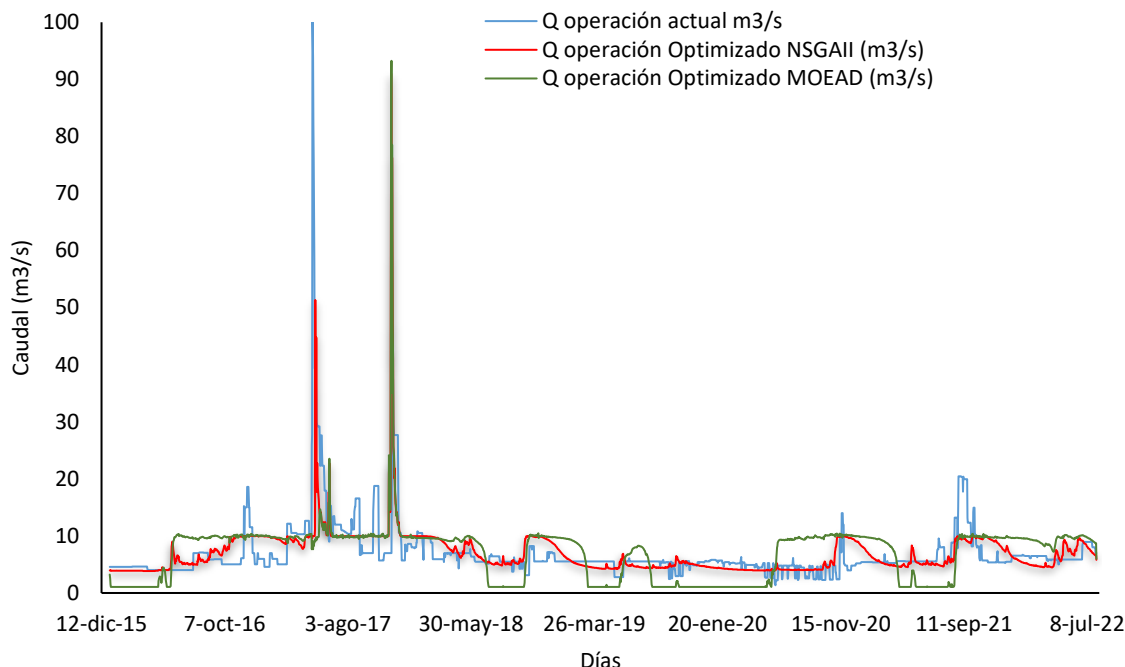


Figura 59. Hidrograma de descarga del embalse para los modelos optimizados NSGAI y MOEA/D

De la Figura 59 se observa que las reglas de operación optimizadas mediante los algoritmos NSGAI y MOEAD consiguen nivelar los picos de los caudales de descarga del embalse respecto a la regla de operación actual, esto debido a que todavía no se encuentra en operación los dos distritos de riego Ranchería y San Juan del Cesar, dando prioridad a caudal ecológico y a suministro de agua para acueductos. Ya con el proceso de optimización se evidenció el comportamiento del embalse ya entrado en operación, incluyendo la operatividad de los dos distritos de riego y la PCH, por lo que considera que los caudales simulados muestran el proceso de operación óptimo para su implementación como sistema multipropósito y observándose prioridad dentro de la regla de operación le generación energética al mantenerse los picos de caudal en varias series de tiempo en $6.74 \text{ m}^3/\text{s}$ para el algoritmo NSGAI.

Para realizar un comparativo entre los algoritmos NSGAI, MOEAD y MiniMax, se tomaron los caudales medios mensuales de los dos primeros algoritmos y los caudales medios mensuales tomados de los resultados del algoritmo MiniMax para un periodo de referencia el cual se llevó a cabo el año 2021.

Fecha	Operación Actual (m3/s)	Operación Simulada NSGAI (m3/s)	Operación Simulada MOEAD (m3/s)	Operación Simulada MiniMax (m3/s)
Enero	5.4	7.40	9.77	5.73
Febrero	5.35	5.63	9.41	5.73
Marzo	5.34	4.90	8.01	5.73
Abril	5.55	4.72	1.57	5.73
Mayo	5.5	5.87	1.79	5.54

Junio	5.5	5.12	1.06	5.54
Julio	6.99	4.97	1.06	5.73
Agosto	9.98	7.26	3.80	5.26
Septiembre	16.98	9.29	9.91	2.83
Octubre	8.55	9.71	9.95	2.34
Noviembre	5.46	9.42	9.80	4.44
Diciembre	5.53	7.92	9.72	7.23

Tabla 24: Caudales de Reglas de Operación tomados de los resultados de los algoritmos NSGAI, MOEAD y MiniMax.

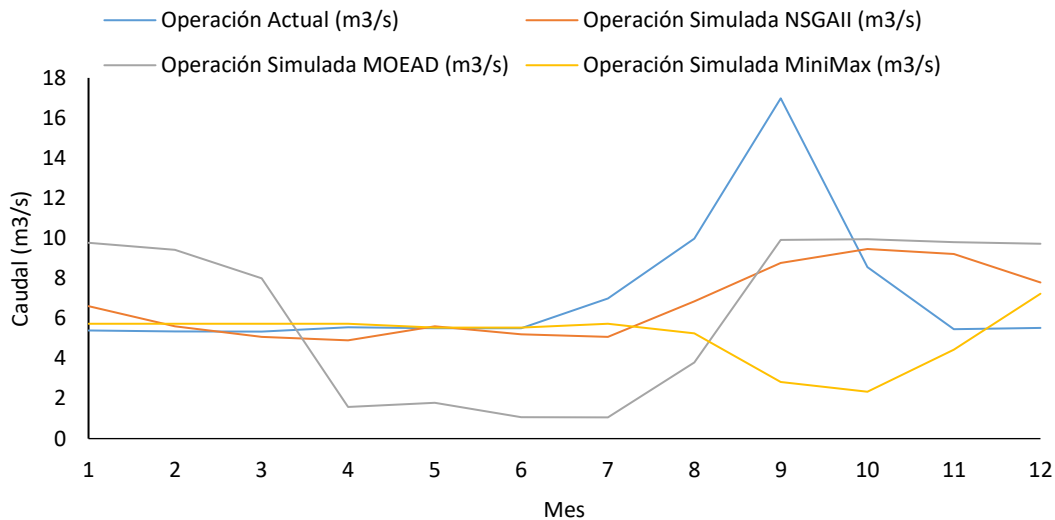


Figura 60. Hidrograma de descarga del embalse de todos los modelos optimizados periodo de análisis (2021)

En la Figura 60, se presentan los hidrogramas de descarga para todas las reglas de operación generadas en el proceso de optimización de todos los modelos de operación, simulados para el periodo de análisis (2009-2019). Así mismo, se presentan los niveles simulados del embalse con cada una de las reglas de operación obtenidas para el mismo periodo de análisis.

Para escoger la mejor regla de operación se utilizó la maximización del coeficiente de eficiencia Nash – Sutcliffe:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t^m - Q_t^o)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t^o - \bar{Q}^o)^2}$$

Donde \bar{Q}^o es el promedio de los caudales observados
 Q_t^o es el caudal observado en el tiempo t
 Q_t^m es el caudal modelado en el tiempo t

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

Tabla 25: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

Y se tiene los siguientes resultados:

Modelo	Coficiente de eficiencia Nash – Sutcliffe (NSE)
Operación Simulada NSGAI (m3/s)	0.244
Operación Simulada MOEAD (m3/s)	-0.96
Operación Simulada MiniMax (m3/s)	-1.059

Tabla 26: Coeficiente de eficiencia Nash – Sutcliffe (NSE).

Donde obtenemos para el modelo de optimización utilizando Algoritmo Artificial NSGAI, un resultado satisfactorio, estableciendo entre el comparativo como el mejor modelo que se ajusta a las condiciones de optimización del embalse el Cercado.

6.2.1. Selección y validación de la regla de operación óptima

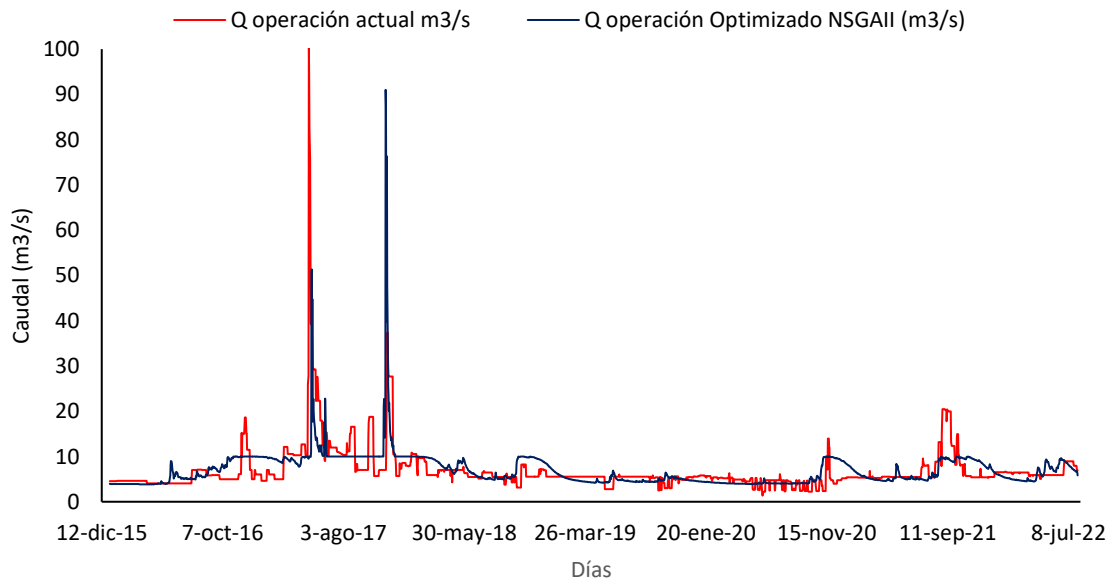


Figura 61. Hidrograma de descarga del embalse para los modelos optimizado NSGAI (optimización seleccionada)

De acuerdo con los resultados analizados de la *Figura 61*, la regla de operación que representa los mejores resultados para la RNA NSGAI para 4 neuronas, usando las condiciones objetivas FO1 y FO2 (Riego y Acueductos) encontrándose Déficit en demanda del servicio de riego. Para el caso de acueductos por ser un servicio vital se deberá garantizar el servicio por tal motivo no se establece déficit para este suministro. Lo que si se evidencia es el mejoramiento sustancial del objetivo FO3 (Generación de energía) debido a que se garantiza una demanda energética promedio de 5.5 MW, que es superior a los 4.25 MW propuesto en los estudios y diseños de la Agencia de Desarrollo Rural – ADR, por lo cual se cumple con este propósito (ver *Figura 62.*)

Meses	Operación Actual (m3/s)	Operación Simulada NSGAI (m3/s)	Demanda Multipropósito (m3/s)	Déficit (m3/s)
Enero	5.4	7.40	6.44	0.96
Febrero	5.35	5.63	6.95	-1.32
Marzo	5.34	4.90	8.23	-3.33
Abril	5.55	4.72	9.23	-4.51
Mayo	5.5	5.87	7.67	-1.80
Junio	5.5	5.12	9.35	-4.23
Julio	6.99	4.97	10.05	-5.08
Agosto	9.98	7.26	7.42	-0.16
Septiembre	16.98	9.29	4.27	5.02
Octubre	8.55	9.71	4.27	5.44
Noviembre	5.46	9.42	5.8	3.62
Diciembre	5.53	7.92	6.97	0.95

Tabla 27: Comparativo de Caudales medios mensuales entre operación actual, operación simulada NSGAI, demanda Multipropósito y Déficit Hídrico.

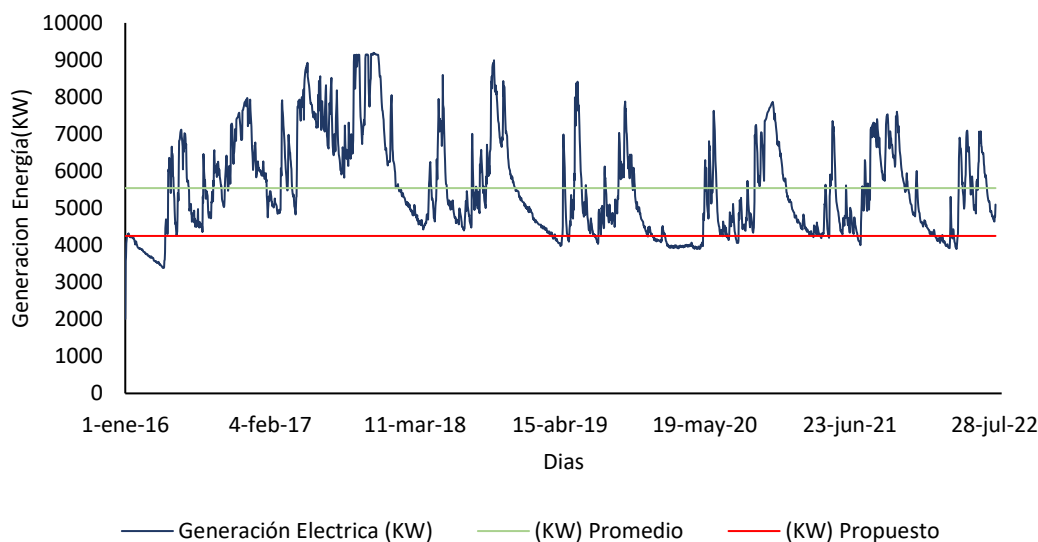


Figura 62. Generación de energía por modelo NSGAI.

Analizados los resultados de los caudales de la optimización RNA NSGAI, es importante precisar que de acuerdo con lo establecido por la Agencia de Desarrollo Rural – ADR, el caudal de demanda actual corresponde a 5.5 m³/s como se muestra en la *Figura 63*, el cual no implica riesgo en el proceso de operación puesto que los caudales optimizados se encuentran en promedio entre el 3 y 6 m³/s.

Demanda Actual

Las demandas y restricciones impuestas actuales son:

- *Caudal Ecológico*.....1,06 m³/s
- *Caudal Concesionado Acueductos*.....0,455 m³/s
- *Caudal Concesionado uso agroindustrial*.....0,051 m³/s
- *Caudal Concesionado para ganadería*.....0,033 m³/s
- *Caudal Concesiones para acequias*.....3,90 m³/s

Luego la demanda actual es:

Demanda actual= 5,50 m³/s

Figura 63 Demanda actual del embalse El Cercado. (ADR A. d., 2021)

Demanda Futura

En el Artículo Segundo de la Resolución 4360 de 5 de diciembre de 2005 se especifica:

Etapas de Operación:

- *Caudal Ecológico*.....1,06 m³/s
- *Caudal Concesionado distrito Ranchería*.....4,57 m³/s
- *Caudal Concesionado distrito San Juan del Cesar*.....1,16 m³/s
- *Caudal Concesionado Acueductos*.....0,455 m³/s
- *Caudal Concesionado uso agroindustrial*.....0,051 m³/s
- *Caudal Concesionado para ganadería*.....0,033 m³/s

• <i>Total Caudal concesionado fase de operación</i>.....7,33 m³/s
--

- *Tiempo de concesión: Cincuenta (50) años*

Figura 64 Demanda Futura del embalse El Cercado. (ADR A. d., 2021)

Sin embargo, cuando entre en operación total el embalse El Cercado, el recurso hídrico va presentar un déficit en el primer semestre en los meses de febrero a agosto, debido a que con el tiempo se ha presentado mayor demanda por concesiones de agua por parte de la Corporación Autónoma Regional de la Guajira – Corpoguajira, que demandan más caudal al embalse, así mismo el cambio climático en esta zona del país ha generado efectos directos en el Hidroclima en la zona de ubicación del embalse que afectan considerablemente el recurso hídrico en una disminución de caudal promedio en 2.15 m³/s y un máximo de 3.03 m³/s, por lo que se requiere un planteamiento de acondicionamiento de cobertura por prioridades del servicio con el fin de garantizar el sistema multipropósito por parte de la Agencia de Desarrollo Rural – ADR, que de acuerdo a los resultados de los estudios y diseños desarrollados por esta entidad establece una demanda de 7.33 m³/s. (ver Figura 64.)

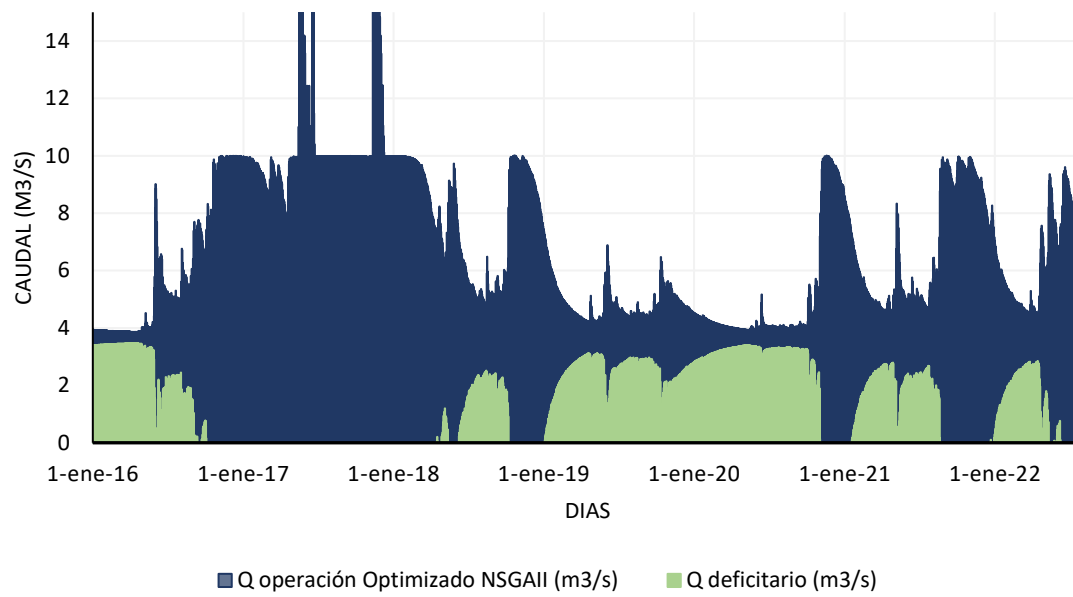


Figura 65. Comparativo Caudal optimizado y Caudal deficitario del embalse El Cercado.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los modelos de operación de embalses se pueden parametrizar adecuadamente empleando funciones de aproximación como son las Redes Neuronales, que permiten efectuar una regulación del recurso hídrico de acuerdo con las demandas para la cual fue diseñado.

Los resultados de la optimización de todos los modelos demuestran que la Redes Neuronales artificiales tiene un mejor desempeño a diferencia de otros métodos. Siendo el NSGAll el algoritmo de optimización que tiene mejor adaptabilidad al caso analizado en términos de tiempo computacional y resultados entregados.

A pesar de que no se presentó conflicto entre los suministros de agua para riego y acueductos, si presenta conflicto con el proceso de generación eléctrica, que mediante el proceso de optimización Multiobjetivo pudo establecer que la regla de operación óptima evidencia que no se garantiza los intereses en la operación del embalse Multipropósito El Cercado.

Con los resultados mostrados durante el periodo de enero de 2016 a julio de 2022 mediante el proceso de optimización RNA NSGAll, no están encaminadas al cumplimiento de un embalse multipropósito, sin embargo, se debe considerar en el servicio de riego una rotación de cultivos que demanden menos agua y así garantizar un equilibrio del recurso hídrico y reducir el déficit de caudal.

Analizado los resultados, se recomienda a la Agencia de Desarrollo Rural – ADR, la implementación de las políticas de gestión dentro de la actualización de los estudios y diseños efectuados en el año 2021, que permitan optimizar la distribución del recurso disminuyendo el déficit y una adecuada regulación acorde con el plan agroproductivo establecido para los distritos de Riego Ranchería y San Juan del Cesar.

Se recomienda para futuros análisis de optimización del embalse El Cercado, incluir dentro de los modelos de operación variables de tipo económico que permitan evaluar la operación del embalse directamente en términos de costos para la toma de decisiones que permitan a la Agencia de Desarrollo Rural – ADR generar un proyecto autosostenible.

8. BIBLIOGRAFIA:

- Adr, a. D. (2021). *Estudios y diseños distrito de riego rancheria y valle de san juan*. Bogotá d.c: adr.
- Adr, a. D. (2021). *Hoja de ruta para la terminación del proyecto estratégico de adecuación de tierras de gran escala del río ranchería*. Bogotá d.c.
- Agencia de desarrollo rural (adr). (2020). *Licitacion publica proyecto multipropósito del rio rancheria*. Bogotá: adr.
- Anghileri, d. (2013). *Management of multi-purpose reservoirs under climate change: impact assessment and adaptation strategies*. Milan: politecnico di milano.
- Avila, n. Y. (6 de 12 de 2021). Por el autor. Bogotá d.c, colombia.
- Barros, m. T.-I. (2003). Optimization of large-scale hydropower system operations. . *Journal of water resources planning and management*. Asce, págs. 178-188.
- Branche, e. (2016). Multipurpose water uses of hydropower reservoirs: sharing the water uses of multipurpose hydropower reservoirs:. *Demain l'énergie – séminaire daniel-dautreppe*, 470-478.
- Castelletti, a. P.-s. (2011). Assessing water resources management and development in northern vietnam. *Hydrol. Earth syst. Sci. Discuss.*, 7177–7206.
- Celeste, a. C. (2009). Implicit stochastic optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid brazil. . *Pesquisa operacional*, 223– 234.
- Corpoguajira. (2011). *Pomca río rancheria*. Riohacha: corporación autónoma regional de la guajira.
- Corpoguajira. (23 de agosto de 2018). *Www.corpoguajira.gov.co*. Obtenido de [www.corpoguajira.gov.co: https://corpoguajira.gov.co/wp/la-guajira-cuenta-con-el-plan-integral-de-cambio-climatico-picc/](https://corpoguajira.gov.co/wp/la-guajira-cuenta-con-el-plan-integral-de-cambio-climatico-picc/)
- Correa, c., bolaños, a., & molina , a. (2008). Algoritmo multiobjetivo nsga-ii aplicado al problema de la mochila. *Scientia et technica*, 206-211.
- Emanueli gandara, c. (2017). *Exploring spatial-temporal data driven modelling techniques for flow forecasting*. Delft.
- Findeter. (2020). Estudio previo para la contratación paf-adr-c-025-2020. “*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.
- Fonade. (2015). *Consultoría para el diseño y estructuración de un modelo de app para el proyecto de ranchería, considerando los diferentes servicios involucrados, para garantizar la sostenibilidad del sistema integral*. Bogotá d.c .
- Giuliani, m. , castelletti, a., pianosi, f., mason, e., & reed, p. M. . (2016). Curses, tradeoffs, and scalable management: advancing evolutionary multiobjective direct policy search to

- improve water reservoir operations. *Asce, journal of water resources planning and management*, 04015050-1 - 04015050-17.
- Hiew, k. (1987). Optimization algorithms for large-scale multireservoir hydropower systems. *Colorado state university: ph.d. Dissertation*.
- Hilera, j., & martínez, v. (2000). *Redes neuronales artificiales y aplicaciones. Fundamentos, modelos y aplicaciones*. México d.f: alfaomega.
- Ideam. (2015). *Estudio nacional de agua 2015*. Bogotá d.c: estimación de la demanda de agua.
- Kiombo, j. (2012). *Modelo de gestión óptima multiobjetivo para la cuenca del río kwanza*. Madrid: universidad rey juan carlos.
- Labadie, j. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of water resources planning and management*. En j. W. Labadie, *optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. Journal of water resources planning and management* (págs. 93-111).
- Lima, a. (2022). *Algoritmo minimax en teoría de juegos*. Obtenido de <https://es.acervolima.com/algoritmo-minimax-en-teoria-de-juegos-conjunto-1-introduccion/>
- Loucks, d. &. (2017). *Wates resource systems planning and management. Gewerbestrasse*, Switzerland: springer.
- Minambiente. (2022). *Caudal ambiental*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/caudal-ambiental/>
- Molnar, p. (2011). "calibration". Watershed modelling, ss 2011. *Institute of environmental, engineering, chair of hydrology and water resources management*.
- Momtahn, s. &. (2007). Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies. *Asce, journal of water resources planning and management*, 202-209.
- Nebro, a. (5 de septiembtre de 2018). *Jmetalpy documentation*. Obtenido de [readthedocs.org: https://readthedocs.org/projects/jmetalpy/downloads/pdf/stable/](https://readthedocs.org/projects/jmetalpy/downloads/pdf/stable/)
- Otero cortés, a. (2013.). *Río ranchería, entre la economía, la biodiversidad y la cultura*. Bogotá d.c.: banco de la república.
- Pardo tovar, s. (2017). *Estimación del volumen de sedimentos de la cuenca del río ranchería*. Bogotá d.c.
- Raman, h. &. (1996). Deriving a general operating policy for reservoirs using neural network. *J. Water resour. Plann. Manage. Asce.*, 122(5), 342-347.
- Rani, d. &. (2006). Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. . *Water resources management*, 861–878.

- Research, f. F. (2010). *World water: resources, usage and the role of man-made reservoirs*. U.k.: foundation for water research. Londres: foundation for water research.
- Reyes-hernández, n., ponsich, a., & hoyos-reyes , l. F. (2018). Técnicas metaheurísticas de optimización multiobjetivo para resolver el problema del portafolio de inversión. *Estocástica: finanzas y riesgo*, 148-182.
- Ritter, j. (2016). *Optimization of hydropower dam cascade operations with respect to energy generation, flood hazard and flow regime alteration using operational modelling*.
- Rojas troncoso, l. M. (2021). *Aplicación del algoritmo minmax en la optimización de embalses multipropósito (caso de estudio: represa rio ranchería)*. Bogotá d.c.
- Sinc, a. (26 de junio de 2018). *Www.eltiempo.com*. Obtenido de www.eltiempo.com: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/desplazamiento-por-cambio-climatico-en-la-guajira-235854>
- Taghian, m., abid, a., & ahmadianfar, i. (2015). A multi-objective evolutionary algorithm using decomposition (moea/d) and its application in multipurpose multi-reservoir operations. *Int. J. Optim. Civil eng.*, 167-187.
- Tami, c. A. (2020). *Identificación de reglas de operación óptimas de embalses para el control de inundaciones a partir de modelos de operación. Caso de estudio: cuenca del río yuna en república dominicana*. Bogotá d.c.
- Troncoso rojas, l. (2021). *Aplicación del algoritmo minmax en la optimización de embalses multipropósito (caso de estudio: represa rio*. Bogotá d.c.
- Yongfeng , g. (mayo de 2020). *Jmetalpy: an evolutionary algorithm framework for solving the optimization problems*. Obtenido de <https://gu-youngfeng.github.io/blogs/jmetalpy.html>
- Zhang, q. &. (2007). Moea/d: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *. IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 11, no. 6, pp., 712-731.*