Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Aplicación de análisis multicriterio mediante Sistema de Información Geográfica para la selección del sitio y tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

AUTOR

Hulinho Yordy ARBAIZA OCROSPOMA

ASESOR

Dr. Samuel Ismael QUISCA ASTOCAHUANA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Arbaiza, H. (2026). *Aplicación de análisis multicriterio mediante Sistema de Información Geográfica para la selección del sitio y tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Civil]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70802078
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-5912-3177
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Dr. Samuel Ismael Quisca Astocahuana
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06640007
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2477-9306
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Humberto Iván Pehovaz Alvarez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07450662
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dra. Luz Baltazara Ramos Lorenzo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Mg. Franci Benito Cruz Montes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08190505
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica

Grupo de investigación	No aplica

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincias: Lima – Huarochirí Distritos: Cieneguilla, La Molina, Lurín, Pachacamac, Villa María del Triunfo, Antioquía, Lahuaytambo, Langa, San Andrés de Tupicocha, San Damián, Santiago de Tuna y Cuenca. Latitud: -11.2500° a -12.3000° Longitud: -76.9333° a -76.1833°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería civil https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01 Oceanografía, Hidrología, Recursos Hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 17de agosto del 2026, siendo las 11:00 horas en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. HUMBERTO IVÁN PEHOVAZ ALVAREZ	Presidente
Dra. LUZ BALTAZARA RAMOS LORENZO	Miembro
Mg. FRANCI BENITO CRUZ MONTES	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: **«APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN»**, presentada por el Bachiller **HULINHO YORDY ARBAIZA OCROSPOMA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, asesorado por el **Dr. SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA**.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:
SATISFACCIÓN DEL JURADO

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:
16 (DIECISEIS) APROBADO CON MENCIÓN HONROSA

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**, a **HULINHO YORDY ARBAIZA OCROSPOMA .**

Siendo las 12.15p.m., se dio por concluido el acto académico, expidiéndose Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 17 de agosto de 2026.

Dr. HUMBERTO IVÁN PEHOVAZ ALVAREZ
PRESIDENTE

Dra. LUZ BALTAZARA RAMOS LORENZO
MIEMBRO

Mg. FRANCI BENITO CRUZ MONTES
MIEMBRO

Dr. FÉLIX SANTIAGO SÁNCHEZ BENITES
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL FIGMMG UNMSM

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS · Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica · E.P. DE INGENIERIA CIVIL · DIRECTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA, en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N.°010-2025-EPIC-FIGMMG/UNMSM de la tesis de investigación, cuyo título es **"Aplicación de análisis multicriterio mediante sistema de información geográfica para la selección del sitio y tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín",** presentado por el Bachiller HULINHO YORDY ARBAIZA OCROSPOMA, para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 15% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de INGENIERO CIVIL.

Lima, 24 de agosto 2026.

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor: SAMUEL ISMAEL QUISCA ASTOCAHUANA

DNI: 06640007

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

Con todo mi corazón, dedico este trabajo a mis padres; quienes, con su amor incondicional, sacrificio y esfuerzo constante me brindaron no solo las oportunidades necesarias para alcanzar mis metas, sino también el ejemplo de rectitud, disciplina y perseverancia que ha guiado cada paso de mi vida. Gracias por velar siempre por mi bienestar y enseñarme con su vida el verdadero valor del trabajo, la humildad y la fortaleza.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional, por ser fuente de ánimo en los momentos difíciles. Su confianza en mí ha sido un motor invaluable para seguir adelante.

A mis colegas y amigos, por compartir conmigo aprendizajes, experiencias y retos que hicieron de este camino académico una etapa enriquecedora. Su colaboración, compañerismo y amistad fueron fundamentales en mi desarrollo profesional y humano.

Agradecimiento

A Dios por bendecirme y darme salud para alcanzar mis metas

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por haberme formado profesionalmente en sus aulas.

Al Dr. Samuel Ismael Quisca Astocahuana, asesor de la presente tesis, por su paciencia, apoyo, apreciaciones y buena disposición durante el desarrollo de la presente investigación.

A la consultora Samuel Quisca & Ingenieros Consultores Constructores (SQ&ICC) por haberme dado la oportunidad de ser participe en sus proyectos, a mis colegas de trabajo por el aliento constante y hacer que mi estadía sea grata y acogedora. He aprendido mucho con ustedes.

A los docentes de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por sus enseñanzas durante mi permanecía en la universidad, a quienes guardo respeto, gran aprecio y estima personal.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, su amor, confianza y aliento día a día. A mis amigos y colegas.

A todos ellos muchas gracias.

CONTENIDO

RESUMEN x
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Introducción 1
1.2. Descripción problemática 2
1.3. Formulación del problema 4
1.3.1. Problema general 4
1.3.2. Problemas específicos 5
1.4. Objetivo de la investigación 5
1.4.1. Objetivo general 5
1.4.2. Objetivos específicos 5
1.5. Importancia y alcance de la investigación 5
1.5.1. Importancia 5
1.5.2. Alcance de la investigación 6
1.6. Limitaciones de la Investigación 7
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 8
2.1. Antecedentes de la investigación 8
2.1.1. Antecedentes internacionales 8
2.1.2. Antecedentes nacionales 12
2.2. Bases teóricas 14
2.2.1. Gestión de los recursos hídricos 14
2.2.2. Presa o Represa 15
2.2.3. Sitio o ubicación de una Presa 18
2.2.4. Factores que determinan la ubicación de una presa 18
2.2.5. Clasificación de las presas 24
2.2.6. Factores que gobiernan la selección del tipo de presa 45
2.2.7. Sistemas de Información Geográfica (SIG) 56
2.2.8. Análisis multicriterio en la toma de decisiones 57
2.2.9. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) 57
2.2.10. Técnica de Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS) 62
2.2.11. Aplicaciones combinadas de SIG y análisis multicriterio 66
2.3. Definición de términos 67
3. CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 69
3.1. Hipótesis 69
3.1.1. Hipótesis general 69
3.1.2. Hipótesis específicas 69

3.2. Variables ... 69
3.2.1. Variable independiente ... 69
3.2.2. Variable dependiente ... 69
3.3. Operacionalización de variables ... 70
4. CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS ... 72
4.1. Área de estudio ... 72
4.1.1. Ubicación política, geográfica e hidrográfica ... 72
4.1.2. Aspectos físicos - ambientales ... 73
4.1.3. Aspectos socioeconómicos ... 77
4.2. Tipo y diseño de investigación ... 78
4.2.1. Tipo de investigación ... 78
4.2.2. Diseño de investigación ... 79
4.3. Población y Muestra ... 79
4.3.1. Población ... 79
4.3.2. Muestra ... 79
4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información ... 80
4.4.1. Procedimiento ... 80
4.4.2. Técnicas utilizadas ... 81
4.4.3. Instrumento de recolección y análisis ... 81
4.5. Análisis estadístico ... 81
5. CAPÍTULO V. RESULTADOS ... 83
5.1. Generación del mapa de idoneidad para ubicación de presas ... 83
5.1.1. Recopilación y preparación de datos ... 83
5.1.2. Selección de criterios y reclasificación de datos ... 96
5.1.3. Análisis multicriterio por superposición ponderada ... 104
5.1.4. Mapa de idoneidad (visualización del resultado) ... 105
5.2. Selección del mejor sitio para el emplazamiento de presa ... 107
5.2.1. Planteamiento de alternativas de ejes de presa ... 107
5.2.2. Definición de criterios locales para selección de emplazamiento de presas ... 116
5.2.3. Valoración de criterios de ubicación de presas mediante el método AHP ... 118
5.2.4. Valoración de alternativas según criterio ... 121
5.2.5. Aplicación del método TOPSIS ... 131
5.2.6. Conclusión del análisis TOPSIS ... 136
5.3. Selección del tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín ... 136
5.3.1. Planteamiento de alternativas de tipos de presa ... 137
5.3.2. Definición de criterios para tipos de presas ... 147
5.3.3. Creación de árbol de jerarquía para selección del tipo de presas ... 157

5.3.4. Aplicación del método AHP 159
6. CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN 175
6.1. Síntesis de Resultados 175
6.1.1. Mapa de idoneidad (Objetivo Específico 1) 175
6.1.2. Selección del eje óptimo (Objetivo Específico 2) 176
6.1.3. Tipología de presa óptima (Objetivo Específico 3) 177
6.2. Comparación con estudios previos 179
6.3. Validación con casos reales 181
6.4. Principios y generalizaciones 183
6.5. Síntesis final de la discusión 184
7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 186
7.1. Conclusiones 186
7.2. Recomendaciones 187
8. CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 188
9. CAPÍTULO IX. ANEXOS ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9.1. Panel fotográfico. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9.2. Mapas y Planos. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
9.3. Artículos presentados a revistas indexadas, conferencias y congresos nacionales e internacionales. 225

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de presas y bordes libre 43
Tabla 2.2 Clasificación de presas según la altura y tipo de fundación 44
Tabla 2.3 Clasificación del estado de la capacidad portante según el tipo de cimentación 47
Tabla 2.4 Escala de comparación de Saaty 59
Tabla 2.5 Valores de RCI para distintos valores de n 61
Tabla 2.6 Matriz de decisión 63
Tabla 3.1 Operacionalización de variables 70
Tabla 3.2 Matriz de consistencia 71
Tabla 4.1 Temperaturas medias mensuales (°C) 75
Tabla 4.2 Precipitación total mensual histórica (mm). 76
Tabla 4.3 Población total en la cuenca hidrográficas del río Lurín 77
Tabla 5.1 Cuadro resumen de las Unidades Estratigráficas del área de estudio 90
Tabla 5.2 Cuadro resumen de Rocas Sub-volcánicas 91
Tabla 5.3 Cuadro resumen de Rocas Intrusivas 91
Tabla 5.4 Cobertura vegetal en la cuenca Lurín 93

Tabla 5.5 Reclasificación del criterio Pendiente 97
Tabla 5.6 Caracterización Hidrogeológica de la cuenca Lurín 98
Tabla 5.7 Reclasificación del criterio Geología 99
Tabla 5.8 Reclasificación del criterio Cobertura Vegetal 100
Tabla 5.9 Reclasificación del criterio Curva número 101
Tabla 5.10 Reclasificación del criterio Distancia a ríos 102
Tabla 5.11 Reclasificación del criterio Distancia a fallas 103
Tabla 5.12 Factores y criterios 104
Tabla 5.13 Características de Presa 1 109
Tabla 5.14 Características de Presa 2 111
Tabla 5.15 Características de Presa 3 113
Tabla 5.16 Características de Presa 4 115
Tabla 5.17 Comparación pareada de los criterios 118
Tabla 5.18 Matriz de comparación pareada de criterios 119
Tabla 5.19 Matriz de comparación de criterios 119
Tabla 5.20 Producto matricial y vector de consistencia 120
Tabla 5.21 Escala de valoración propuesta 122
Tabla 5.22 Valoración de alternativas según Condiciones geológicas (C1) 124
Tabla 5.23 Valoración de alternativas según Condiciones geotécnicas (C2) 126
Tabla 5.24 Valoración de alternativas según Capacidad de almacenamiento (C3) 127
Tabla 5.25 Valoración de alternativas según Geometría de la boquilla (C4) 128
Tabla 5.26 Valoración de alternativas según Producción de sedimentos (C5) 130
Tabla 5.27 Valoración de alternativas según criterio Socioambiental (C6) 131
Tabla 5.28 Matriz de decisión TOPSIS 132
Tabla 5.29 Matriz de cuadrados y raíces para normalización vectorial 132
Tabla 5.30 Matriz Normalizada TOPSIS 133
Tabla 5.31 Matriz normalizada ponderada 133
Tabla 5.32 Cálculo de la distancia euclidiana a la solución ideal positiva 134
Tabla 5.33 Cálculo de la distancia euclidiana a la solución ideal negativa 134
Tabla 5.34 Resultados del método TOPSIS 135
Tabla 5.35 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa A (TENCI) 139
Tabla 5.36 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa B (ENII) 141
Tabla 5.37 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa C (CFRD) 143
Tabla 5.38 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa D (RCC) 145
Tabla 5.39 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa E (CC) 146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Retos de la gestión de los recursos hídricos frente al cambio climático..... 15
Figura 2.2 Planta esquemática de una presa de materiales sueltos 16
Figura 2.3 Esquema general de una presa y sus estructuras principales..... 18
Figura 2.4 Clasificación de presas según su material de construcción y concepción estructural 25
Figura 2.5 Esquema de una presa de gravedad y fuerzas actuantes..... 26
Figura 2.6 Presa CC de Ricobayo, Zaragoza - España 27
Figura 2.7 Presa RCC de Enciso, La Rioja – España..... 29
Figura 2.8 Esquema de una presa de contrafuertes y fuerzas actuantes..... 31
Figura 2.9 Presa de Roselend (Francia) 32
Figura 2.10 Esquema de una presa de arco y fuerzas actuantes..... 33
Figura 2.11 Presa Hoover (Estados Unidos)..... 34
Figura 2.12 Esquema de una presa de materiales sueltos homogéneos 35
Figura 2.13 Esquema de una presa de materiales sueltos de núcleo..... 36
Figura 2.14 Presa Gallito Ciego, Cajamarca y Lambayeque – Perú..... 36
Figura 2.15 Presa La Esmeralda, Colombia - Enrocado con núcleo inclinado, Altura: 237 m 38
Figura 2.16 Esquema de una presa de pantalla 40
Figura 2.17 Construcción Presa CFRD Limón/Olmos - Perú..... 41
Figura 2.18 Distintos tipos de valle 46
Figura 2.19 Esquema hidráulico de la presa Quisco – presa de gravedad de concreto..... 49
Figura 2.20 Esquema hidráulico de la presa San Gabán – presa CRFD..... 49
Figura 2.21 Rotura de la presa Teton en 1976 - EEUU 52
Figura 2.22 Construcción de presas con hormigón compactado con rodillo 54
Figura 2.23 Partes de un Sistema de Información Geográfica..... 56
Figura 2.24 Estructura de la jerarquía AHP..... 58
Figura 2.25 Análisis espacial multicriterio 66
Figura 4.1 Ubicación política del área de estudio..... 72
Figura 4.2 Diagrama metodológico de la investigación..... 82
Figura 5.1 Modelo de elevación digital de la zona de estudio..... 83
Figura 5.2 Mapa de pendientes de la Cuenca del río Lurín 84
Figura 5.3 Mapa Geológico de la cuenca Lurín..... 91
Figura 5.4 Mapa de ubicación de fallas en la cuenca Lurín..... 92
Figura 5.5 Mapa de Cobertura vegetal de la cuenca Lurín 94
Figura 5.6 Mapa de Número de Curva en la Cuenca Lurín 95
Figura 5.7 Mapa de la Red Hidrográfica de la Cuenca Lurín 96
Figura 5.8 Mapa de reclasificación de Pendientes de la cuenca Lurín 97
Figura 5.9 Mapa de reclasificación de la Geología de la cuenca Lurín 99
Figura 5.10 Mapa de reclasificación de Cobertura vegetal de la cuenca Lurín 100
Figura 5.11 Mapa de reclasificación de Curva número en la cuenca Lurín..... 101
Figura 5.12 Mapa de reclasificación de Distancia a ríos en la cuenca Lurín..... 102
Figura 5.13 Mapa de reclasificación de Distancia a fallas en la cuenca Lurín 103
Figura 5.14 Mapa de idoneidad para ubicación de presas 105
Figura 5.15 Áreas óptimas para la ubicación de presas en la cuenca Lurín..... 106
Figura 5.16 Alternativas de ejes de presa propuestas en la cuenca del río Lurín..... 107

Figura 5.17 Vista en planta de la topografía del Eje de Presa 1 108
Figura 5.18 Sección de Boquilla – Eje Presa 1 108
Figura 5.19 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 1 109
Figura 5.20 Vista en planta de topografía de Eje de Presa 2 y embalse 110
Figura 5.21 Sección de Boquilla – Eje Presa 2 110
Figura 5.22 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 2 111
Figura 5.23 Vista en planta de topografía de Eje Presa 3 y embalse 112
Figura 5.24 Sección de Boquilla – Eje Presa 3 112
Figura 5.25 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 3 113
Figura 5.26 Vista en planta de topografía de Eje Presa 4 y embalse 114
Figura 5.27 Sección de Boquilla – Eje Presa 4 114
Figura 5.28 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 4 115
Figura 5.29 Árbol de estructuración jerárquico 117
Figura 5.30 Porcentaje de priorización global de Eje de presas 135
Figura 5.31 Sección transversal típica de presa Alternativa A 138
Figura 5.32 Sección transversal típica de presa Alternativa B 140
Figura 5.33 Sección transversal típica de presa Alternativa C 142
Figura 5.34 Sección transversal típica de presa Alternativa D 144
Figura 5.35 Sección transversal típica de presa Alternativa E 146
Figura 5.36 Estructura jerárquica del modelo AHP para la selección del tipo de presa. 158
Figura 5.37 Creación del nuevo modelo en el programa Expert Choice. 159
Figura 5.38 Definición del objetivo en el programa Expert Choice. 160
Figura 5.39 Inserción de los criterios en el modelo jerárquico. 160
Figura 5.40 Criterios del modelo jerárquico. 161
Figura 5.41 Ingreso de alternativas al modelo. 161
Figura 5.42 Matriz de comparación por pares de criterios en el software Expert Choice. .. 162
Figura 5.43 Ponderación relativa de los criterios para la selección del tipo de presa. 163
Figura 5.44 Matriz de comparación de alternativas respecto al criterio Topografía del sitio. 164
Figura 5.45 Matriz de comparación de alternativas respecto al criterio Condiciones geológicas. 165
Figura 5.46 Matriz de comparación de alternativas respecto a Disponibilidad de materiales. 166
Figura 5.47 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Seguridad de presas. 166
Figura 5.48 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Obras conexas. 167
Figura 5.49 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Procedimient constructivo. 168
Figura 5.50 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Plazo de construcción. 169
Figura 5.51 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Costo directo. 169
Figura 5.52 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Impacto ambiental. 170
Figura 5.53 Resultados globales del modelo AHP en Expert Choice. 171
Figura 5.54 Análisis de sensibilidad por criterios en la selección del tipo de presa. 172
Figura 5.55 Sensibilidad dinámica de criterios y alternativas 173

RESUMEN

La creciente presión sobre los recursos hídricos en el Perú exige metodologías innovadoras para la planificación de infraestructuras hidráulicas que garanticen sostenibilidad, seguridad y eficiencia. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo aplicar técnicas de análisis multicriterio, apoyadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la selección óptima del sitio y del tipo de presa en la cuenca del río Lurín, Lima, Perú.

La metodología se desarrolló en tres etapas: (i) recopilación y sistematización de información topográfica, geológica, hidrológica y socioambiental de la cuenca; (ii) aplicación del método AHP (Analytic Hierarchy Process) para asignar pesos a los criterios mediante comparaciones por pares, complementado con el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para jerarquizar alternativas; y (iii) integración de los resultados en el entorno SIG para generar mapas de idoneidad espacial.

Los resultados evidenciaron que la zona del eje alternativo 4 presenta las condiciones más favorables para la construcción de una presa, debido a su topografía adecuada, macizo rocoso competente y menor afectación social y ambiental. Asimismo, el análisis comparativo de tipologías determinó que la presa de enrocado con cara de concreto (CFRD) constituye la alternativa más adecuada para este sitio, superando ligeramente a la presa de concreto compactado con rodillo (RCC), principalmente por su mejor adaptación a terrenos fracturados y su menor costo relativo.

Se concluye que la integración de SIG con métodos multicriterio constituye una herramienta eficaz y replicable para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura hidráulica, al permitir una evaluación objetiva, transparente y sustentada en criterios técnicos, económicos y ambientales.

Palabras clave: presas, análisis multicriterio, AHP, TOPSIS, SIG, cuenca del río Lurín, CFRD, RCC, planificación hidráulica.

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La sostenibilidad y la existencia de la vida en la Tierra dependen en gran medida de las reservas de agua las cuales se han visto amenazadas en las últimas décadas por los efectos del cambio climático. El agotamiento progresivo de este recurso esencial podría desencadenar consecuencias catastróficas a nivel global. Por ello, resulta indispensable promover el uso racional y la protección del agua como prioridad estratégica para el desarrollo sostenible.

El Perú, a pesar de ser el octavo país con mayor disponibilidad de agua en el mundo, es considerado el tercer país más vulnerable al cambio climático. Se estima que, en los próximos 20 años, dispondrá solo del 60 % del agua potable actual, lo que podría generar una severa escasez del recurso (Tyndall Center, 2004). Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2021), el 62.4 % de la población peruana se concentra en las 62 cuencas del Pacífico, las cuales cuentan con apenas el 1.8 % del total de agua disponible, y experimentan precipitaciones durante solo tres meses al año. En contraste, la cuenca amazónica alberga el 33.5 % de la población y concentra el 97.7 % de los recursos hídricos, con lluvias casi todo el año. Esta marcada desigualdad refleja que la escasez en la costa no responde a una falta absoluta del recurso, sino a una distribución territorial y temporal altamente irregular, agravada por la intensificación de eventos climáticos extremos.

Adicionalmente, las cuencas del Pacífico presentan un régimen hidrológico asimétrico, con ríos que se activan intensamente durante el verano y permanecen con caudales bajos o secos el resto del año. Esta condición no satisface la demanda hídrica de la región costera, donde se concentra la mayor parte de la actividad económica e industrial del país. Frente a este panorama, se han propuesto diversas soluciones. Una de las más relevantes es la construcción de más de 300 presas en las cuencas del Pacífico, con el fin de almacenar agua durante la temporada de lluvias y recargar los acuíferos subterráneos (Quisca, 2021).

En el contexto local, Lima, la capital del Perú con una población estimada de 10.5 millones de habitantes (INEI, 2025), es la segunda ciudad más grande del mundo edificada en un desierto, después de El Cairo. Su acelerado y desordenado crecimiento

urbano y periurbano ha generado una creciente presión sobre los recursos naturales, en especial del agua. Durante los periodos de lluvias intensas, esta escasez contrasta con la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones que ponen en riesgo vidas humanas y dañan infraestructuras. En este sentido, la construcción de presas se presenta como una solución integral que permite tanto el control de inundaciones como el almacenamiento y distribución del agua en épocas de sequía. Además, su implementación podría extenderse a la generación de energía hidroeléctrica y a fines recreativos.

Inmediatamente, surge el problema de selección de un sitio adecuado que cumpla con ciertos criterios para la ubicación de una presa y la elección de la tipología idónea que posibilite su durabilidad en el tiempo. Para esto, es necesario del apoyo de la informática, la tecnología y la experiencia, de tal manera que permita determinar la mejor ubicación y tipología de presa en una cuenca determinada. Los resultados serán cruciales para futuros estudios sobre proyectos de embalses en Perú y en el Mundo.

1.2. Descripción problemática

Partiendo de la premisa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2019), se advierte que los recursos hídricos regionales y estacionales están siendo afectados significativamente por el calentamiento global, especialmente en los ríos de Asia y América Latina, que actualmente abastecen de agua al 20 % de la población mundial. Asimismo, los problemas de cantidad y calidad del agua se están viendo exacerbados por las alteraciones del ciclo hidrológico global, en particular los fenómenos extremos, cuyo impacto se distribuye de forma desigual en todo el mundo.

En la costa peruana, particularmente en la ciudad de Lima, el cual se ubica en la región árida donde el recurso hídrico es críticamente escaso, se concentra casi la tercera parte de la población del país, y es abastecida en la actualidad con recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, que provienen de las cuencas Chillón, Rímac, Alto Mantaro y Lurín (sólo aguas subterráneas). Sin embargo, la oferta de agua potable y agrícola actualmente resulta deficitaria con respecto a la demanda creciente en términos de represamiento de agua superficial, limitando la producción y abastecimiento de agua a la población.

Actualmente, resulta necesario en la medida que sea posible el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Lurín, mediante represamientos que permitan atender a la población local de la cuenca del río Lurín, distritos de Cieneguilla, Pachacamac y Lurín, donde el desarrollo urbano y poblacional es acelerado. Por lo anterior, se requiere definir las condiciones de ubicación y diseño de uno o más embalses en la cuenca del río Lurín, para el aprovechamiento de las aguas de los períodos de avenida que se pierden en el mar.

Satisfacer la demanda de agua es un pilar fundamental para mantener un nivel de vida humano normal, la evolución de la industria y el crecimiento agrícola. Los principales obstáculos para los países en desarrollo de las regiones áridas son la urbanización no planificada y la escasez de recursos hídricos. En ese sentido, la localización y construcción de presas es una prioridad estratégica de los países para preservar y almacenar agua.

La construcción de una presa es una solución importante para frenar el problema del agua, tanto para uso doméstico como para riego, que se produce sobre todo debido a la escasez de precipitaciones y a las prolongadas estaciones secas que provocan sequías. Para que este esfuerzo se lleve a cabo con éxito, debe centrarse principalmente en encontrar un emplazamiento adecuado para la ubicación y construcción de la presa. El principal problema consiste en identificar un método eficaz, eficiente y preciso para la selección del emplazamiento y tipología de presa, que proporcione una investigación exacta del terreno y la información adecuada sobre el lugar seleccionado para una planificación y un diseño correcto.

La identificación del mejor emplazamiento para la construcción de una presa, y la selección de la tipología idónea, es una de las decisiones más complejas y controvertidas en la gestión del abastecimiento de agua. Así como una selección óptima puede mejorar la seguridad de los embalses y la regeneración de las aguas subterráneas de una región; una mala selección de los mismos puede provocar su falla y causar perdidas masivas de vidas humanas y económicas, así como un impacto negativo en el medio ambiente. Así pues, para seleccionar el sitio y tipo de presa, es necesario realizar un estudio preciso sobre la zona de interés teniendo en cuenta los factores que afectan a esta selección. Sin embargo, este procedimiento es costoso y requiere mucho tiempo. Con los avances de la informática y las tecnologías de la

información, se facilita enormemente la determinación de soluciones competitivas en términos de costo, tiempo y otra serie de variables objetivas.

En el proceso de selección del sitio y tipo de presa influyen múltiples factores: topografía, condiciones geológicas y geotécnicas del emplazamiento, tipo y uso del suelo, aspectos climáticos e hidrológicos, disponibilidad de materiales de construcción, altura de la presa, tamaño y ubicación de obras conexas, costo, tiempo de construcción, aspectos medioambientales y sociales propios del lugar en el que se lleva a cabo el proyecto, y sismicidad de la zona (Emiroglu et al., 2002). En muchas ocasiones, las distintas tipologías de presas son favorables para alguno de estos factores y desfavorables para otros, siendo necesario equilibrar las ventajas y desventajas en cada uno de ellos para poder justificar de forma idónea la tipología y sitio seleccionado.

En la actualidad, gran porcentaje de la toma de decisiones sobre la selección del sitio y tipo de presa se realiza de manera empírica o en función de intereses políticos, esto limita el uso de una metodología que tenga en cuenta variables para la comparación y el análisis de alternativas. (Zapata et al., 2020).

Al tratarse de un problema de decisión multi-criterio, las metodologías disponibles para abordar este tipo de problemas resultan de gran interés. En la presente investigación se emplea el análisis de decisiones multicriterio mediante el uso del SIG, como posible forma de tomar decisiones óptimas a la hora de seleccionar un emplazamiento y tipología adecuado para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín. Las principales consideraciones se referían a las capacidades del SIG para adquirir, almacenar, recuperar, manipular y analizar datos, mientras que las capacidades del Análisis de Decisiones Multicriterio combinaban los datos geográficos con las preferencias de los responsables de la toma de decisiones en juicios alternativos (Munyao, 2010).

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿En qué medida la aplicación de técnicas de análisis multicriterio, integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite una adecuada selección del sitio y tipo de presa en la cuenca del río Lurín?

1.3.2. Problemas específicos

(1) ¿De qué manera la aplicación del análisis multicriterio, integrado con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite construir un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín?

(2) ¿Cómo contribuye la aplicación del método TOPSIS a identificar el sitio más adecuado para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín?

(3) ¿De qué manera el método de análisis jerárquico AHP permite seleccionar la alternativa óptima del tipo de presa a construir en la cuenca del río Lurín?

1.4. Objetivo de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Determinar el sitio óptimo de emplazamiento y el tipo de presa más adecuado en la cuenca del río Lurín, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.4.2. Objetivos específicos

(1) Generar un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín, mediante la integración de SIG y el método de análisis jerárquico AHP.

(2) Identificar el sitio más adecuado para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín, aplicando la técnica de análisis multicriterio TOPSIS a los ejes previamente seleccionados.

(3) Seleccionar la alternativa optima de tipo de presa en la cuenca del río Lurín, mediante la aplicación de la técnica AHP.

1.5. Importancia y alcance de la investigación

1.5.1. Importancia

La presente investigación es de gran relevancia técnica, ambiental y social, ya que aborda una problemática crítica en la gestión de los recursos hídricos en la región costera del Perú. La cuenca del río Lurín, ubicada en un contexto de acelerado crecimiento urbano y escasa disponibilidad de agua, representa un escenario

estratégico para el desarrollo de infraestructura hidráulica destinada al almacenamiento y regulación del recurso hídrico.

La aplicación de técnicas de análisis multicriterio, integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituye un enfoque innovador y eficaz para la toma de decisiones en proyectos de presas. Este enfoque permite incorporar múltiples variables técnicas, ambientales, sociales y económicas de manera objetiva y sistemática, mejorando la calidad del proceso de planificación y reduciendo los márgenes de error asociados a métodos empíricos o subjetivos.

Además, los resultados de esta investigación contribuirán a optimizar el uso del territorio, reducir el riesgo de inversiones mal localizadas y fomentar la sostenibilidad de los proyectos hidráulicos. El estudio también constituye un aporte metodológico replicable en otras cuencas del país y de regiones similares, fortaleciendo la capacidad técnica para enfrentar los desafíos de la seguridad hídrica.

1.5.2. Alcance de la investigación

La presente investigación se enfoca en la aplicación de técnicas de análisis multicriterio combinadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la identificación del sitio óptimo de emplazamiento y la selección del tipo de presa más adecuado en la cuenca del río Lurín, ubicada en el departamento de Lima, Perú.

El estudio comprende tres etapas principales:

1) Elaboración de un mapa de idoneidad para la ubicación de presas mediante la integración de criterios físicos, geológicos, ambientales y de uso del suelo en un entorno SIG, aplicando el método AHP para la ponderación de dichos criterios.
2) Evaluación comparativa de ejes potenciales, previamente identificados en el mapa de idoneidad, utilizando la técnica TOPSIS para seleccionar el sitio más adecuado para la construcción de una presa.
3) Determinación del tipo de presa óptimo, mediante la aplicación del método AHP, considerando criterios técnicos, constructivos, económicos y ambientales.

El alcance de esta investigación es de carácter técnico y metodológico, orientado a la toma de decisiones en la etapa de planificación y preinversión de proyectos hidráulicos.

1.6. Limitaciones de la Investigación

Esta investigación se enfrentó a limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de la información geoespacial, ya que muchas capas de datos utilizadas (como geología, uso del suelo o hidrología) presentaban restricciones en cuanto a resolución, escala o actualización.

Asimismo, no se abordaron en profundidad los aspectos institucionales y sociales, como la gobernanza del agua, conflictos de uso, tenencia de tierras, etc.; los cuales también influyen en la viabilidad real de un proyecto de este tipo.

No obstante, la metodología aplicada ofrece una base técnica valiosa para estudios preliminares y puede ser replicada en otras cuencas con características similares.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

A escala internacional, se han realizado los siguientes estudios en cuanto a la selección del sitio de presas:

Cursi (2015), realizó una investigación sobre los SIG y la teledetección como herramientas para determinar los mejores emplazamientos para la construcción de presas en Pakistán. En esta investigación, se utilizaron técnicas de Evaluación de Criterios Múltiples (ECM) para superponer las capas, utilizando el método de combinación lineal ponderada. El problema consistía en analizar los emplazamientos iniciales para el desarrollo teniendo en cuenta tres criterios a saber: la precipitación, la pendiente (S) y los asentamientos (Se); con la atención centrada en la protección del medio ambiente, las consideraciones económicas y la seguridad. Los asentamientos y las precipitaciones se consideraron criterios restrictivos, ya que la presa o embalse no debía situarse en un asentamiento o cerca de él y debía tener zonas de acumulación de agua. La pendiente se consideró un criterio factor, y la presa debía situarse en una ladera suave para evitar que fallara. Los criterios respondían directamente a parámetros económicos y de protección del medio ambiente. Había que evaluar la influencia relativa de los tres criterios. Para ello se utilizó la matriz de comparación por pares, el cálculo de la ponderación de los criterios y la estimación del coeficiente de coherencia. El resultado de los posibles emplazamientos cumplía todas las condiciones de los criterios. Los embalses seleccionados estaban fuera de cualquier asentamiento, se encontraban en pendientes suaves que conducían a zonas de acumulación de agua, se encontraban en zonas de máxima pluviosidad. Los emplazamientos de los embalses seleccionados eran realmente buenos para recoger y almacenar agua. Sin embargo, esta investigación se limitó únicamente a los asentamientos, la pendiente y la pluviosidad, dejando de lado otros criterios importantes como el tipo de suelo, las zonas protegidas y las explotaciones agrícolas (emplazamientos agrícolas). Esto puede dar lugar a que una presa se sitúe en una zona con un suelo ineficaz en cuanto a capacidad de retención y retención de agua, por lo que el agua recogida se perderá muy rápidamente.

Dai (2016), reporta la investigación denominada “Dam site selection using an integrated method of AHP and GIS for decision making support in Bortala, Northwest China”. El objetivo de esta investigación fue encontrar emplazamientos adecuados para presas en la región de Bortala, en el noroeste de China, con el fin de ayudar a los responsables de la toma de decisiones a seleccionar los mejores sitios de emplazamiento para construir presas, en función de las condiciones ambientales; siendo el principal uso de estas presas el abastecimiento de agua de regadío. En el aspecto metodológico, se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en combinación con el Sistema de Información Geográfica (SIG) como método de Toma de Decisiones Multicriterio para seleccionar el emplazamiento de la presa. Se consideran como criterios: la precipitación, pendiente, capa geológica, el tipo de suelo, la cubierta vegetal y el orden de drenaje. Se generó un mapa de idoneidad para la construcción de presas en Bortala, a partir del cual se propusieron 08 posibles emplazamientos de presas con una idoneidad relativamente alta. Según el mapa de idoneidad, Bortala Oeste, donde la elevación es relativamente alta, resultó ser la zona más densa con una idoneidad alta a muy alta para la construcción de presas, mientras que Bortala Noroeste y Bortala Central, resultaron ser zonas con una idoneidad baja a extremadamente baja para la construcción de presas. En términos porcentuales, el 11.8% de la zona de Bortala se encuentra en el rango de alta a muy alta idoneidad, de los cuales sólo el 0.0001% es zona de muy alta idoneidad; el 47.6% de la zona de Bortala se encuentra en el rango de idoneidad moderada; el 34.1% de Bortala tiene una idoneidad baja o extremadamente baja. Concluyó que, debido a la complejidad de la selección del emplazamiento de la presa en función del número de factores, el empleo del método AHP, que es una herramienta potente y flexible, que proporciona una medición integrada de factores tangibles con distinta prioridad mediante una comparación por pares; y el empleo del SIG nos da una presentación más visualizada. Finalmente, recomienda que para estudios posteriores se empleen fuentes de alta resolución, con el fin de mejorar la precisión de todos los componentes y determinar el mapa de idoneidad con mayor precisión; además, sugiere que se tengan en cuenta mayores criterios y tamaños de conjuntos de datos para la toma de decisiones, mediante la metodología del Proceso de Análisis Jerárquico.

Jozaghi et al. (2018), en la investigación denominada “A Comparative Study of the AHP and TOPSIS Techniques for Dam Site Selection Using GIS: A Case Study of

Sistan and Baluchestan Province, Iran", realizan un estudio comparativo amplio del AHP y de la Técnica de Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS) para seleccionar emplazamientos de presas, aplicando SIG en la provincia de Sistán y Baluchistán. Se utilizan las ubicaciones de las presas existentes, construidas en la zona para comprobar el resultado de los dos métodos. La comparación se realizó en función de la calidad del agua y de criterios geográficos. Los criterios geográficos incluyen la pendiente, aguas subterráneas, geología, erosión, uso del suelo, sedimentos y los vertidos. Los criterios de calidad del agua también incluyen: cantidad de sólidos disueltos, potencial de hidrógeno, porcentaje de sodio disoluble y conductividad eléctrica del agua. Las ponderaciones individuales de estos criterios se determinaron mediante un método de estimación de proporciones. Los resultados muestran que el método TOPSIS se adapta mejor al problema de la selección del emplazamiento de presas para esta zona de estudio.

En Kenia, en el subcondado de Mbeere Norte; Njiru y Siriba (2018) reportan una investigación centrada en el uso de SIG para la selección de sitios de pequeñas presas de tierra, aplicando un método eficaz, eficiente y preciso para la selección del sitio de la presa que proporcione información de campo precisa y adecuada sobre el sitio de emplazamiento seleccionado para la planificación y el diseño adecuado. El objetivo del estudio fue estudiar la hidrología para la selección de emplazamientos de presas pequeñas de tierra, utilizando una combinación del SIG con otras técnicas de decisión multicriterio como el AHP para establecer características hidrológicas aceptables en la región para la construcción de presas. Los factores elegidos para el estudio corresponden a diferentes criterios. La topografía es uno de los principales factores considerados en la selección del sitio de construcción de presas de tierra, ya que tiene un control dominante sobre el patrón de flujo en la parte alta de la cuenca. La fundación geológica del emplazamiento de la presa suele influir en el tipo de presa adoptado. Un emplazamiento con fundación geológica impermeable (sin filtraciones) proporcionará una mejor capacidad de almacenamiento de agua, a la vez que facilitará la construcción y asegurará la fiabilidad de la estructura. El tipo de suelo influye en la cantidad de agua que puede perderse por filtración. Para la construcción de una presa se recomiendan las fundaciones de suelos de grano fino e impermeables, y suficientemente resistentes a la fractura hidráulica. En total, se tuvieron en cuenta siete factores: tipo de suelo, pendiente, capa geológica, cubierta vegetal, proximidad a fuentes de agua (arroyos y

ríos), proximidad a carreteras y tamaño de la cuenca. Aproximadamente el 10% de la superficie total del estudio resultó ser muy adecuada, el 14% adecuada, el 45% medianamente adecuada, el 23% poco adecuada y el 8% inadecuada para la construcción de presas. La clasificación de muy adecuados incluía cuatro emplazamientos propuestos con capacidades volumétricas de embalse que oscilaban entre los 2 millones de m^3 de la parte nororiental de la zona de estudio y los 26.9 millones de m^3 de la parte noroccidental de la zona de estudio. La altitud en la zona de estudio oscilaba entre 638 msnm y 1,798 msnm. Finalmente, el estudio concluyó que la combinación del SIG con el análisis de decisiones multicriterio (AHP), es eficaz para proporcionar información hidrológica sobre la zona, lo que ha contribuido a la toma de decisiones con respecto a la ubicación de los emplazamientos de las presas.

Kassim (2019), reporta en su investigación "Using Gis and Multi Criteria Decision Making to Determine Suitable Dam Sites in the Upper West Region of Ghana", sobre la ventaja de utilizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) para elaborar un mapa de idoneidad para la construcción de presas en la región del Alto Oeste de Ghana. En el aspecto metodológico, se aplica el SIG y la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) para seleccionar el emplazamiento de presas, aplicando cinco factores: pendiente, pluviosidad, tipo de suelo, zonas protegidas y asentamientos. Los resultados de la investigación muestran un mapa de idoneidad de los emplazamientos de las presas; según el mapa, el 4.3% de la zona estudiada es adecuada para la construcción de presas, el 33% es medianamente adecuada, el 53.9% es poco adecuada, y el 8.8% es inadecuada para la construcción de presas. El estudio propone además, cuatro emplazamientos de presa específicos, determina la geometría de la boquilla, y estima las capacidades volumétricas de los embalses conformados, constatándose que las capacidades de embalses resultan: 219,000 m^3, 1 312,500 m^3, 557,666 m^3 y 375.000 m^3 respectivamente, para los emplazamientos de presa 1, 2, 3 y 4. Se concluye que el SIG es una herramienta potente, que puede utilizarse eficazmente para ayudar a seleccionar los emplazamientos adecuados para la construcción de presas, y supone una mejora del proceso tradicional de selección de emplazamientos de presas, aplicados por los responsables de la toma de decisiones.

A escala internacional, se reportan los siguientes estudios sobre la selección del tipo de presa:

Martínez (2019), reporta en su investigación “El problema de selección del tipo de presa en un proyecto: criterios y métodos de apoyo a la toma de decisiones”, el análisis de los principales factores que intervienen en la toma de decisiones sobre el tipo de presa. Este estudio se desarrolló bajo un enfoque de investigación básica, con alcance descriptivo y de corte transversal. Se utiliza como técnica principal la aplicación de cuestionarios a expertos, lo que permitió estructurar matrices de decisión y aplicar el método Analytic Hierarchy Process (AHP). Los criterios considerados fueron el costo de obra, plazo de construcción, seguridad, funcionalidad e impacto ambiental. La conclusión más relevante fue que la seguridad constituye el factor de mayor peso en la toma de decisiones, mientras que el AHP demostró ser una herramienta eficaz para integrar criterios cualitativos y cuantitativos en la selección del tipo de presa.

Zapata et al. (2020), presentan en la investigación “Propuesta metodológica para la selección optima del tipo de presa mediante el uso de técnicas multicriterio”, una propuesta metodológica para la selección óptima del tipo de presa mediante técnicas multicriterio, específicamente el Analytic Hierarchy Process (AHP). La investigación resalta que, en la práctica, la selección del tipo de presa suele realizarse de manera empírica y cualitativa, lo que limita la objetividad y la comparación entre alternativas. En este estudio se integraron variables geológicas, geotécnicas, morfológicas, ambientales, sísmicas y económicas, asignándoles pesos estadísticos a través de comparaciones por pares. El caso de aplicación consideró 15 variables y 8 alternativas de tipos de presa, obteniéndose como resultado que la presa de tierra zonificada (EZD) era la opción más adecuada para las condiciones analizadas. Entre los factores con mayor peso destacaron el riesgo de falla (12%), condiciones de fundación (12%), la vulnerabilidad sísmica (10%) y la disponibilidad de materiales de construcción (10%). Los autores concluyen que el AHP permite transformar un proceso complejo y subjetivo en un análisis cuantitativo y sistemático, garantizando una elección del tipo de presa más consistente y técnicamente fundamentada.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En el contexto nacional, se ha realizado el siguiente estudio en cuanto a la selección del sitio de presas:

Sedano Areche (2021), reporta en su investigación “Identificación de sitios potenciales de presas mediante las técnicas de la geomática en la subcuenca del río Ichu”, la aplicación de modelos hidrológicos y herramientas de geomática para determinar sitios con potencial para el emplazamiento de presas. El estudio empleó el modelo SWAT y datos de imágenes ASTER para evaluar caudales y características fisiográficas de las microcuencas. Los resultados permitieron delimitar zonas con disponibilidad de agua y condiciones topográficas favorables, concluyendo que el uso de la geomática constituye una herramienta eficiente y económica para la preselección de sitios de presas.

En el contexto nacional, se han realizado los siguientes estudios en cuanto a la selección del tipo de presas:

Pérez Zereceda y Vasconcellos Orejuela (2017), reportan en la investigación “Evaluación de tres alternativas de proyecto de presa para el embalse Palo Redondo”, la evaluación de tres tipologías de presa: tierra con núcleo de arcilla, enrocado con pantalla de concreto en talud húmedo (CFRD) y concreto compactado con rodillo (RCC). El estudio consideró criterios técnicos, económicos y socioambientales, elaborando diseños a nivel de anteproyecto con análisis hidrológicos, geológicos y de estabilidad. Asimismo, se aplicaron matrices comparativas para evaluar la dificultad constructiva, disponibilidad de materiales, impacto socioambiental y costos de cada alternativa. La investigación concluyó que el uso de metodologías multicriterio permite sustentar de manera más objetiva la selección del tipo de presa, garantizando que la alternativa elegida se adecúe tanto a las condiciones técnicas del emplazamiento como a la viabilidad económica y ambiental del proyecto.

Arbaiza y Quisca (2023), desarrollan un estudio sobre la presa Toma Grande aplicando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para seleccionar la alternativa óptima. El análisis consideró cuatro tipologías de presas: enrocado con cara de concreto (CFRD), concreto compactado con rodillo (RCC), gravedad de concreto y tierra-enrocado. Se evaluaron ocho criterios principales (topografía y geología, disponibilidad de materiales, obras conexas, seguridad de presas, sistema de desvío del río, procedimiento constructivo, plazo de construcción y costo de obra), los cuales se organizaron en un árbol jerárquico y se ponderaron mediante comparaciones pareadas.

Los resultados evidenciaron que la presa de gravedad de concreto resultó la alternativa óptima, alcanzando un peso del 40%, seguida por la presa RCC (35%). Asimismo, el criterio con mayor influencia fue la seguridad de la presa (33%), lo que confirma la importancia de este factor en la toma de decisiones para proyectos hidráulicos de gran envergadura.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Gestión de los recursos hídricos

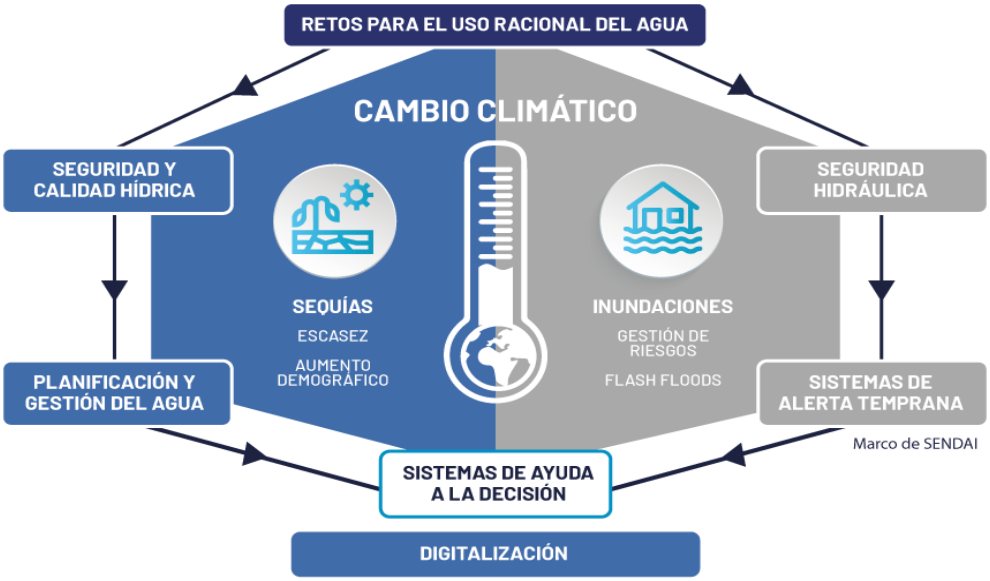
La gestión de los recursos hídricos constituye un enfoque integral que busca equilibrar la oferta y demanda del agua, garantizando su disponibilidad para usos múltiples y sostenibles. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), promovida por organismos internacionales como la ONU y el Banco Mundial, plantea que el agua debe administrarse considerando simultáneamente aspectos sociales, económicos y ambientales, de modo que se asegure la equidad intergeneracional (ONU-Agua, 2012).

En el caso del Perú, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), a través de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338), establece la gestión por cuencas hidrográficas como unidad básica, priorizando el acceso al agua para consumo humano, seguido de actividades productivas y ambientales (ANA, 2016). Este enfoque reconoce la necesidad de integrar la planificación hidráulica con políticas de conservación, control de contaminación y adaptación al cambio climático.

Actualmente, los desafíos más relevantes en la gestión hídrica incluyen el cambio climático, la urbanización acelerada, la presión sobre la demanda agrícola y energética, y la creciente frecuencia de fenómenos extremos como sequías e inundaciones. Frente a estos retos, las presas juegan un papel estratégico al permitir el almacenamiento de agua, la regulación de caudales, el control de avenidas y la generación de energía hidroeléctrica (ICOLD, 2011; SPANCOLD, 2010). Una tendencia emergente es la digitalización de la gestión hídrica, donde herramientas como Big Data, Machine Learning e Inteligencia Artificial optimizan la toma de decisiones. En esta línea, Idrica (2024) enfatiza que los Sistemas de Ayuda a la Decisión y los Sistemas de Alerta Temprana permiten anticipar con eficacia eventos hidrometeorológicos extremos y aumentar la resiliencia operativa de embalses y redes de agua. Del mismo modo, la

introducción de “embalses inteligentes” con reglas de operación automatizadas refuerza la capacidad de respuesta frente a escenarios de estrés hídrico.

Figura 2.1 Retos de la gestión de los recursos hídricos frente al cambio climático



Fuente: Adaptado de Idrica (2024).

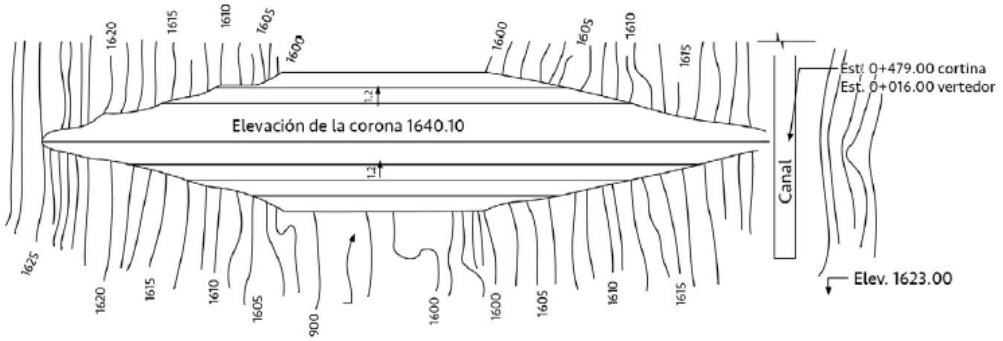
En consecuencia, la gestión de los recursos hídricos constituye el marco estratégico dentro del cual se concibe la construcción de presas, las cuales deben diseñarse no solo para satisfacer la demanda actual, sino también para contribuir a la sostenibilidad, seguridad y resiliencia del sistema hídrico en el largo plazo.

2.2.2. Presa o Represa

Una Presa o Represa es una “barrera estanca, construida para el almacenamiento de agua generalmente ubicada en el cauce de los cursos naturales del agua superficial concordante con la selección de cierre del vaso (boquilla). Comprende a las obras conexas y el embalse” (ANA, 2018, p.09).

Del mismo modo, Arreguín F. et al (1987) define una presa como un “conjunto de estructuras (cortina, obra de toma, obra de excedencias, desagüe de fondo) que se emplea para almacenar el agua que escurre de una cuenca de captación, o para desviar dicho recurso, de acuerdo con los objetivos establecidos en el aprovechamiento hidráulico” (p.01).

Figura 2.2 Planta esquemática de una presa de materiales sueltos



Fuente: Comisión Nacional del Agua (2009).

2.2.2.1. Importancia de las Presas

"Las presas constituyen infraestructuras básicas para la gestión del agua, ya que permiten retener grandes volúmenes, regular los caudales, generar energía y mitigar eventos extremos como inundaciones o sequías" (World Commission on Dams, 2000, p. 24). En regiones con alta variabilidad hídrica, como el Perú, su construcción responde a la necesidad de estabilizar la oferta frente a una demanda creciente.

Además de su función hidráulica, las presas pueden contribuir al desarrollo local, al mejorar el acceso al agua para riego, consumo humano e incluso actividades recreativas o industriales. No obstante, su planificación debe ser rigurosa para evitar impactos negativos sobre el ambiente y las comunidades aledañas (World Bank, 2014).

2.2.2.2. Elementos principales de una Presa

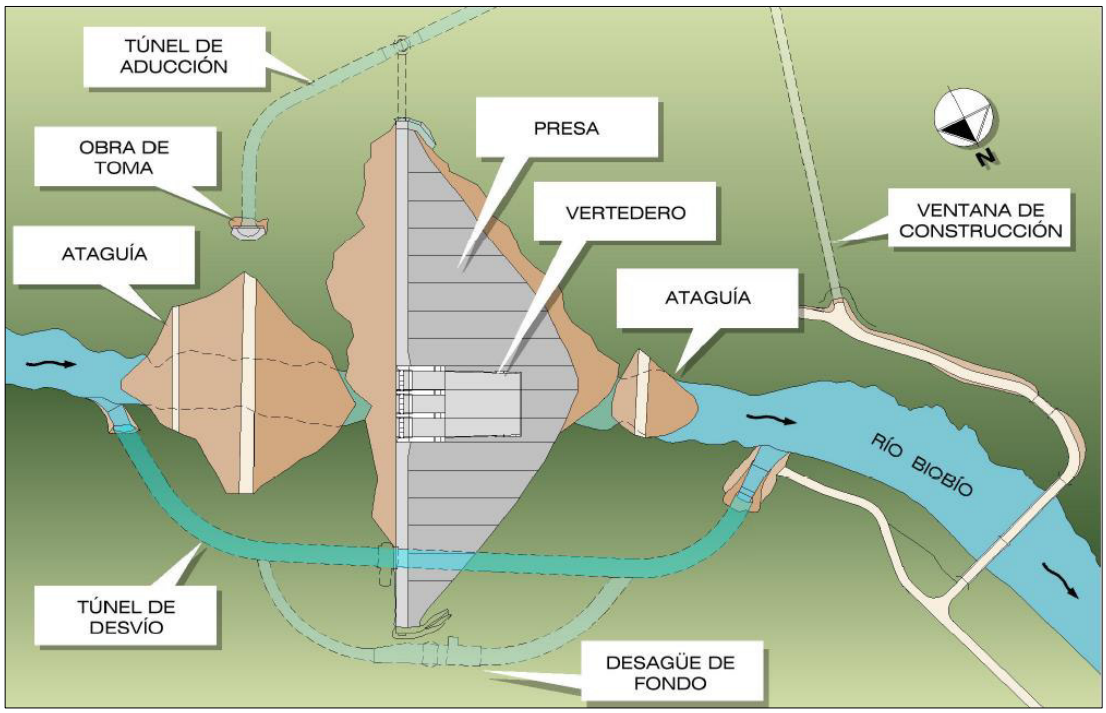
Una presa es una infraestructura compleja compuesta por diversos elementos estructurales e hidráulicos, cada uno con funciones específicas que en conjunto aseguran su estabilidad, impermeabilidad, operación y seguridad. De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016), el International Commission on Large Dams (ICOLD, 2011), SPANCOLD (2017) y el Instituto Español del Cemento (2012), los principales componentes de una presa son:

- **Cuerpo de la presa**: es la estructura principal que resiste las presiones hidrostáticas y transmite las cargas al terreno de fundación. Su tipología depende del material y método constructivo (tierra, enrocado, concreto de gravedad, arco, etc.).

- **Cimentación o fundación**: constituye la base sobre la cual descansa el cuerpo de la presa. Debe poseer suficiente capacidad portante, baja permeabilidad y estabilidad frente a esfuerzos sísmicos y cargas hidráulicas. Su adecuada preparación es clave para evitar fenómenos como filtraciones, subpresión o piping.
- **Corona o cresta**: parte superior de la presa que delimita el nivel máximo de embalse y, en muchos casos, funciona como vía de comunicación o camino de servicio.
- **Estribos o empotramientos**: zonas laterales del valle donde la presa se apoya y transmite cargas al macizo rocoso o terreno contiguo.
- **Paramentos o taludes**: superficies exteriores, aguas arriba y aguas abajo, que limitan el cuerpo de la presa y aseguran su estabilidad frente al empuje hidráulico.
- **Estructuras de impermeabilización**: incluyen núcleos arcillosos, pantallas de inyecciones, caras de concreto (en CFRD) o losas asfálticas. Su función es controlar las filtraciones a través del cuerpo y cimentación.
- **Aliviadero o vertedero**: obra hidráulica que permite evacuar los caudales extraordinarios durante avenidas, evitando el sobrevertido que podría comprometer la seguridad de la presa. Puede estar integrado al cuerpo (en presas de concreto) o separado (en presas de materiales sueltos).
- **Obra de toma**: estructura que posibilita la derivación de caudales para consumo humano, riego, generación hidroeléctrica u otros usos. Incluye conductos, compuertas y dispositivos de control.
- **Desagüe de fondo**: conducto ubicado en la parte baja de la presa que permite el vaciado del embalse, la evacuación de sedimentos y el mantenimiento de caudales ecológicos.
- **Obras de desvío**: túneles, canales o galerías temporales que permiten encauzar el río durante la construcción; en algunos casos, se incorporan luego como descargas de fondo o auxiliares.
- **Instrumentación y drenajes**: dispositivos instalados para monitorear el comportamiento de la presa (piezómetros, inclinómetros, drenes), medir presiones intersticiales, deformaciones y controlar filtraciones internas.

La integración adecuada de estas partes garantiza el cumplimiento de las funciones principales de una presa: almacenamiento de agua, control de caudales, generación de energía y protección frente a avenidas, en condiciones de seguridad para la población y el ambiente (SPANCOLD, 2017; ICOLD, 2011).

Figura 2.3 Esquema general de una presa y sus estructuras principales



Fuente: Recuperado de Civilgeeks.com.

2.2.3. Sitio o ubicación de una Presa

2.2.3.1. Definición

El sitio de presa es el lugar físico dentro de una cuenca hidrográfica donde se construye la estructura principal de una presa, en función de criterios técnicos, geológicos, topográficos, hidrológicos y socioambientales. Se trata de una localización estratégica que debe permitir el cierre eficiente del valle o quebrada, facilitando el almacenamiento de agua con el menor volumen de obra y el mayor aprovechamiento hidráulico posible (Emiroglu et al., 2002).

2.2.4. Factores que determinan la ubicación de una presa

La ubicación de un sitio de presa o embalse depende de un conjunto de factores físicos, ambientales y socioeconómicos que, analizados en conjunto, garantizan la seguridad,

funcionalidad y sostenibilidad de la infraestructura. De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua (2016) e ICOLD (2011), estos factores deben evaluarse mediante estudios específicos apoyados en topografía, hidrología, geología y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); entre ellos tenemos:

2.2.4.1. Pendiente del terreno

La pendiente del terreno constituye uno de los factores más determinantes en la ubicación de presas, debido a que influye directamente en la estabilidad del cierre, el comportamiento hidráulico y el volumen de obra necesario. Diversos investigadores han resaltado su importancia en los estudios de selección de sitios. Qureshi (2015), Dai (2016), Iftikhar et al. (2016), Tshegofatso (2016), Boateng et al. (2016) y Njiru y Siriba (2018) señalan que la pendiente es un factor decisivo para la selección del sitio de una presa.

En particular, Boateng et al. (2016) y Njiru y Siriba (2018) la consideran el factor más relevante, asignándole la mayor ponderación en sus modelos de priorización. Boateng et al. (2016) sugieren que la pendiente óptima debe ser inferior al 3%, ya que este valor permite que el agua fluya adecuadamente hacia la presa sin generar un empuje excesivo que incremente las tensiones sobre la estructura.

2.2.4.2. Red de drenaje y arroyos

La red hidrográfica de una cuenca condiciona de manera directa la captación de agua en el embalse y su comportamiento hidrológico. Estudios como los de Ahmed y Al-Mamun (2018) y Rawat et al. (2020) destacan que la densidad de drenaje, la jerarquía de los cauces y la conectividad de los arroyos determinan la confiabilidad del suministro hídrico hacia la presa. Un drenaje bien definido permite una recarga constante, mientras que cuencas con drenaje disperso o intermitente reducen la eficiencia del embalse. Además, la ubicación de la presa debe considerar la confluencia de tributarios, ya que allí suelen obtenerse mayores volúmenes de almacenamiento con menores superficies inundadas (Yildirim & Kaya, 2017).

2.2.4.3. Geología del sitio

La geología del sitio es fundamental para evaluar la viabilidad del emplazamiento. La litología, la presencia de fracturas, fallas y diaclasas, así como la hidrogeología local, determinan la estabilidad de la fundación y la seguridad de la obra. Según la Autoridad Nacional del Agua (2016) y Arreguín et al. (1987), la existencia de roca sana y macizos competentes constituye una condición favorable para el emplazamiento de presas. Investigaciones como las de Al-Ansari et al. (2015) enfatizan que los depósitos aluviales no consolidados, los suelos blandos y las zonas con alta permeabilidad natural deben descartarse o requerir tratamientos costosos de cimentación.

2.2.4.4. Condiciones geotécnicas

El análisis geotécnico complementa al geológico, evaluando el comportamiento mecánico de los materiales. Factores como la clasificación geomecánica RMR, la capacidad portante admisible del macizo, la permeabilidad y el ángulo de fricción del suelo permiten definir la resistencia frente a cargas estáticas e hidráulicas (Bieniawski, 1989). Estudios de Tshegofatso (2016) y Dai (2016) subrayan que valores bajos de resistencia al corte o de capacidad portante limitan la seguridad estructural, incrementando los riesgos de deslizamiento o asentamientos diferenciales.

2.2.4.5. Condiciones climáticas y régimen hidrológico

El clima y el régimen hidrológico de la cuenca son factores determinantes en la ubicación de presas y embalses, ya que condicionan tanto la disponibilidad de agua como los riesgos asociados a fenómenos extremos. Según ICOLD (2011) y la Autoridad Nacional del Agua (2016), la selección de un sitio debe considerar la precipitación media anual, su distribución estacional, la temperatura y la variabilidad climática. Estos parámetros influyen directamente en los aportes al embalse, en la tasa de evaporación y en la durabilidad de la infraestructura.

Diversos investigadores resaltan que, en regiones con alta estacionalidad de lluvias, los embalses permiten regular los excesos de la época húmeda para cubrir la demanda en la estación seca (Mahmood, 1987; Rawat et al., 2020). Por otro lado, en zonas áridas

con precipitaciones concentradas en eventos extremos, es necesario prever un mayor riesgo de sedimentación súbita y erosión en la cuenca (Sen et al., 2015).

El régimen hidrológico también define el tamaño y tipo de obras hidráulicas complementarias, en especial el vertedero de demasías y los desagües de fondo, que deben dimensionarse para evacuar crecidas extraordinarias sin comprometer la seguridad de la presa. Investigaciones recientes subrayan la importancia de incorporar escenarios de cambio climático, debido al incremento en la frecuencia de sequías prolongadas e inundaciones extremas, lo cual puede modificar los patrones hidrológicos previstos (World Bank, 2014; Tortajada, 2016).

2.2.4.6. Capacidad de almacenamiento

La topografía del vaso de embalse determina el volumen de agua que puede almacenarse y su relación con la superficie inundada. De acuerdo con la ANA (2016), se prefieren sitios donde el volumen útil sea elevado en comparación con el área anegada, lo que maximiza el rendimiento y minimiza impactos socioambientales.

Estudios de Njiru y Siriba (2018) muestran que este factor suele recibir alta ponderación en análisis AHP, al representar la funcionalidad principal de la presa: garantizar el suministro hídrico frente a la variabilidad estacional.

2.2.4.7. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal tiene un doble papel: técnico y ambiental. Desde el punto de vista hidrológico, influye en la escorrentía, la infiltración y la erosión de la cuenca (FAO, 2010). Desde la perspectiva ambiental, implica la afectación de ecosistemas y la necesidad de medidas de compensación.

Estudios como los de Kumar et al. (2017) señalan que áreas densamente cubiertas de bosques o zonas de alta biodiversidad requieren evaluaciones ambientales estratégicas, mientras que terrenos agrícolas o con vegetación secundaria suelen presentar menor resistencia social y ambiental a proyectos de represamiento.

2.2.4.8. Curva Número (CN)

El método de la Curva Número (CN), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS, 1972), permite estimar la escorrentía superficial en función del uso de suelo, tipo de cobertura y condiciones de humedad. Este parámetro resulta clave en la selección de sitios de embalse, pues condiciona la disponibilidad real de agua.

Investigaciones recientes como las de Sen et al. (2015) muestran que el CN constituye un insumo esencial en modelos hidrológicos aplicados en SIG, dado que integra información de suelos, vegetación y precipitación para priorizar ubicaciones con mayor rendimiento hídrico.

2.2.4.9. Producción de sedimentos

La sedimentación en embalses constituye uno de los principales problemas que afectan su vida útil. Factores como las pendientes de la cuenca, la erosión hídrica y la precipitación determinan la carga sólida que llegará al embalse.

De acuerdo con Mahmood (1987) y ICOLD (2011), sitios con alta producción de sedimentos deben evitarse o contemplar obras de manejo como desarenadores o descargas de fondo. Estudios de Rawat et al. (2020) demuestran que la acumulación de sedimentos puede reducir en más del 30% la capacidad de almacenamiento de presas en apenas dos décadas si no se evalúa este criterio en la fase de diseño.

2.2.4.10. Geometría de la boquilla

La forma y dimensiones de la boquilla o zona de cierre influyen directamente en la eficiencia hidráulica y en el volumen de obra requerido. Una boquilla estrecha y profunda permite generar mayor capacidad de almacenamiento con una presa de menor longitud (Emiroglu et al., 2002).

Investigadores como Yildirim y Kaya (2017) destacan que este criterio es esencial en la evaluación multicriterio, ya que condiciona tanto la inversión económica como el aprovechamiento hidráulico.

2.2.4.11. Accesibilidad y logística

La accesibilidad del sitio y las condiciones logísticas necesarias para la construcción constituyen factores decisivos en la selección de la ubicación de una presa o embalse. Un emplazamiento técnicamente viable puede resultar inviable desde el punto de vista constructivo si presenta dificultades de acceso, carencia de infraestructura básica o elevados costos de transporte (ANA, 2016; ICOLD, 2011).

La facilidad para trasladar maquinaria pesada, materiales de construcción y personal influye directamente en los costos y en la rapidez de ejecución. Sitios alejados de carreteras principales, con relieves abruptos o ubicados en zonas aisladas, pueden incrementar de manera significativa los costos de movilización y operación (Yildirim & Kaya, 2017). Además, la disponibilidad de servicios complementarios (energía eléctrica, agua industrial, talleres y campamentos) es fundamental para garantizar la continuidad de las obras (SPANCOLD, 2017).

El Banco Mundial (2014) recomienda evaluar no solo la accesibilidad en la etapa de construcción, sino también en la fase de operación y mantenimiento, ya que un acceso restringido puede complicar las labores de inspección, monitoreo y reparación a lo largo de la vida útil de la presa.

2.2.4.12. Aspectos socioambientales

Los impactos sociales y ambientales constituyen un criterio transversal en la selección de sitios. La afectación a centros poblados, tierras agrícolas, infraestructura o patrimonio cultural debe minimizarse, mientras que los beneficios de regulación hídrica y generación de energía deben maximizarse (World Bank, 2014). Autores como Tortajada (2016) subrayan que los proyectos de presas con menor resistencia social son aquellos en los que la selección del sitio priorizó la reducción de desplazamientos humanos y la protección de ecosistemas sensibles.

Además de los factores descritos, la literatura especializada señala que existen otros aspectos que también pueden influir en la selección de un sitio de presa o embalse. Estos criterios complementarios deben ser evaluados en función de las condiciones particulares de cada proyecto.

2.2.5. Clasificación de las presas

La clasificación de las presas constituye un aspecto fundamental en la ingeniería hidráulica, ya que permite diferenciar sus tipologías en función de parámetros técnicos, constructivos y de seguridad. Organismos internacionales como la International Commission on Large Dams (ICOLD), la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA), la SPANCOLD en España, así como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en Perú y la normativa rusa (CP 58.133330.2012), han desarrollado diferentes esquemas de clasificación que permiten orientar el diseño y la selección de tipología según las condiciones del sitio y los objetivos del proyecto. En términos generales, las presas pueden clasificarse en función de los siguientes criterios:

2.2.5.1. Clasificación según su función

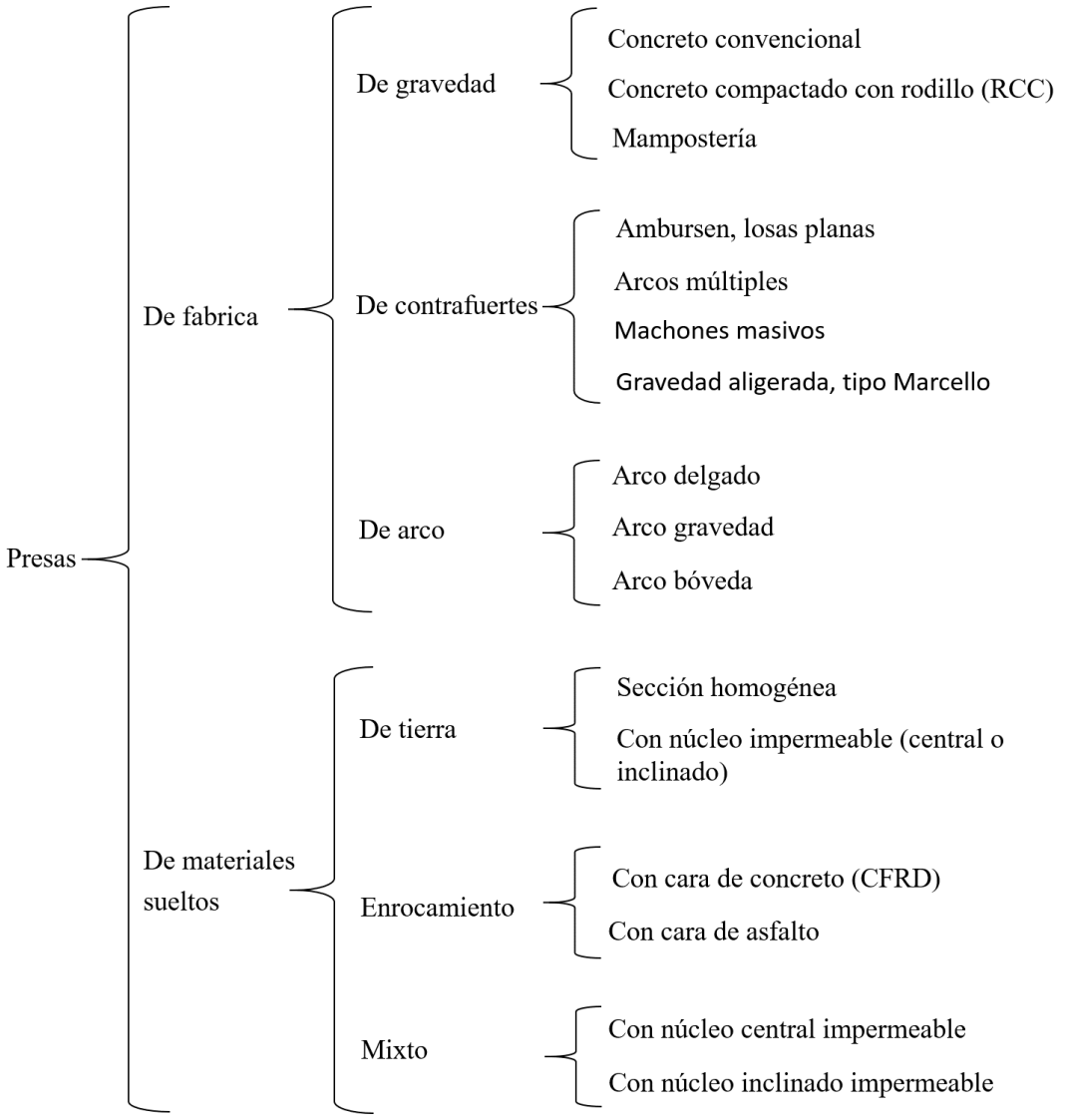
De acuerdo con el ANA (2015), las presas pueden clasificarse según la función principal que cumplen en la gestión de los recursos hídricos:

- **Presas de almacenamiento**: destinadas a retener agua en épocas de excedencia para utilizarla en períodos de escasez. Pueden ser estacionales, anuales o plurianuales. Su finalidad incluye el abastecimiento poblacional, riego agrícola, generación hidroeléctrica, recreación y conservación ambiental.
- **Presas de derivación**: su función es desviar el caudal de un río hacia canales, zanjas u otros sistemas de conducción. Se aplican principalmente en irrigación y en casos donde se requiere llevar el recurso hacia un vaso de almacenamiento externo al cauce natural.
- **Presas de regulación**: se diseñan para atenuar crecidas y reducir los efectos de avenidas extraordinarias. En algunos casos, también cumplen un rol en la recarga de acuíferos o en la retención de sedimentos.
- **Presas de relaves**: se construyen con el objetivo de contener los residuos provenientes de las plantas de procesamiento minero. A diferencia de las presas convencionales de agua, estas estructuras deben garantizar la estabilidad geotécnica a largo plazo, el control de infiltraciones y la prevención de fallas que puedan generar impactos ambientales severos. (ICOLD, 2016; ANCOLD, 2019).

2.2.5.2. Clasificación según los materiales de construcción

La clasificación de las presas según los materiales de construcción es una de las más empleadas en ingeniería, ya que determina su comportamiento estructural, el método constructivo y la vida útil de la obra. De forma general, las presas pueden clasificarse en dos categorías principales según el material de su construcción. Por un lado se encuentran las presas de fábrica, construidas con concreto, RCC o mampostería (gravedad, contrafuertes y arco); por otro lado, se tienen las presas de materiales sueltos, conformadas por tierra, enrocado o combinaciones mixtas. Cada tipología presenta características, ventajas y limitaciones propias que deben considerarse en el proceso de selección (UNAM, 2010; Martínez, 2019). Ver Figura 2.4.

Figura 2.4 Clasificación de presas según su material de construcción y concepción estructural



Fuente: Elaboración propia.

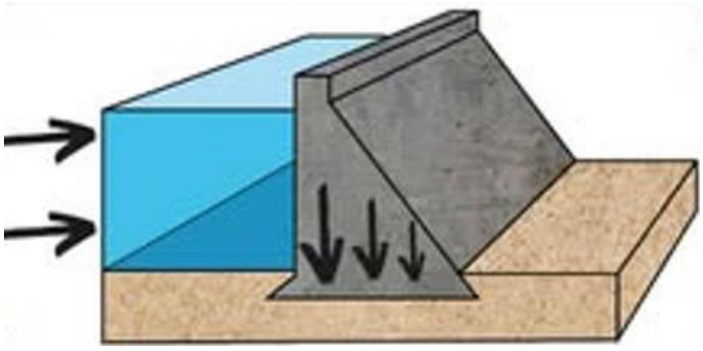
A) Presa de fábrica

Son estructuras relativamente esbeltas cuyo material predominante es el concreto, aunque en el pasado también llegaron a ejecutarse en mampostería. Este tipo de presas se subdividen en tres categorías principales, atendiendo a sus características constructivas y estructurales.

1) Presas de gravedad

La estabilidad de una presa de gravedad depende fundamentalmente de su propio peso, el cual debe ser capaz de generar suficiente fricción en la cimentación para resistir el deslizamiento. En otras palabras, para impedir el volcamiento, la fuerza resultante de la presión del agua junto con el peso de la estructura debe mantenerse dentro de la base de apoyo de la presa (USBR, 1987).

Figura 2.5 Esquema de una presa de gravedad y fuerzas actuantes



Fuente: Adaptado de Konstrutecnia.com.

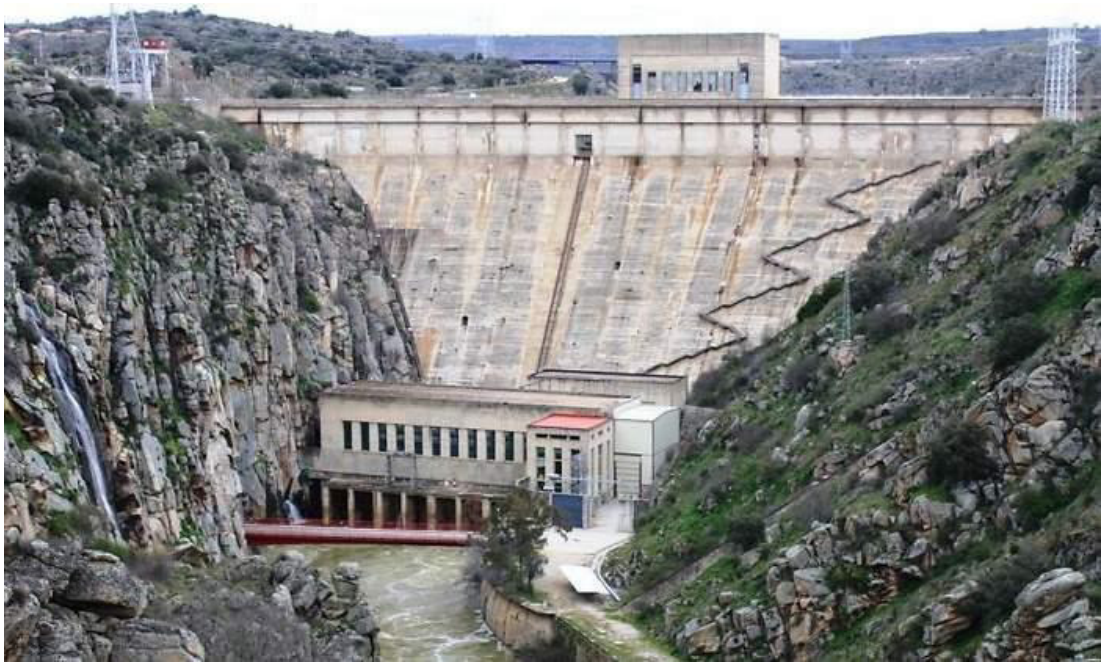
Estas presas se construyen fundamentalmente con concreto en masa, incorporando armaduras únicamente en zonas puntuales sometidas a esfuerzos de tracción, como las galerías. Su desempeño estructural depende de que el concreto trabaje preferentemente a compresión, razón por la cual las tensiones de tracción deben ser cuidadosamente controladas, siendo el pie de aguas arriba uno de los sectores más críticos.

Existen dos variantes constructivas principales: por un lado, las presas de fábrica de concreto vibrado, también denominadas convencionales; y por otro, las presas de concreto compactado con rodillo (CCR), que constituyen una alternativa moderna de construcción.

- Presa de concreto convencional (CC)

Una presa de concreto convencional es una estructura hidráulica construida con concreto vibrado, colocado en capas mediante encofrados y vibración mecánica para garantizar su compactación y homogeneidad. Se caracteriza por su alta resistencia, durabilidad y rigidez, aunque requiere mayores plazos y costos de construcción.

Figura 2.6 Presa CC de Ricobayo, Zaragoza - España



Fuente: Wikimedia Commons (2021).

Características, ventajas y limitaciones de las presas de concreto convencional:

Ventajas:

- Topografía: Adecuada para valles estrechos y profundos, donde se optimiza su sección maciza.
- Condiciones geológicas: Excelente desempeño cuando se apoya sobre macizos rocosos sanos, con baja deformabilidad.
- Disponibilidad de materiales: No requiere grandes volúmenes de enrocado o arcillas impermeables; solo agregados, cemento y acero.
- Obras conexas: Permite integrar el vertedero, tomas y galerías de drenaje en el cuerpo de la presa, simplificando las obras complementarias.

- Seguridad: Muy alta resistencia estructural frente a cargas estáticas y dinámicas; gran durabilidad y baja deformabilidad.
- Procedimiento constructivo: Bien conocida a nivel mundial, con métodos estandarizados de diseño y construcción.
- Plazo de construcción: Si bien es más largo que RCC, permite avanzar en forma modular y controlada por bloques.
- Mantenimiento: Bajos requerimientos de mantenimiento durante su vida útil, con una durabilidad superior a 100 años.
- Experiencia: Tipología con gran cantidad de referencias construidas a nivel mundial, siendo una de las más estudiadas y probadas.

Limitaciones:

- Topografía: Poco eficiente en valles amplios, dado que requiere grandes volúmenes de concreto, encareciendo la obra.
- Condiciones geológicas: Necesita cimentarse en roca de alta resistencia; no adecuada en suelos compresibles o roca muy fracturada.
- Disponibilidad de materiales: Altas exigencias logísticas en el suministro de cemento y acero; elevados costos de transporte si no hay plantas cercanas.
- Seguridad: Aunque resistente, puede presentar problemas de subpresiones internas si no se diseñan sistemas de drenaje adecuados.
- Procedimiento constructivo: Requiere gran volumen de formaletas, cimbras y encofrados, con un proceso intensivo en mano de obra.
- Plazo de construcción: Generalmente el más largo entre las tipologías de presas, lo que incrementa costos indirectos y riesgo de retrasos.
- Costo: El más alto en comparación con presas de materiales sueltos y RCC; mayor consumo de cemento y acero.
- Impacto ambiental: Alta huella de carbono debido a la fabricación de cemento; construcción prolongada genera impactos ambientales mayores.
- Experiencia local: En algunos países, menor experiencia reciente debido al reemplazo progresivo por RCC en grandes proyectos.

- Presa de concreto compactado con rodillo (CCR ó RCC)

Una presa de concreto compactado con rodillo (CCR) es una variante de las presas de gravedad en la que el concreto, con bajo contenido de agua y consistencia seca, se coloca en capas horizontales y se compacta mediante rodillos vibratorios, de manera similar a la construcción de presas de enrocado o terraplenes.

Este método permite una construcción más rápida y económica que el concreto vibrado convencional, ya que reduce el uso de encofrados, disminuye tiempos de fraguado y aprovecha procedimientos de colocación mecanizada. Su desempeño estructural sigue basándose en el peso propio de la cortina, garantizando estabilidad frente al empuje hidrostático, al deslizamiento y al vuelco.

Figura 2.7 Presa RCC de Enciso, La Rioja – España



Fuente: Web Grupo TYPSA (2024).

Características, ventajas y limitaciones de las presas de CCR:

Ventajas:

- Topografía: Adecuada tanto en valles amplios como en valles estrechos.
- Condiciones geológicas: Se adapta bien a macizos rocosos sanos y de baja deformabilidad.
- Disponibilidad de materiales: Los agregados suelen obtenerse de canteras cercanas o del cauce del río, reduciendo costos.

- Obras conexas: Posibilidad de integrar el vertedero y la toma en el cuerpo de la presa, reduciendo excavaciones y costos adicionales.
- Seguridad: Alta resistencia sísmica; comportamiento seguro frente a reboses accidentales por la cresta.
- Sistema de desvío: Menor necesidad de túneles de desvío y ataguías, gracias a la velocidad de construcción.
- Procedimiento constructivo: Construcción rápida y continua (hasta 100,000 m^3/mes), menor consumo de cemento, reducción en el uso de formaletas, tratamientos de juntas y control de temperatura.
- Plazos de construcción: Periodos de obra hasta un 25–50% menores que con concreto convencional.
- Costo: Entre un 30–50% más económico que una presa de concreto convencional, por menor consumo de cemento y encofrado.
- Impacto ambiental: Reducción del impacto ambiental durante la construcción por menor tiempo de obra.
- Mantenimiento: Menores requerimientos a largo plazo por la durabilidad del concreto.

Limitaciones:

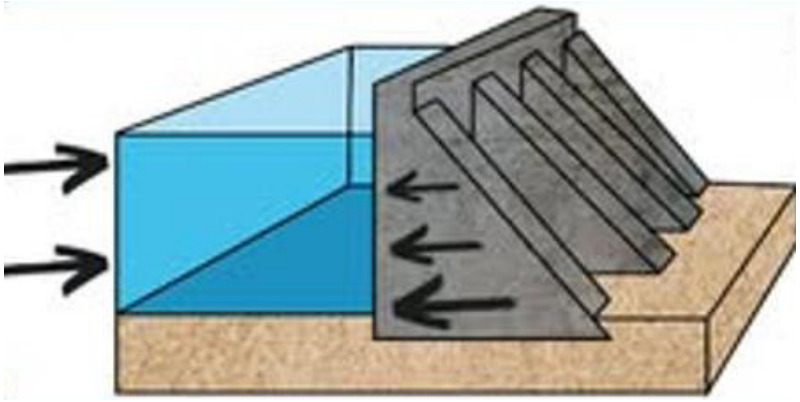
- Condiciones geológicas: Exige cimentación en roca sana y con baja deformabilidad; limitada en suelos compresibles.
- Materiales: Dependencia del suministro continuo de cemento; altos costos de transporte si no existe una planta cercana.
- Seguridad: Requiere impermeabilización adicional para controlar permeabilidad, riesgo de fisuras por juntas frías, subpresiones internas y baja resistencia a tracción.
- Procedimiento constructivo: Necesita control riguroso de temperatura y humedad, ensayos específicos y diseños detallados. Construcción más exigente en comparación con presas de tierra o CFRD.
- Tiempo de colocación: La velocidad de avance por capa está condicionada por el análisis térmico (6–24 horas entre capas).
- Costo inicial: Requiere alta inversión en plantas de mezcla, transporte y compactación especializada.

- Experiencia: Menor número de proyectos construidos en comparación con presas de materiales sueltos o CFRD; escasa experiencia nacional.
- Clima: Mal tiempo puede afectar la calidad de unión entre capas (tongadas).

2) Presas aligeradas o de contrafuertes

Una presa de contrafuertes es una estructura hidráulica formada por una cortina delgada de concreto, vertical o inclinada hacia aguas arriba, que transmite las presiones hidrostáticas a una serie de elementos triangulares de soporte llamados contrafuertes, dispuestos en dirección aguas abajo. Estos contrafuertes actúan como columnas o "colas" que estabilizan la cortina, permitiendo reducir significativamente el volumen de concreto respecto a una presa de gravedad maciza, sin comprometer la seguridad estructural.

Figura 2.8 Esquema de una presa de contrafuertes y fuerzas actuantes



Fuente: Adaptado de Konstrutecnia.com

A diferencia de las presas de gravedad, estas estructuras presentan una reducción notable en el volumen de concreto utilizado, ya que prácticamente no generan presión de succión y, además, se benefician del peso adicional de la cuña de agua que actúa sobre la cabeza. En términos geométricos, la anchura de la base suele ser proporcional a la altura de la presa.

No obstante, la complejidad constructiva de su diseño, en contraste con las presas de gravedad macizas, exige una mayor demanda de mano de obra especializada, lo que incrementa significativamente los costos. Por esta razón, pese a la economía en materiales, su construcción ha caído en desuso en la actualidad.

Figura 2.9 Presa de Roselend (Francia)



Fuente: Adaptado de masqueingenieria.com

Características, ventajas y limitaciones de las presas de contrafuertes:

Ventajas:

- Requieren menor volumen de concreto en comparación con una presa de gravedad maciza.
- El peso de la cuña de agua sobre la cabeza contribuye a la estabilidad estructural.
- Adecuadas para valles amplios donde no conviene una presa maciza.
- En el pasado representaron una alternativa económica en materiales.

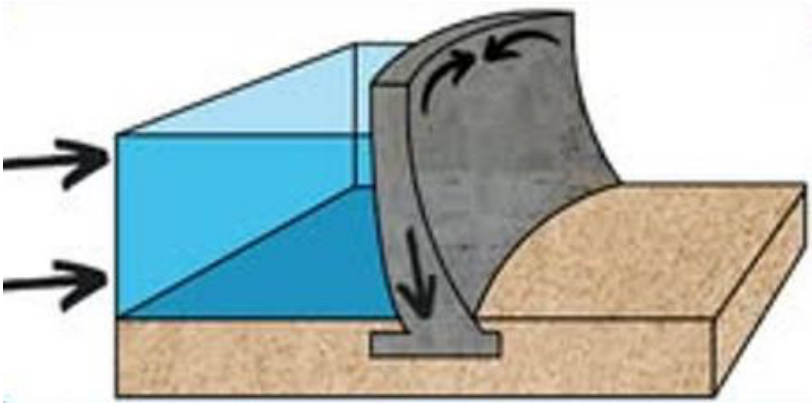
Limitaciones:

- Su geometría compleja demanda mayor precisión constructiva.
- Necesitan mayor cantidad de mano de obra especializada, lo que eleva costos.
- Su construcción es más lenta y complicada que otros tipos de presa.
- Presentan gran número de juntas de construcción, que requieren tratamientos especiales de impermeabilización y aumentan los costos de mantenimiento.
- Actualmente han caído en desuso debido a sus altos costos y exigencias técnicas.

3) Presas de arco

Una presa de arco es una estructura hidráulica cuya resistencia se basa en su geometría curva, la cual permite que los empujes hidrostáticos se transmitan principalmente como esfuerzos de compresión axiales hacia los estribos de la cerrada. Debido a este principio estructural, los estribos deben tener gran capacidad portante, ya que concentran las cargas. Estas presas son más esbeltas que las de gravedad y requieren cerradas estrechas y con condiciones geológicas favorables.

Figura 2.10 Esquema de una presa de arco y fuerzas actuantes



Fuente: Adaptado de Konstrutecnia.com

Para su construcción se deben cumplir dos condiciones fundamentales:

- Estribos con suficiente resistencia para absorber los esfuerzos transmitidos.
- Una cerrada con características geométricas adecuadas, preferentemente simétrica, que favorezca el comportamiento estructural.

Según la forma del cuerpo, las presas de arco se clasifican en tres variantes:

- Arco simple: de sección trapezoidal con planta curva.
- Doble curvatura o bóveda: con curvatura tanto en planta como en alzado.
- Arco-gravedad: combinación en la que, debido a la menor resistencia de los estribos, se incrementa el espesor de la cortina para que el peso propio contribuya a la estabilidad.

Figura 2.11 Presa Hoover (Estados Unidos)



Fuente: Adaptado de academic.com

Características, ventajas y limitaciones de las presas de arco:

Ventajas:

- Requieren mucho menor volumen de concreto que las presas de gravedad.
- Transmiten los esfuerzos principalmente a compresión, aprovechando mejor la resistencia del material.
- Son estructuras más esbeltas y estéticas.
- Mayor economía en materiales en sitios adecuados.
- Buen comportamiento frente a grandes alturas y caudales

Limitaciones:

- Necesitan cerradas angostas y geológicamente estables, lo que limita su ubicación
- Exigen estribos muy resistentes, capaces de soportar grandes concentraciones de carga.
- Su diseño y construcción requieren alto grado de especialización técnica.
- Poca aplicabilidad en valles anchos o con cimientos débiles.

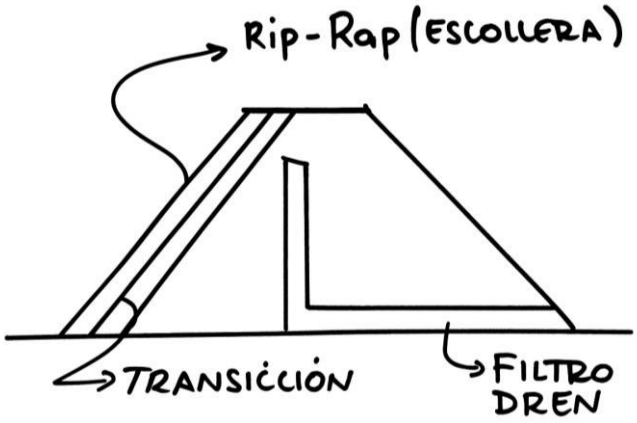
B) Presa de materiales sueltos

Las presas de materiales sueltos destacan por su gran versatilidad constructiva, ya que pueden ejecutarse con una amplia variedad de materiales disponibles localmente, lo que explica que constituyan la tipología más común a nivel mundial. Suelen presentar una sección trapezoidal, con proporciones más robustas y menos esbeltas que las presas de fábrica. Su rasgo distintivo es la zonificación de los materiales, es decir, la disposición de cada tipo de material en la zona donde cumple de manera más eficiente su función estructural o hidráulica.

1) Presas homogéneas

Este tipo de presas utilizan un único material impermeable en toda su sección, lo que simplifica su estructura. Son más adecuadas para alturas bajas y medias, donde la anchura de la base suele variar entre 6 y 8 veces la altura total de la presa.

Figura 2.12 Esquema de una presa de materiales sueltos homogéneos



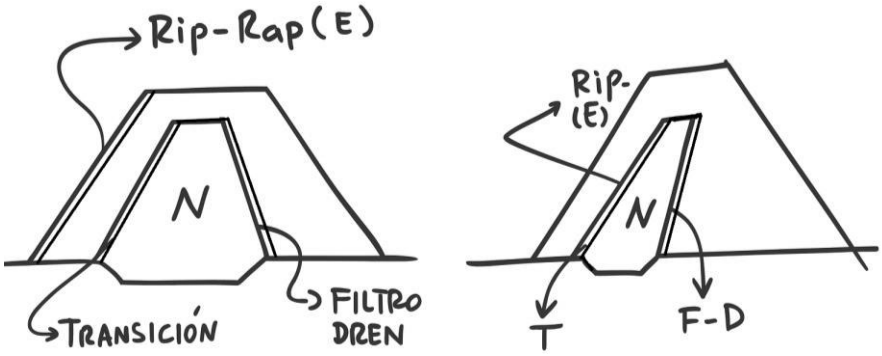
Fuente: Elaboración propia.

2) Presas de núcleo

Estas presas cuentan con un núcleo impermeable ubicado en el interior, el cual se encuentra confinado por materiales resistentes, generalmente enrocado.

Pueden clasificarse a su vez de acuerdo con la morfología del núcleo (delgado o grueso) y con su disposición geométrica (vertical o inclinada). El núcleo inclinado ofrece ventajas tanto en términos de seguridad hidráulica como de facilidad constructiva.

Figura 2.13 Esquema de una presa de materiales sueltos de núcleo



Fuente: Elaboración propia.

- Presa de núcleo central (vertical) impermeable

Una presa de núcleo central (vertical) impermeable es un tipo de presa de materiales sueltos en la que el elemento impermeable se ubica en el eje central de la sección, dispuesto de forma vertical, y se encuentra confinado lateralmente por materiales más resistentes como enrocados o gravas. Su función principal es reducir las filtraciones a través del cuerpo de la presa, manteniendo la estabilidad estructural mediante la zonificación de materiales.

Figura 2.14 Presa Gallito Ciego, Cajamarca y Lambayeque – Perú



Fuente: PEJEZA (2014)

Características, ventajas y limitaciones de una presa de núcleo central impermeable:

Ventajas:

- Topografía: Adecuada para valles amplios con geometría regular.
- Condiciones geológicas: Se adapta a un amplio rango de condiciones de fundación, incluso en terrenos con cierta permeabilidad, mediante tratamientos de cimentación.
- Disponibilidad de materiales: Permite el uso extensivo de materiales locales (suelo arcilloso, limos, gravas, roca), reduciendo la necesidad de importar materiales.
- Procedimiento constructivo: Construcción mecanizada y continua con maquinaria sencilla y de amplia disponibilidad.
- Costo: Menor costo en comparación con presas de concreto (CC, RCC) si se dispone de materiales adecuados en las cercanías.
- Experiencia: Es la tipología más utilizada históricamente en presas de materiales sueltos, con abundantes referencias y guías de diseño.

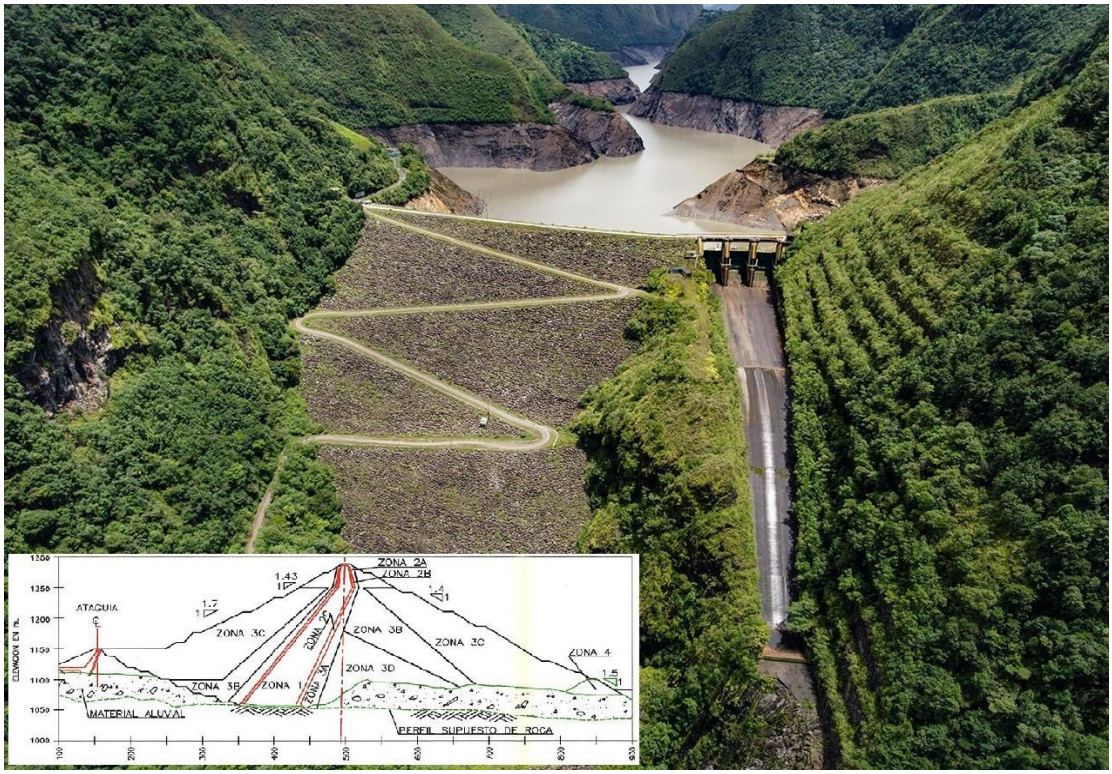
Limitaciones:

- Topografía: No adecuada en valles estrechos, ya que exige una gran base para garantizar la estabilidad.
- Disponibilidad de materiales: Requiere contar con una cantera de arcillas plásticas de buena calidad para conformar el núcleo impermeable.
- Obras conexas: Vertederos y tomas deben construirse fuera del cuerpo de la presa, lo que aumenta costos y complejidad.
- Seguridad: Muy vulnerable a daños por sobrevertimiento; requiere estrictos sistemas de descarga de avenidas. Su comportamiento estructural es limitado frente a la ocurrencia de sismos
- Plazo de construcción: Generalmente mayor que en presas de enrocado o RCC; además, debe programarse en época seca.
- Costo: El tiempo prolongado de construcción genera mayor impacto ambiental y logístico (campamentos, maquinaria, consumo de combustible).
- Mantenimiento: Más susceptible a filtraciones, lo que requiere monitoreo continuo y eventuales intervenciones.

- Presa de núcleo central inclinado

Una presa de núcleo central inclinado es una presa de materiales sueltos en la que el elemento impermeable se dispone con inclinación hacia aguas arriba, en lugar de ubicarse en posición vertical. Esta configuración mejora la seguridad hidráulica al aumentar el recorrido de filtración y facilita la ejecución constructiva, especialmente en presas de gran altura.

Figura 2.15 Presa La Esmeralda, Colombia - Enrocado con núcleo inclinado, Altura: 237 m



Fuente: Ramírez (2016).

Características, ventajas y limitaciones de una presa de núcleo inclinado impermeable:

Ventajas:

- Topografía: Adecuada para valles amplios y de geometría moderada.
- Condiciones geológicas: Puede adaptarse a fundaciones de permeabilidad media, con tratamientos adecuados en la base y pantallas de inyecciones.
- Disponibilidad de materiales: El volumen de material impermeable (arcillas plásticas o limos) requerido es menor que en presas de núcleo central, lo que reduce la presión sobre la cantera de impermeabilizantes.

- Seguridad: El enrocado lateral aporta gran estabilidad estructural frente a cargas estáticas y sísmicas. Presenta un mejor comportamiento hidráulico en caso de filtraciones, ya que el flujo se desvía hacia aguas arriba. Su comportamiento frente al sobrevertimiento accidental es más tolerante que en presas de tierra.
- Procedimiento constructivo: La construcción del enrocado es mecanizada y rápida; el núcleo puede compactarse por etapas a medida que avanza la presa.
- Plazo de construcción: Más corto que en presas de núcleo central, dado que el núcleo requiere menor volumen y se ejecuta en combinación con el enrocado.
- Costo: Generalmente más económica que una presa de núcleo central, por el menor uso de material impermeable y la mecanización del enrocado.
- Mantenimiento: Larga vida útil si se garantiza la calidad de los filtros y del núcleo impermeable.

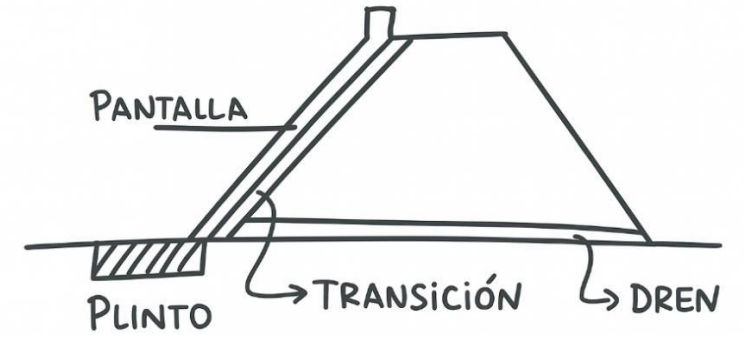
Limitaciones:

- Topografía: No es adecuada en valles muy estrechos, ya que requiere una sección más amplia para garantizar la estabilidad del núcleo.
- Disponibilidad de materiales: Necesita contar con canteras de roca de buena calidad para el enrocado y disponibilidad de material arcilloso impermeable.
- Seguridad: Riesgo de filtración y erosión interna si no se diseña un sistema eficiente de filtros y drenes.
- Procedimiento constructivo: Requiere alta precisión en la colocación del núcleo inclinado, para garantizar continuidad y espesor adecuado.
- Plazo de construcción: El ritmo puede verse condicionado por la coordinación simultánea de núcleo, filtros y enrocado.
- Costo: Aunque más económica que una presa de núcleo central, la ejecución de filtros, drenes y tratamientos de cimentación eleva los costos.
- Mantenimiento: En caso de problemas de filtración, las reparaciones son más complicadas que en presas CFRD, ya que el núcleo se encuentra embebido.
- Experiencia: Menor cantidad de proyectos construidos en comparación con CFRD y RCC, lo que puede limitar la experiencia técnica en algunos países.
- Obras conexas: deben desarrollarse fuera del cuerpo de la presa.

3) Presas de pantalla

Estas presas cuentan con una pantalla impermeable dispuesta sobre el paramento de aguas arriba, cuya función es reducir las filtraciones a través del cuerpo de la presa. Su clasificación depende del material empleado en dicha pantalla: concreto, utilizada en presas de gran, mediana y pequeña escala; asfalto, aplicado en presas medianas y pequeñas; y plásticos o geomembranas, empleados principalmente en presas de menor tamaño.

Figura 2.16 Esquema de una presa de pantalla



Fuente: Elaboración propia.

- Presa de enrocado con cara de concreto (CFRD)

Una presa de enrocado con cara de concreto, es un tipo de presa de materiales sueltos cuya cortina está conformada por enrocado compactado, y cuya impermeabilidad se garantiza mediante una losa de concreto armado ubicada en el paramento de aguas arriba. La estabilidad estructural proviene del peso del enrocado, mientras que la losa de concreto actúa únicamente como elemento impermeable. Este diseño permite aprovechar al máximo los materiales disponibles localmente (roca de cantera y de excavación), reduciendo costos de construcción en comparación con presas de concreto masivo. Además, las CFRD han demostrado buen comportamiento en condiciones sísmicas debido a la flexibilidad del enrocado, lo que las convierte en una opción competitiva en regiones con alta actividad tectónica.

En la actualidad, las presas de enrocado con cara de concreto (CFRD) se han consolidado como una de las tipologías más utilizadas a nivel mundial, debido a su eficiencia constructiva y a la posibilidad de ejecutar proyectos de gran altura en plazos relativamente cortos.

Figura 2.17 Construcción Presa CFRD Limón/Olmos - Perú



Fuente: SIKA PERÚ S.A.

Características, ventajas y limitaciones de una presa CFRD:

Ventajas:

- Topografía: Adecuada para valles amplios y estrechos.
- Condiciones geológicas: Puede adaptarse a fundaciones de roca o suelos relativamente permeables, siempre que se realice tratamiento adecuado.
- Disponibilidad de materiales: Permite aprovechar grandes volúmenes de enrocado de canteras locales, reduciendo la necesidad de materiales impermeables.
- Obras conexas: El vertedero y la toma pueden diseñarse fuera del cuerpo de la presa, simplificando la zonificación interna respecto a presas de núcleo.
- Seguridad: Buen desempeño frente a sismos, debido a la flexibilidad del enrocado y su capacidad de disipar energía.
- Procedimiento constructivo: Construcción rápida y mecanizada del enrocado; la cara de concreto se ejecuta posteriormente.

- Plazo de construcción: Generalmente más corto que en presas de núcleo central, dado que la zonificación interna es más sencilla.
- Costo: Uso eficiente de materiales, menor volumen de material impermeable en comparación con presas de núcleo central o inclinado.
- Mantenimiento: Larga vida útil con mantenimiento limitado si se asegura la calidad de la losa de concreto.
- Experiencia: Numerosos casos exitosos a nivel internacional respaldan esta tipología, en especial en proyectos de gran altura.

Desventajas:

- Condiciones geológicas: Exige un tratamiento adecuado de fundación para controlar filtraciones; la permeabilidad de la base puede ser crítica.
- Seguridad: La impermeabilidad depende exclusivamente de la losa de concreto, lo que concentra el riesgo en un único elemento.
- Materiales: Se requiere disponibilidad de roca de buena calidad para el enrocado; no viable en zonas con roca débil o desintegrada.
- Procedimiento constructivo: La losa de concreto requiere alto control técnico en juntas, plinto y drenajes para evitar fisuración y filtraciones.
- Plazo de construcción: La ejecución de la losa de concreto puede generar retrasos si no existe continuidad en el cronograma.
- Costo: Aunque más económica que una presa de concreto convencional, la ejecución de la losa (plinto, juntas, drenajes) puede ser costosa y compleja.
- Mantenimiento: Las reparaciones en la cara de concreto, en caso de fisuras o filtraciones, resultan difíciles y costosas.
- Clima: Variaciones térmicas pueden inducir contracción y expansión en la losa, incrementando el riesgo de agrietamiento.
- Experiencia nacional: Menor número de presas CFRD en comparación con presas de materiales sueltos, lo que limita la experiencia local en algunos países.

2.2.5.3. Clasificación según la altura o tamaño

Según el International Commission on Large Dams (ICOLD), se define como presa alta a toda presa por encima de 15.00 m de altura (medido desde el punto más bajo de la cimentación a la cresta de la presa), o cualquier presa entre 10 m y 15 m de altura, que cumplan como mínimo con las siguientes condiciones:

- Longitud de la cresta de la presa no menor de 500 m
- Capacidad del embalse formado por la presa no menor de 1.00 millón de metros cúbicos (MMC)
- Caudal de avenida maxima descargado por la presa es no menor de 2,000 m3/s
- Que la presa haya tenido problemas de fundación especialmente difíciles
- La presa tenga un diseño inusual

La Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) aplica la siguiente clasificación de presas de almacenamiento de agua (Tabla 2.1), a partir del criterio del International Commission on Large Dams (ICOLD).

Tabla 2.1 Clasificación de presas y bordes libre

Tamaño	Altura de presa (m)	Almacenamiento (Hm3)
Grande	≥ 15.00	--
	$5.00 \leq h < 15.00$	≥ 3.00
Pequeño	$5.00 \leq h < 15.00$	$0.50 \leq V < 3.00$
Borde libre	< 3.00	≤ 0.50

Fuente: CONAGUA, México.

2.2.5.4. Clasificación según el grado de riesgo

Según Cánovas Del Castillo (1998), “el grado de seguridad exigible a las presas no debe ser uniforme, sino adecuado a su importancia, al servicio que presta y, sobre todo, al riesgo potencial que resultaría de su eventual fallo”.

El Reglamento Español (art. 3.2), de acuerdo con la Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, distingue tres categorías a este respecto:

- Categoría A. Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o a servicios especiales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- Categoría B. Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- Categoría C. Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales de moderada importancia o sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las A o B.

2.2.5.5. Clasificación según su fundación

Según la Norma CP 58.133330.2012 de la Federación de Rusia (2012), una presa se clasifica de acuerdo a su altura y tipo de fundación; como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación de presas según la altura y tipo de fundación

Tipo de presa	**Tipo de material de fundación**	**Clasificación de la presa por su altura (m)**			
		I	**II**	**III**	**IV**
Presas de concreto y concreto armado	Roca	> 100	60 ≤ h ≤ 100	25 ≤ h ≤ 60	< 20
	Arena, cantos rodados y arcilla en estado denso y semidenso	> 50	25 ≤ h ≤ 50	10 ≤ h ≤ 25	< 10
	Arcilla saturada en estado plástico	> 25	20 ≤ h ≤ 25	10 ≤ h ≤ 20	< 10

Fuente: Norma CP 58.133330.2012 "Fundamentos Básicos de las Construcciones Hidrotécnicas" de la Federación de Rusia (2012).

Donde:

- Clase I: Presas de gran altura (muy altas), que requieren condiciones de fundación más resistentes y medidas especiales de seguridad.
- Clase II: Presas de altura intermedia–alta, con fundaciones de resistencia adecuada.
- Clase III: Presas de mediana altura, en fundaciones de resistencia moderada.
- Clase IV: Presas de pequeña altura, generalmente con menor complejidad estructural y fundaciones más limitadas.

2.2.6. Factores que gobiernan la selección del tipo de presa

La selección adecuada del tipo de presa es una decisión crucial en la planificación de proyectos hidráulicos de embalse. Diversos organismos internacionales (como ICOLD, SPANCOLD, ANCOLD, la WCD, el Banco Mundial, entre otros) coinciden en que se trata de un proceso complejo y multicriterio, donde intervienen factores técnicos, económicos, ambientales y sociales. No existe una "receta" única: cada emplazamiento y proyecto requiere evaluar un conjunto de condicionantes para elegir la tipología de presa óptima. A continuación, se profundiza en doce factores clave que condicionan dicha selección.

2.2.6.1. Topografía de la cerrada

La topografía es uno de los factores determinantes en la selección del tipo de presa, ya que influye directamente en la geometría de la boquilla, la longitud del eje y el volumen de materiales necesarios para la construcción. La configuración del valle condiciona la eficiencia hidráulica y la estabilidad de la obra, así como los costos asociados al movimiento de tierras y a las estructuras complementarias.

- Relación anchura/altura: Una relación pequeña (menor a 4) favorece el diseño de presas de arco, mientras que relaciones mayores son más apropiadas para presas de materiales sueltos.
- Pendientes de los estribos: Taludes pronunciados pueden inducir agrietamientos o asentamientos diferenciales, lo que exige mayor control geotécnico y puede condicionar el uso de presas CFRD (Concrete Face Rockfill Dam).
- Forma del valle:

- Valles estrechos en forma de V suelen ser favorables para presas de arco, ya que permiten aprovechar la resistencia de los estribos.
- Valles amplios o de sección irregular se adaptan mejor a presas de materiales sueltos (tierra o enrocado), dado que requieren mayores volúmenes de relleno, pero permiten una cimentación más flexible.
- En valles en forma de U, con taludes suaves, es común optar por presas de gravedad o zonificadas.

Figura 2.18 Distintos tipos de valle



Fuente: Adaptado de internet.

- Accesibilidad y transporte de materiales: La topografía condiciona la facilidad de construir caminos de acceso y de movilizar grandes volúmenes de material de relleno o concreto hacia el sitio de la presa.

2.2.6.2. Condiciones geológicas y geotécnicas

Las condiciones geológicas y geotécnicas del emplazamiento son determinantes en la selección del tipo de presa, pues influyen en la estabilidad de la cimentación, en la impermeabilidad del vaso y en la respuesta estructural frente a cargas hidráulicas y sísmicas. Una caracterización deficiente puede derivar en filtraciones excesivas, subsidencias o incluso fallas estructurales.

- Geología de la zona de cierre: La litología define la resistencia del macizo, la presencia de fracturas, fallas o diaclasas, y la permeabilidad de los materiales. Por ejemplo, formaciones de roca sana y poco fracturada resultan más favorables para presas de arco o gravedad, mientras que terrenos aluviales o altamente permeables suelen condicionar la elección hacia presas de materiales sueltos
- Capacidad portante del macizo rocoso y del suelo: La resistencia a compresión, la cohesión y el ángulo de fricción del terreno condicionan la capacidad de soportar el peso del cuerpo de presa. Macizos de alta resistencia permiten estructuras más esbeltas, mientras que suelos blandos requieren cimentaciones amplias o tratamientos de mejora (Martínez Ruiz, 2019).

Tabla 2.3 Clasificación del estado de la capacidad portante según el tipo de cimentación

Tipo de cimentación	Estado de la capacidad portante de la cimentación				
	Muy baja	**Baja**	**Media**	**Buena**	**Muy buena**
Roca	<1 MPa	1 a 2 MPa	2 a 4 MPa	4 a 7 MPa	> 7 MPa
Aluvión		< 200 KPa	200 a 600 KPa	> 600 KPa	
Grava		< 200 KPa	200 a 600 KPa	> 600 KPa	
Limo y arena fina		< 100 KPa	100 a 300 KPa	> 300 KPa	
Arcilla		< 75 KPa	75 a 150 KPa	150 a 300 KPa	300 a 600 KPa

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de la Tabla 2.3 muestra que los cimientos rocosos son los más adecuados, ya que alcanzan resistencias superiores a 7 MPa y permiten presas más seguras y esbeltas, con menor necesidad de tratamientos adicionales. En contraste, suelos como aluvión, grava, limo o arcilla presentan capacidades portantes menores, lo que incrementa el riesgo de asentamientos, filtraciones y subpresión, obligando a considerar refuerzos como inyecciones o drenes.

- Permeabilidad y filtraciones: La presencia de acuíferos, materiales porosos o discontinuidades puede generar problemas de filtración bajo la presa. En estos casos, es indispensable el uso de pantallas de inyecciones, núcleos impermeables o plintos de concreto, según el tipo de presa (ICOLD, 2011).
- Estabilidad de taludes y estribos: Las características geotécnicas de los estribos influyen en la seguridad global. Estribos inestables, con planos de falla activos, pueden requerir excavaciones profundas, refuerzos o incluso descartar el emplazamiento.

2.2.6.3. Disponibilidad de materiales de construcción

La disponibilidad de materiales de construcción en las proximidades del emplazamiento constituye un factor decisivo en la selección del tipo de presa y en la viabilidad económica del proyecto. El acceso a materiales como suelos, gravas, enrocamiento y agregados para concreto determina no solo los volúmenes de acarreo y los costos asociados, sino también la factibilidad técnica de ejecutar ciertas tipologías estructurales.

En términos generales, las presas de materiales sueltos requieren grandes cantidades de tierra y roca de características mecánicas apropiadas para conformar los núcleos impermeables, filtros, zonas de transición y enrocados de protección. La inexistencia de canteras o bancos de préstamo cercanos puede volver inviable esta alternativa debido a los elevados costos de transporte. De manera análoga, en presas de concreto, la disponibilidad de agregados (arena, grava y piedra triturada) en cantidades suficientes y con calidad adecuada es fundamental para garantizar la durabilidad y resistencia de las mezclas.

Por lo tanto, los estudios de materiales deben incluir investigaciones geológicas y geotécnicas orientadas a caracterizar la calidad, homogeneidad y volumen explotable de los depósitos cercanos, así como la logística para su extracción y transporte (USBR, 1987)

2.2.6.4. Vertederos y descargas (aliviaderos y desagües)

El dimensionamiento y la disposición de los vertederos y descargas constituyen factores que condicionan directamente la selección del tipo de presa, dado que garantizan la seguridad hidráulica frente a avenidas extraordinarias y la operación del embalse en condiciones de servicio. La capacidad de evacuar caudales de crecida sin comprometer la estabilidad estructural de la presa es uno de los requisitos básicos de diseño establecidos por ICOLD (2011) y la ANA (2016).

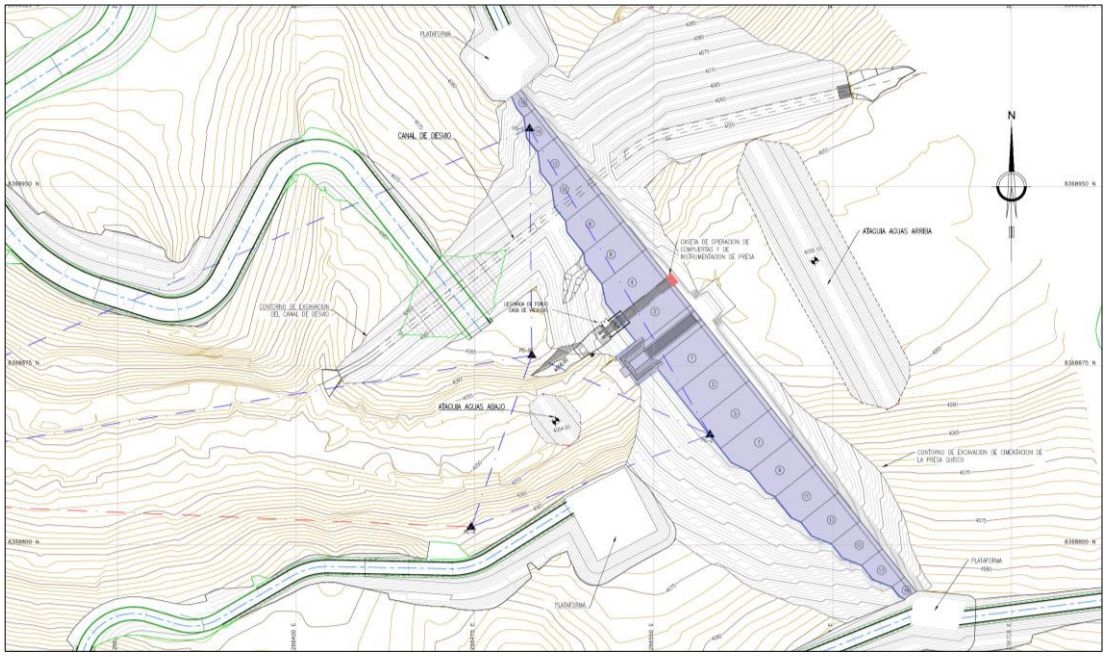
En presas de concreto de gravedad o de arco, es frecuente integrar el vertedero de demasías en la propia estructura, lo que simplifica la evacuación de avenidas y permite un mayor control hidráulico. Sin embargo, esta solución no siempre es viable en presas de materiales sueltos, donde la erosión podría comprometer el cuerpo de la presa; en estos casos, el vertedero debe proyectarse como una obra independiente, generalmente en roca firme en una de las márgenes (SPANCOLD, 2017).

Las descargas de fondo y de servicio también condicionan la tipología y ubicación de la presa. Estas estructuras permiten el control del nivel del embalse, la purga de sedimentos y la entrega de caudales para riego, abastecimiento o generación hidroeléctrica. Su diseño requiere cimentaciones estables y baja permeabilidad, lo cual favorece a presas de concreto que facilitan la incorporación de galerías internas. En

contraste, en presas de tierra o enrocado las descargas suelen construirse mediante túneles o conductos embebidos, lo que incrementa los desafíos técnicos y los costos (USBR, 1987; Martínez Ruiz, 2019).

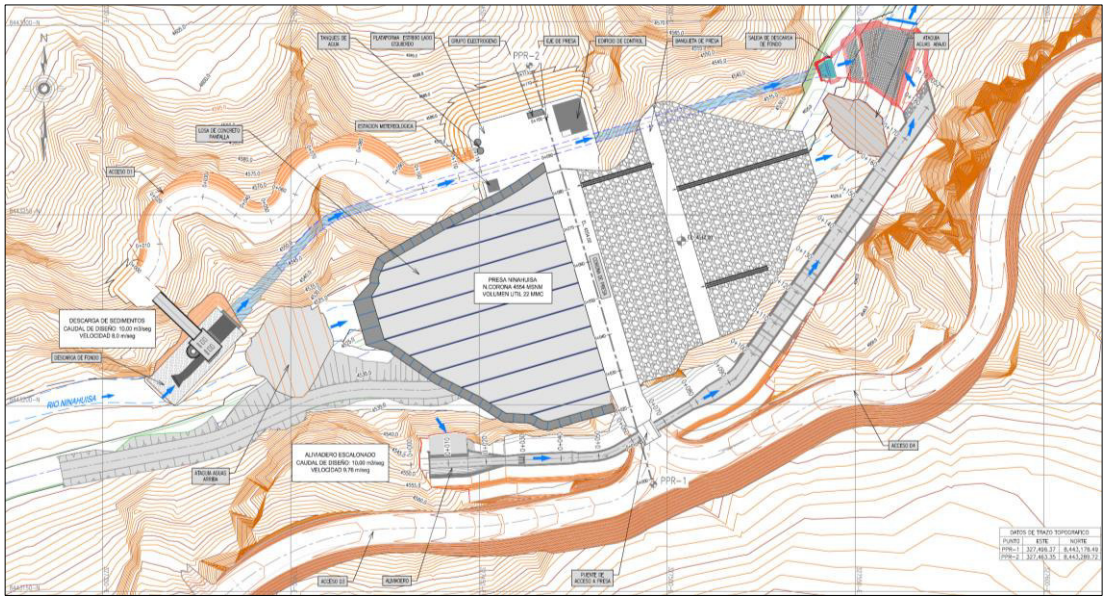
A continuación, se muestra un esquema hidráulico para una presa de concreto y una presa de materiales sueltos, donde se evidencia la ubicación de las obras conexas.

Figura 2.19 Esquema hidráulico de la presa Quisco – presa de gravedad de concreto



Fuente: SQA & ICC (2017).

Figura 2.20 Esquema hidráulico de la presa San Gabán – presa CRFD



Fuente: SQA & ICC (2023).

2.2.6.5. Sistema de desvío del río durante la construcción

El sistema de desvío del río constituye una de las obras temporales más críticas en la construcción de una presa, ya que permite conducir el caudal y mantener seco el área de fundación durante la etapa constructiva (USBR, 1987; ICOLD, 2016). La definición de este sistema está estrechamente ligada a la tipología de la presa, puesto que la magnitud del desvío, su complejidad y su costo pueden hacer más viable un tipo de presa frente a otro.

En presas de materiales sueltos (tierra o enrocado), que requieren grandes volúmenes de relleno y un tiempo constructivo prolongado, se hace necesario un sistema de desvío robusto, capaz de manejar caudales significativos durante varios años. En estos casos, los túneles de desvío o canales excavados en roca son la alternativa más empleada, complementados por atajías provisionales (Martínez Ruiz, 2019).

Por el contrario, en presas de concreto (gravedad, arco o RCC), cuyo plazo de construcción puede ser menor y que permiten levantar rápidamente estructuras de protección, el sistema de desvío puede dimensionarse de forma más compacta. En algunos casos, incluso se integra al diseño final de la presa, reutilizando el túnel como descarga de fondo o el canal como parte de un vertedero auxiliar.

En síntesis, el sistema de desvío condiciona tanto el cronograma como la seguridad constructiva, y su diseño puede inclinar la decisión hacia una tipología de presa más compatible con las restricciones hidráulicas y constructivas del sitio (ICOLD, 2016; USBR, 1987).

2.2.6.6. Clima y condiciones constructivas

El clima y las condiciones constructivas del emplazamiento son factores determinantes en la selección del tipo de presa, ya que inciden directamente en la viabilidad técnica, la seguridad durante la obra y los plazos de construcción. La precipitación, la temperatura, la ocurrencia de avenidas y las condiciones de accesibilidad influyen tanto en el diseño como en los métodos constructivos que pueden emplearse (USBR, 1987; ICOLD, 2016).

En zonas con clima húmedo y alta pluviosidad, las presas de materiales sueltos presentan mayores riesgos de saturación de los terraplenes y dificultades para garantizar una adecuada compactación, lo que obliga a implementar drenajes intensivos o, en algunos casos, a preferir presas de concreto. Por el contrario, en ambientes secos o áridos, las presas de tierra y enrocado son más convenientes, ya que permiten aprovechar los materiales locales sin mayores problemas de humedad.

La temperatura también condiciona el tipo de presa: en regiones con gradientes térmicos elevados, las presas de concreto pueden presentar riesgos de agrietamiento por retracción térmica, lo que requiere medidas especiales de control de temperatura (como el uso de presas RCC o CFRD en lugar de concreto convencional).

Otro aspecto clave es la ocurrencia de crecidas estacionales. En climas con fuertes avenidas durante la temporada de lluvias, la selección de un tipo de presa con menor tiempo de construcción (como RCC o arco de concreto) puede resultar más favorable que una presa de enrocado de gran volumen, que requiere periodos constructivos prolongados y sistemas de desvío más complejos (Martínez Ruiz, 2019).

En síntesis, el clima y las condiciones constructivas condicionan la tipología de presa en función de:

- La compatibilidad del material constructivo con la humedad y la temperatura del ambiente.
- La facilidad de ejecución frente a limitaciones de tiempo impuestas por avenidas o condiciones extremas.
- La seguridad estructural frente a fenómenos climáticos y ambientales propios de la región.

2.2.6.7. Seguridad: sismicidad y riesgo de sobrevertido

La seguridad constituye un criterio fundamental en la selección del tipo de presa, siendo la sismicidad del emplazamiento y el riesgo de sobrevertido dos de los factores más influyentes. Según ICOLD (2016) y USBR (1987), la falla de una presa asociada a estos fenómenos representa un riesgo elevado para la vida humana y las

infraestructuras aguas abajo, por lo que las decisiones de diseño deben priorizar márgenes de seguridad amplios.

En lo que respecta a la sismicidad, el comportamiento dinámico de las presas depende de su tipología:

- Una presa de concreto correctamente diseñada y cimentada en roca competente suele considerarse más segura sísmicamente que una presa de materiales sueltos, porque su rigidez y continuidad estructural permiten resistir cargas dinámicas intensas sin deformaciones significativas.
- Las presas de materiales sueltos tienen un desempeño aceptable en sismos, gracias a su ductilidad, pero presentan riesgos adicionales de asentamientos, agrietamientos y fallas por filtración, que deben ser cuidadosamente mitigados.

Por su parte, el riesgo de sobrevertido se asocia principalmente a la capacidad del aliviadero. El sobrevertido no controlado es una de las principales causas de fallas históricas en presas (WCD, 2000). En este sentido:

- Las presas de materiales sueltos son altamente vulnerables al sobrevertido, ya que la erosión rápida puede provocar la rotura del terraplén.
- Las presas de concreto (gravedad o arco) ofrecen mayor resistencia al paso de agua.

Figura 2.21 Rotura de la presa Teton en 1976 - EEUU



Fuente: IDAHO (2024)

2.2.6.8. Plazo y velocidad de construcción

El tiempo de construcción es un factor importante en la selección del tipo de presa, ya que condiciona la viabilidad económica y la oportunidad del proyecto. De acuerdo con ICOLD (2010), la elección de la tipología debe considerar no solo los aspectos técnicos de seguridad y estabilidad, sino también la rapidez con que la infraestructura puede ejecutarse para satisfacer las demandas de agua, energía o control de inundaciones.

- Las presas de concreto compactado con rodillo (RCC) destacan por su alta velocidad de construcción, ya que la colocación continua del material y la mínima necesidad de encofrados reducen sustancialmente el plazo de obra.
- Las presas de enrocado con cara de concreto (CRFD) también presentan una notable rapidez constructiva, debido al uso de enrocados colocados en grandes volúmenes y a que la pantalla de hormigón se ejecuta en paralelo con el terraplén.
- Las presas de materiales sueltos zonificadas tradicionales requieren más tiempo, porque dependen de la excavación, acarreo y compactación secuencial de diferentes tipos de materiales.
- Las presas de arco y de gravedad en concreto convencional suelen tener plazos mayores, por la necesidad de encofrados extensivos, control de juntas y vertido sucesivo de grandes volúmenes de hormigón.

2.2.6.9. Tecnología y experiencia disponible

La elección del tipo de presa no solo depende de las condiciones naturales del emplazamiento, sino también de la tecnología constructiva y la experiencia técnica disponible en el país o región. Según ICOLD (2016), la capacidad de una nación para ejecutar un tipo de presa específico está directamente relacionada con el desarrollo de su industria de la construcción, la disponibilidad de equipos especializados, y la existencia de mano de obra capacitada.

Las presas de tierra se construyen en capas compactadas mecánicamente con control de humedad; las de enrocado con cara de concreto (CFRD) emplean enrocado colocado en capas gruesas y una pantalla de hormigón en el paramento aguas arriba; las de concreto de gravedad y arco requieren grandes volúmenes de hormigón vertido

en bloques, encofrados y un estricto control de juntas y fisuración térmica; mientras que las presas de concreto compactado con rodillo (RCC) combinan la durabilidad del hormigón con la mecanización típica de las presas de materiales sueltos, al colocarse en capas extendidas y compactadas con rodillos, lo que reduce significativamente los plazos de ejecución.

Figura 2.22 Construcción de presas con hormigón compactado con rodillo



Fuente: Vietnam Construction (2020).

2.2.6.10. Costo total del proyecto

El costo total de un proyecto de presa constituye uno de los factores más influyentes en la selección de la tipología, ya que integra no solo la inversión inicial de construcción, sino también los gastos de operación, mantenimiento y mitigación socioambiental a lo largo de la vida útil de la obra (World Bank, 2014).

El análisis económico suele considerar la relación entre el volumen de almacenamiento y el volumen de obra, indicador que refleja la eficiencia hidráulica y financiera del emplazamiento. Tipologías como las presas de enrocado con cara de concreto (CFRD) y las presas de RCC suelen ser competitivas en términos de costo, al aprovechar materiales locales y reducir tiempos de ejecución. En contraste, las presas de arco y de gravedad en concreto convencional presentan mayores requerimientos de hormigón y encofrado, lo que eleva el costo unitario, aunque pueden ser más seguras en sitios con estribos rocosos de alta calidad (ICOLD, 2016).

2.2.6.11. Factores socioeconómicos y ambientales

Los factores socioeconómicos y ambientales desempeñan un papel decisivo en la selección del tipo de presa, ya que una decisión basada únicamente en criterios técnicos o económicos puede generar conflictos sociales o impactos ambientales irreversibles. Según la Comisión Mundial de Represas (WCD, 2000) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016), todo proyecto de presa debe evaluarse dentro de un marco de sostenibilidad integral, considerando los beneficios y los costos sociales y ambientales.

En el plano socioeconómico, la construcción de presas puede impulsar el desarrollo regional mediante la generación de empleo, el suministro de agua para riego y consumo humano, la regulación hídrica para seguridad alimentaria y la producción hidroeléctrica. No obstante, también puede implicar la reubicación de comunidades, la pérdida de tierras agrícolas y el cambio en las dinámicas productivas locales, lo que requiere procesos participativos y compensaciones adecuadas (World Bank, 2014).

En el aspecto ambiental, las presas modifican el régimen natural de los ríos, alteran ecosistemas acuáticos y terrestres, y pueden interrumpir la migración de especies. Asimismo, la inundación de valles genera pérdida de biodiversidad y emisiones de gases por descomposición de biomasa. Para mitigar estos impactos, se emplean medidas como pantallas de inyecciones, caudales ecológicos, pasos para peces y programas de reforestación, cuya complejidad y costo varían según la tipología de la presa y el sitio seleccionado (ICOLD, 2016; SPANCOLD, 2017).

2.2.6.12. Altura de la presa

La altura constituye un factor clave en la selección del tipo de presa, pues determina las solicitaciones hidrostáticas, la magnitud de las obras de cimentación y la tipología constructiva más adecuada. En presas bajas y medianas suelen adoptarse soluciones de materiales sueltos (homogéneas, zonificadas o con drenajes), mientras que en presas de gran altura se favorece el uso de tipologías de concreto (gravedad, arco o RCC), que ofrecen mayor seguridad estructural y control frente a cargas extremas. Según ICOLD (2016) y Martínez Ruiz (2019), esta relación entre altura y tipología es esencial para garantizar tanto la viabilidad técnica como la seguridad hidráulica del proyecto.

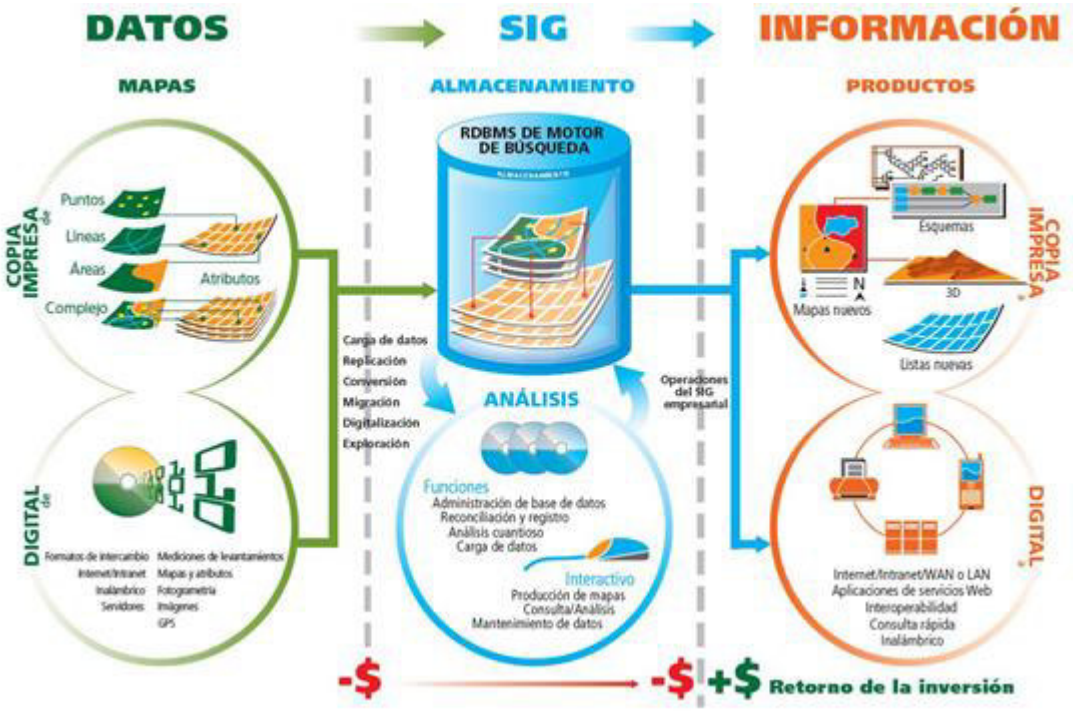
2.2.7. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta fundamental en los estudios de ingeniería y planificación, ya que permite integrar, analizar y representar información espacial vinculada al territorio. De acuerdo con el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) de Estados Unidos, un SIG se define como un "sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión" (Junta de Castilla y León, 2009, p.46).

En el contexto de proyectos hidráulicos y de infraestructura, los SIG resultan especialmente útiles para la selección de sitios de presas, al permitir integrar capas temáticas como topografía, geología, cobertura vegetal, red de drenaje y uso de suelo, posibilitando análisis multicriterio para la toma de decisiones técnicas y ambientales.

En la Figura 2.23 se muestran las principales partes que integran un Sistema de Información Geográfica (SIG), así como la relación entre ellas.

Figura 2.23 Partes de un Sistema de Información Geográfica



Fuente: Tomado de Anchelía y Mori (2020).

2.2.8. Análisis multicriterio en la toma de decisiones

La toma de decisiones complejas a menudo involucra múltiples criterios, a veces conflictivos entre sí. En este contexto, los métodos de decisión multicriterio (MCDM, Multi-Criteria Decision Making) se han convertido en herramientas fundamentales para apoyar al decisor en entornos complejos. Estos métodos permiten evaluar alternativas considerando simultáneamente diversos factores (tanto cuantitativos como cualitativos) y proporcionan un marco sistemático para elegir la opción más adecuada según las preferencias y objetivos establecidos. A continuación, se describen dos de las técnicas multicriterio más difundidas en ingeniería y ciencias aplicadas: el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el método TOPSIS; así como su integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la selección de sitios y evaluación de alternativas espaciales.

2.2.9. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

2.2.9.1. Concepto

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es un método de decisión multicriterio introducido por Thomas L. Saaty a finales de la década de 1970. Es una técnica ampliamente utilizada para enfrentar decisiones complejas, ayudando a los decisores a establecer prioridades y seleccionar la mejor alternativa con base en múltiples criterios. El AHP se basa en la descomposición jerárquica del problema y en comparaciones por pares entre los elementos de cada nivel de la jerarquía, mediante juicios expertos, para derivar escalas de prioridad o pesos relativos. En esencia, permite cuantificar valoraciones cualitativas convirtiendo las percepciones subjetivas en valores numéricos de importancia relativa. Esto se logra a través de una teoría de medición fundamentada en comparaciones por pares y en la obtención de vectores propios (autovalores) que producen ponderaciones consistentes para cada criterio y alternativa.

Una característica valiosa del AHP es que incorpora un mecanismo para verificar la consistencia de los juicios emitidos, calculando un índice y razón de consistencia basados en el valor propio principal de la matriz de comparación, lo que permite evaluar la coherencia de las preferencias y reducir la subjetividad arbitraria. Gracias a

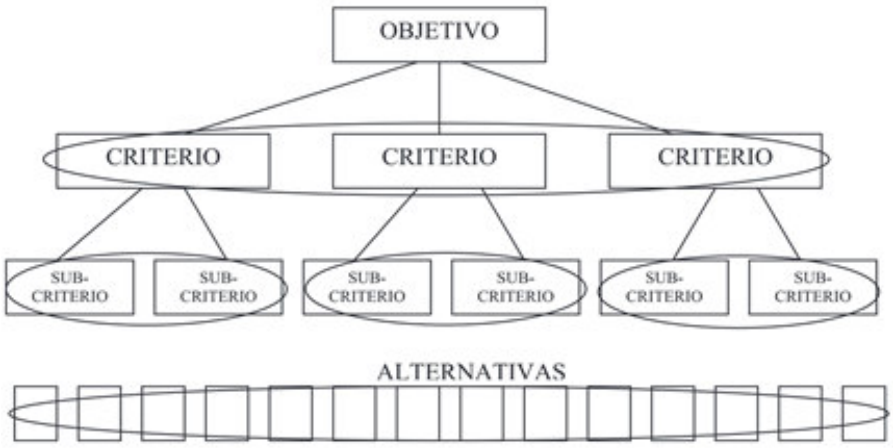
estas propiedades, el AHP se ha consolidado como una de las técnicas multicriterio más extendidas en la literatura para apoyo en la toma de decisiones.

2.2.9.2. Metodología:

La metodología del AHP típicamente comprende las siguientes etapas fundamentales:

1) *Estructuración jerárquica del problema*: Se modela el problema de decisión construyendo una estructura jerárquica de varios niveles. En la cúspide se define el objetivo general de la decisión. En niveles intermedios se disponen los criterios (y subcriterios, de ser necesarios) que influirán en la decisión, y en el nivel más bajo se sitúan las alternativas evaluadas. Esta descomposición "objetivo-criterios-alternativas" organiza el problema de forma lógica y facilita el análisis independiente de cada nivel. Ver figura 2.24.

Figura 2.24 Estructura de la jerarquía AHP



Fuente: Arquero (2009).

2) *Comparación por pares de los criterios con el objetivo*: Para calcular las ponderaciones de los distintos criterios, el método AHP crea una matriz de comparación por pares A (una matriz real m × m) de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{jk} & \dots & a_{jm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mk} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

donde ajk representa la importancia del j-ésimo criterio en relación con el k-ésimo criterio. El j-ésimo criterio es menos importante que el k-ésimo criterio siempre que ajk<1. Por el contrario, el j-ésimo criterio es más importante que el k-ésimo criterio si ajk>1. Siempre que dos criterios tengan la misma importancia, la entrada ajk es 1. La comparación por pares se basa en el asesoramiento de expertos a partir de preguntas sobre qué criterio es más importante con respecto al objetivo de la decisión, y la importancia relativa entre dos criterios se mide según una escala numérica de 1 a 9 generada por Saaty (1980); ver tabla 2.4.

En la matriz de comparación A, las columnas representan los pesos relativos de cada factor con respecto a los demás. Para determinar el factor de mayor preferencia, para un determinado criterio, los valores se normalizan dividiendo cada elemento de la columna k por la suma de todos los elementos de esa columna (ecuación (2)) y, a continuación, estimar un vector de ponderaciones $\vec{w} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]$. Este vector de pesos se obtiene promediando cada fila de la matriz normalizada (ecuación (3)) y su valor indica la importancia relativa de cada factor en un rango entre 0 y 1.

$$x_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{j=k}^{m} a_{jk}}$$

$$w_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{x_{jk}}{m}$$

Tabla 2.4 Escala de comparación de Saaty

Valor numérico	Escala verbal	Explicación
1	Igual	Los dos elementos contribuyen igualmente.
3	Moderado	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento sobre otro.
5	Fuerte	Un elemento está fuertemente favorecido.
7	Muy fuerte	Un elemento domina muy fuertemente sobre otro.
9	Extremos	La evidencia favorece al elemento considerado al más alto grado posible de afirmación.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usan para el compromiso entre dos juicios.
Inversos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	

Fuente: Arquero (2009)

3) *Comparación por pares de las alternativas con respecto a los criterios*: Las comparaciones por pares de las alternativas proporcionan la matriz S (una matriz real n × m), donde m es el número de criterios y n es el número de alternativas o emplazamientos.

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1j} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2j} & \dots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{i1} & s_{i2} & \dots & s_{ij} & \dots & s_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nj} & \dots & s_{nm} \end{bmatrix}$$

Donde sij representa el valor de la i-ésima alternativa con respecto al j-ésimo criterio, n es el número de alternativas, m es el número de criterios. Para construir la matriz S, primero se construye una matriz de comparación por pares para cada uno de los m criterios, denominada B(j), que es una matriz real n × n. Cada entrada b(j)ik, de la matriz B(j) representa la evaluación de la i-ésima alternativa en comparación con la k-ésima alternativa con respecto al j-ésimo criterio. Una vez construida la matriz B(j), se lleva a cabo el mismo procedimiento de dos pasos descrito para la matriz de comparación por pares A para el proceso de normalización. Por último, se construye la matriz S de comparaciones por pares de las alternativas.

4) *Cálculo de los vectores de prioridad*: Se crea un vector v de valores globales multiplicando S y w, donde S es la matriz de comparaciones por pares de las alternativas y w es el vector de pesos de los criterios.

$$v = Sx\ w$$

5) *Cálculo del ratio de consistencia (RC)*: En el enfoque AHP, las comparaciones por pares de una matriz de valoración se consideran adecuadamente coherentes si el RC correspondiente es inferior al 10%. Para calcular el coeficiente RC, se define un Índice de Consistencia (IC) que se calcula de la siguiente manera:

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

Donde λmax es el valor propio máximo de la matriz de comparación por pares.

Según el teorema de Saaty, para una matriz positiva dada A, el único vector positivo x y la única constante positiva c que satisfacen Ax = cx, es un vector x que es múltiplo positivo del vector de Perron (vector propio principal) de A, y la única c de este tipo es el valor de Perron (valor propio principal) de A. Saaty calcula λmax sumando las columnas de la matriz A y multiplicando el vector resultante por el vector x. El coeficiente RC se calcula dividiendo el valor IC por el índice de consistencia aleatoria (IA), como se indica en la Tabla 2.5.

$$RC = IC/IA \Rightarrow \begin{matrix} si\ RC\ < 10\%, los\ datos\ obtenidos\ son\ consistentes \\ si\ RC\ > 10\%, los\ datos\ obtenidos\ son\ inconsistentes \end{matrix}$$

Tabla 2.5 Valores de RCI para distintos valores de n

n	1	2	3	4	5	6	7	8
IA	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40
n	9	10	11	12	13	14	15	
IA	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

Fuente: Jozaghi (2018)

6) *Análisis de las puntuaciones AHP:* Si el modelo es coherente, se elegirá la mejor alternativa basándose en la matriz calculada en el paso 4.

2.2.9.3. Ventajas comparativas del AHP

- Entre los principales beneficios del AHP destaca su flexibilidad y estructura: al descomponer un problema complejo en una jerarquía, permite abordar decisiones de manera modular y comprensible, enfocando la atención en un criterio a la vez.
- Asimismo, el método combina información objetiva (datos cuantitativos) con juicios subjetivos de expertos, incorporando así factores intangibles difíciles de medir directamente.
- La traducción de percepciones en escalas de razón mediante el cálculo de autovectores proporciona una base matemáticamente sólida para las prioridades derivadas.
- Otra ventaja importante es la verificación de consistencia, ausente en muchos otros métodos multicriterio: el AHP cuantifica cuán coherentes son las comparaciones del decisor y alerta cuando se detectan contradicciones significativas (CR alto), fomentando una reflexión y refinamiento de los juicios

- Adicionalmente, el AHP es adaptable a decisiones grupales, permitiendo combinar las matrices de juicio de varios expertos (por ejemplo, mediante promedios geométricos) para obtener una evaluación consensuada.
- Su amplio uso en diversos campos ha generado disponibilidad de software y aplicaciones (e.g. Expert Choice, SuperDecisions, módulos AHP en SIG, etc.), facilitando su implementación práctica.

2.2.10. Técnica de Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS)

2.2.10.1. Concepto

El método TOPSIS (Técnica para el Ordenamiento de Preferencias según la Similaridad con la Solución Ideal) es otro enfoque clásico de decisión multicriterio, propuesto originalmente por C.L. Hwang y K. Yoon en 1981. A diferencia de AHP, que se basa en comparaciones pareadas, TOPSIS opera directamente sobre las evaluaciones de las alternativas en cada criterio, y su premisa fundamental es muy intuitiva: la mejor alternativa será aquella que esté más cerca de la "solución ideal" y más lejos de la "solución anti-ideal" dentro del conjunto considerado.

En términos prácticos, la solución ideal está compuesta por el mejor valor logrado en cada criterio (es decir, representa una alternativa hipotética óptima que dominaría en todos los criterios), mientras que la solución anti-ideal se conforma con los peores valores de cada criterio (alternativa hipotética más desfavorable). TOPSIS supone que cada criterio tiene la característica de monotonía (ya sea "cuanto más grande, mejor" para criterios de beneficio, o "cuanto más pequeño, mejor" para criterios de costo), facilitando así identificar el ideal y el anti-ideal a partir de los datos de las alternativas reales. El método busca entonces una solución de compromiso: la alternativa seleccionada será aquella que simultáneamente minimice su distancia a la solución ideal positiva y maximice su distancia a la solución ideal negativa. En otras palabras, TOPSIS elige la alternativa cuyo perfil de desempeño tiene la distancia Euclídea más corta respecto al punto ideal, y la más larga respecto al punto anti-ideal en el espacio de criterios.

Esta filosofía de decisión se alinea con la noción de que la opción más satisfactoria es aquella que equilibra todos los criterios de forma casi óptima, evitando grandes desviaciones en cualquiera de ellos. Por su énfasis en distancias a escenarios ideales, TOPSIS ofrece un criterio de selección claro y racional incluso cuando ninguna alternativa es óptima en todos los criterios (lo cual es común en decisiones reales). Cabe destacar que TOPSIS asume la independencia de los criterios (no solapamiento) y exige una normalización de las unidades, pero no requiere comparaciones pareadas, lo que puede simplificar su aplicación en problemas con gran número de alternativas.

2.2.10.2. Metodología

El procedimiento estándar de TOPSIS se desarrolla en una serie de pasos secuenciales, descritos a continuación:

1) *Determinación del peso de los criterios y construcción de la matriz de decisión*: El primer y principal paso del algoritmo TOPSIS es crear una matriz de decisión y determinar la ponderación de los criterios. En este paso, deben asignarse pesos relativos no sólo a cada criterio, sino también a sus valores cuantitativos y cualitativos en función de su importancia. Dado que la ponderación de los criterios es el paso principal del proceso de toma de decisiones, se requiere una gran precisión para determinar las ponderaciones de cada criterio y sus valores. Ver tabla 2.6.

Tabla 2.6 Matriz de decisión

	w_1	w_2	⋯	w_j	⋯	w_n
	C_1	C_2	⋯	C_j	⋯	C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	⋯	x_{1j}	⋯	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	⋯	x_{2j}	⋯	x_{2n}
⋯	⋯	⋯	⋯	⋯	⋯	⋯
A_i	x_{i1}	x_{i2}	⋯	x_{ij}	⋯	x_{in}
⋯	⋯	⋯	⋯	⋯	⋯	⋯
A_m	x_{m1}	x_{m2}	⋯	x_{mj}	⋯	x_{mn}

donde:

$\vec{w} = [w_1, w_1, \dots, w_n]$ es el vector de pesos relativos o prioridades asociadas a los criterios;

$\overrightarrow{x_j} = \begin{bmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \vdots \\ x_{4j} \end{bmatrix}$ es el vector de prioridades locales de las alternativas establecidas en función de los criterios Cj;

$\overrightarrow{x_i} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ es el vector de prioridad local asociado a la alternativa Ai, cuyos componentes son las prioridades locales asociadas a esta alternativa según cada uno de los criterios.

2) *Cálculo de la matriz de decisión normalizada*: Generalmente, en un problema MCDM hay atributos de beneficio y atributos de coste. Para transformar varias dimensiones de atributos en unidades adimensionales y facilitar las comparaciones entre atributos, se introducen varias ecuaciones normalizadas conocidas para normalizar cada valor de atributo xij en la matriz de decisión X=(xij)m×n.

El método TOPSIS evalúa la matriz de decisión obtenida en el paso anterior (Tabla 2.6), que se refiere a m alternativas Ai, i =1, 2, ..., m, que se valoran en función de n criterios Cj, j=1, ..., n. Donde xij denota la valoración de la alternativa ith en términos de jth criterios. Y donde $\vec{w} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]$. es el vector de pesos asociados a Cj.

A continuación, las dimensiones de los distintos criterios se convierten en criterios adimensionales. Un elemento $\overline{n_{ij}}$ de la matriz de decisión normalizada $N = \left[\overline{n_{ij}}\right]_{mxn}$ se calcula como:

$$\overline{n_{ij}} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(x_{ij})^2}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

3) *Cálculo de la matriz de decisión normalizada ponderada*: El valor normalizado ponderado $\overline{v_{ij}}$ de la matriz de decisión normalizada ponderada $V = \left[\overline{v_{ij}}\right]_{mxn}$ se calcula como:

$$\overline{v_{ij}} = w_j \otimes \overline{n_{ij}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

donde wj es tal que $1 \in \sum_{j=1}^{n} w_j$ es el peso del atributo o criterio jth.

4) *Determinación de las soluciones ideales positivas y de las soluciones ideales negativas*: La solución ideal positiva minimiza los criterios de coste y maximiza los criterios de beneficio; por el contrario, la solución ideal negativa maximiza los criterios de coste y minimiza los criterios de beneficio. El conjunto de valores ideales positivos $\bar{A}^+$ y el conjunto de valores ideales negativos $\bar{A}^-$ se determinan como:

$$\bar{A}^+ = \{\overline{v_1}^+, \dots, \overline{v_n}^+\} = \{(max_i \overline{v_{ij}}, j \in J)(min_i \overline{v_{ij}}, j \in J')\}; i = 1,2, \dots m$$

$$\bar{A}^- = \{\overline{v_1}^-, \dots, \overline{v_n}^-\} = \{(min_i \overline{v_{ij}}, j \in J)(max_i \overline{v_{ij}}, j \in J')\}; i = 1,2, \dots m$$

donde J está asociado a los criterios de beneficio y J′ a los criterios de coste.

5) *Determinación de las medidas de distancia entre las alternativas y soluciones ideales positivas y negativas*: En este paso, se calcula la separación de cada alternativa de la solución ideal positiva y de la solución ideal negativa y, a continuación, se crean dos capas SIG diferentes $\bar{A}^+$ y $\bar{A}^-$ resultados similares se encuentran en:

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva $\bar{A}^+$ viene dada como:

$$\overline{d_i}^+ = \left\{ \sum_{j=1}^{n} \left(\overline{v_{ij}} - \overline{v_{ij}}^+ \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} ; i = 1, \dots, m.$$

Y la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa $\bar{A}^-$ es la siguiente:

$$\overline{d_i}^- = \left\{ \sum_{j=1}^{n} \left(\overline{v_{ij}} - \overline{v_{ij}}^- \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} ; i = 1, \dots, m.$$

En este caso se utiliza la distancia euclidiana m-multidimensional.

6) *Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal positiva*: La proximidad relativa de $\overline{R_i}$ a la solución ideal puede expresarse del siguiente modo:

$$\overline{R_i} = \frac{\overline{d_i}^-}{\overline{d_i}^+ + \overline{d_i}^-} ; i = 1, \dots, m.$$

Cuanto más se acerque el valor de $\overline{R_i}$ a 1, mayor prioridad tendrá la alternativa ith.

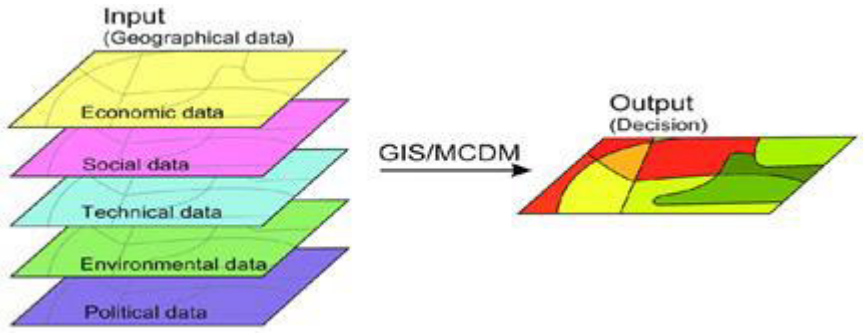
7) *Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal positiva*: En el último paso, se determinan los valores de la capa (la proximidad relativa a la solución ideal positiva) creada en el paso 5 para las alternativas seleccionados en función de los criterios. El conjunto de alternativas puede ordenarse ahora por orden descendente del valor de $\overline{R_i}$. Las mejores alternativas son los que tienen valores de $\overline{R_i}$ más altos y, como están más cerca de la solución ideal positiva, son preferibles y deben elegirse como en el caso de los resultados obtenidos.

2.2.11. Aplicaciones combinadas de SIG y análisis multicriterio

La integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con técnicas de análisis multicriterio (AMC) constituye una de las metodologías más robustas en la planificación territorial y la gestión de recursos hídricos. Los SIG permiten manejar información espacial compleja mediante la superposición de capas temáticas (pendiente, geología, drenaje, cobertura vegetal, uso del suelo, etc.), mientras que el análisis multicriterio aporta un marco estructurado para ponderar dichos criterios y evaluar alternativas de manera objetiva (Malczewski, 2006).

El enfoque SIG-AMC es ampliamente conocido como GIS-MCDA (Geographic Information System – Multi-Criteria Decision Analysis) y ha sido aplicado en campos como la ordenación del territorio, la selección de sitios para infraestructuras, la gestión de riesgos y la evaluación ambiental. En este esquema, los SIG permiten manejar múltiples capas de información georreferenciada (geología, topografía, hidrología, uso del suelo, accesibilidad, etc.), mientras que el análisis multicriterio pondera cada capa según su importancia relativa, facilitando la construcción de mapas de idoneidad espacial que identifican las áreas más favorables para el desarrollo de proyectos (Malczewski, 1999; Gómez-Delgado & Barredo, 2005).

Figura 2.25 Análisis espacial multicriterio



Fuente: Adaptado de Rikalovic (2014).

El principal aporte de este tipo de aplicaciones es que generan resultados visualizables en mapas, lo cual no solo facilita la comprensión de las decisiones por parte de técnicos y autoridades, sino que también mejora la transparencia y legitimidad del proceso de planificación. Además, permite realizar análisis de sensibilidad espacial, evaluando cómo la variación de los pesos o la incorporación de nuevos criterios impacta en la selección final de las zonas aptas (Malczewski, 2006).

2.3. Definición de términos

- **Presa**: Estructura hidráulica que almacena y regula agua en un cauce natural, compuesta por obras principales y conexas (Resolución Jefatural N.° 272-2018-ANA, 2018; ICOLD, 2011).
- **Embalse**: Acumulación de agua generada por la construcción de una presa, con volúmenes definidos como útil, muerto y total.
- **Aliviadero**: Obra hidráulica destinada a evacuar caudales excedentes y evitar el sobrevertido de la presa (SPANCOLD, 2010).
- **Toma de fondo**: Estructura ubicada en la base de la presa que permite la evacuación controlada de caudales o sedimentos.
- **Toma de servicio**: Conducción destinada a derivar agua para abastecimiento poblacional, riego u otros usos productivos.
- **Cuenca hidrográfica**: Unidad territorial delimitada por divisorias de agua, donde la precipitación converge hacia un único cauce principal (ANA, 2016).
- **Boquilla**: Estrechamiento natural del valle donde se emplaza una presa, clave para reducir longitud de eje y volumen de obra.
- **Corona de la presa**: Parte superior de la presa que define la cota máxima de almacenamiento y sirve de vía de acceso.
- **Cimentación**: Base sobre la que se apoya la presa, debe presentar capacidad portante y baja permeabilidad para garantizar la estabilidad estructural.
- **Plinto**: Losa de transición en presas CFRD que asegura la unión impermeable entre el cuerpo de enrocado y la pantalla de concreto.
- **Impermeabilización**: Conjunto de elementos como núcleos de arcilla, pantallas de concreto o inyecciones que reducen filtraciones en el cuerpo y cimentación.
- **CFRD (Concrete Face Rockfill Dam)**: Presa de enrocado con cara de concreto que asegura impermeabilidad aguas arriba y flexibilidad estructural (ICOLD, 2011).
- **RCC (Roller Compacted Concrete Dam)**: Presa de concreto compactado con rodillo, caracterizada por construcción mecanizada continua y rapidez de ejecución.

- **Presa de tierra zonificada**: Presa conformada por materiales sueltos (arcillas, limos, gravas) distribuidos en zonas con funciones específicas (USBR, 1987).
- **Sedimentos**: Material sólido arrastrado por el agua que puede depositarse en el embalse, reduciendo su vida útil.
- **NAMO (Nivel de Agua Máximo Ordinario)**: Nivel de operación habitual del embalse en condiciones normales.
- **NAME (Nivel de Agua Máximo Extraordinario)**: Cota máxima de almacenamiento durante eventos de avenida extraordinaria.
- **Bordo libre**: Diferencia de altura entre el nivel máximo del agua y la coronación de la presa, que garantiza seguridad hidráulica.
- **SIG (Sistema de Información Geográfica)**: Conjunto de hardware, software y procedimientos para almacenar, analizar y representar datos espaciales georreferenciados (Junta de Castilla y León, 2009).
- **AHP (Analytic Hierarchy Process)**: Método multicriterio desarrollado por Saaty (1980) para asignar pesos relativos a criterios mediante comparaciones por pares.
- **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**: Método multicriterio que ordena alternativas en función de su proximidad a la solución ideal positiva y alejamiento de la negativa (Hwang & Yoon, 1981).
- **Análisis multicriterio (AMC)**: Conjunto de técnicas que permiten tomar decisiones considerando simultáneamente múltiples factores cualitativos y cuantitativos (Malczewski, 2006).
- **Obras de desvío**: Túneles, galerías o canales provisionales que permiten conducir el río durante la construcción.
- **Instrumentación de presas**: Conjunto de dispositivos (piezómetros, inclinómetros, drenes) usados para monitorear el comportamiento estructural e hidráulico.

3. CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La aplicación de Análisis Multicriterio en proyectos hidráulicos permite la correcta selección del sitio y tipo de presa en la cuenca del río Lurín.

3.1.2. Hipótesis específicas

(1) La aplicación de Análisis Multicriterio mediante la integración con SIG, permite la construcción de un mapa de idoneidad para la ubicación de presas.

(2) La aplicación del método de análisis multicriterio (TOPSIS) permite identificar el mejor sitio para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín.

(3) La aplicación del método de análisis jerárquico (AHP) permite seleccionar la alternativa óptima de tipo de presa a construir en la cuenca del río Lurín.

3.2. Variables

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), "una variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse en un contexto determinado" (p.105). En esta investigación, se identifican las variables independientes y dependientes vinculadas al análisis multicriterio y a la selección del sitio y tipo de presa.

3.2.1. Variable independiente

- Análisis multicriterio

3.2.2. Variable dependiente

- Sitio de Presa
- Tipo de Presa

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 3.1 Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala
Sitio de presa	El sitio de emplazamiento es el lugar donde se construirá la presa, considerando una serie de factores que aseguren su viabilidad y funcionalidad.	Se va medir con los criterios de selección para el sitio óptimo de presa.	No adecuado Menos adecuado Moderado Adecuado Óptimo	Geología/Geotecnia Distancia a fallas Distancia a ríos Pendiente de terreno Capacidad almacenamiento Geometría de la boquilla Producción de sedimentos Cobert.vegetal/Uso suelos Factores socioambientales	Shapefile del INGEMET Shapefile del INGEMET Shapefile del INGEMET Modelo de elevación Digital Topografía del vaso Topografía cerrada Método Gravilovic Imagen Satelital Imagen Satelital	Adimensional Metros Metros ° (grados) MM3 Adimensional M3/año Adimensional Adimensional
Tipo de presa	Según Novak et al. (2001), los tipos de presas son amplios y su clasificación depende de múltiples factores, siendo los materiales de construcción uno de los criterios principales.	Se va medir con los criterios de selección para el tipo óptimo de presa.	Presa de tierra Presa de enrocado Presa CFRD Presa CCR Presa CC	Fundación Disponibilidad de materiales Obras conexas Seguridad Sistema de desvió Procedimiento constructivo Plazo de construcción Costo de obra	Estudios geotécnicos Estudio de canteras Costo/tiempo Factor de seguridad Costos/tiempo Factor de complejidad Tiempo Costo	Adimensional M3 Soles/días Adimensional Soles/días Adimensional Días Soles
Análisis multicriterio	Según Saaty (1980), el análisis multicriterio es un proceso estructurado que descompone un problema complejo en jerarquías de criterios y alternativas, facilitando comparaciones por pares para asignar prioridades en la toma de decisiones.	Se va medir con la aplicación de los métodos AHP Y TOPSIS integrado con el SIG.	Método AHP Método TOPSIS	Mapas de zonificación. Sitio y Tipo de presa óptimo	Procesamiento de datos a través de SIG, Excel y Expert Choice	¿Sitio y Tipo óptimo de presa? Si No

Tabla 3.2 Matriz de consistencia

Título: Aplicación de análisis multicriterio mediante sistema de información geográfica para la selección del sitio y tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Metodología
Problema general ¿En qué medida la aplicación de técnicas de análisis multicriterio, integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite una adecuada selección del sitio y tipo de presa en la cuenca del río Lurín? *Problemas específicos* (1) ¿De qué manera la aplicación del análisis multicriterio, integrado con Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite construir un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín? (2) ¿Cómo contribuye la aplicación del método TOPSIS a identificar el sitio más adecuado para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín? (3) ¿De qué manera el método de análisis jerárquico AHP permite seleccionar la alternativa óptima del tipo de presa a construir en la cuenca del río Lurín?	*Objetivo general* Determinar el sitio óptimo de emplazamiento y el tipo de presa más adecuado en la cuenca del río Lurín, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio integradas con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Objetivos específicos* (1) Generar un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín, mediante la integración de SIG y el método de análisis jerárquico AHP. (2) Identificar el sitio más adecuado para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín, aplicando la técnica de análisis multicriterio TOPSIS a los ejes previamente seleccionados. (3) Seleccionar la alternativa óptima de tipo de presa en la cuenca del río Lurín, mediante la aplicación de la técnica AHP.	*Hipótesis general* La aplicación de Análisis Multicriterio en proyectos hidráulicos, permite la correcta selección del sitio y tipo de presa en la cuenca del río Lurín. *Hipótesis especificas* (1) La aplicación de Análisis Multicriterio mediante la integración con SIG, nos permite la construcción de un mapa de idoneidad para la ubicación de presas. (2) La aplicación del método de análisis multicriterio (TOPSIS) permite identificar el mejor sitio para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín. (3) La aplicación del método de análisis jerárquico (AHP) permite seleccionar la alternativa óptima de tipo de presa a construir en la cuenca del río Lurín.	*Variable independiente* Análisis multicriterio - Método AHP - Método TOPSIS *Variables dependientes* Sitio de Presa Tipo de Presa	*Tipo de investigación:* Investigación aplicada *Diseño de investigación:* No experimental, de tipo transversal, explicativo. *Población:* 62 cuencas hidrográficas de la vertiente del pacífico. *Unidad de análisis:* Zonas potenciales de emplazamiento de presas dentro de la cuenca del río Lurín. *Muestra:* Cuenca hidrográfica del río Lurín. *Tipo de muestra:* No probabilística. *Método:* Análisis multicriterio a través de SIG. *Tratamiento de datos:* Software: ArcGIS, Expert Choice y Excel.

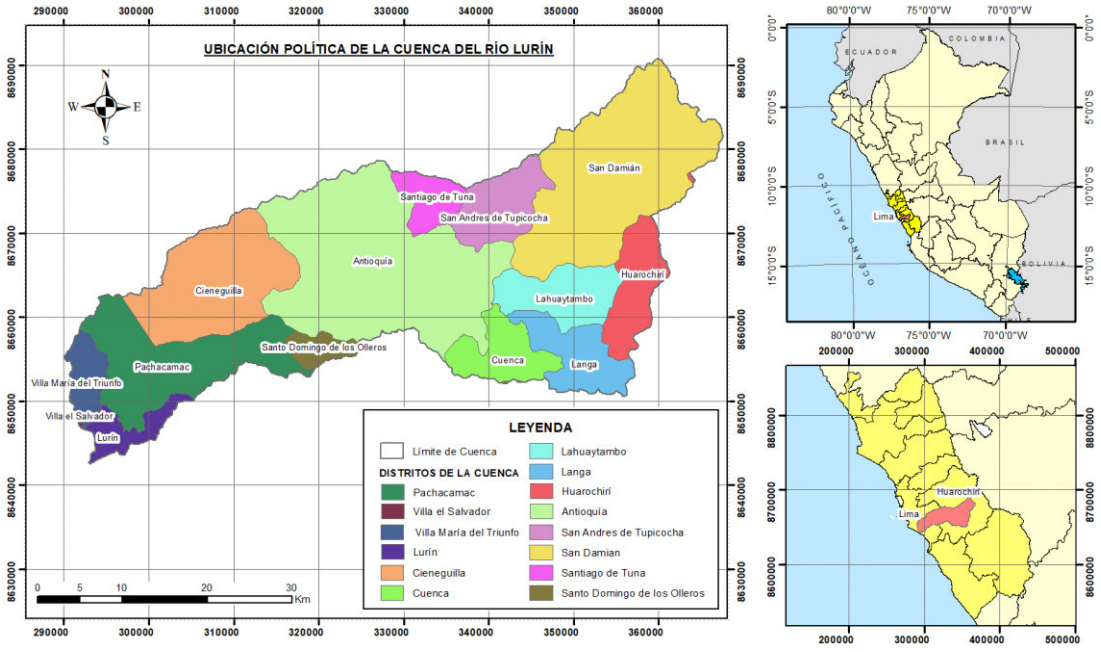
4. CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

4.1.1. Ubicación política, geográfica e hidrográfica

El área donde se desarrolla el estudio es la cuenca del río Lurín, la cual políticamente se encuentra ubicado en el departamento de Lima, en las jurisdicciones de las provincias de Lima (distritos de Cieneguilla, Lurín, Pachacamac, Villa María del Triunfo y Villa el Salvador) y Huarochirí (distritos de Antioquía, Cuenca, Lahuaytambo, Langa, San Andrés de Tupicocha, San Damián, Santiago de tuna, Huarochirí y Santo Domingo de Olleros). (figura 4.1).

Figura 4.1 Ubicación política del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Geográficamente se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera Occidental de los Andes, entre las coordenadas 76°56′ y 76°11′ longitud oeste y 11°15′ y 12°18′ latitud sur.

Hidrográficamente, la cuenca del río Lurín, según el manual de delimitación y codificación de unidades hidrográficas (ANA), se le asigna el código N° 1375534, y pertenece a la vertiente del Pacífico, limita por el norte con la cuenca del río Rímac; por el sur, con la intercuenca formada por la quebrada Cruz de Hueso, y la cuenca Chilca; por el este, con la cuenca del río Mala y por el oeste con el océano Pacífico.

La cuenca abarca una superficie de 1670 km2, de forma alargada y estrecha, con una longitud máxima de 80 km, en la dirección este - oeste; y una longitud máxima de 48 km, en la dirección norte – sur, aproximadamente.

4.1.2. Aspectos físicos - ambientales

- **Geomorfología**

  Geomorfológicamente, la cuenca del río Lurín muestra un contraste muy marcado entre sus zonas alta, media y baja. En la zona alta andina encontramos una morfología típica de paisajes glaciares, con profundos valles en "U", circos y depósitos morrénicos y fluvioglaciares que evidencian la intensa acción erosiva de los grandes glaciares cuaternarios. Estos rasgos van dando paso aguas abajo a un paisaje de estribaciones y crestas sumamente abruptas y disectadas pertenecientes al flanco occidental de la Cordillera de los Andes, donde la incisión de los cursos de agua ha labrado profundos cañones sobre las rocas intrusivas y volcánicas terciarias.

  En la zona media y baja predominan las planicies aluviales y conos deyectivos depositados por el río Lurín y sus tributarios sobre el piedemonte andino. Destacan los extensos conos de deyección de grandes dimensiones adosados a las estribaciones, algunos de los cuales han sido erosionados por el río Lurín dejando remanentes aislados o "cerros isla". El cauce mismo del río ha labrado amplias terrazas aluviales escalonadas y se encuentra confinado en un cañón hacia su desembocadura en el Océano Pacífico en el borde litoral costero.

- **Suelos**

  Cuenca baja

  Esta caracterizado por un proceso de urbanización intensiva como parte de la expansión urbana de ciudades como Lurín, Cieneguilla, Pachacamac, etc. Con múltiples usos como habitacional, industrial, comercial y de servicios. A lo largo del río principal, las ciudades interactúan constantemente y fusionan sus operaciones en un intenso proceso de desarrollo; esto es influenciado por dos factores: la carretera Panamericana, que sirve de eje integrador centro-sur y de corredor económico preponderante en el país; y la presencia de los valles costeros.

En esta parte de la cuenca hidrográfica se encuentran el grupo de suelos de llanuras marítimas y eólicas, junto con las estribaciones de la vertiente occidental de la cadena montañosa andina.

Cuenca media

La orografía accidentada del valle limita el crecimiento de las actividades en esta zona. En la cuenca media del río Lurín se desarrolla la agricultura y la ganadería a pequeña escala, sobre todo en las proximidades de carreteras y ríos.

En esta parte de la cuenca hidrográfica se encuentran regiones del tipo de suelo Leptosol Lítico y Dístrico con diversos afloramientos en la zona.

Cuenca alta

En las partes altas de la cuenca se desarrolla principalmente actividades agrícolas y pecuarias; así como también la actividad minera en pequeña escala.
En esta parte de la cuenca hidrográfica se encuentran regiones del tipo de suelo Regosol Dístrico con afloramiento Lítico, presentándose en las montañas de la cadena occidental de los andes.

- **Geología**

La cuenca del río Lurín se encuentra emplazada en una compleja configuración geológica resultado de los intensos procesos tectónicos y magmáticos que han ocurrido en la región desde el Cretácico hasta el Cuaternario reciente. Litológicamente, hay una extensa variedad de unidades que van desde rocas sedimentarias marinas del Cretácico como calizas, lutitas y areniscas, hasta potentes secuencias volcánicas del Terciario compuestas por derrames de lavas andesíticas, flujos piroclásticos, tobas e ignimbritas. Sin embargo, la unidad geológica predominante en el área de estudio es el batolito de la Costa, una enorme masa intrusiva compuesta por cuerpos plutónicos de composición tonalítica-diorítica que aflora ampliamente en ambas márgenes del río Lurín.

Desde el punto de vista estructural, la zona ha sido intensamente fracturada y fallada producto de los esfuerzos compresivos de la tectónica andina. Se observan sistemas de fallas longitudinales de rumbo andino, así como abundantes fallas transversales de movimiento lateral que han fragmentado las distintas unidades geológicas

presentes. Esta intrincada red de fallas y fracturamiento ha dado origen a la extensa red de drenaje tributaria al río Lurín.

La geodinámica externa juega un rol destacado debido a las condiciones semiáridas de la región, con años de fuertes precipitaciones seguidos por largos periodos de sequía. Esto favorece la erosión y el intenso intemperismo físico de las rocas volcánicas e intrusivas, generando grandes volúmenes de detritos que son movilizados por los huaycos y debris flows en los años lluviosos.

❖ **Clima y meteorología**

- Temperatura

  En la cuenca de estudio, las temperaturas medias más bajas se producen en el mes de julio, mientras que las más elevadas se registran en los meses de diciembre a abril, por lo general centradas en febrero.

  En el Cuadro N° 4.1, se aprecia la variación de la temperatura media anual en las estaciones climáticas, donde la zona más fría en la Unidad Hidrográfica del río Lurín, se encuentra en la estación Escomarca que registra una temperatura media anual de 9.1°C. Por el contrario, las regiones más cálidas en la Unidad Hidrográfica del río Lurín se encuentran en las zonas de las estaciones Antioquía, Vom Humboltd y Manchay Bajo con 19.9°C, 19. 8°C y 19.67°C respectivamente.

Tabla 4.1 Temperaturas medias mensuales (°C)

ESTACIÓN	ALTITUD (msnm)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
Antioquía	1839	20.6	20.7	20.3	19.8	19.3	18.7	18.9	19.7	20.2	20.6	20.5	20.1	19.9
Huarochirí	3154	11.3	11.2	11.2	11.4	11.4	10.8	11.0	11.4	12.0	12.0	11.8	11.7	11.4
Matucana	2479	15.6	15.4	15.4	15.6	15.6	15.3	15.2	15.4	15.9	15.9	15.8	15.6	15.6
Ñaña	543	19.1	20.3	20.2	19.1	15.4	14.9	14.3	13.9	15.4	15.9	16.7	16.9	16.8
Escomarca	3758	8.7	8.7	8.3	9.0	9.3	9.3	9.3	9.3	9.7	9.3	9.1	8.6	9.1
V. Humboldt	247	22.8	23.9	23.6	21.7	19.4	17.5	16.8	16.6	17.0	17.9	19.1	21.0	19.8
Pte. Manchay	148	22.7	23.5	23.2	21.6	19.3	17.6	16.7	16.5	16.8	18.0	19.3	21.1	19.7
Pantanos V.	4	22.3	22.9	22.5	20.7	19.2	17.9	17.2	17.1	17.2	17.9	19.2	20.6	19.6
MEDIA		17.9	18.3	18.1	17.4	16.1	15.3	14.9	15.0	15.5	15.9	16.4	17.0	16.5

Fuente: ANA/SENAMHI.

- Precipitación

  En general presenta precipitaciones mínimas en las partes bajas de la cuenca y máxima en las partes altas de la cuenca; así mismo presenta una variación temporal con mínimas precipitaciones en los meses de mayo – octubre y máximas en los meses de noviembre - abril. Dichas variaciones se pueden verificar en el Cuadro N° 4.2, las precipitaciones promedio mensuales.

Tabla 4.2 Precipitación total mensual histórica (mm).

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
San José	116.2	127.9	131.1	46.4	10.0	2.7	1.7	4.1	13.7	41.2	46.8	96.7	638.4
Escomarca	94.9	112.3	130.6	45.3	4.4	0.4	0.5	1.6	3.8	12.9	21.8	59.2	487.7
Huarochirí	88.1	110.5	118.0	30.9	3.7	0.4	0.1	0.5	2.7	13.0	18.4	49.5	435.7
Santiago Tuna	57.0	92.7	101.7	17.7	1.3	0.1	0.1	0.1	0.8	3.8	11.7	28.7	315.6
Langa	59.6	76.2	83.3	16.8	0.5	0.1	0.0	0.2	1.5	5.3	7.7	24.7	275.8
Matucana	56.5	69.7	77.8	20.3	1.8	0.2	0.0	0.9	2.1	8.9	12.5	47.9	306.6
Antioquía	14.3	27.3	26.4	2.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.9	7.0	14.3
Santa Eulalia	10.0	14.7	16.7	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.4	3.5	47.4
Ñaña	0.89	1.03	1.05	0.08	0.06	0.11	0.17	0.12	0.07	0.04	0.06	0.16	3.84
Chosica	6.90	9.70	8.63	2.08	0.15	0.00	0.02	0.01	0.12	0.11	0.29	1.60	29.62
Von Humboldt	1.67	1.15	1.14	2.14	1.13	5.48	2.18	2.34	1.97	1.57	0.80	10.68	32.25
Pte. Manchay	3.37	0.63	0.46	0.23	1.05	2.62	3.03	4.61	5.28	1.91	1.48	1.59	26.26

Fuente: ANA/SENAMHI.

- Evaporación

  Se tienen datos de la Estación Puente Manchay, en el que se tiene como promedio una evaporación anual de alrededor 750.0 mm., siendo mayor desde noviembre a mayo, en que el promedio mensual se ubica alrededor de 70.0 mm. y menor desde junio a octubre cuando el promedio mensual solo llega a 40.0 mm.

- Humedad relativa

  Para el estudio de este elemento meteorológico, se cuenta con información proveniente de la Estación Puente Manchay, ubicado en la parte baja de la cuenca, no se cuenta con información referente a la humedad relativa en la parte media y alta de la cuenca. Los promedios anuales de humedad relativa oscilan entre 81 a 84% H.R. para la costa, mientras que en sector de sierra dicho promedio se estima entre 65% H.R.

❖ **Hidrología**

El río Lurín al igual que la mayoría de los ríos de la costa, presenta un régimen de descargas irregulares y de carácter torrentoso con una diferencia bastante pronunciada entre sus valores extremos. La descarga media anual en la Estación Manchay durante el periodo de registro de enero 1938 – diciembre 2003 fue de 4.49 m3/s que representa un volumen medio anual de 139.64 MMC. Las variaciones estacionales del régimen de descargas del río Lurín son consecuencia directa del comportamiento de las precipitaciones que ocurren en su cuenca húmeda.

4.1.3. Aspectos socioeconómicos

❖ **Población – Demografía**

La población total de los 12 distritos ubicados dentro del ámbito de estudio de la cuenca hidrográfica del río Lurín, según el reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). En Tabla N° 3.5, se muestra la distribución por distritos, área y densidad de población por distritos. Considerando el Censo del año 2017 la población ascendía a 152 126 habitantes, con una tasa de crecimiento aproximado de 3% anual.

Tabla 4.3 Población total en la cuenca hidrográficas del río Lurín

REGIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	ALTITUD (msnm)	POBLACIÓN CENSO 2017	SUPERFICIE (km^2)	DENSIDAD POBLACIONAL (Hab/km^2)
LIMA	HUAROCHIRÍ	Antioquía	1,573	1,225	422.29	2.90
		Cuenca	3,073	449	67.94	6.61
		Huarochirí	3,866	4	75.12	0.05
		Lahuaytambo	3,362	616	81.93	7.52
		Langa	2,889	889	76.05	11.69
		San Andrés T.	3,321	1,276	75.86	16.82
		San Damián	3,252	1,202	332.96	3.61
		Santo Domingo O.	1,543	46	25.76	1.79
		Santiago de Tuna	2,913	358	40.53	8.83
		Cieneguilla	287	34,684	187.50	184.98
	LIMA	Lurín	21	1,306	39.43	33.12
		Pachacamac	68	110,071	179.23	614.13

Fuente: INEI 2017.

❖ **Caracterización Socio - Económica**

- Actividad agrícola

  La actividad agrícola es una de las actividades principales, en general esta se concentra en la parte baja, media y alta de la cuenca hidrográfica del río Lurín, bajo el tipo de riego por gravedad y presurizados.

Los principales cultivos instalados en la parte baja, media y alta de la cuenca obedecen principalmente al Plan de Cultivo Programado (PCP), que se elabora anualmente, los cultivos más representativos de acuerdo al PCP son los siguientes: maíz chala, frutales, manzana, membrillo, alfalfa, papa y entre otros.

- Actividad pecuaria

  La actividad pecuaria, se presenta en la parte alta de la cuenca y constituyen fuente de ocupación e ingreso para el productor alto andino, siendo las especies de mayor representatividad: ganado vacunos, ovinos, caprinos, porcinos, equinos, aves de corral y otros. La existencia de pastos naturales, cultivos de forrajes y pastos cultivados favorecen la crianza del ganado, siendo los vacunos de doble propósito (carne y leche), los ovinos para carne y porcinos (carne).

- Actividad minera

  No existen centros mineros importantes en la cuenca, excepto cuatro minas pequeñas ubicadas en el distrito de San Damián y otro en Lurín, en la cuenca alta, tampoco existen concentraciones de minerales.

- Actividad industrial

  Las actividades Industriales están ubicadas en su mayoría en la zona baja de la cuenca y emplean preferentemente aguas subterráneas. Se presentan tipo de industrias alimentarias, textiles y entre otros.

4.2. Tipo y diseño de investigación

4.2.1. Tipo de investigación

Ñaupas et al. (2018), afirma que la investigación aplicada "Es aquella que, basándose en los resultados de la investigación básica, pura o fundamental está orientada a resolver los problemas sociales de una comunidad, región o país, como los problemas de salud, contaminación ambiental […], entre otros" (p.136).

En relación con lo anterior, el estudio se consideró del tipo aplicado, ya que contribuirá a abordar la cuestión de la escasez de recursos metodológicos para determinar las ubicaciones y los tipos de presas adecuados mediante la aplicación del enfoque del análisis multicriterio.

4.2.2. Diseño de investigación

Según Sampieri et al. (2014), "El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de responder al planteamiento del problema". (p.128). En consecuencia, la presente investigación es de tipo no experimental, porque las variables objeto de estudio no se modificarán ni controlarán, solamente se hace una observación y recopilación de estas; asimismo se trata de una investigación de tipo transversal o transeccional porque recoge datos, describe variables y examina cómo se relacionan entre sí en un momento concreto; y por último, el diseño es explicativo porque explica cómo se aplica el método de análisis multicriterio para encontrar ubicaciones adecuadas para la construcción del tipo correcto de presa en la cuenca del río Lurín.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

"Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones" (Hernández et al., 2014, p.206). En otras palabras, vendría a ser el conjunto de elementos que poseen similares cualidades; por consiguiente, serán válidas las conclusiones de la investigación.

En este estudio, la población de estudio incluye las 62 cuencas hidrográficas/unidades hidrográficas de la vertiente del Pacífico.

4.3.2. Muestra

Sampieri et al. (2014), define la muestra como "un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población".

Para la presente investigación la muestra corresponde a la cuenca hidrográfica del río Lurín.

El tipo de muestra es no probabilístico, debido a que se llevó a cabo la selección de la muestra de manera intensional por la importancia del área de estudio.

4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1. Procedimiento

Para el desarrollo de esta investigación, se aplicará un procedimiento estructurado en las siguientes etapas:

1) Recolección de información secundaria: Se recopilarán datos geográficos, geológicos, hidrológicos y socioambientales a partir de fuentes institucionales oficiales como INGEMMET, ANA, IGP y CENEPRED. Esta información incluirá capas SIG (shapefiles), modelos de elevación digital (DEM), imágenes satelitales y bases de datos técnicas.
2) Análisis multicriterio AHP: Se aplicará la técnica del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para determinar la ponderación de los criterios de selección, mediante comparaciones por pares. Las matrices de juicio se construirán con base en literatura técnica y validación con expertos.
3) Procesamiento SIG: Se integrarán los criterios ponderados en un entorno GIS (ArcGIS) para generar un mapa de idoneidad del sitio de presa. Se emplearán herramientas como Weighted Overlay y análisis espacial multicriterio.
4) Evaluación TOPSIS: A los ejes preseleccionados en el mapa de idoneidad se les aplicará la técnica TOPSIS para identificar el eje más favorable, comparando las alternativas con base en su cercanía a la solución ideal y alejamiento de la solución negativa.
5) Selección del tipo de presa: Finalmente, se utilizará nuevamente el método AHP para seleccionar la tipología de presa más adecuada (tierra, enrocado, CCR, CFRD o concreto), considerando factores técnicos como materiales, costo, procedimiento constructivo, seguridad y obras conexas.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama metodológico de la investigación, el cual integra las etapas de recopilación de datos, elaboración de capas temáticas, modelación cartográfica, definición de criterios locales y aplicación de métodos multicriterio para la selección del sitio y tipo de presa. Este esquema permite visualizar de manera secuencial el proceso seguido, desde las fuentes de información hasta la obtención del tipo de presa óptimo.

4.4.2. Técnicas utilizadas

- Análisis documental (fuentes técnicas secundarias)
- Análisis multicriterio AHP
- Análisis de decisión multicriterio TOPSIS
- Análisis espacial con SIG

4.4.3. Instrumento de recolección y análisis

- Cuestionarios o matrices de comparación (AHP)
- Capas SIG (shapefiles)
- Imágenes satelitales (Sentinel-2, Landsat)
- Software: ArcGIS, Expert Choice, Excel

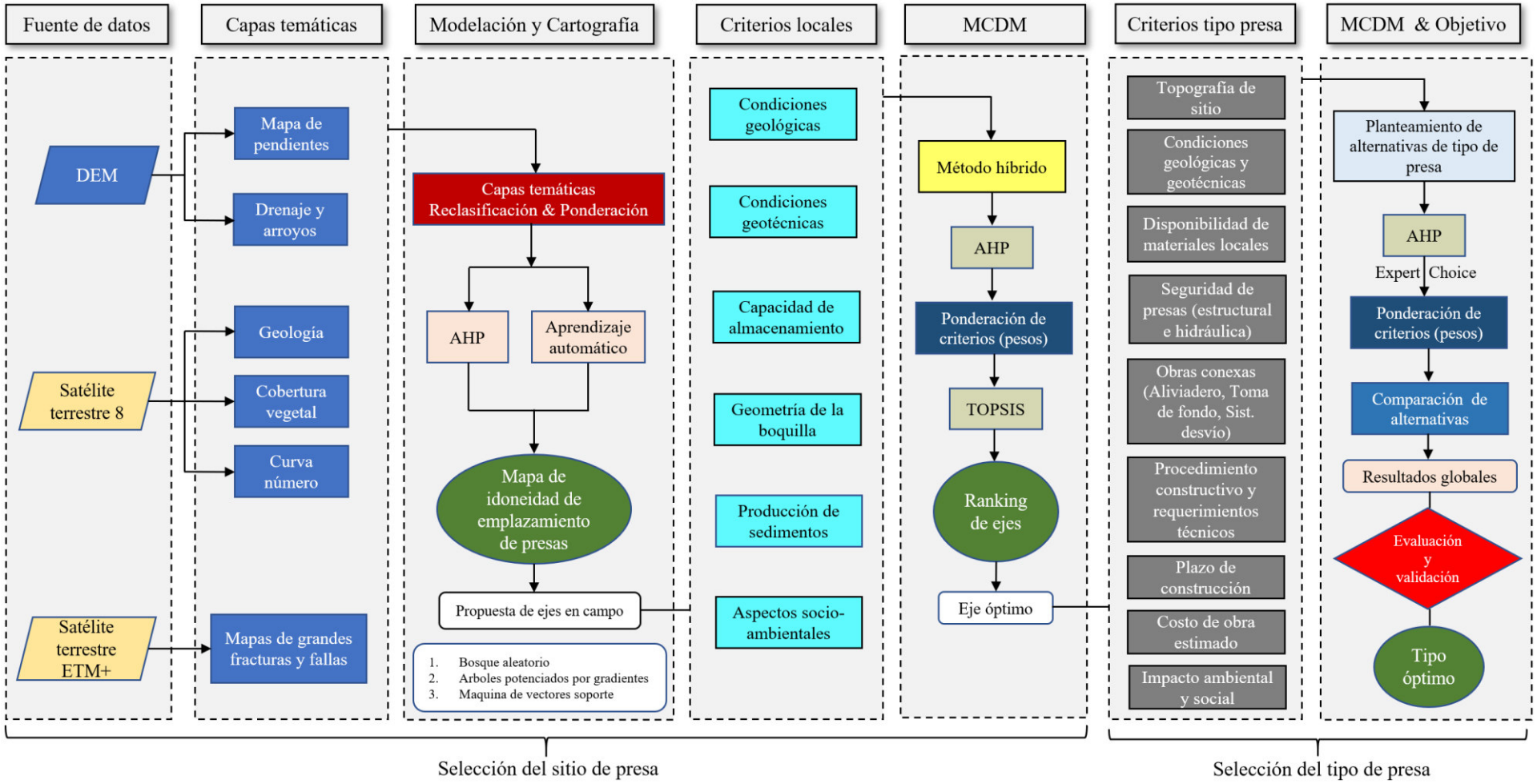
4.5. Análisis estadístico

En esta investigación no se aplicarán pruebas estadísticas inferenciales tradicionales, dado que no se pretende contrastar hipótesis poblacionales mediante muestreo probabilístico. En su lugar, se empleará un análisis cuantitativo de tipo determinístico y multicriterio, mediante los métodos AHP y TOPSIS.

El análisis estadístico se centrará en:

- Estadística descriptiva para la organización, tabulación y síntesis de los datos técnicos recolectados (matrices de evaluación, ponderaciones, rankings).
- Método AHP (Analytic Hierarchy Process), que permite obtener pesos relativos de los criterios a través de matrices de comparación por pares, las cuales serán procesadas en Excel o software Expert Choice 11.
- Método TOPSIS, que permite determinar la alternativa más cercana a la solución ideal mediante normalización vectorial y análisis de distancia relativa.

Figura 4.2 Diagrama metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia

5. CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. Generación del mapa de idoneidad para ubicación de presas

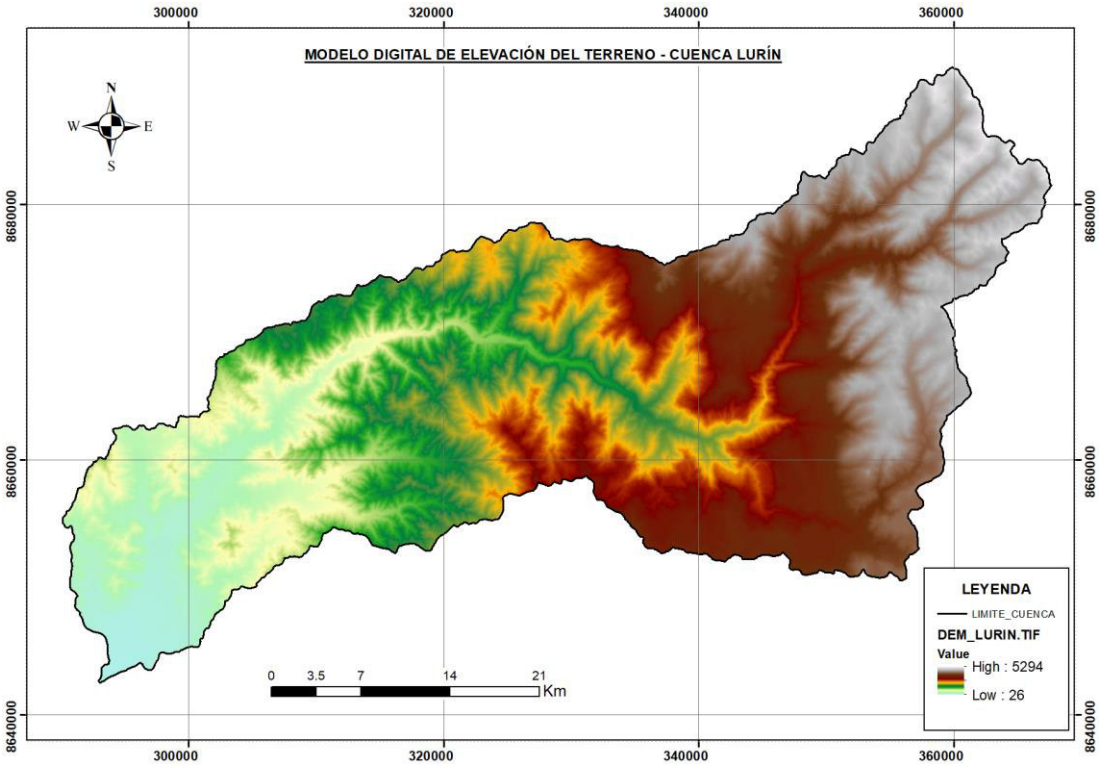
El primer objetivo de esta investigación es la generación de un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín; esto se llevará a cabo mediante la aplicación del SIG y análisis multicriterio.

5.1.1. Recopilación y preparación de datos

5.1.1.1. Modelo de elevación digital

Como modelo de elevación digital se usó un DEM de alta resolución (ALOS PALSAR DEM) del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), la cual fue descargada a través del portal Verter de la NASA. Este DEM nos determina la topografía del terreno y será el insumo principal para generar el mapa de pendientes en la cuenca. La resolución es de 12.5 m, y el formato usado es ráster (.tif), ver figura 5.1.

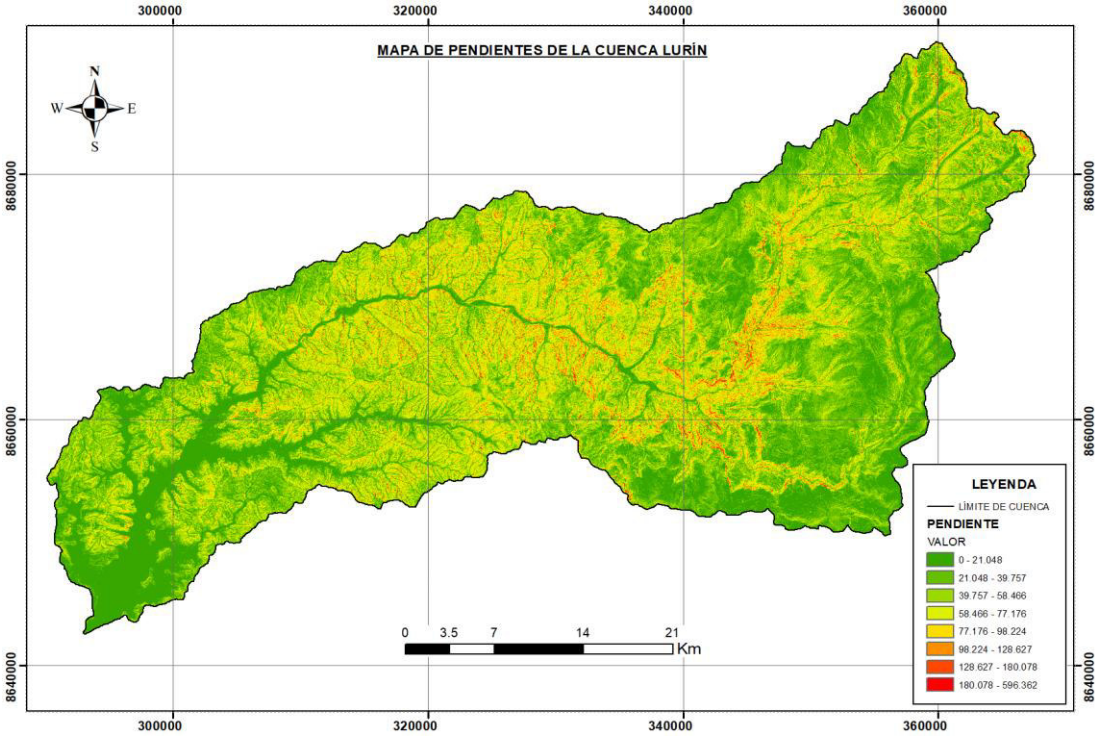
Figura 5.1 Modelo de elevación digital de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El modelo de elevación digital del terreno (DEM) se procesó para generar las pendientes en el área de estudio utilizando la herramienta Slope del programa ArcGIS, eligiendo como unidad de salida PERCENT_RICE; el cual nos muestra la pendiente en porcentaje divididos en valores de 8 rangos generados de manera automática. Ver figura 5.2.

Figura 5.2 Mapa de pendientes de la Cuenca del río Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2. Geología

De acuerdo con estudios geológicos previos (Ingemmet, 1992), en la cuenca afloran diversos tipos de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, cuya antigüedad abarca desde el periodo Jurásico hasta el Cuaternario.

Unidades Litoestratigráficas

Formación Arahuay (J – ar): Según Palacios et al. (1992), la Formación Arahuay corresponde a una secuencia de rocas ftaníticas con estratos volcánicos, calizas y lodolitas, aflorando únicamente en el cerro Chaymillán (borde occidental de la cuenca).

Grupo Puente Piedra (JsKi – pp): De acuerdo con Castro (1962), esta unidad aflora únicamente en la margen izquierda del río Lurín. Se trata de rocas de origen sedimentario que incluyen capas delgadas y de geometría lenticular compuestas por lutitas con aporte volcánico. Estas rocas, de textura fina y tonalidades asociadas a procesos de oxidación. El espesor aproximado de la secuencia alcanza los 290 m.

Grupo Morro Solar: Se encuentran las siguientes formaciones:

Formación Salto del Frayle (Ki – sf): Conformada por areniscas cuarzosas gris verdosas con intercalaciones de limolitas arenosas, el único afloramiento correspondiente a esta Formación se encuentra en la margen izquierda del río Lurín.

Formación Herradura (Ki – h): Esta unidad está constituida por rocas arcillosas y secuencias sedimentarias con limoarcillitas y areniscas de grano medio, intercaladas con lutitas fisibles y niveles calcáreos. La presencia de minerales evaporíticos como yeso y halita influye en su coloración y textura. Los afloramientos se presentan en capas delgadas que tienden a fracturarse en lajas. Su espesor aproximado es de 200 m.

Formación Marcavilca (Ki – mar): En esta unidad se reconoce una facies arenosa de unos 65 m, con tonos grises y estratificación irregular. Las rocas muestran mayor competencia, siendo compactas y de grano bien clasificado, además de presentar laminación inclinada característica. Predominan niveles de cuarcita gris clara con cemento silíceo. El espesor total de la formación varía entre 200 y 350 m.

Grupo Lima: Se distinguen las siguientes formaciones:

Formación Lurín (Ki – lu): Calizas micríticas grises separados por niveles de limolitas rojizas a verdosas con costras de yeso y sal interestratificadas; presenta un espesor de hasta 500 m y aflora en piso de valle.

Formación Pamplona (Ki – pa): Esta unidad aflora en el cerro Pamplona y está compuesta por una sucesión de materiales arcillosos y calcáreos. Incluye arcillas y limoarcillitas con tonalidades variadas y laminación fina, acompañadas por intercalaciones de caliza y margas. Se considera una unidad estratigráfica que continúa hacia las calizas de la Formación Atocongo. Su espesor varía entre 600 y 700 m.

Formación Atocongo (Ki – at): Está compuesta por calizas masivas bioclásticas y micríticas de tono gris claro, asociadas a niveles de skarn y a paquetes gruesos de areniscas. Se reconocen calizas recristalizadas y silicificadas con fenoblastos de cuarzo en zonas de contacto, vinculadas a una intrusión andesítica. Las calizas presentan fuerte deformación debido al plegamiento y a una fracturación con esquistosidad marcada, lo que les confiere un aspecto astilloso.

Grupo Casma: Conformada por las formaciones Chilca y Quilmaná:

Formación Chilca (Ki – chil): Los principales afloramientos se localizan entre Antapucro y Antioquía, a lo largo de ambas márgenes de la quebrada Lurín. La unidad está compuesta por tobas líticas y vítricas, intercaladas con brechas piroclásticas, además de lavas explosivas, lavas andesíticas y areniscas volcánicas bien estratificadas.

Formación Quilmaná (Kis – qui): Corresponde a derrames de lavas andesíticas masivas y con escasa estratificación, caracterizadas por textura porfírica con fenocristales de plagioclasa en matriz microcristalina. Incluye además tobas cristalolíticas muy fracturadas con fragmentos volcánicos y abundante plagioclasa parcialmente alterada a clorita (Palacios et al., 1992).

Grupo Rímac (P – r): Según Palacios et al. (1992), en el cuadrángulo de Lurín este grupo está representado por una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de predominio piroclástico, que muestran tonalidades rojizas a violáceas. En su base aparece una asociación volcano–sedimentaria compuesta por lavas y brechas andesíticas porfíricas muy fracturadas, lo que favorece la circulación subterránea y la oxidación vinculada a la presencia de pirita. También se observan tobas cristalinas de aspecto masivo con escasos fragmentos andesíticos. Hacia niveles intermedios se desarrolla una secuencia tobácea con aporte volcánico, areniscas limoníticas y niveles retrabajados. En la parte alta predomina una serie de tobas, seguida por areniscas feldespáticas con matriz tobácea y cuarzo. El espesor total estimado del grupo alcanza aproximadamente 1200 m.

Grupo Colqui: Designada a una gruesa secuencia de unidades volcánicas con derrames andesíticos que alternan en menor proporción con tufos finos redepositados.

Formación Millotingo (Nm – m): Presenta una distribución influenciada por pliegues y fallas con orientación NO–SE. Está compuesta por areniscas volcánicas con estructura brechoide y niveles de andesitas, intercaladas con capas conglomerádicas. Su espesor estimado varía entre 500 y 1000 m.

Formación Huarochirí (Nm – h): Está constituida principalmente por tobas riolíticas a riodacíticas, acompañadas por intercalaciones de areniscas y limolitas tobáceas, además de niveles aglomerádicos. También se reconocen horizontes de tobas pardas, andesitas tobáceas y triquiandesitas. Su espesor aproximado alcanza los 600 m.

Formación Pacococha (Np – p): Está compuesta por derrames volcánicos andesíticos y basálticos, además de domos, con intercalaciones de flujos de brecha volcánica y andesita tobácea. La unidad es cortada por cuerpos hipabisales jóvenes y engloba los domos y flujos andesíticos asociados al centro volcánico Cascasule.

Depósitos cuaternarios: En hidrogeología, la caracterización de los materiales recientes es fundamental, ya que en ellos ocurre gran parte de la interacción entre el suelo y el agua, tanto superficial como subterránea. La forma y composición de estos depósitos dependen de su posición dentro de la cuenca y de la distancia recorrida por los flujos que los originan. Se han identificado los siguientes depósitos recientes:

Depósitos Eólicos (Q – eo): Corresponden a acumulaciones de arena desarrolladas sobre superficies rocosas y en llanuras aluviales. En la cuenca se manifiestan como pequeñas dunas longitudinales y barjanes localizados en sectores puntuales.

Depósitos Aluviales: Se presentan como terrazas o superficies planas asociadas al cauce principal. Los depósitos del Pleistoceno (Qp–al) incluyen conglomerados, cantos y clastos polimícticos derivados de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias. También contienen gravas subangulosas, arenas de variada granulometría y, en menor proporción, limos y arcillas. Estos materiales forman parte del cono deyectivo de la cuenca.

Depósitos Glaciares (Q – gl): Corresponden a acumulaciones morrénicas ubicadas en las partes altas de los valles glaciares. Están formadas por fragmentos de rocas, en su mayoría volcánicas, junto con gravas angulosas parcialmente consolidadas.

Depósito Glaciar Fluvial (Q – glfl): Corresponde a material morrénico retrabajado a corta distancia por acción fluvial, donde el transporte del agua genera una selección parcial de clastos y de la matriz fina. Está compuesto por gravas y arenas con matriz limo–arenosa, junto con sedimentos aportados por los ríos provenientes de las vertientes altoandinas.

Depósitos Marinos (Q – ma): Compuestos principalmente por arenas de grano medio a fino con tonalidades gris amarillentas, acompañadas por limos no consolidados que incluyen fragmentos de conchas y cantos retrabajados. Se distribuyen a lo largo del litoral como resultado de la acción erosiva de las olas, la desintegración de los acantilados y la incorporación de sedimentos transportados por los ríos.

Depósitos Coluviales (Q – cl): Se acumulan principalmente al pie de laderas escarpadas, donde se reúnen materiales desprendidos de los cerros. Están formados por gravas y bloques subangulosos con una matriz arenosa y limosa de baja consolidación.

Rocas volcánicas y subvolcánicas

Andesitas: Afloran en pequeñas áreas dentro de las planicies costeras y en el sector occidental de la Cordillera Occidental. Se distinguen por su textura porfírica y corresponden a unidades de edad Cretácico superior (León et al., 2002).

Riodacitas: Estos depósitos se encuentran en la parte alta de la cuenca del río Lurín; sus afloramientos son de gran extensión.

Traquiandesitas: Según Salazar (1983) estas rocas pertenecen a la Formación Huarochirí. La dirección de los afloramientos es de NO-SE.

Rocas intrusivas

Súper Unidad Atocongo (Ks-bc/at-mgr): Presenta amplios afloramientos en los cerros Atocongo, Hierba Buena y Zorritos; limitada por la SU Patap hacia los flancos este, oeste y norte. Hacia el sur se relaciona con las formaciones Herradura y Atocongo. Su litología corresponde principalmente a monzogranitos y representa la unidad más antigua del sector, emplazada durante el final del Cretácico inferior.

Súper Unidad Patap (Ks-bc/pt-gb,di; Ks-bc/pt-di): Presenta afloramientos a lo largo de ambos lados de la carretera que conecta La Molina con Cieneguilla, siguiendo una tendencia NO–SE. En esta unidad se reconocen pequeños stocks gabródioríticos, compuestos principalmente por gabro dioritas y afloramientos menores de dioritas.

Súper Unidad Jecuan (Ks-bc/j-tn,gd): Se extiende ampliamente hacia el sureste, donde es atravesada por el sistema de fallas Conchao–Cocachacra, generando un fuerte fracturamiento. La tonalita de esta unidad pasa localmente a granodiorita debido a la incorporación de ortosas que cortan las plagioclasas. Además, intruye cuerpos de diorita xenolítica.

Súper Unidad Santa Rosa (Ks-bc/sr-tn,gd): Los afloramientos de esta unidad están conformados por tonalitas, tonalita–granodiorita y tonalita–diorita. A estas rocas se les asigna una edad comprendida entre el Cretácico superior y el Paleógeno.

Súper Unidad Tiabaya (Ks-bc/t-tn,di): Está formada por cuerpos intrusivos que cortan a la Súper Unidad Santa Rosa en la zona alta de la quebrada Tinajas, al este de Cieneguilla. Su litología incluye tonalita–diorita y tonalita–granodiorita, rocas que fueron emplazadas durante el Cretácico superior (Palacios et al., 1992).

Rocas ígneas menores

Monzonita-Granodiorita: Importantes intrusiones de monzonita y granodiorita afloran a lo largo de un lineamiento importante de dirección NE-SO dentro del dominio de la Cordillera Occidental.

Diorita (N-di): Los afloramientos de dioritas a manera de stocks en la cuenca del río Lurín se encuentran únicamente en el dominio morfoestructural de la Cordillera Occidental.

Tonalita (Ks-tn): El único afloramiento de tonalita se encuentra en piso de valle que colinda con los depósitos aluviales de la cuenca del río Lurín.

Granito (Ks-gr): Estos afloramientos son puntuales y se encuentran en la margen izquierda del río Lurín.

Tabla 5.1 Cuadro resumen de las Unidades Estratigráficas del área de estudio

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS		SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Depósitos eólicos		Q-eo	Arenas cuarzosas formando dunas y pampas amplias.
Depósitos coluviales		Qh-cl	Gravas y bloques subangulosos con matriz areniscosa y limosa.
Depósitos aluviales		Qh-al	Material grueso fluvial y abanicos aluviales, gravas subredondeadas en matriz arenosa con materiales finos, arenas con cantos rodados mal seleccionados.
Depósitos marinos		Q-ma	Arenas de grano medio a fino, conteniendo cuarzo, micas ferromagnesianas, limos inconsolidados y cantos retrabajados.
Depósito glaciar fluvial		Q-glfl	Gravas, arenas en matriz limoarenosa.
Depósitos glaciares		Qp-g	Bloques y gravas angulosas consolidadas; grava, limo y arcilla que conforman clastos de naturaleza volcánica.
Depósitos aluviales		Qp-al	Conglomerados, cantos, clastos de diferente tipo de roca (intrusiva, volcánicas, sedimentarias); gravas subangulosas, arenas con diferente granulometría y en menor proporción, limos y arcillas
Fm. Pacococha		Np-p	Derrames volcánicos andesíticos, basálticos y domos; con intercalaciones de flujo de brecha volcánica y andesita tobácea.
Grupo Colqui	Fm. Huarochirí	Nm-h	Flujos andesíticos intercalados con brechas andesíticas y tobas, con intercalaciones de areniscas, limolitas tobáceas y bancos de traquiandesitas; secuencias de rocas volcánicas y riodasitas, presencia de ignimbritas.
	Fm. Millotingo	Nm-mi	Rocas volcánicas, sucesión de derrames andesíticos (porfiríticas y riodacíticos); intercalaciones de areniscas rojas, lentes de calizas, tobas y lavas andesíticas.
Grupo Rímac		P-r	Lavas y brechas andesíticas porfiríticas con contenido de pirita; tobas de cristales rosáceas parduscas de aspecto masivo con pocos líticos de composición andesíticas; areniscas limoníticas, tobas de composición riolítica y dacítica; y areniscas feldespáticas con cuarzo y matriz tobácea.
Grupo Casma	Fm. Quilmana	Kis-qui	Derrames y lavas andesíticas masivas de textura porfirítica con fenos de plagioglasa en una matriz microcristalina, secuencia de tobas cristalolíticas muy fracturadas con fragmentos volcánicos; abundancia de plagioglasa que están alterándose a clorita con cierto grado de metamorfismo.
	Fm. Chilca	Ki-chil	Tobas, limolitas tobáceas abigarradas, brechas piroclásticas con intercalaciones de lavas andesíticas, areniscas volcánicas bien estratificadas, cortadas por numerosos diques andesíticos.
Grupo Lima	Fm. Atocongo	Ki-at	Calizas masivas bioclásticas y micritas en estratos de color gris claro; skarn gris afanítico; calizas metamorfizadas afaníticas y areniscas en paquetes gruesos. Calizas silificadas y margosas.
	Fm. Pamplona	Ki-pa	Formación arcillosa, limoarcillitas abigarradas finamente estratificadas con intercalaciones de calizas y margas.
	Fm. Lurín	Ki-lu	Calizas micríticas grises separadas por niveles de limolitas rojizas a verdosas con películas de yeso y sal interestratificadas.
Grupo Morro Solar	Fm. Marcavilca	Ki-mar	Areniscas cuarzosas de grano medio a fino, grises con estratos esporádicos de limolitas arenosas. Predomina la cuarcita con cemento silíceo.
	Fm. Herradura	Ki-h	Limoarcillitas con capas de areniscas de grano medio intercalados con lutitas fisibles y calizas gris oscuras hacia el tope.
	Fm. Salto del Frayle	Ki-sf	Areniscas cuarzosas bioturbadas con intercalaciones de limolitas arenosas
Grupo Puente Piedra		JsKi-pp	Horizontes lenticulares de lutitas tobáceas, blancas, muy fosilíferas, finamente estratificadas intercaladas con derrames volcánicos.
Fm. Arahuay		J-ar	Metavolcánicos con lodolitas calcáreas negras y calizas grises, andesita piroclástica y calizas margosas.

Fuente: INGEMMET-2021.

Tabla 5.2 Cuadro resumen de Rocas Sub-volcánicas

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
N-and	Andesita
N-rda	Riodasita (Hipab isal)
N-tand	Traquiandesita
Ks-aba	Andesita basáltica
Ki-and	Andesita (Hipabisal)

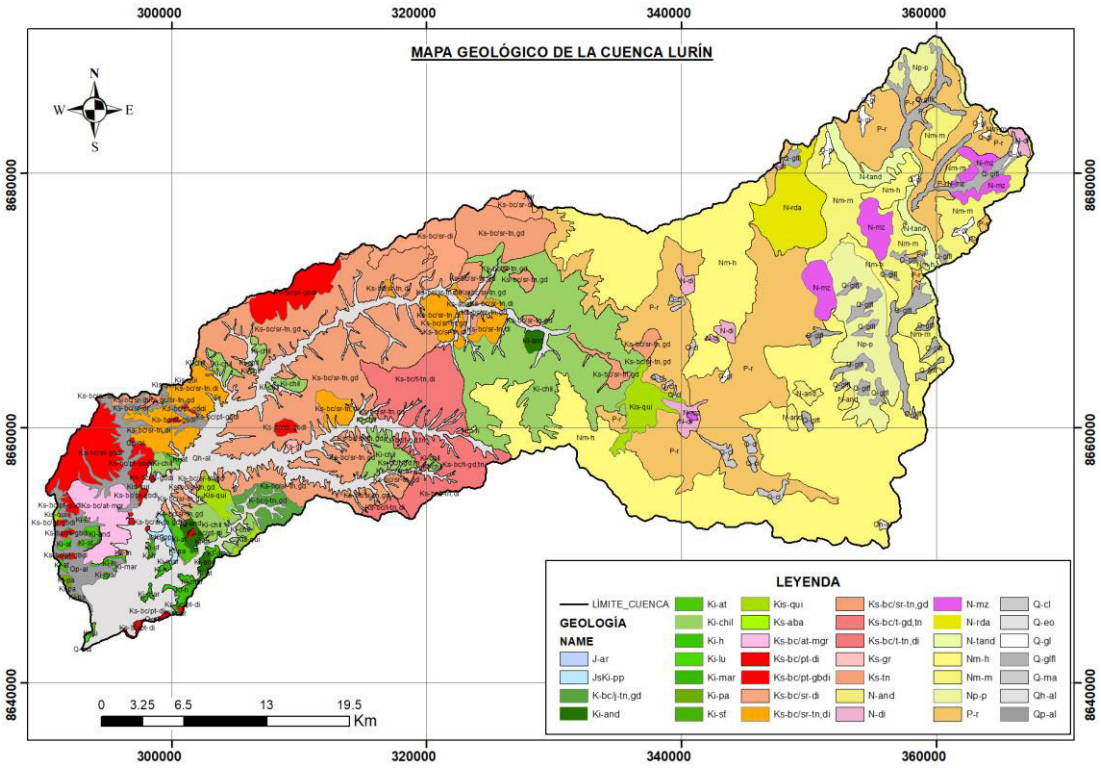
Fuente: INGEMMET-2021.

Tabla 5.3 Cuadro resumen de Rocas Intrusivas

SUPER UNIDAD	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	N-mz	Monzonita
	N-di	Diorita
	Ks-tn	Tonalita
	Ks-gr	Granito
S. U. Tiabaya	Ks-bc/t-tn,gd	Tonalita - Granodiorita
	Ks-bc/t-tn,di	Tonalita - Diorita
	Ks/bc/sr-di	Diorita
S. U. Santa Rosa	Ks-bc/sr-tn,di	Tonalita - Diorita
	Ks-bc/sr-tn,gd	Tonalita - Granodiorita
S. U. Atocongo	Ks-bc/at-mgr	Monzogranito
S. U. Jecuán	Ks-bc/j-tn,gd	Tonalita - Granodiorita
S. U. Patap	Ks-bc/pt-di	Diorita
	Ks-bc/pt-gd,di	Gabrodiorita

Fuente: INGEMMET-2021.

Figura 5.3 Mapa Geológico de la cuenca Lurín



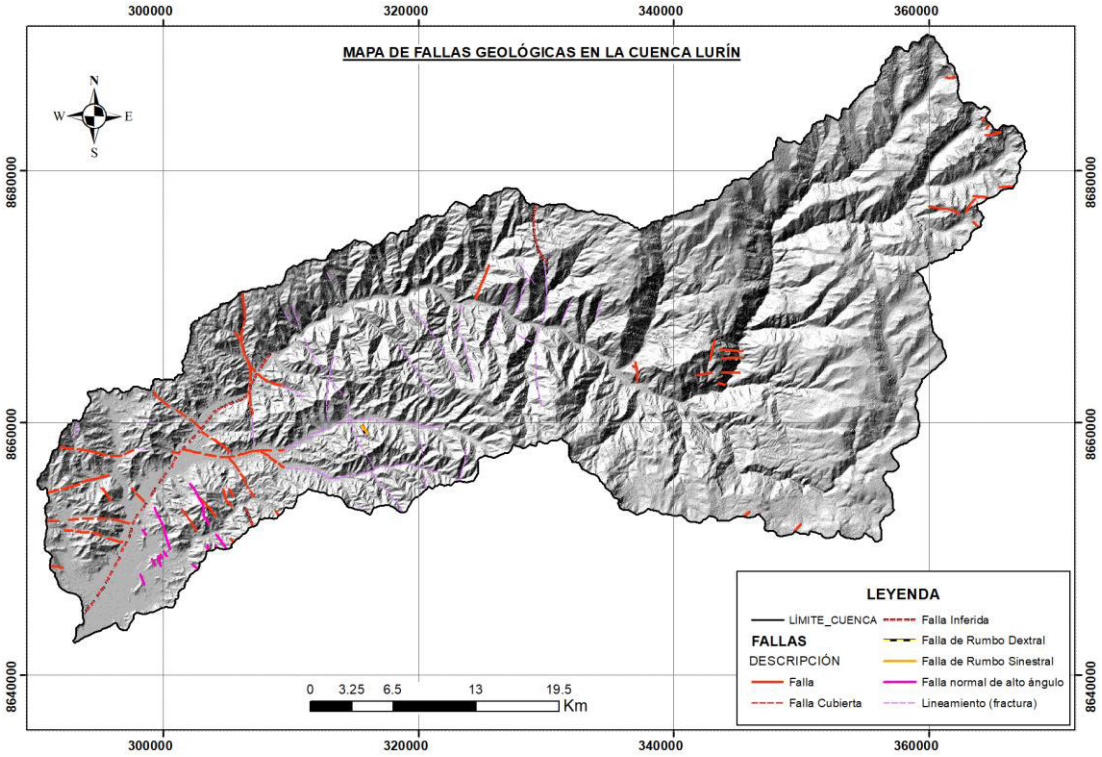
Fuente: Elaboración propia. Adaptado de INGEMMET, 2021.

5.1.1.3. Geología estructural

Pliegues: En la parte baja de la cuenca de Lurín, las rocas presentan evidencias de una intensa deformación, constituida por los anticlinales de lomas del Manzano – Manchay con una dirección NNE y SSO. Las rocas volcánicas presentan pliegues abiertos con flancos de buzamiento suaves (10º a 15º); destacan entre ellos pliegues del área de Langa, Mariatana y Alloca, con ejes orientados en la dirección NNO - SSE. En cambio, en el sector de la subcuenca Lurín Alto, se ha desarrollado pliegues angostos cuyos ejes están orientados al NNO – SSE con flancos con 30º – 40º de inclinación.

Fallas: Generalmente en la parte baja y media del valle es evidente un sistema de fallas longitudinales; la mayoría abarcan longitudes kilométricas. Estas estructuras mantienen una dirección NO–SE, tienen una posición subvertical y muestran movimientos inversos; localmente son conocidas como las Fallas San Fernando, El Manzano (NO–SE) y son subverticales. Este sistema de fallas longitudinales está vinculado con una fase de comprensión. En el tramo Cieneguilla - Chontay existen lineamientos estructurales con una orientación NO-SE, que probablemente controlan la dirección del río Lurín (figura 5.4).

Figura 5.4 Mapa de ubicación de fallas en la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de INGEMMET, 2021.

5.1.1.4. Cobertura vegetal

En esta investigación se utilizó como información base el mapa de Cobertura Vegetal Actualizado del Ministerio del Ambiente (MINAM), el cual corresponde al año 2015; descargado de la plataforma GEO GPS PERÚ, obtenido y clasificado en formato vectorial (.shp).

Debido a que, en estos últimos años los cambios demográficos en la zona han sido notable por el crecimiento y expansión del área urbana sobre todo en los distritos limeños; la zonificación de la Cobertura Vegetal ha sufrido un ligero cambio en cuanto al crecimiento en la zonificación de área urbana, para lo cual se ha realizado un reajuste al mapa del MINAM obteniendo una nueva distribución en la zonificación; este reajuste se ha realizado con el apoyo de imágenes satelitales los cuales permitieron obtener con mayor precisión la distribución real de la cobertura Vegetal en el área de estudio.

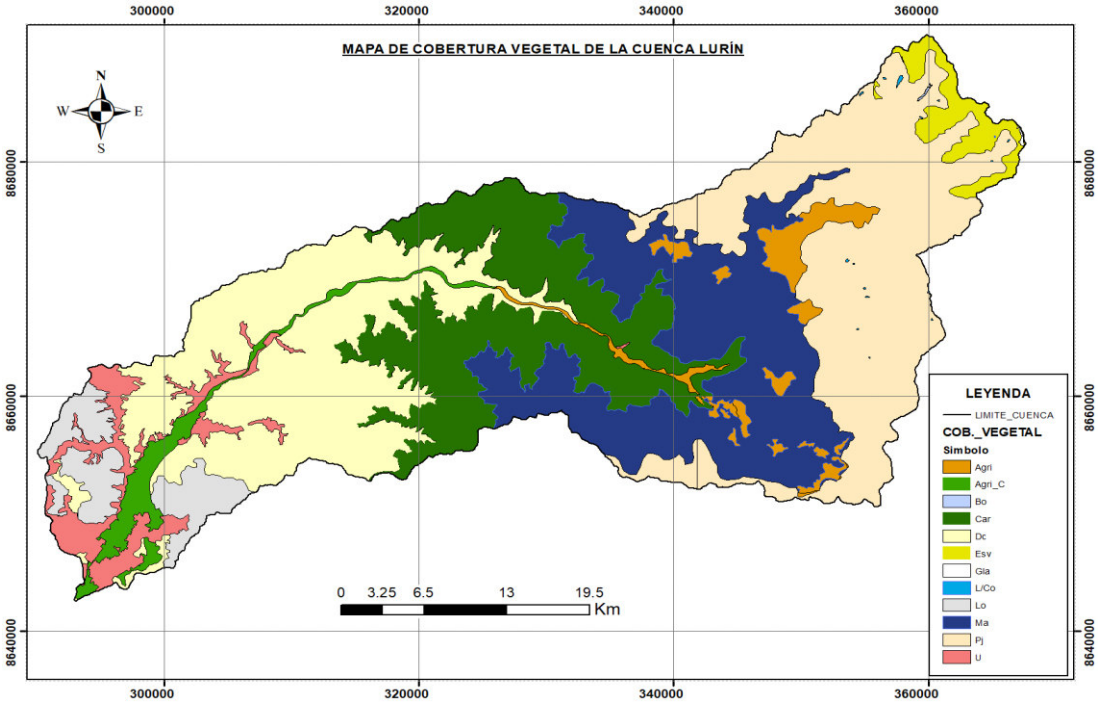
En la cuenca del río Lurín se pueden distinguir 12 tipo de cobertura vegetal, las cuales son: Agricultura costera (Agri_C), Agricultura andina (Agri), Desierto costero (Dc), Área urbana (U), Área altoandina con escasa y sin vegetación (Esv), Bofedal (Bo), Cardonal (Car), Glaciar (Gla), Laguna, lagos y cochas (L/Co), Loma (Lo), Matorral arbustivo (Ma) y Pajonal andino (Pj). En la Tabla N° 5.1, se presentan las características de cada una de ellas y en la Figura N° 5.4, se muestra la zonificación de las diferentes coberturas.

Tabla 5.4 Cobertura vegetal en la cuenca Lurín

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	SUPERFICIE	
		Km2	%
Agricultura costera	Agri_C	39.389	2.40
Agricultura andina	Agri	53.067	3.23
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Esv	39.506	2.41
Área urbana	U	67.772	4.13
Bofedal	Bo	0.251	0.02
Cardonal	Car	285.163	17.36
Desierto Costero	Dc	365.342	22.24
Glaciar	Gla	0.315	0.02
Lagunas, lagos y cochas	L/Co	0.582	0.04
Loma	Lo	72.800	4.43
Matorral arbustivo	Ma	324.291	19.74
Pajonal andino	Pj	394.050	23.99
TOTAL		**1,642.528**	**100.00**

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de MINAM, 2015.

Figura 5.5 Mapa de Cobertura vegetal de la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de MINAM, 2015.

5.1.1.5. Número de Curva

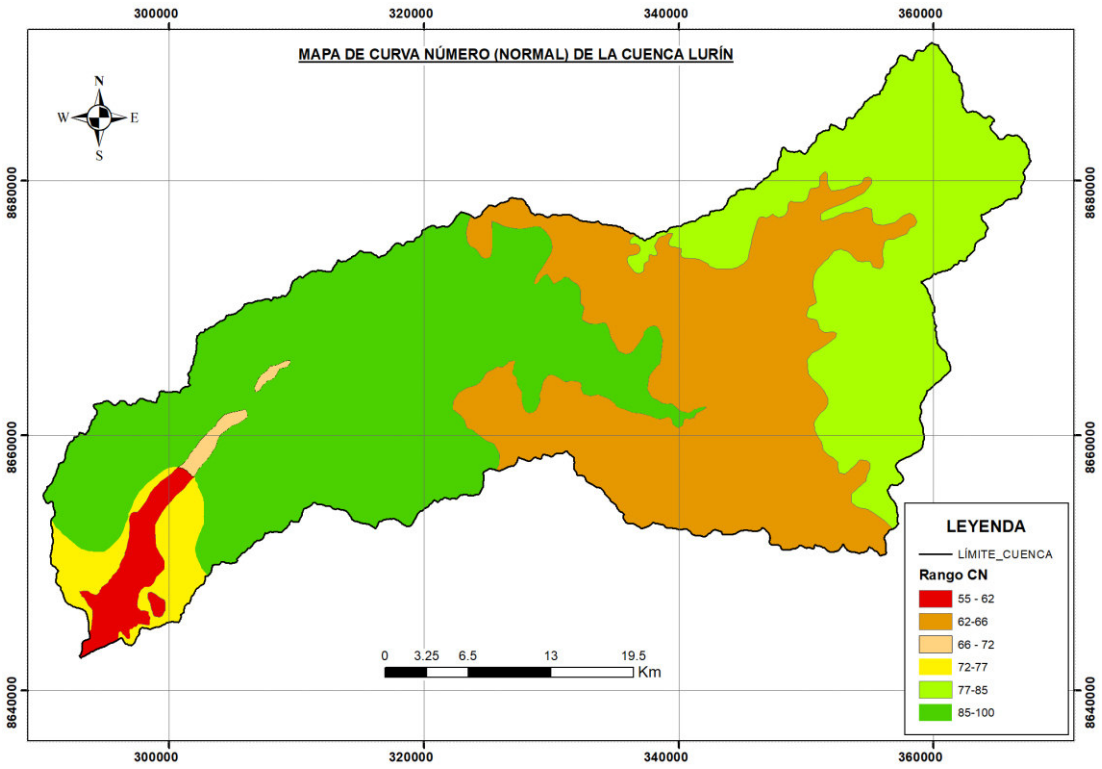
La escorrentía de una cuenca, es el agua que circula por la superficie del suelo o a través de él; es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida que llega a los causes superficiales.

Según el NRCS (2010): "El Número de Curva es un parámetro hidrológico que caracteriza el potencial de escorrentía de una cuenca, determinado por las características de uso del suelo y grupo hidrológico" (NRCS, 2010, pp. 1-3). Los valores del Número de Curva oscilan entre 0 y 100 en función de la capacidad de producir escorrentía superficial. Las condiciones con una permeabilidad muy alta están representadas por valores en torno a 0, mientras que las condiciones impermeables están representadas por valores cercanos a 100.

En la presente investigación, se utilizó la información de Autoridad Nacional del Agua (ANA); el cual, en un estudio del 2019 titulada "Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrológica Lurín", elaboran el mapa de Número de Curva en condiciones normales de la Cuenca Lurín.

En el mapa de Número de Curva de la cuenca Lurín, se observan valores de CN que van desde 55 a 100, clasificados en 6 rangos; se destaca la zona media y alta de la cuenca donde se presentan áreas de potencial de escorrentía altas (77-100). Ver figura 5.6.

Figura 5.6 Mapa de Número de Curva en la Cuenca Lurín



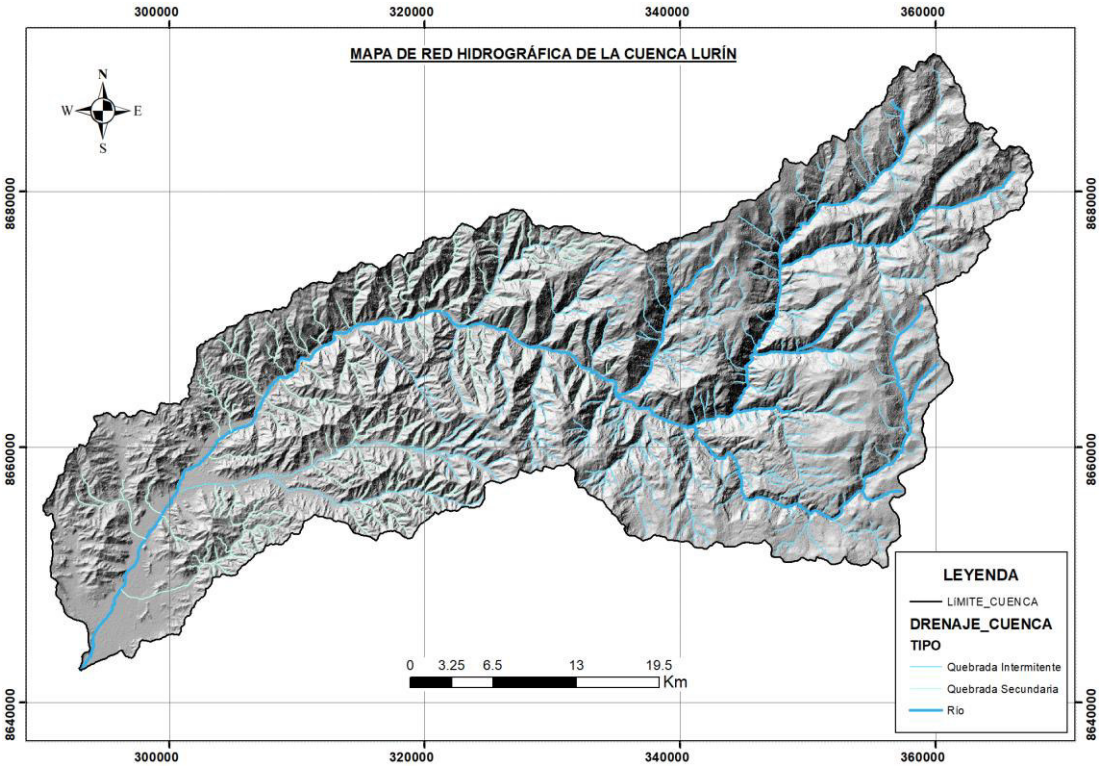
Fuente: Elaboración propia. Adaptado de ANA, 2019.

5.1.1.6. Red Hidrográfica

Dentro de la cuenca del río Lurín se pueden distinguir un sistema de redes de drenaje las cuales se clasifican según el flujo de agua a lo largo del año en: intermitente, en el cual el agua fluye en determinadas temporadas, existiendo periodos en el que el agua deja de fluir; efímero, aquellos donde el agua solo fluye en episodios de lluvia abundante; y permanente, en el que el agua fluye de manera habitual durante todo el año.

Para el caso del estudio, en la determinación de sitios potenciales de presas se considerará los flujos de agua permanente, en este caso los ríos.

Figura 5.7 Mapa de la Red Hidrográfica de la Cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Selección de criterios y reclasificación de datos

Tomando en cuenta la revisión bibliográfica, en las condiciones específicas de la cuenca Lurín y en la disponibilidad de datos, se eligen para este estudio 6 criterios considerados como factores principales: Condiciones topográficas (pendiente), geología, cobertura vegetal, curva número, distancia a los ríos y distancia a fallas.

Para aplicar la herramienta de superposición del ArcGIS, con el objetivo de determinar el mapa de idoneidad de sitios de presas, son necesarios los archivos de entrada en formato ráster. En principio, un gran porcentaje de los ficheros adquiridos de los geoservidores fueron vectoriales (shapefile) a excepción del ráster DEM, los cuales necesariamente tienen que ser rasterizados utilizando un tamaño de celda de 15 por 15 metros.

A continuación, los conjuntos de datos derivados se reclasificaron en 5 clases diferentes de 1 a 5: 1 como Inadecuado, 2 como Poco adecuado, 3 como Aceptable, 4 como Adecuado y 5 como Óptimo.

5.1.2.1. Pendiente

La pendiente es uno de los factores muy importantes para la ubicación de presas, ya que ejerce un control dominante sobre el encaminamiento del flujo de agua a través de la cuenca; siendo los terrenos suaves más adecuados para la construcción de presas que las pendientes pronunciadas. Buraihi (2015) afirma que "a medida que aumenta la pendiente, también lo hace el riesgo de desprendimientos y la presión sobre los cimientos" (p. 76). Ruzouq (2019) llegó a la conclusión de que "la velocidad del agua es proporcional a la pendiente, y que una pendiente inferior al 15% tiene un efecto positivo en la conservación del suelo y el agua en los embalses" (p. 11).

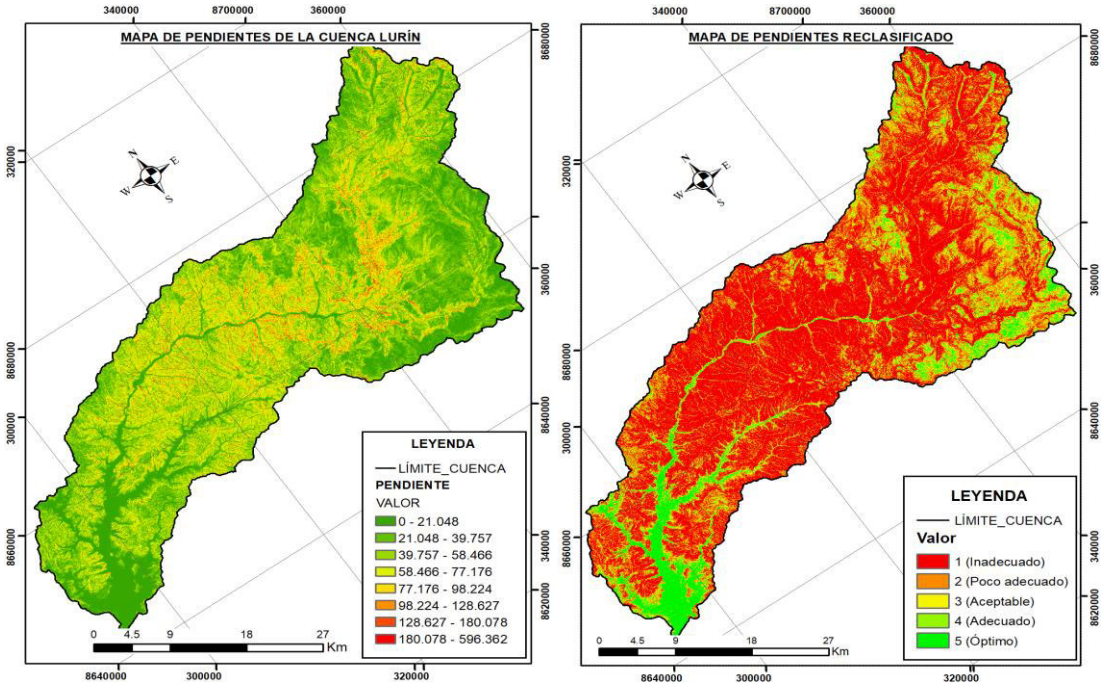
Los criterios de reclasificación de la Pendiente se muestran en la Tabla 5.5; y el mapa ráster de reclasificación de la cuenca Lurín se muestra en la Figura 5.8.

Tabla 5.5 Reclasificación del criterio Pendiente

Pendiente (%)		Valoración	Definición
0	9	5	Óptimo
9.1	16	4	Adecuado
16.1	25	3	Aceptable
25.1	40	2	Poco adecuado
40.1	a más	1	Inadecuado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.8 Mapa de reclasificación de Pendientes de la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2. Geología

Las condiciones geológicas del emplazamiento de la presa son críticas y afectan directamente a la seguridad y estabilidad del proyecto. La base geológica del emplazamiento también afecta al tipo de presa y a los materiales de construcción de la presa. El emplazamiento debe tener una geología impermeable, cimientos competentes y ausencia de filtraciones.

Tomando en cuenta los factores de permeabilidad y porosidad, el INGEMMET realizó una caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas de la cuenca Lurín; este dato sirvió de apoyo para elaborar una reclasificación más precisa de las estratificaciones geológicas en la cuenca del río Lurín. En el siguiente cuadro 5.6 se muestra la caracterización hidrogeológica de la cuenca.

Tabla 5.6 Caracterización Hidrogeológica de la cuenca Lurín

CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA			**DESCRIPCIÓN**
ACUÍFERO	BOFEDALES		Humedad permanente
	POROSO CONSOLIDADO	Eólico	Formaciones detríticas permeables generalmente no consolidadas
		Coluvial	
		Aluvial holocénico	
		Marino	
		Fluvio glaciar	
		Glaciar	
		Aluvial pleistocénico	
	FISURADO VOLCÁNICO	Pacococha	Formaciones permeables fisuradas en rocas volcánicas y volcánico sedimentarias
	FISURADO VOLCÁNICO SEDIMENTARIO	Rímac	
		Milotingo	
ACUITARDO	SEDIMENTARIO	Atocongo	Formaciones de baja permeabilidad en rocas volcánicas y volcano sedimentarias
		Pamplona	
		Lurín	
		Marcavilca	
		Herradura	
		Salto del Frayle	
	VOLCÁNICO	Quilmaná	Formaciones impermeables en rocas volcano sedimentarias
		Volcánicos menores	
	VOLCÁNICO SEDIMENTARIO	Rímac	
		Huarochirí	
		Milotingo	
		Chilca	
		Puente Piedra	
		Arahuay	
	INTRUSIVO	Intrusivo	Rocas intrusivas impermeables

Fuente: Elaboración propia, adaptado de INGEMMET, 2021.

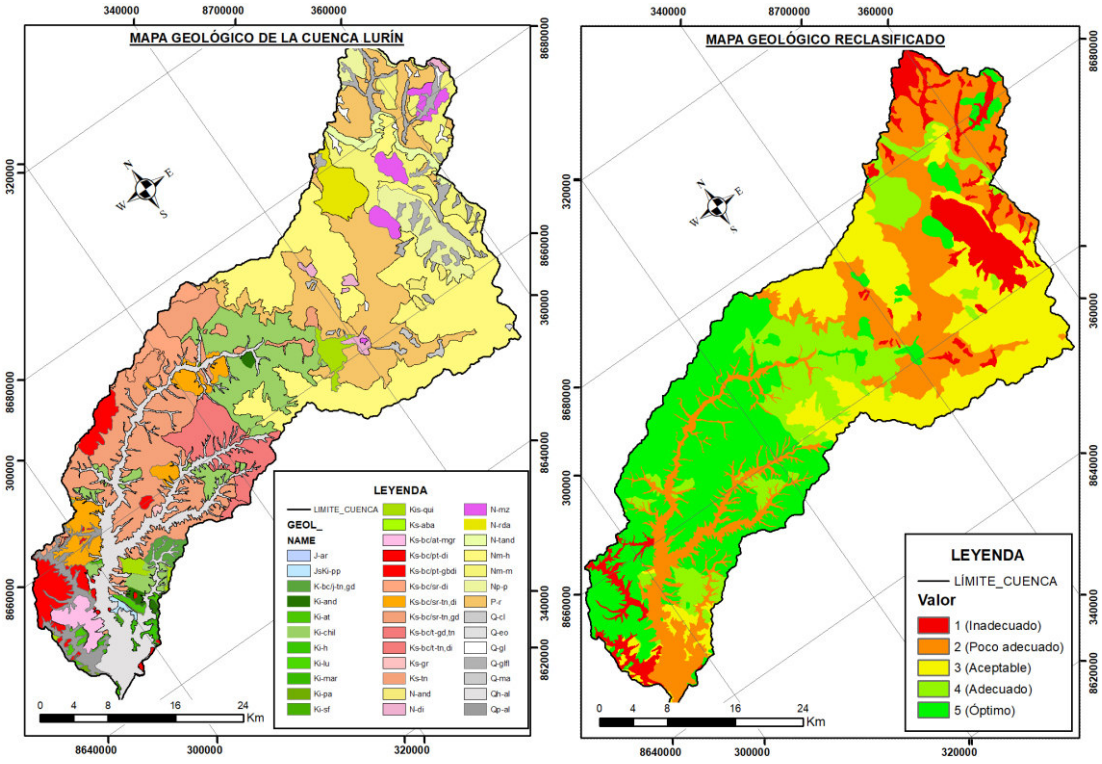
De acuerdo con las características de las diferentes clases de rocas, que pueden representar la preferencia para la ubicación de presas, los datos geológicos originales se reclasifican en 5 clases, como se muestra en la tabla 5.7 y en la figura 5.9.

Tabla 5.7 Reclasificación del criterio Geología

Geología	Valoración	Definición
K-bc/j-tn,gd; Ks-aba; Ks-bc/at-mgr; Ks-bc/pt-di; Ks-bc/pt-gbdi; Ks-bc/sr-di; Ks-bc/sr-tn,di; Ks-bc/sr-tn,gd; Ks-bc/t-gd,tn; Ks-bc/t-tn,di; Ks-gr; N-di; N-mz	5	Óptimo
Ki-and, Kis-qui, Ks-tn, N-and, N-rda, N-tand, Ki-chil	4	Adecuado
J-ar, JsKi-pp, Ki-at, Ki-h, Ki-lu, Ki-mar, Ki-pa, Ki-sf, Nm-h	3	Aceptable
Nm-m, P-r, Qh-al	2	Poco adecuado
Np-p, Q-cl, Q-eo, Q-gl, Q-glfl, Q-ma, Qp-al	1	Inadecuado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.9 Mapa de reclasificación de la Geología de la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3. Cobertura vegetal

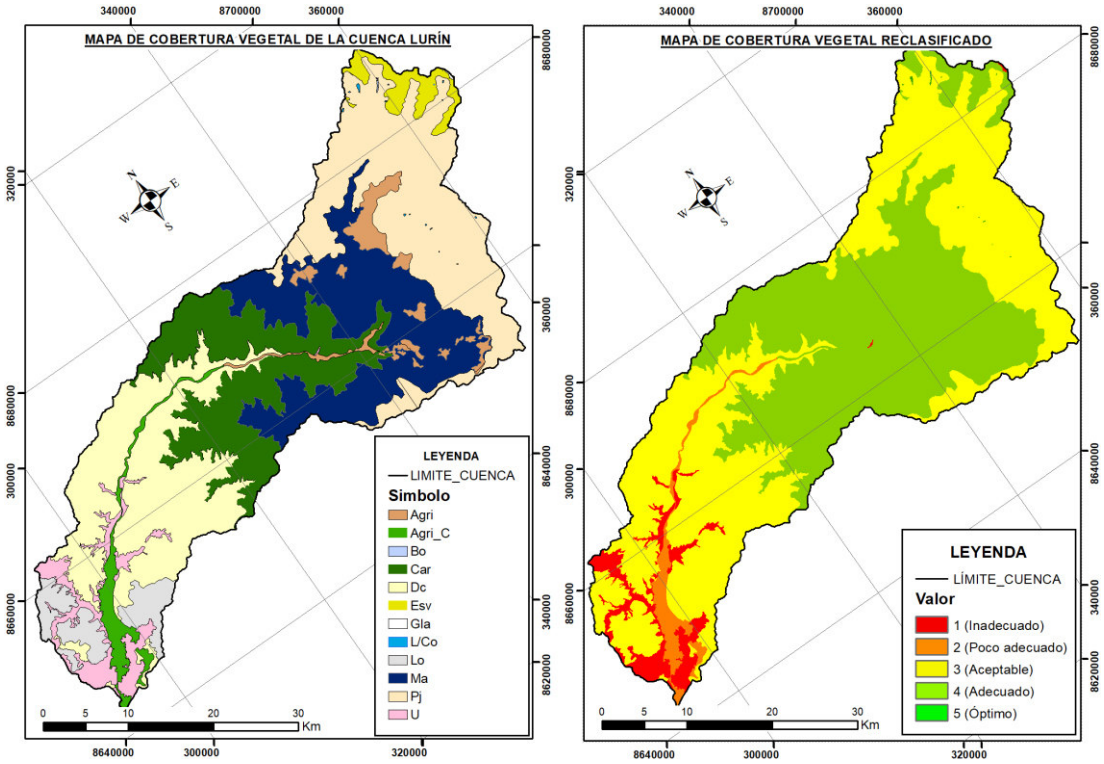
La cobertura vegetal desempeña varias funciones en la selección del emplazamiento de las presas. En primer lugar, “la cubierta del suelo modifica en gran medida el efecto de las precipitaciones, lo que hace que la cubierta del suelo influya en la erosión del suelo” (Adinarayana et al, 1995, p. 20). Por otra parte, “la construcción de una presa conlleva la expropiación de terrenos que tienen un costo económico diferente según el tipo de cubierta terrestre” (Baban & Wan-Yusof, 2003, p. 34). En este estudio, la cobertura vegetal se reclasifica de 12 clases a 5 clases, como se muestra en la tabla 5.8 y en la figura 5.10, según la preferencia para ubicación de presas.

Tabla 5.8 Reclasificación del criterio Cobertura Vegetal

Cobertura Vegetal	Valoración	Definición
Bo, L/Co	5	Óptimo
Car, Esv, Ma, Agri	4	Adecuado
Dc, Lo, Pj	3	Aceptable
Agri_C	2	Poco adecuado
U, Gla	1	Inadecuado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.10 Mapa de reclasificación de Cobertura vegetal de la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.4. Número de Curva (CN)

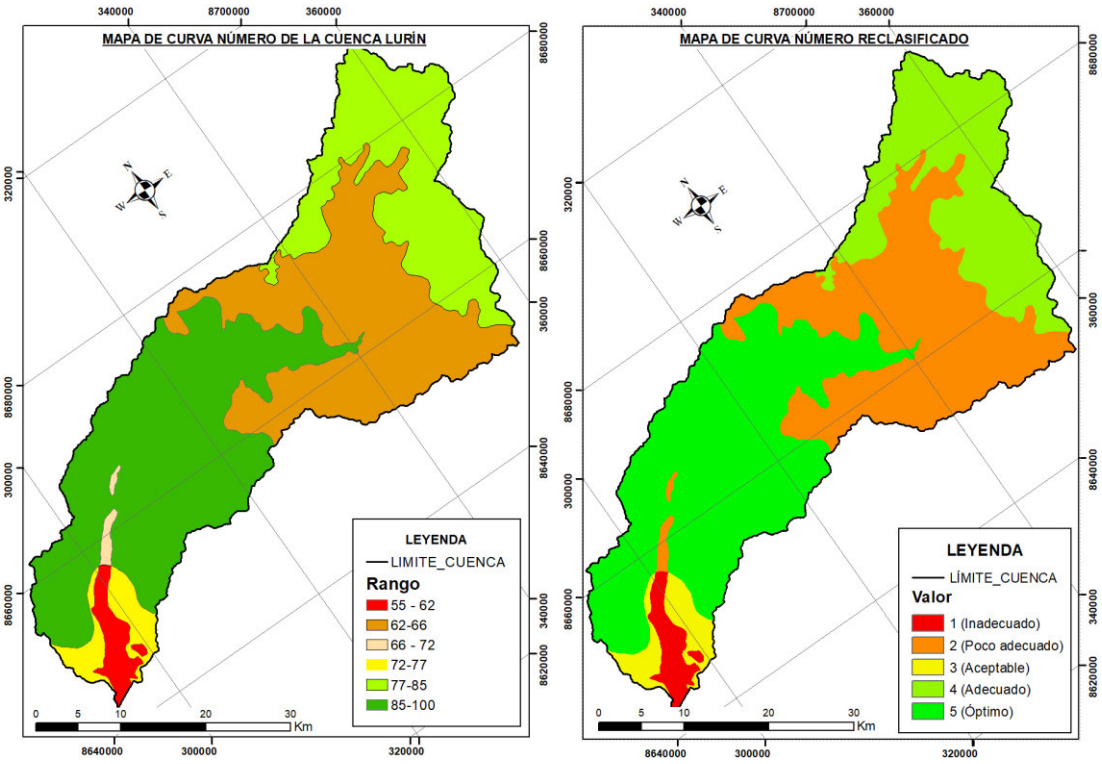
El CN es un parámetro empírico utilizado habitualmente en hidrología para predecir la escorrentía directa o la retención a partir del exceso de precipitación; depende del tipo de suelo, de los efectos del uso y cobertura del suelo y de la condición hidrogeológica. El valor CN de 100 sugiere una cuenca impermeable; un valor de CN de 0 representa una alta impermeabilidad de la cuenca, lo que sugiere una cuenca infinitamente abstracta con capacidad de generación de escorrentía nula. Un CN elevado indica una alta idoneidad para ubicar emplazamientos de presas. Para este estudio, se obtuvieron CN con valores de 55 a 100; se reclasifica de 6 clases a 5 clases, como se muestra en la tabla 5.9 y en la figura 5.11.

Tabla 5.9 Reclasificación del criterio Curva número

Curva número		Valoración	Definición
55	62	1	Inadecuado
62	72	2	Poco adecuado
72	77	3	Aceptable
77	85	4	Adecuado
85	100	5	Óptimo

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.11 Mapa de reclasificación de Curva número en la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.5. Distancia a ríos

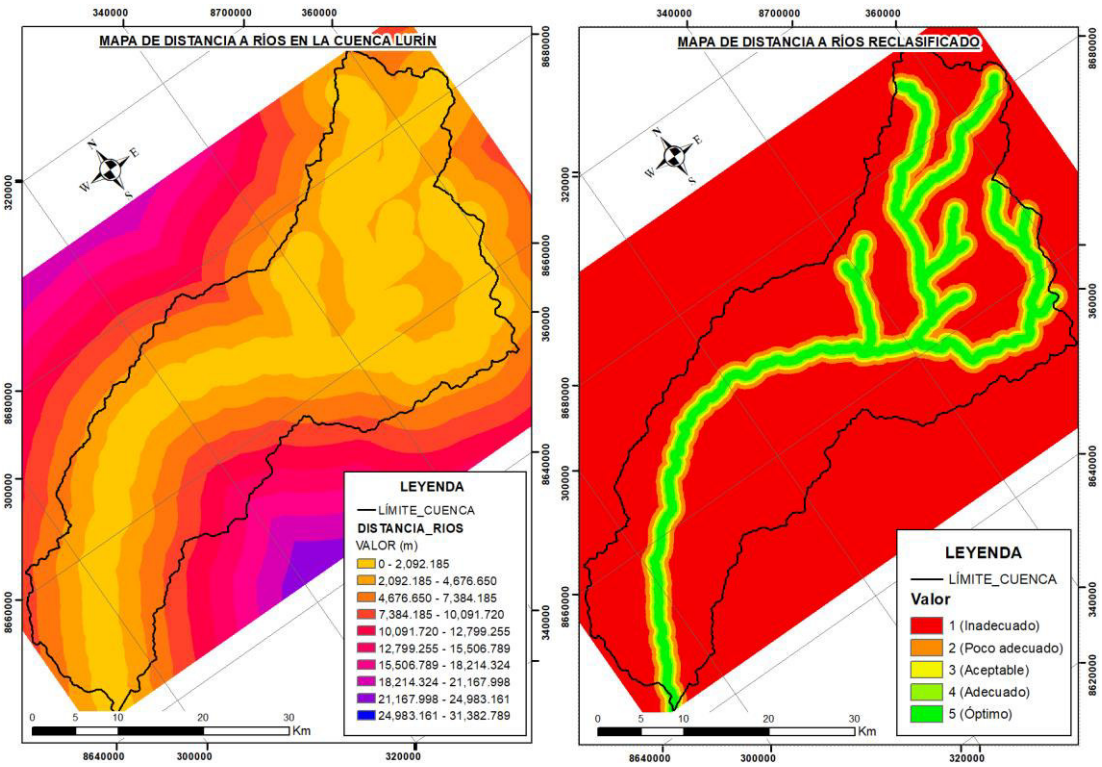
Las presas se construyen en el paso de un río o quebrada, porque este es el lugar natural donde se puede controlar y almacenar el agua de manera efectiva, permitiendo aprovecharla para diversos fines como la energía, el abastecimiento, la agricultura y protección de inundaciones. Un sitio adecuado para ubicación de presas debe estar dentro de una zona de amortiguamiento de un kilómetro del río; esta se considera una distancia económicamente sostenible del río según la opinión de expertos. Para el presente estudio se ha considerado la distancia euclidiana al río como un criterio importante para la selección de sitios de presas; los cuales se han reclasificado en 5 clases, como se muestra en la tabla 5.10 y en la figura 5.12.

Tabla 5.10 Reclasificación del criterio Distancia a ríos

Distancia a ríos (m)		Valoración	Definición
0	500	5	Óptimo
500	1000	4	Adecuado
1000	1500	3	Aceptable
1500	2000	2	Poco adecuado
2000	a más	1	Inadecuado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.12 Mapa de reclasificación de Distancia a ríos en la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.6. Distancia a fallas

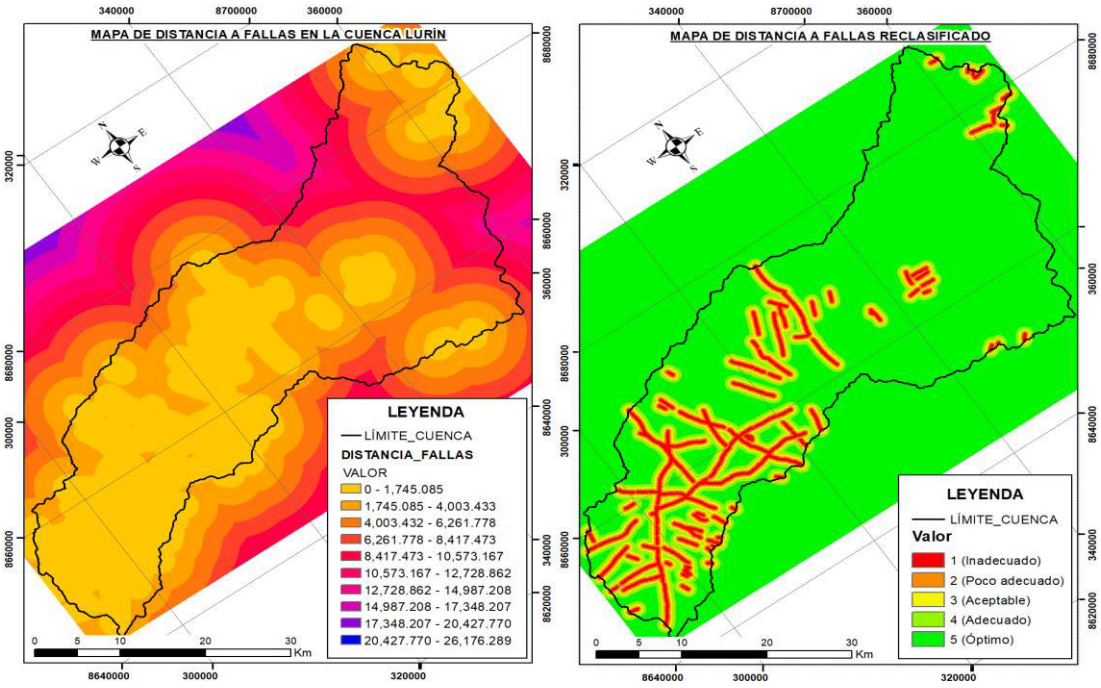
La distancia a fallas geológicas es un factor muy importante a considerar cuando se elige la ubicación de una presa, ya que las fallas pueden afectar la estabilidad estructural de la presa y aumentar el riesgo de desastres. Las normas de diseño de presas, como las establecidas por organismos como la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) o los códigos sísmicos locales, exigen que se eviten las áreas cercanas a fallas activas, o si no se puede evitar, que se tomen medidas para garantizar que la presa pueda resistir terremotos. Aunque no hay una distancia fija universalmente aceptada, las presas generalmente se sitúan a una distancia segura de fallas activas para minimizar el riesgo de que un terremoto afecte la estructura. En muchos casos, se recomienda que las presas no se construyan a menos de 1 kilómetros de una falla activa. En la tabla 5.11 y en la figura 5.13 se muestra la reclasificación respectiva.

Tabla 5.11 Reclasificación del criterio Distancia a fallas

Distancia a ríos (m)		Valoración	Definición
0	100	1	Inadecuado
100	300	2	Poco adecuado
300	500	3	Aceptable
500	1000	4	Adecuado
1000	a más	5	Óptimo

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.13 Mapa de reclasificación de Distancia a fallas en la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Análisis multicriterio por superposición ponderada

Una vez que se dispuso de los archivos ráster de entrada, se realizó el análisis multicriterio utilizando la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS (Weighted Overlay), según los criterios mencionados anteriormente. La superposición ponderada, en ArcGIS es una técnica de análisis espacial que combina varias capas ráster (o mapas) en una sola capa, asignando a cada capa un peso que refleja su importancia relativa en el análisis.

La configuración final de los parámetros empleados, junto con su peso porcentual; los cuales fueron asumidos de acuerdo a la opinión de expertos, se distribuyó utilizando los factores y los valores de los criterios del Cuadro 5.12.

Tabla 5.12 Factores y criterios

Factor	Peso (%)	Valoración	Escala
Pendiente	20	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
Geología	20	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
Cobertura vegetal	10	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
Curva número	18	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
Distancia a ríos	18	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5
Distancia fallas	14	1	1
		2	2
		3	3
		4	4
		5	5

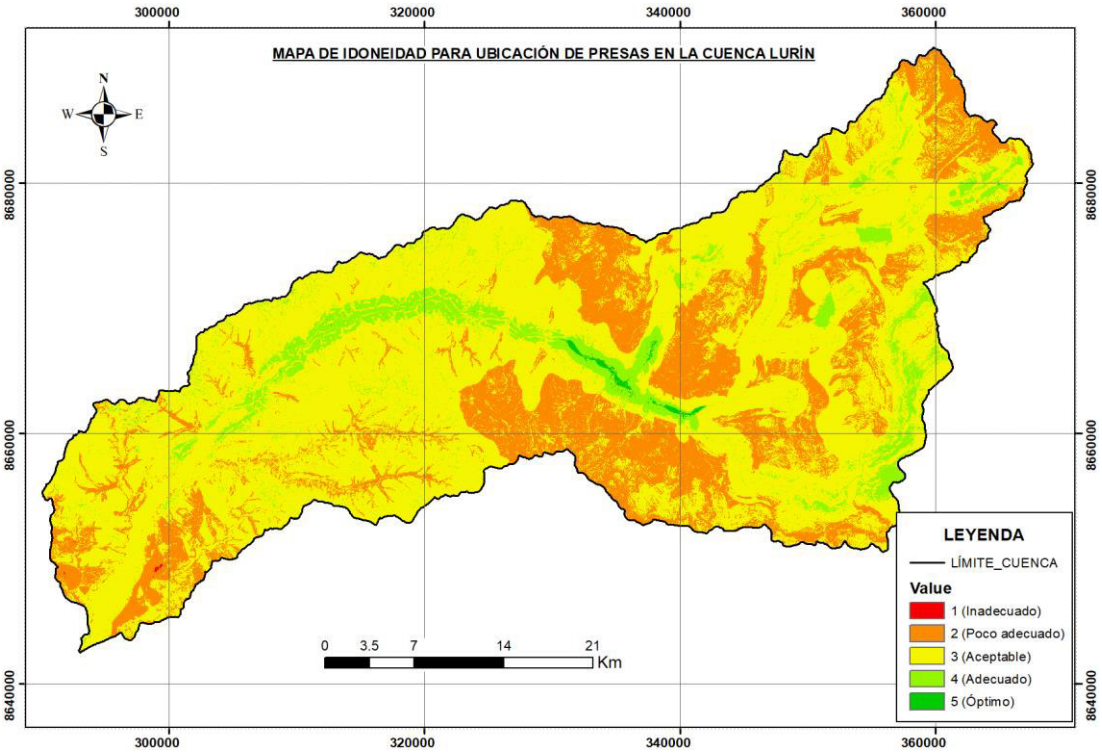
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4. Mapa de idoneidad (visualización del resultado)

Como resultado de aplicar la superposición ponderada en ArcGIS, se obtuvo un ráster que representa la combinación de las capas ráster anteriores, donde cada celda tiene un valor numérico que representa una medida combinada de todas las capas de entrada definidas como criterios, ponderadas con sus respectivos valores de peso. El valor de cada celda del ráster de salida depende de los valores de las celdas de las capas de entrada y de los pesos asignados en cada capa. El análisis de la capa resultante permite identificar zonas que cumplen mejor con los criterios del análisis.

Una vez se tiene el ráster de salida, se procede hacer un análisis visual mediante una clasificación simbólica; el cual consiste en aplicar una simbología que coloree las áreas con valores altos de forma destacada (verde) y las áreas con valores bajos de otra (rojo); en el caso del presente estudio las áreas se clasificaron en valores de 1 al 5, representados en colores rojo (1), anaranjado (2), amarillo (3), verde claro (4) y verde oscuro (5). En la figura 5.14 se muestra los resultados de la capa ráster ponderada mediante un mapa que representa la idoneidad de sitios para la ubicación de presas.

Figura 5.14 Mapa de idoneidad para ubicación de presas



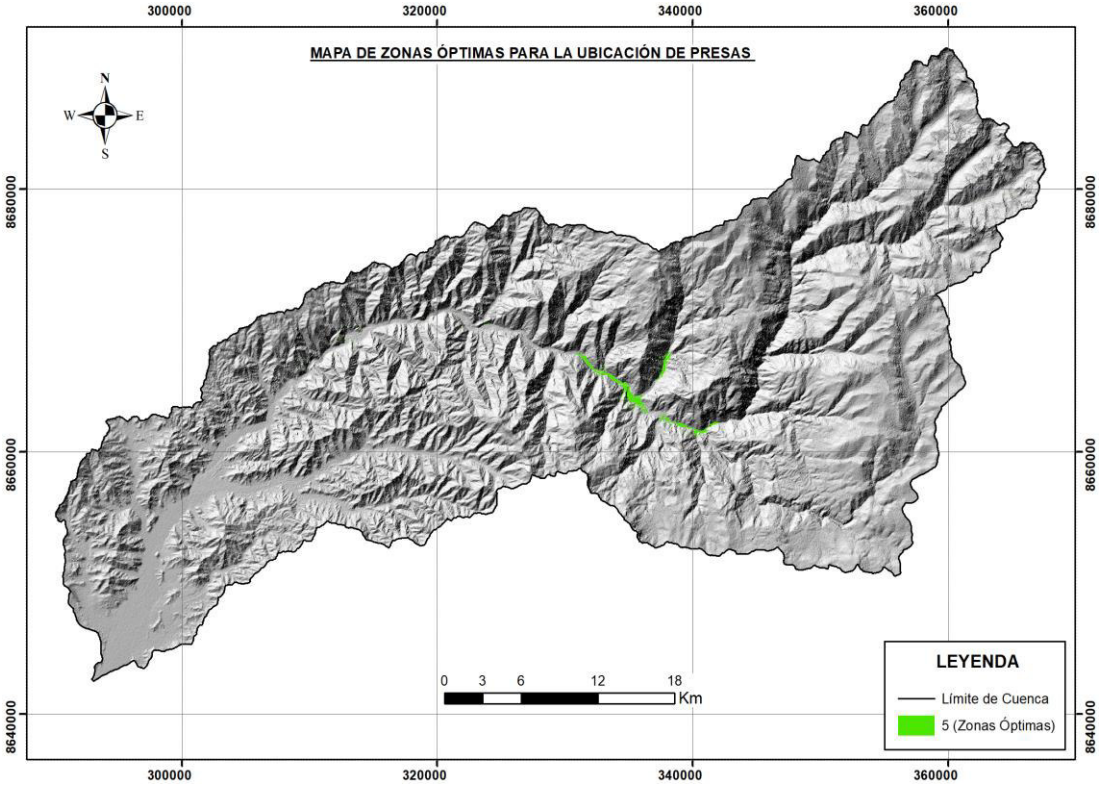
Fuente: Espacio de trabajo de la herramienta de superposición ponderada en ArcGIS.

Las áreas de color verde representan valores altos que cumplen mejor con los criterios de análisis para la ubicación de presas; mientras que las áreas que van de color amarillo a rojo representan valores bajos, lo cual significa que son moderado, poco adecuadas e inadecuadas para la ubicación de presas.

Las áreas de color verde claro (valor de 4) representan áreas adecuadas para la construcción de presas; consecuentemente, las áreas de color verde oscuro (valor de 5) representan áreas óptimas para la ubicación de presas; estas últimas son las que se procederán analizar a mayor detalle en el siguiente ítem, ya que según el resultado tienen muy altas posibilidades de albergar una presa.

En la figura 5.15 se muestra la ubicación espacial de las áreas óptimas para la ubicación de presas dentro del área de estudio; estas áreas se localizan en la parte media – alta de la cuenca Lurín, cercanas al poblado del distrito de Antioquia.

Figura 5.15 Áreas óptimas para la ubicación de presas en la cuenca Lurín



Fuente: Elaboración propia

5.2. Selección del mejor sitio para el emplazamiento de presa

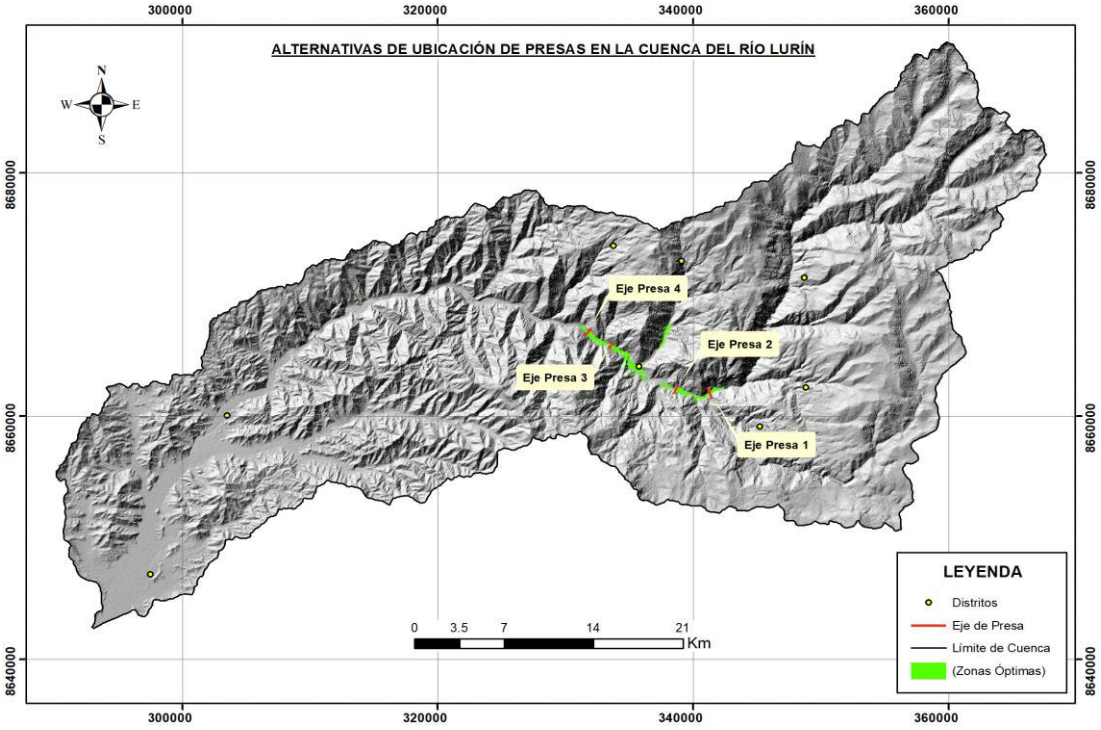
El objetivo del presente ítem es seleccionar el mejor sitio de emplazamiento, de entre las cuatro alternativas propuestas en campo, para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín. Para lo cual se emplea análisis multicriterio mediante un sistema híbrido AHP-TOPSIS.

5.2.1. Planteamiento de alternativas de ejes de presa

Tras la obtención del mapa de idoneidad para la ubicación de presas en el ítem anterior; tomando en consideración las zonas óptimas, se realizó una visita a campo, en compañía de un especialista en Presas y un especialista en Geología-Geotecnia con la finalidad hacer una inspección y evaluación in situ de estas áreas y posteriormente determinar la ubicación de posibles sitios de represamiento.

Se identificaron 4 alternativas de ubicación de ejes de presas, las cuales serán evaluadas mediante Análisis Multicriterio (Método AHP - TOPSIS), para determinar finalmente el mejor sitio de emplazamiento para la construcción de una presa en la cuenca del río Lurín. Ver figura 5.16.

Figura 5.16 Alternativas de ejes de presa propuestas en la cuenca del río Lurín



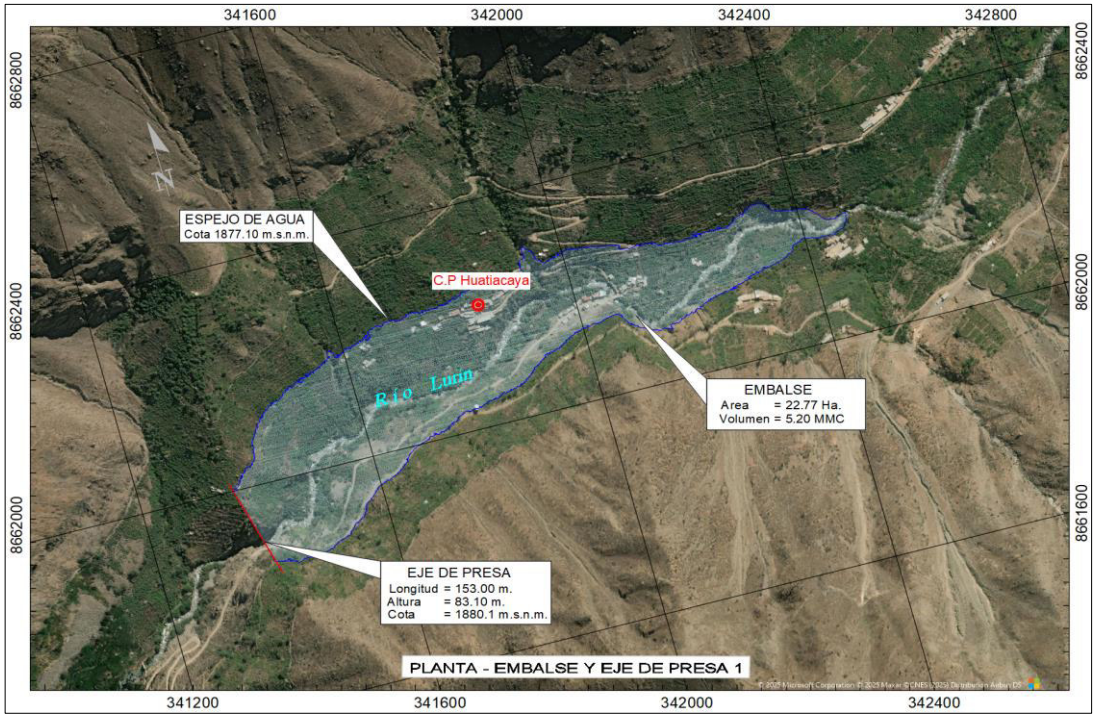
Fuente: Elaboración propia

Para una comprensión racional de las 04 alternativas a evaluar, se presenta información base, la cual considera la topografía en planta, boquilla en el eje, Curva: Altitud - Área - Volumen, y tabla de características de cada presa.

5.2.1.1. Alternativa N° 1: Eje Presa 1

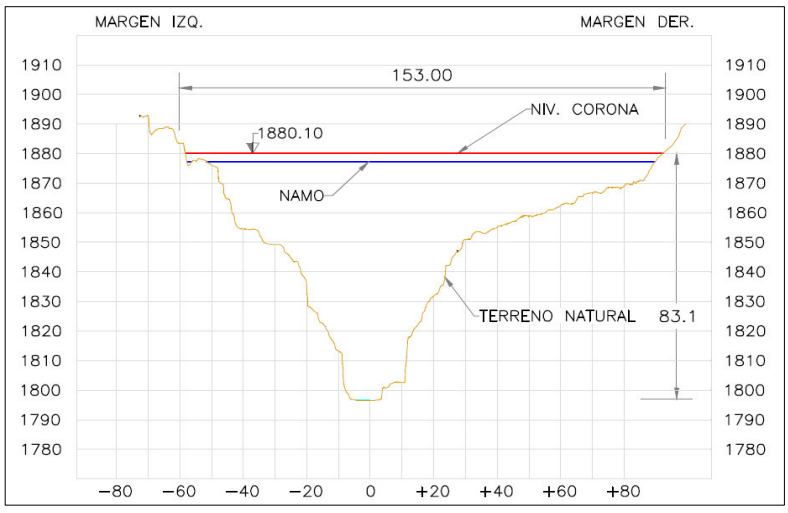
En la figura 5.17 y 5.18 se muestra la topografía y boquilla de la Presa 1 propuesta.

Figura 5.17 Vista en planta de la topografía del Eje de Presa 1



Fuente: Elaboración propia

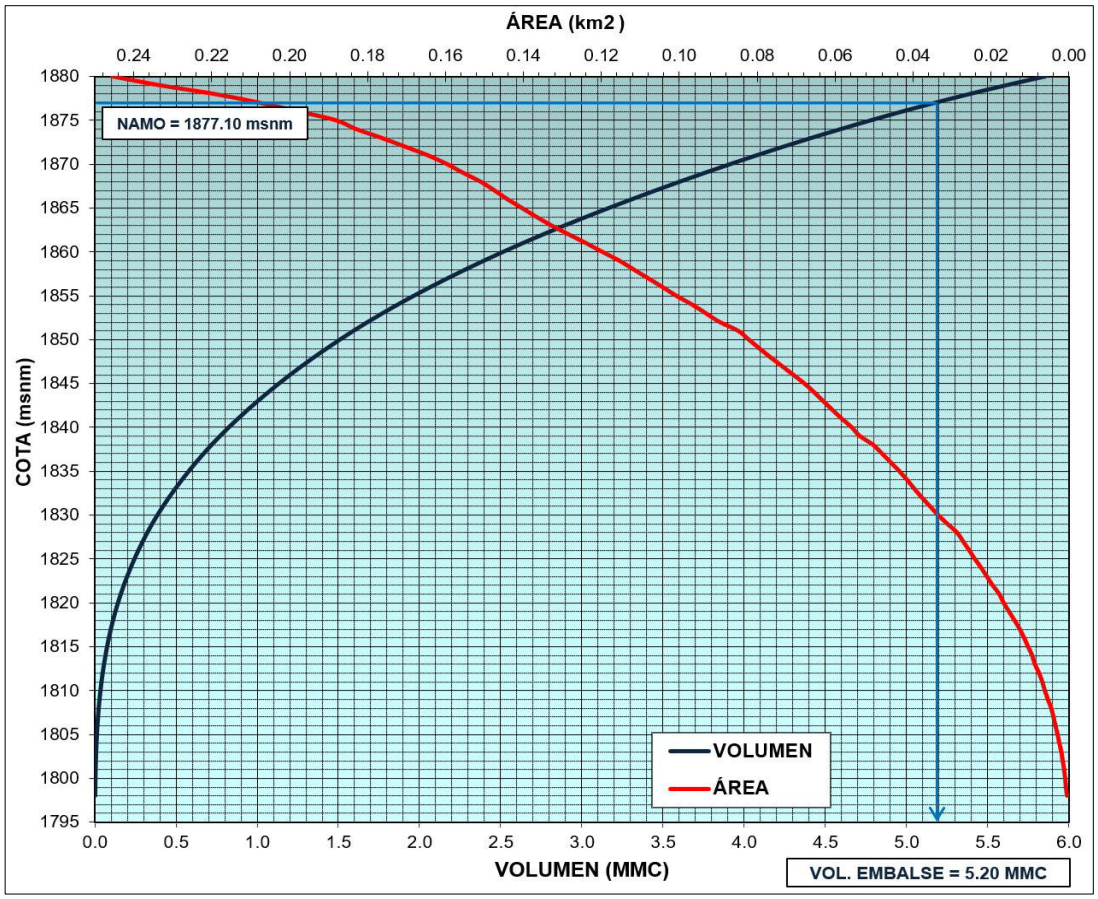
Figura 5.18 Sección de Boquilla – Eje Presa 1



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como información insumo la topografía del vaso del embalse, se procedió a la medición de las áreas cerradas definidas a partir del eje de la Presa 1; lo que permitió calcular los volúmenes parciales entre dos curvas de nivel adyacentes, y finalmente capacidad total del vaso. Para una cota de NAMO de 1877.10 msnm se obtiene un volumen de embalse de 5.20 MMC. Ver figura 5.19.

Figura 5.19 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 1



Fuente: Elaboración propia

Las características del embalse y de la Presa 1, son las siguientes:

Tabla 5.13 Características de Presa 1

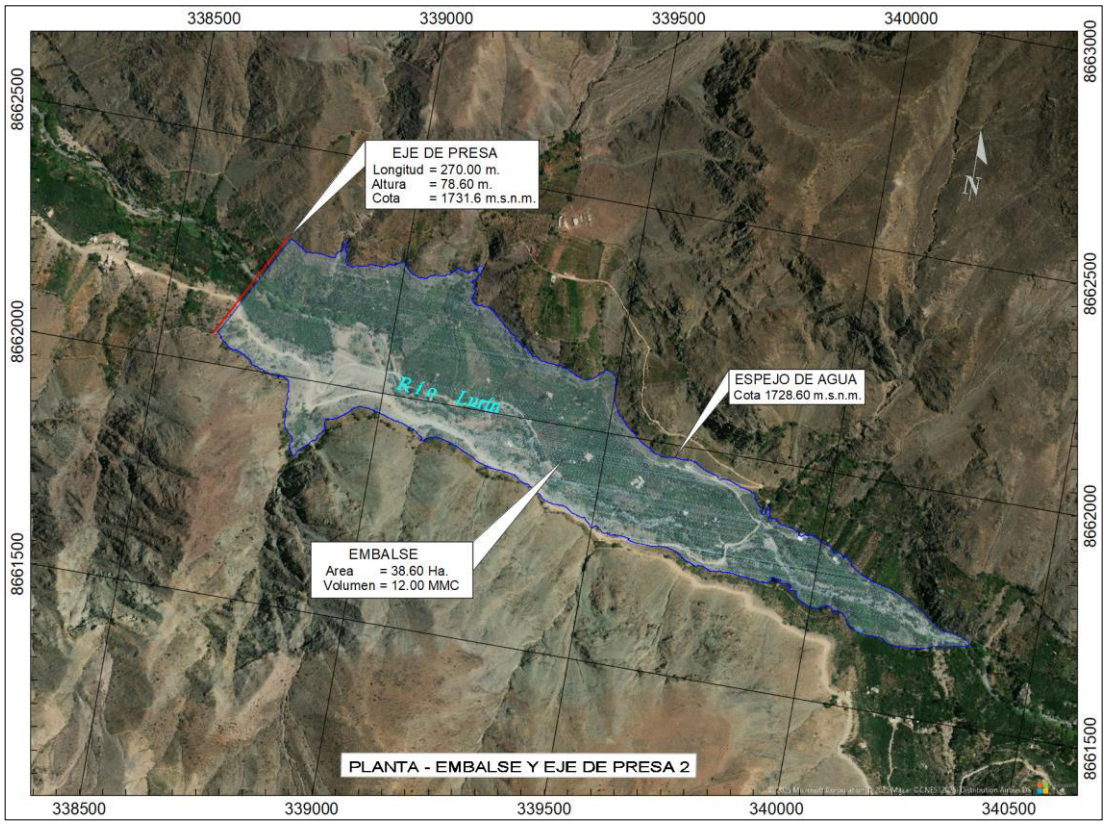
Descripción	Valor
Volumen útil	3.20 MMC
Volumen Muerto	2.00 MMC
Volumen Total	5.20 MMC
Área de Embalse	22.77 ha
Nivel de Cauce	1796.50 msnm
Nivel de NAMO	1877.10 msnm
Nivel de Corona	1880.10 msnm
Altura de Presa	83.10 m
Longitud de Corona	153.00 m

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.2. Alternativa N° 2: Eje Presa 2

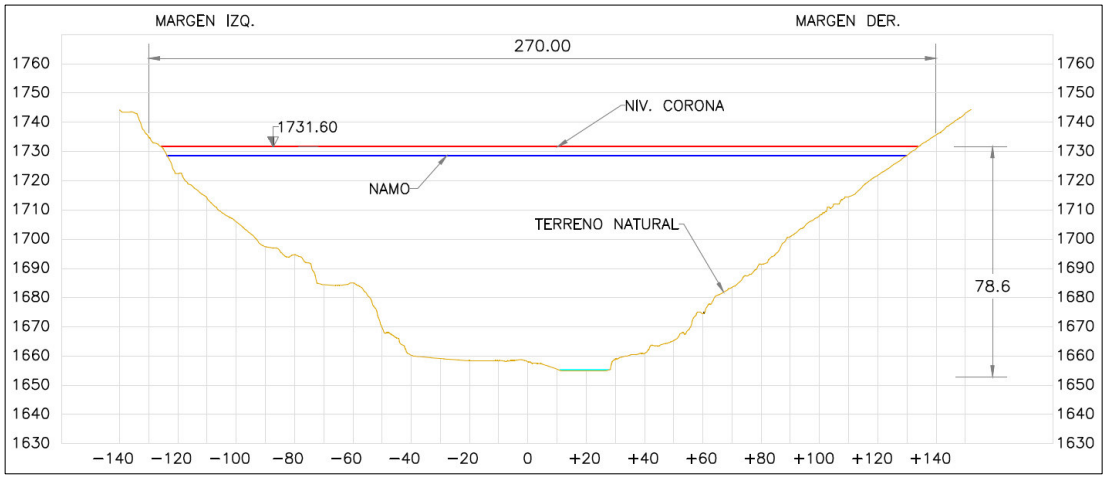
En la figura 5.20 se muestra la vista en planta de topografía y área de embalse en el eje de la Presa 2; así mismo en la figura 5.21 se presenta el perfil longitudinal de la sección en la boquilla del eje de presa.

Figura 5.20 Vista en planta de topografía de Eje de Presa 2 y embalse



Fuente: Elaboración propia

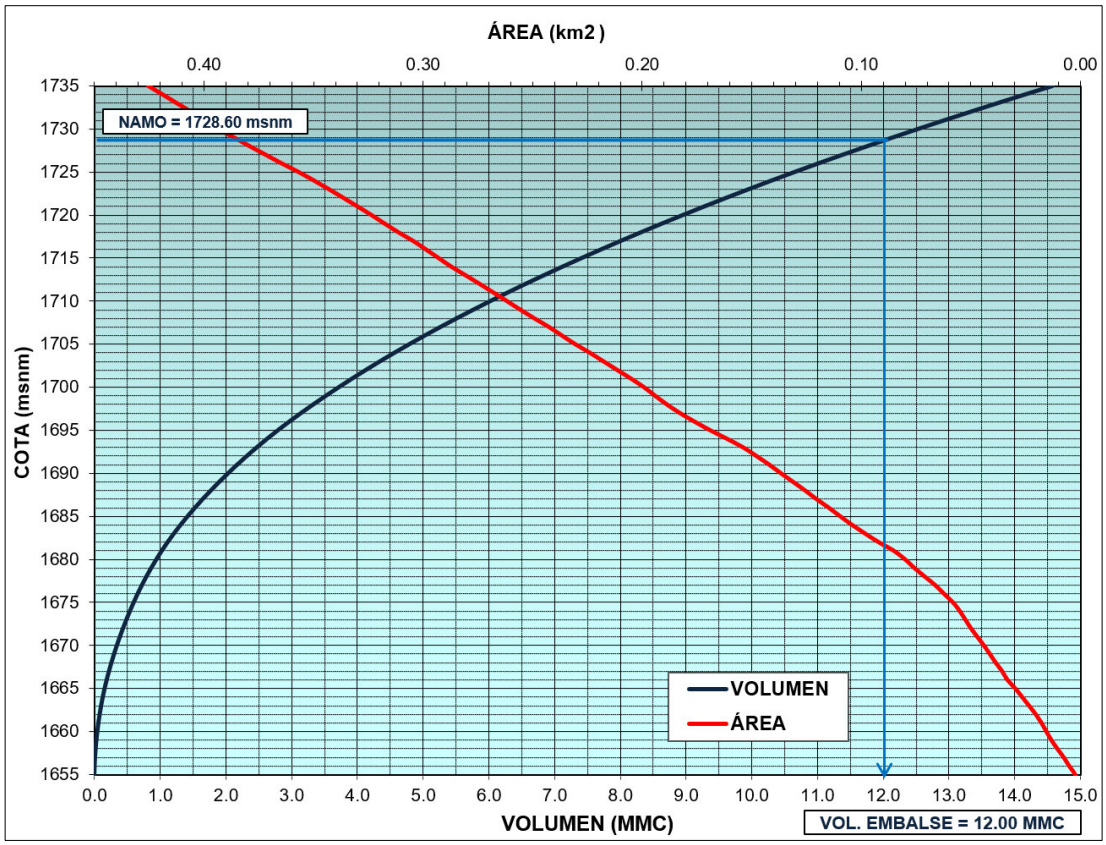
Figura 5.21 Sección de Boquilla – Eje Presa 2



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como información insumo la topografía del vaso del embalse, se procedió a la medición de las áreas cerradas definidas a partir del eje de la Presa 2; lo que permitió calcular los volúmenes parciales entre dos curvas de nivel adyacentes, y finalmente capacidad total del vaso. Para una cota de NAMO de 1728.60 msnm se obtiene un volumen de embalse de 12.00 MMC. Ver figura 5.22.

Figura 5.22 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 2



Fuente: Elaboración propia

Las características del embalse y de la Presa 2, son las siguientes:

Tabla 5.14 Características de Presa 2

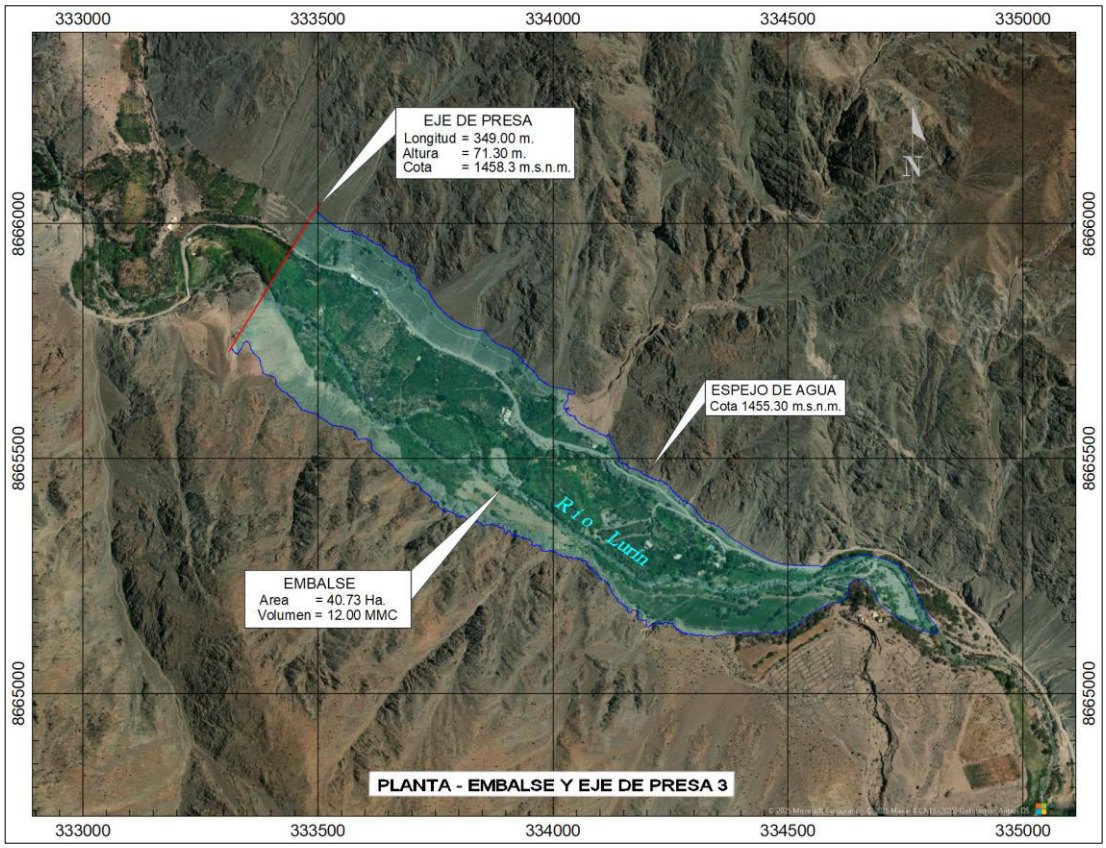
Descripción	Valor
Volumen útil	9.40 MMC
Volumen Muerto	2.60 MMC
Volumen Total	12.00 MMC
Área de Embalse	38.60 ha
Nivel de Cauce	1653.00 msnm
Nivel de NAMO	1728.60 msnm
Nivel de Corona	1731.60 msnm
Altura de Presa	78.60 m
Longitud de Corona	270.00 m

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.23 se muestra la vista en planta de topografía y área de embalse en el eje de la Presa 3; así mismo en la figura 5.24 se presenta el perfil longitudinal de la sección en la boquilla del eje de presa.

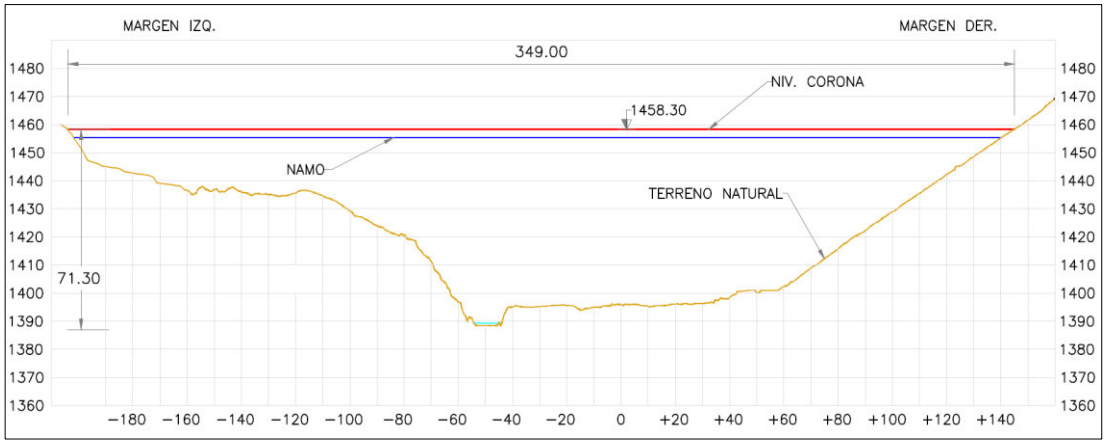
5.2.1.3. Alternativa N° 3: Eje Presa 3

Figura 5.23 Vista en planta de topografía de Eje Presa 3 y embalse



Fuente: Elaboración propia

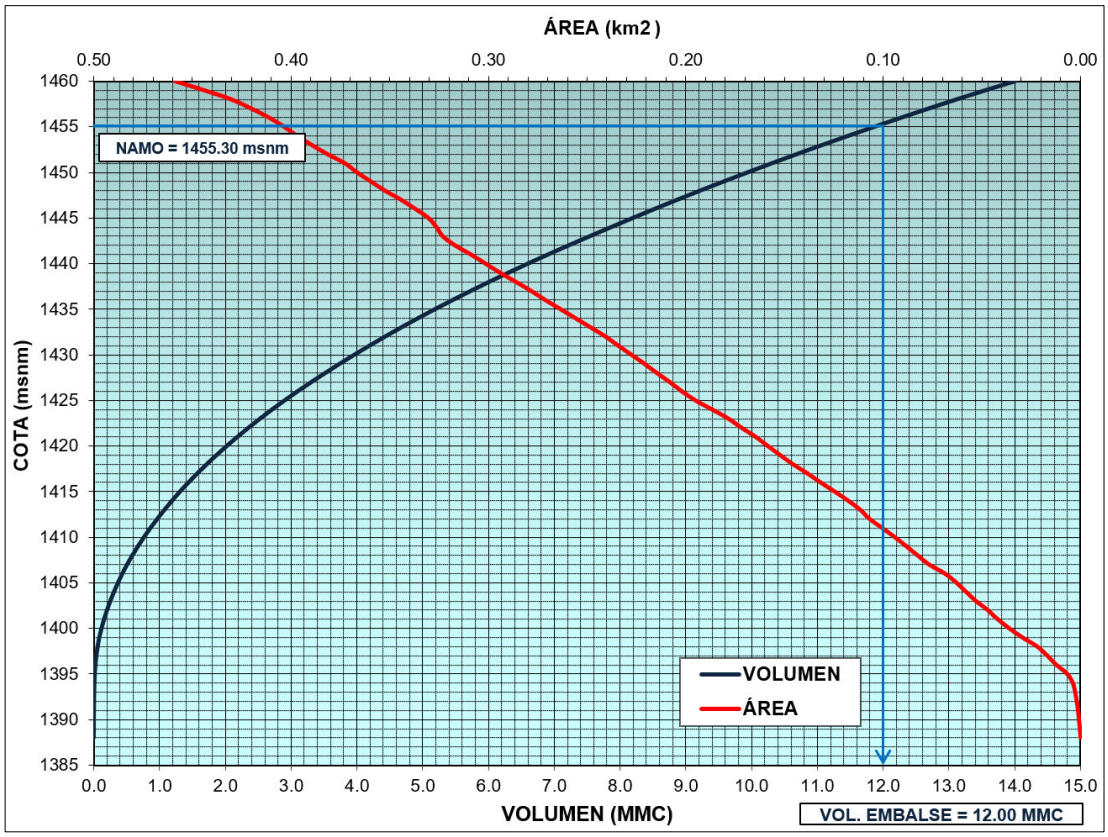
Figura 5.24 Sección de Boquilla – Eje Presa 3



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como información insumo la topografía del vaso del embalse, se procedió a la medición de las áreas cerradas definidas a partir del eje de la Presa 3; lo que permitió calcular los volúmenes parciales entre dos curvas de nivel adyacentes, y finalmente capacidad total del vaso. Para una cota de NAMO de 1455.30 msnm se obtiene un volumen de embalse de 12.00 MMC. Ver figura 5.25.

Figura 5.25 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 3



Fuente: Elaboración propia

Las características del embalse y de la Presa 3, son las siguientes:

Tabla 5.15 Características de Presa 3

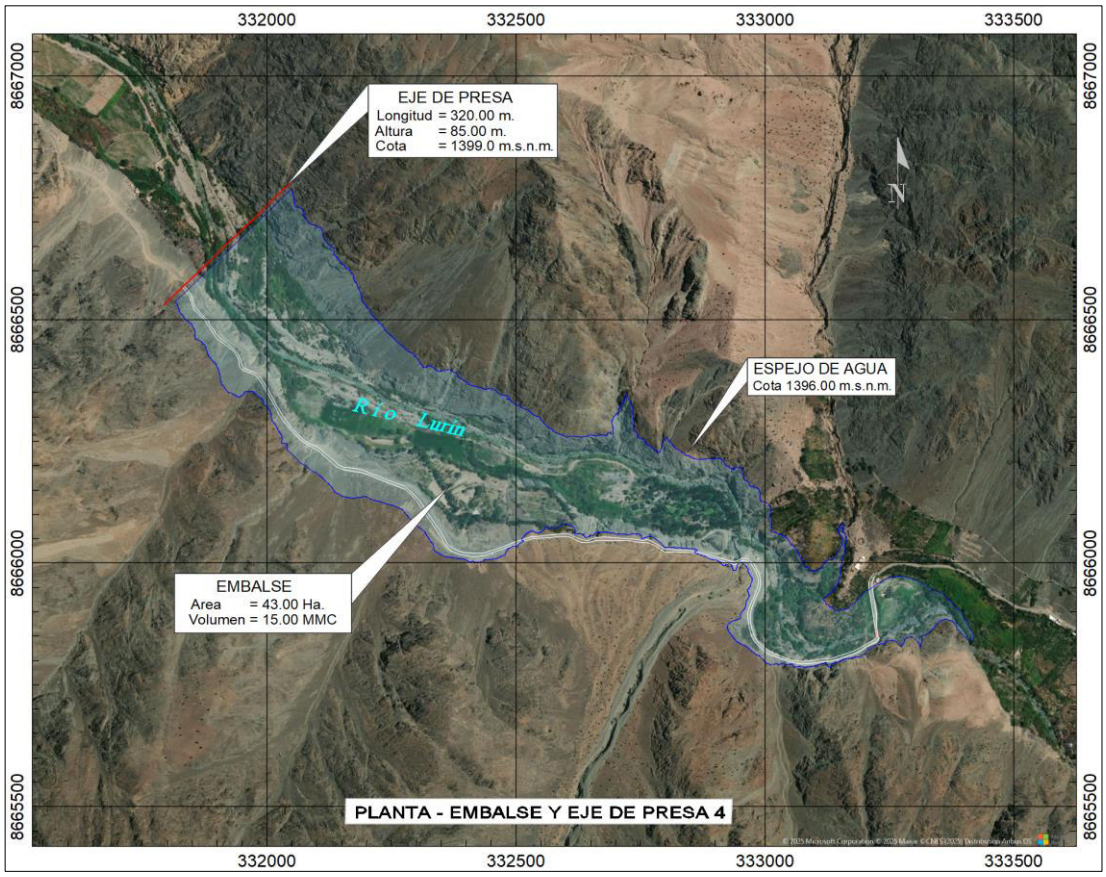
Descripción	Valor
Volumen útil	9.20 MMC
Volumen Muerto	2.80 MMC
Volumen Total	12.00 MMC
Área de Embalse	40.73 ha
Nivel de Cauce	1388.50 msnm
Nivel de NAMO	1455.30 msnm
Nivel de Corona	1458.30 msnm
Altura de Presa	71.30 m
Longitud de Corona	196.00 m

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.4. Alternativa N° 4: Eje Presa 4

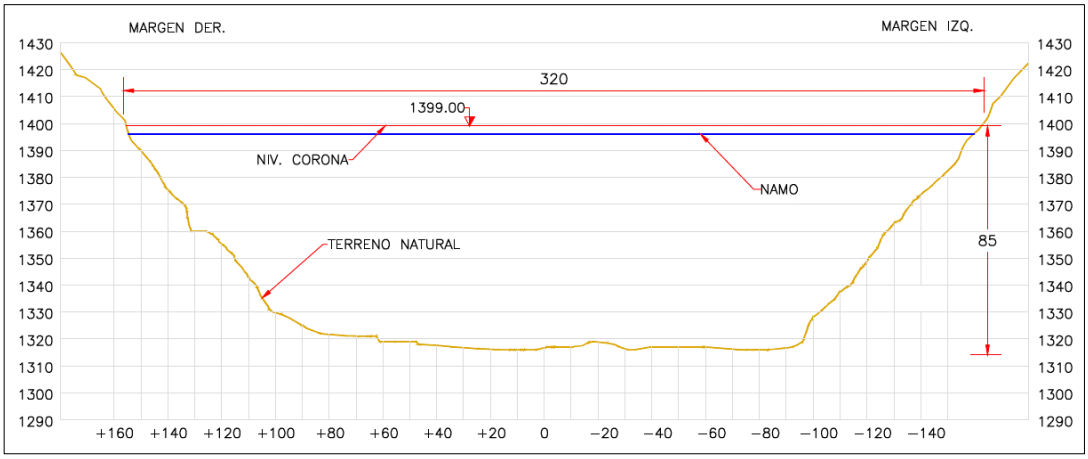
En la figura 5.26 se muestra la vista en planta de topografía y área de embalse en el eje de la Presa 4; así mismo en la figura 5.27 se presenta el perfil longitudinal de la sección en la boquilla del eje de presa.

Figura 5.26 Vista en planta de topografía de Eje Presa 4 y embalse



Fuente: Elaboración propia

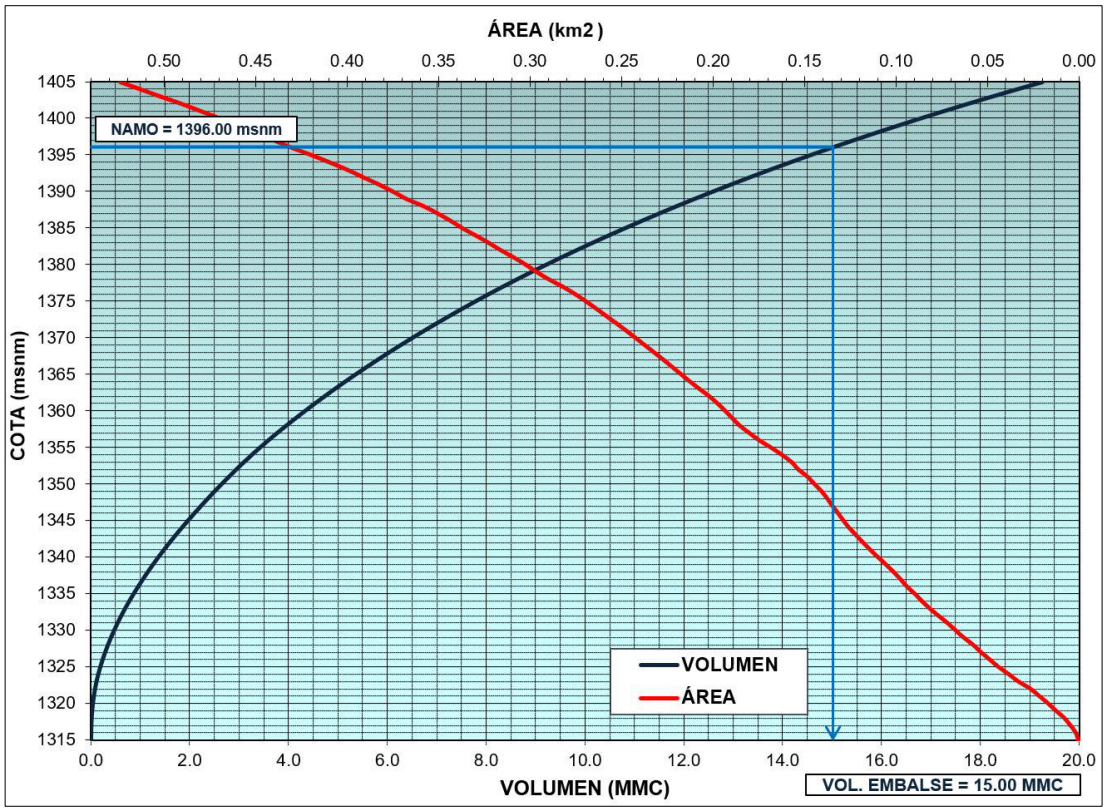
Figura 5.27 Sección de Boquilla – Eje Presa 4



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como información insumo la topografía del vaso del embalse, se procedió a la medición de las áreas cerradas definidas a partir del eje de la Presa 4; lo que permitió calcular los volúmenes parciales entre dos curvas de nivel adyacentes, y finalmente capacidad total del vaso. Para una cota de NAMO de 1396.00 msnm se obtiene un volumen de embalse de 15.00 MMC. Ver figura 5.28.

Figura 5.28 Curva Altitud – Área – Volumen de embalse en Eje de Presa 4



Fuente: Elaboración propia

Las características del embalse y de la Presa 4, son las siguientes:

Tabla 5.16 Características de Presa 4

Descripción	Valor
Volumen útil	12.15 MMC
Volumen Muerto	2.85 MMC
Volumen Total	15.00 MMC
Área de Embalse	43.00 ha
Nivel de Cauce	1316.00 msnm
Nivel de NAMO	1396.00 msnm
Nivel de Corona	1399.00 msnm
Altura de Presa	85.00 m
Longitud de Corona	320.00 m

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Definición de criterios locales para selección de emplazamiento de presas

Los criterios para definir el sitio de emplazamiento óptimo no tendrán la restricción antrópica toda vez que se parte de la hipótesis de que habrá aceptación de las entidades públicas y población a los diversos emplazamientos. Asimismo, se ha valorado aspectos físicos, ingenieriles, por lo que, tras una minuciosa inspección en campo y estimación de demandas, se han considerado algunos criterios que se descomponen, a su vez, en una serie de subcriterios. Los criterios resultantes se indican a continuación:

Condiciones geológicas (C1)
- Geología del vaso: (SC11)
- Geología de la zona de cierre: (SC12)
- Característica hidrogeológica: (SC13)

Condiciones Geotécnicas (C2)
- Clasificación geomecánica RMR: (SC21)
- Capacidad admisible del macizo rocoso: (SC22)
- Ángulo de fricción del suelo: (SC23)

Capacidad de almacenamiento (C3)
- Tamaño del vaso: (SC31)
- Impermeabilidad del vaso: (SC32)

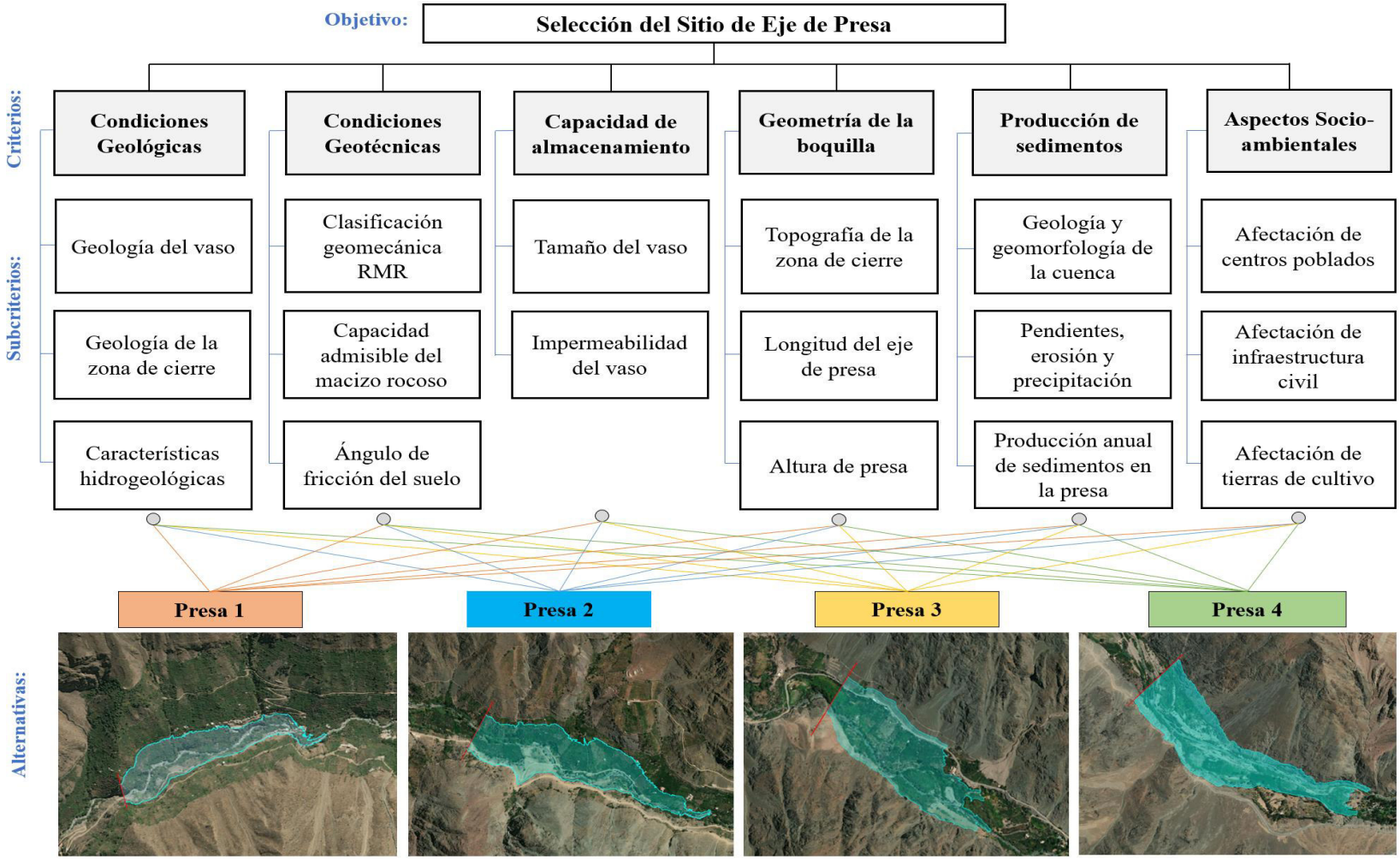
Geometría de la boquilla (C4)
- Topografía de la zona de cierre: (SC41)
- Longitud del eje de presa: (SC42)
- Altura de presa: (SC43)

Producción de sedimentos (C5)
- Geología y geomorfología de la cuenca: (SC51)
- Pendientes, erosión y precipitación: (SC52)
- Producción anual de sedimentos en la presa: (SC53)

Aspectos socio-ambientales (C6)
- Afectación de centros poblados: (SC61)
- Afectación de infraestructura civil: (SC62)
- Afectación de tierras de cultivo: (SC63)

A continuación, se presenta la estructura jerárquica del modelo; mediante un árbol jerárquico que consta de tres niveles. Ver figura 5.29.

Figura 5.29 Árbol de estructuración jerárquico



Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Valoración de criterios de ubicación de presas mediante el método AHP

Una vez planteada las alternativas de eje de presa; definido los criterios de selección, y jerarquizado cada uno de los factores según niveles para el logro del objetivo; se procedió a determinar los pesos respectivos de cada criterio mediante el método AHP. El procedimiento de la aplicación del método AHP es el siguiente:

Comparaciones pareadas

Se realizaron las comparaciones de cada uno de los seis factores considerados para la ubicación de emplazamiento de presas; para esta comparación, atribuimos un valor del 1 al 9, de acuerdo a la escala de Saaty, según el grado de importancia del criterio 1 sobre el criterio 2. Con respecto a lo que hemos comentado, nos queda una tabla de la siguiente forma:

Tabla 5.17 Comparación pareada de los criterios

Comparación	Explicación	Valor
Condiciones geológicas vs Condiciones geotécnicas	El factor Condiciones geológicas es igualmente preferible en comparación al factor Condiciones geotécnicas	1
Condiciones geológicas vs Capacidad de almacenamiento	El factor Condiciones geológicas es entre igualmente y moderadamente preferible en comparación al factor Capacidad de almacenamiento	2
Condiciones geológicas vs Geometría de la boquilla	El factor Condiciones geológicas es entre moderadamente y fuertemente preferible en comparación al factor Geometría de la boquilla	4
Condiciones geológicas vs Producción de sedimentos	El factor Condiciones geológicas es moderadamente preferible en comparación al factor Producción de sedimentos	3
Condiciones geológicas vs Aspectos socio-ambientales	El factor Condiciones geológicas es entre moderadamente y fuertemente preferible en comparación al factor Aspectos socio-ambientales	4
Condiciones geotécnicas vs Capacidad de almacenamiento	El factor Condiciones geotécnicas es entre igualmente y moderadamente preferible en comparación al factor Capacidad de almacenamiento	2
Condiciones geotécnicas vs Geometría de la boquilla	El factor Condiciones geotécnicas es entre moderadamente y fuertemente preferible en comparación al factor Geometría de boquilla	4
Condiciones geotécnicas vs Producción de sedimentos	El factor Condiciones geotécnicas es moderadamente preferible en comparación al factor Producción de sedimentos	3
Condiciones geotécnicas vs Aspectos socio-ambientales	El factor Condiciones geotécnicas es entre moderadamente y fuertemente preferible en comparación a Aspectos socio-ambientales	4
Capacidad de almacenamiento vs Geometría de la boquilla	El factor Capacidad de almacenamiento es moderadamente preferible en comparación al factor Geometría de boquilla	3
Capacidad de almacenamiento vs Producción de sedimentos	El factor Capacidad de almacenamiento es moderadamente preferible en comparación al factor Producción de sedimentos	3
Capacidad de almacenamiento vs Aspectos socio-ambientales	El factor Capacidad de almacenamiento es moderadamente preferible en comparación a Aspectos socio-ambientales	3
Geometría de la boquilla vs Producción de sedimentos	El factor Producción de sedimentos es entre igualmente y moderadamente preferible en comparación a la Geometría de boquilla	1/2
Geometría de la boquilla vs Aspectos socio-ambientales	El factor Geometría de la boquilla es entre igualmente y moderadamente preferible en comparación a Aspectos socio-ambientales	2
Producción de sedimentos vs Aspectos socio-ambientales	El factor Producción de sedimentos es entre igualmente y moderadamente preferible en comparación a Aspectos socio-ambientales	2

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de proporcionar datos para los cálculos posteriores, los valores de cada par se almacenaron en forma de matriz, reflejando el análisis realizado en una matriz comparativa por pares.

Tabla 5.18 Matriz de comparación pareada de criterios

Criterios	Condiciones geológicas	Condiciones geotécnicas	Capacidad almacenamiento	Geometría de boquilla	Producción de sedimentos	Aspectos socio-ambientales
Condiciones geológicas	1	1	2	4	3	4
Condiciones geotécnicas	1	1	2	4	3	4
Capacidad almacenamiento	1/2	1/2	1	3	3	3
Geometría de la boquilla	1/4	1/4	1/3	1	1/2	2
Producción de sedimentos	1/3	1/3	1/3	2	1	2
Aspectos socio-ambientales	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1
SUMA	**0.33**	**0.33**	**6.00**	**15.50**	**11.00**	**16.00**

Fuente: Elaboración propia.

Sintetización

A continuación, se procede a dividir cada elemento de la matriz anterior entre la suma total de su columna, a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada. seguidamente, se calcula el promedio (Ponderación) de los elementos de cada fila de las prioridades relativas de los elementos que se compara, obteniendo la matriz o vector promedio; estos valores nos indican el peso relativo de cada criterio. Ver tabla 5.19.

Tabla 5.19 Matriz de comparación de criterios

Criterios	**Matriz Normalizada**						**Vector Promedio**	
Condiciones geológicas	0.30	0.30	0.33	0.28	0.27	0.25	0.289	(28.9 %)
Condiciones geotécnicas	0.30	0.30	0.33	0.28	0.27	0.25	0.289	(28.9 %)
Capacidad almacenamiento	0.15	0.15	0.17	0.21	0.27	0.19	0.189	(18.9 %)
Geometría de la boquilla	0.08	0.08	0.06	0.07	0.05	0.13	0.074	(7.4 %)
Producción de sedimentos	0.10	0.10	0.06	0.14	0.09	0.13	0.102	(10.2 %)
Aspectos socio-ambientales	0.08	0.08	0.06	0.03	0.05	0.06	0.058	(5.8 %)
SUMA							**1.00**	**100 %**

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 5.19, se puede apreciar que los factores Condiciones geológicas y Condiciones geotécnicas con un peso relativo de 0.289 poseen una mayor importancia frente al resto de parámetros respecto a su posibilidad para identificar zonas de emplazamiento de presas, mientras que el factor Aspecto socio-ambientales resultó ser el menos relevante con un peso relativo de 0.058.

Análisis de consistencia

Después de calcular las ponderaciones de cada criterio, para comprobar la representatividad de los valores resultantes con respecto al análisis realizado; es decir, si los juicios de valor emitidos son coherentes, es necesario comprobar la consistencia de los mismos.

El primer paso para determinar la relación de consistencia (RC), es multiplicar la matriz de comparación pareada original por el vector promedio, con el fin de determinar el vector fila total; luego se dividen los valores del vector fila total entre los valores del vector promedio, a este cociente se le denomina vector de consistencia; enseguida se calcula la media de estos valores para obtener el valor de consistencia promedio (λmax). Ver Tabla 5.20.

Tabla 5.20 Producto matricial y vector de consistencia

Criterios	Cálculo	Vector fila total	Vector de consistencia
Condiciones geológicas	1*0.289+1*0.289+2*0.189+4*0.074+3*0.102+4*0.058	1.79	6.196
Condiciones geotécnicas	1*0.289+1*0.289+2*0.189+4*0.074+3*0.102+4*0.058	1.79	6.196
Capacidad almacenamiento	0.5*0.289+0.5*0.289+1*0.189+3*0.074+3*0.102+3*0.058	1.18	6.238
Geometría de la boquilla	0.25*0.289+0.25*0.289+0.33*0.189+1*0.074+0.5*0.102+ 2*0.058	0.45	6.044
Producción de sedimentos	0.33*0.289+0.33*0.289+0.33*0.189+2*0.074+1*0.102+ 2*0.058	0.62	6.117
Aspectos socio-ambientales	0.25*0.289+0.25*0.289+0.33*0.189+0.25*0.074+ 0.25*0.102+ 1*0.058	0.35	6.089
λmax			**6.147**

Fuente: Elaboración propia.

Como segundo paso se determina el índice de consistencia (IC) según la fórmula de Aguarón & Moreno-Jiménez (2003):

$$IC = \frac{\lambda max - n}{n - 1} = \frac{6.147 - 6}{6 - 1} = 0.03$$

A continuación, se calcula el índice aleatorio (IA), el cual está en función de la cantidad de elemento que se comparan (n); según la formula:

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} = \frac{1.98(6 - 2)}{6} = 1.32$$

Finalmente, se calcula la relación de consistencia como el cociente entre el índice de consistencia y el índice aleatorio; resultando:

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.03}{1.32} = 0.02$$

Se obtiene un valor de la razón de consistencia de 0.02, lo cual es señal de un nivel razonable de consistencia, por lo que se procede a continuar con el análisis.

5.2.4. Valoración de alternativas según criterio

Una vez establecidos los criterios de evaluación y determinados sus pesos relativos mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), se procede a valorar cada una de las alternativas de emplazamiento de presa (Ejes 1, 2, 3 y 4) con relación a dichos criterios. Esta valoración es necesaria para construir la matriz de decisión del método TOPSIS, el cual se aplicará en el siguiente apartado para identificar el sitio óptimo.

La valoración de las alternativas se basa en dos enfoques complementarios:

- Enfoque técnico cuantitativo: Para criterios objetivos como volumen útil de almacenamiento o longitud del eje de cierre, se emplean directamente los valores numéricos obtenidos en las etapas previas de caracterización.
- Enfoque cualitativo interpretativo: Para criterios geológicos, geotécnicos, ambientales y de producción de sedimentos, se utiliza una escala ordinal de 1 a 7, basada en la evaluación experta e interpretaciones derivadas de los estudios de campo, perfiles topográficos, y análisis geoespaciales.

La escala de valoración adoptada es la siguiente:

Tabla 5.21 Escala de valoración propuesta

Valor	Descripción técnica general
1	Muy desfavorable
2	Desfavorable
3	Poco favorable
4	Moderadamente favorable
5	Favorable
6	Muy favorable
7	Óptimo / altamente favorable

Fuente: Elaboración propia.

Esta clasificación permite homogeneizar las valoraciones de criterios de naturaleza distinta y preparar la matriz para su normalización y análisis multicriterio. En las siguientes secciones (5.2.4.1 a 5.2.4.6), se presenta la justificación técnica y la asignación de puntajes para cada criterio.

5.2.4.1. Condiciones geológicas (C1)

Las condiciones geológicas fueron evaluadas en base a los datos recolectados durante las salidas de campo realizadas por el equipo técnico, complementados con la información hidrogeológica proporcionada por el estudio de INGEMMET (2021). El análisis se desarrolló considerando tres subcriterios: Geología del vaso (SC1), Geología de la zona de cierre (SC2) y Característica hidrogeológica (SC3).

Para cada alternativa se examinó la calidad litológica del macizo rocoso, el grado de fracturamiento, la presencia de materiales coluviales o aluviales, y la permeabilidad relativa del entorno. Se priorizaron aquellas configuraciones geológicas que favorecen la estabilidad del vaso y del cierre, así como una baja conductividad hidráulica.

Resumen técnico por alternativa:

- **Eje Presa 1**: El vaso está flanqueado por andesitas porfiríticas con disyunción columnar, altamente fracturadas y parcialmente cubiertas por depósitos coluviales con vegetación. El fondo del vaso está conformado por depósitos aluviales gruesos (bloques, gravas, arenas) con alta permeabilidad. La zona de cierre presenta estribos con roca fracturada, parcialmente cubierta por coluviales en la parte alta, y el cauce está constituido por depósitos fluviales polimícticos sueltos. Hidrogeológicamente, la zona corresponde a un acuífero

fisurado en andesita, con productividad media a baja. Estas condiciones indican una geología aceptable, pero con riesgos moderados de filtración y deformación diferencial, lo cual limita ligeramente su favorabilidad.

- **Eje Presa 2**: La geología del vaso está compuesta por andesitas porfiríticas y tobas cristalolíticas muy fracturadas, parcialmente cubiertas por depósitos coluvio-deluviales en el flanco derecho. El fondo presenta depósitos aluviales gruesos, pero más confinados que en la alternativa 1. La zona de cierre cuenta con andesitas similares, con condiciones estructurales más favorables, buena continuidad litológica y coluviales superficiales que pueden ser retirados. El estudio hidrogeológico clasifica esta zona como un acuitardo volcánico, con baja permeabilidad, lo cual es muy favorable para el control de filtraciones. En conjunto, esta alternativa presenta condiciones geológicas superiores en estabilidad, homogeneidad y comportamiento hidrogeológico.
- **Eje Presa 3**: Los flancos del vaso están formados por andesitas con niveles de arenisca y diques andesíticos, altamente fracturados. Se identificaron depósitos coluvio-deluviales de espesor moderado. La roca en el estribo derecho es regular, con un RMR de clase III, mientras que el izquierdo requiere remoción de depósitos sueltos antes de cimentar. El fondo del vaso contiene materiales similares a los de las otras alternativas, con predominancia de gravas y arenas. Hidrogeológicamente, el sector se clasifica como un acuitardo volcánico sedimentario, es decir, de permeabilidad intermedia. Aunque presenta características razonables, la litología heterogénea y los depósitos más profundos de materiales sueltos lo hacen menos favorable que las alternativas 2 y 4.
- **Eje Presa 4**: Este eje está conformado por flancos de andesitas y areniscas parcialmente metamorfoseadas, con roca de buena calidad estructural en ambos estribos. Se identifican depósitos coluviales localizados que pueden ser fácilmente removidos. El fondo del vaso está constituido por materiales aluviales gruesos con buen drenaje. La zona de cierre tiene una morfología angosta y estructuralmente estable. Según INGEMMET, esta área corresponde a un acuitardo volcánico, con baja permeabilidad, lo cual reduce el riesgo de pérdidas por filtración. Se observan buenas condiciones de continuidad

litológica y estructura favorable, haciendo de este eje una de las opciones más seguras desde el punto de vista geológico.

A continuación, se presenta la valoración asignada a cada alternativa en una escala de 1 a 7, según el grado de favorabilidad geológica:

Tabla 5.22 Valoración de alternativas según Condiciones geológicas (C1)

Alternativa	Resumen geológico	Valoración
Eje Presa 1	Andesitas porfiríticas muy fracturadas, coluviales en estribos, fondo con aluvión grueso; acuífero fisurado de media a baja productividad.	3
Eje Presa 2	Andesitas y tobas cristalolíticas fracturadas; coluviales removibles en zona de cierre; acuitardo volcánico de baja permeabilidad.	6
Eje Presa 3	Andesitas con diques y niveles de arenisca muy fracturados; acuitardo volcánico sedimentario con permeabilidad moderada.	5
Eje Presa 4	Andesitas con diques fracturados y coluviales en zona baja; acuitardo volcánico de baja permeabilidad.	7

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.2. Condiciones geotécnicas (C2)

Las condiciones geotécnicas fueron evaluadas considerando las características mecánicas y estructurales del macizo rocoso y de los suelos de fundación identificados en campo, así como los resultados de ensayos de laboratorio, geofísica y estimaciones mediante clasificación geomecánica. El análisis se desarrolló bajo los siguientes subcriterios: Clasificación geomecánica (RMR, Q de Barton, GSI); Capacidad portante del macizo rocoso o suelos; Ángulo de fricción interna y cohesión.

Los criterios técnicos incluyen parámetros como RMR de Bieniawski, resistencia a la compresión simple (UCS), cohesión (c), ángulo de fricción (φ), módulo de deformación, resistividad eléctrica y rigidez sísmica, que permiten estimar la calidad del soporte de cimentación para cada alternativa. A partir de esta información, se asignaron valoraciones relativas sobre una escala de 1 a 7, donde 7 representa las mejores condiciones geotécnicas.

Resumen técnico por alternativa:

- **Eje Presa 1**: Ambos estribos se asientan sobre andesitas porfiríticas muy fracturadas, con un RMR estimado de 50 (roca regular) y RQD entre 25–50% (mala calidad). La resistencia a la compresión simple oscila entre 50 y 100 MPa. La capacidad portante de la roca varía de 2.9 a 6.3 MPa, dependiendo de la profundidad. El fondo del valle presenta depósitos fluviales clasificados como gravas mal gradadas (GP), medianamente densos. Estas condiciones se consideran aceptables, aunque menos favorables en comparación con otras alternativas.
- **Eje Presa 2**: Presenta las mejores condiciones geotécnicas. Los estribos están conformados por andesitas de calidad regular a buena, con RMR de hasta 61, GSI de 63 y una resistencia uniaxial del orden de 175 MPa. La cohesión estimada es de 1.13 MPa y el ángulo de fricción de 58.5°. La capacidad portante calculada mediante el método de Serrano y Olalla alcanza hasta 13.4 MPa a 2 m de profundidad. Los ensayos geofísicos confirman buena rigidez y baja meteorización del macizo. Esta alternativa presenta condiciones geotécnicas óptimas para cimentación directa en roca.
- **Eje Presa 3**: Se identifican andesitas con diques muy fracturados, particularmente en el estribo izquierdo, con RMR cercano a 50 y RQD de 25–50%. La roca se clasifica como regular. La capacidad portante estimada del macizo rocoso varía entre 6.3 y 11.8 MPa. En el fondo del valle, se hallan depósitos granulares similares a los del eje 1, clasificados como GP. Las condiciones son adecuadas, pero presentan mayor incertidumbre por la heterogeneidad litológica y presencia de coluviales en un estribo.
- **Eje Presa 4**: Esta alternativa presenta una secuencia de areniscas parcialmente metamorfoseadas de buena calidad (tipo II), con RMR de hasta 61 y resistencia a la compresión de 200 MPa. La cohesión estimada es de 11.05 MPa y el ángulo de fricción de 32.9°. La capacidad portante del macizo rocoso alcanza 19.4 MPa a 2 m de profundidad. Los ensayos de resistividad eléctrica y refracción sísmica muestran alta rigidez, especialmente en el estribo derecho. Estas condiciones hacen de este eje una opción técnicamente muy favorable desde el punto de vista geotécnico.

Tabla 5.23 Valoración de alternativas según Condiciones geotécnicas (C2)

Alternativa	Resumen geotécnico	Valoración
Eje Presa 1	Andesita muy fracturada (RMR≈50, RQD 25–50%), cohesión baja (2.9–6.3 MPa), Ø ≈ 35°, capacidad portante en roca 2.9–6.3 MPa. Fondo con sedimentos GP, medianamente densos.	4
Eje Presa 2	Andesita de mejor calidad (RMR 61), GSI 63, cohesión 1.13 MPa, Ø 58.5°, capacidad portante de roca hasta 13.4 MPa. Mejor calidad en estribos.	7
Eje Presa 3	Andesita con diques, RMR regular (≈50), capacidad portante de roca estimada 6.3–11.8 MPa. Cauce con GP medianamente denso.	5
Eje Presa 4	Arenisca parcialmente metamorfoseada (RMR 61), GSI 63, cohesión 11.05 MPa, Ø 32.9°, capacidad portante de roca hasta 19.4 MPa. Buena rigidez según geofísica.	6

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.3. Capacidad de almacenamiento (C3)

La capacidad de almacenamiento fue evaluada tomando en cuenta el volumen total del vaso, calculado en la zona de cierre de cada eje propuesto a partir del modelo topográfico y curvas altitud–área–volumen desarrolladas para cada alternativa. Adicionalmente, se consideró de forma complementaria la condición geológica del fondo del vaso, la cual influye en la eficiencia hidráulica del embalse y en el tratamiento necesario para garantizar su estanqueidad.

Se priorizó el volumen total como variable principal de comparación, dado que expresa directamente el potencial de regulación hídrica de cada alternativa. Los valores obtenidos se utilizarán de forma directa en la matriz de decisión del método TOPSIS, pues constituyen datos cuantitativos objetivos y comparables. Al tratarse de un criterio medible y técnicamente fundamentado, no requieren transformación a escalas ordinales, permitiendo así preservar la proporcionalidad real entre alternativas.

Resumen técnico por alternativa:

- **Eje Presa 1**: Presenta un volumen total de almacenamiento de 5.20 millones de metros cúbicos (MMC). El vaso está conformado principalmente por depósitos aluviales gruesos de alta permeabilidad, lo que reduce su eficiencia de retención y podría requerir tratamiento de fondo adicional.
- **Eje Presa 2**: Alcanza un volumen total de 12.00 MMC. Si bien presenta suelos de permeabilidad media, la configuración geométrica del vaso permite un mejor aprovechamiento volumétrico. Es una alternativa eficiente en cuanto a volumen de regulación.

- **Eje Presa 3**: Tiene también un volumen total de 12.00 MMC, pero se diferencia por presentar una litología heterogénea en el fondo del vaso, lo que podría afectar la continuidad de almacenamiento y aumentar los requerimientos de control hidráulico.
- **Eje Presa 4**: Se destaca por ofrecer la mayor capacidad de almacenamiento con 15.00 MMC. La estructura geológica del vaso es favorable, con materiales de permeabilidad moderada a baja y una configuración eficiente para la retención de volúmenes significativos.

Tabla 5.24 Valoración de alternativas según Capacidad de almacenamiento (C3)

Alternativa	Volumen total de almacenamiento (MMC)	Condición geológica del vaso
Eje Presa 1	5.20	Vaso sobre depósitos aluviales permeables
Eje Presa 2	12.00	Vaso con coluviales y aluviales intermedios
Eje Presa 3	12.00	Vaso con litología heterogénea
Eje Presa 4	15.00	Vaso con estructura favorable y permeabilidad moderada

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.4. Geometría de la boquilla (C4)

La evaluación de la geometría de la boquilla se realizó tomando en cuenta la topografía específica de la zona de cierre en cada eje propuesto, con el objetivo de identificar configuraciones naturales más favorables para el emplazamiento de la presa. Se consideraron tres subcriterios principales:

Topografía de la zona de cierre: Se valoró la forma y estrechez del valle, evaluando la presencia de boquillas angostas, simétricas y con condiciones naturales que reduzcan el volumen de obra requerido.

Longitud del eje de presa: Se utilizaron los valores calculados directamente en planta, priorizando ejes más cortos que implican menores volúmenes de relleno, menor inversión en materiales y menores probabilidades de discontinuidades estructurales.

Altura de presa: Se consideró la altura estructural propuesta en cada eje, reconociendo que presas más altas implican mayores esfuerzos estructurales y mayores cargas hidrostáticas, aunque también pueden reflejar una mejor capacidad de embalse.

Los datos utilizados fueron obtenidos del análisis topográfico en planta y de las secciones de boquilla descritos en el ítem 5.2.1.

Resumen técnico por alternativa:

- **Eje Presa 1**: Presenta una boquilla angosta con buena configuración topográfica, lo que permite una longitud de eje de solo 153.00 m y una altura de presa de 83.10 m. Es una de las alternativas con mejores condiciones geométricas para el cierre estructural.
- Eje Presa 2: La boquilla es más ancha y el eje de cierre alcanza los 270.00 m de longitud, con una altura de presa de 78.60 m. Aunque el volumen regulado es elevado, la geometría implica mayores cantidades de obra.
- Eje Presa 3: Tiene una longitud de eje intermedia (196.00 m) y una altura de presa de 71.30 m. La configuración del valle es moderadamente angosta, aunque asimétrica, lo que puede aumentar los movimientos de tierra requeridos.
- Eje Presa 4: Es la alternativa con la mayor altura de presa (85.00 m) y también la longitud más extensa (320.00 m). La boquilla presenta una sección amplia, lo cual implica mayores volúmenes de construcción y costos asociados, aunque está compensado por el alto volumen de almacenamiento.

Con base en estos parámetros, se realizó una valoración cualitativa en escala de 1 a 7, considerando la eficiencia geométrica de la boquilla en cada eje propuesto.

Tabla 5.25 Valoración de alternativas según Geometría de la boquilla (C4)

Alternativa	Resumen de la geometría de boquilla	Valoración
Eje Presa 1	Boquilla angosta y profunda; eje corto (153 m) y altura adecuada (83.10 m); configuración eficiente.	7
Eje Presa 2	Boquilla más ancha; eje largo (270 m) y altura media (78.60 m); mayor volumen de obra.	5
Eje Presa 3	Boquilla intermedia y asimétrica; eje de 196 m y altura de 71.30 m; geometría regular.	6
Eje Presa 4	Boquilla amplia; eje muy largo (320 m) y altura elevada (85.00 m); mayores costos estructurales.	4

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.5. Producción de sedimentos

Este criterio evalúa el volumen anual de sedimentos que llega al eje de la presa desde las cuencas de aporte ubicadas aguas arriba. La estimación se realizó mediante un estudio especializado de producción de sedimentos, utilizando el modelo de Gavrilovic, con base en datos climáticos, topográficos, geológicos y de cobertura vegetal. El modelo considera variables como el coeficiente de erosión (Z), la precipitación, el uso del suelo y la pendiente media, y fue aplicado a través de un análisis SIG de alta resolución espacial.

Para cada eje propuesto se calculó el volumen de sedimentos que alcanza la sección de cierre, considerando el coeficiente de retención específico de cada cuenca de aporte. Los valores obtenidos reflejan el impacto erosivo esperado sobre el embalse, condicionando su vida útil y los requerimientos de mantenimiento.

Resumen técnico por alternativa:

- **Eje Presa 1**: Registra el menor volumen anual de sedimentos con aproximadamente 0.119 MMC/año, debido a que su cuenca de aporte es reducida, con pendientes moderadas y cobertura vegetal parcialmente conservada. Esto sugiere una menor afectación por colmatación, lo que favorecería una mayor vida útil del embalse.
- **Eje Presa 2**: Se estima una producción de sedimentos de 0.156 MMC/año. La cuenca de drenaje es más extensa que la del Eje 1, con zonas parcialmente intervenidas y sectores con deforestación localizada. El aporte es intermedio y requerirá estrategias de manejo sedimentológico.
- **Eje Presa 3**: Presenta una tasa de producción de sedimentos más elevada, con 0.174 MMC/año, debido a la presencia de subcuencas con alta pendiente, uso agrícola intensivo y menor cobertura boscosa. Esto puede traducirse en una mayor frecuencia de operaciones de limpieza y mayor vulnerabilidad a la colmatación.
- **Eje Presa 4**: Es la alternativa con mayor volumen de aporte sedimentario (0.177 MMC/año). Su ubicación aguas abajo abarca casi la totalidad de la cuenca, incluyendo zonas de alta erosión y uso intensivo del suelo. Esta

condición representa un factor limitante para la sostenibilidad del embalse en el largo plazo si no se contemplan medidas de control.

Los valores de producción anual de sedimentos obtenidos para cada alternativa, expresados en millones de metros cúbicos por año (MMC/año), serán utilizados de forma directa en la matriz de decisión del método TOPSIS. Al tratarse de un criterio cuantitativo objetivo derivado de un estudio técnico especializado, no se requiere su transformación a una escala ordinal, lo que permite preservar la proporcionalidad real entre alternativas en términos del impacto sedimentológico esperado.

Tabla 5.26 Valoración de alternativas según Producción de sedimentos (C5)

Alternativa	Volumen de sedimentos (MMC/año)	Observaciones
Eje Presa 1	0.119	Menor volumen; menor cuenca de aporte.
Eje Presa 2	0.156	Volumen intermedio; cuenca de aporte extensa.
Eje Presa 3	0.174	Alto aporte sedimentario; múltiples subcuencas.
Eje Presa 4	0.177	Mayor volumen; incluye casi toda la cuenca

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.6. Aspectos socioambientales

La evaluación de los impactos socio-ambientales para cada alternativa de emplazamiento de presa se desarrolló considerando tres subcriterios específicos: Afectación de centros poblados, Afectación de infraestructura civil y Afectación de tierras de cultivo.

El análisis se basó en la superposición de las áreas inundables proyectadas con imágenes satelitales actualizadas, ortofotos de alta resolución, y cartografía temática del área de estudio. Esta información fue validada con datos recolectados durante las visitas técnicas de campo, lo que permitió precisar la ubicación de viviendas, centros poblados, redes viales y áreas agrícolas dentro de la zona de influencia directa del embalse.

Dado que los tres subcriterios presentan naturaleza diversa y unidades distintas, se optó por integrar los resultados en una valoración sintética en escala ordinal de 1 a 7,

utilizando un enfoque cualitativo interpretativo basado en la magnitud del impacto observado. En dicha escala, el valor 1 representa menor afectación y el valor 7 representa el mayor impacto.

Resumen técnico por alternativa:

- **Presa 1**: Presenta afectación directa al centro poblado de Huaticaaya (6,384 m² de área urbana), además de interferencia con 1,902 m de vía principal. No se identificó afectación significativa a tierras agrícolas.
- **Presa 2**: Inundaría aproximadamente 1,788.7 m² de zona habitada, impacta tanto una vía principal (1,134 m) como un tramo de trocha (732 m), y compromete 7.9 ha de cultivos frutales.
- **Presa 3**: Genera afectación a población rural (2,899.8 m²) y carretera principal (1,399 m), además de interferir con 5.7 ha de áreas agrícolas.
- **Presa 4**: Muestra la menor afectación general: 230 m² de población dispersa, 1,396 m de vía principal y solo 0.9 ha de terrenos agrícolas ubicados en faja marginal del río.

Tabla 5.27 Valoración de alternativas según criterio Socioambiental (C6)

Alternativa	Resumen de afectaciones socio ambientales	Valoración
Eje Presa 1	Afectación urbana alta (6,384 m²), vía principal (1,902 m), sin tierras agrícolas.	7
Eje Presa 2	Afectación urbana media, vías combinadas (1,134 m + 732 m), cultivos moderados (7.9 ha).	4
Eje Presa 3	Afectación urbana media a alta (2,899.8 m²), vía principal (1,399 m), cultivos moderados (5.7 ha).	5
Eje Presa 4	Afectación urbana muy baja, vía principal (1,396 m), cultivos menores (0.9 ha).	2

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5. Aplicación del método TOPSIS

A continuación, se aplica el método TOPSIS para seleccionar el mejor sitio de emplazamiento de presa entre las cuatro alternativas propuestas en la cuenca del río Lurín. Para ello, se han seguido siete etapas, detalladas a continuación:

5.2.5.1. Construcción de la matriz de decisión

A partir de los valores de desempeño de cada alternativa frente a los seis criterios definidos en el análisis AHP (Condiciones geológicas, Condiciones geotécnicas, Capacidad de almacenamiento, Geometría de la boquilla, Producción de sedimentos y Aspectos socioambientales), se construyó la matriz de decisión del método TOPSIS (Matriz 1). Esta matriz reúne tanto valores cualitativos (valoraciones en escala de 1 a 7) como cuantitativos (volumen de almacenamiento y volumen de sedimentos), los cuales serán normalizados para hacerlos comparables entre sí.

Los pesos de cada criterio fueron obtenidos mediante el análisis jerárquico AHP (ver ítem 5.2.3), y son utilizados para ponderar la matriz normalizada. La tabla siguiente muestra los datos de entrada que constituyen la base para el análisis TOPSIS.

Tabla 5.28 Matriz de decisión TOPSIS

Pesos	0.289	0.289	0.189	0.074	0.102	0.057
Matriz 1						
Alternativa/ Criterios	Condiciones geológicas	Condiciones geotécnicas	Capacidad almacenamiento	Geometría de boquilla	Producción sedimentos	Asp. socio-ambientales
Presa 1	3	4	5.20	7	0.119	7
Presa 2	6	7	12.00	5	0.156	4
Presa 3	5	5	12.00	6	0.174	5
Presa 4	7	6	15.00	4	0.177	2

5.2.5.2. Normalización de la matriz

Se procede a elevar cada miembro de la matriz 1 al cuadrado y se suman las cantidades por columna, para finalmente calcular la raíz cuadrada del total. Ver tabla 5.29.

Tabla 5.29 Matriz de cuadrados y raíces para normalización vectorial

Matriz 2						
Alternativa/ Criterios	Condiciones geológicas	Condiciones geotécnicas	Capacidad almacenamiento	Geometría de boquilla	Producción sedimentos	Asp. socio-ambientales
Presa 1	9	16	27.04	49	0.01416	49
Presa 2	36	49	144.00	25	0.02434	16
Presa 3	25	25	144.00	36	0.03028	25
Presa 4	49	36	225.00	16	0.03133	4
Total	119	126	540.04	126	0.10010	94
Raíz	**10.90871**	**11.22497**	**23.23876**	**11.22497**	**0.31639**	**9.69536**

En seguida, se divide cada elemento de la matriz 1 entre la raíz cuadrada de la sumatoria para calcular la matriz 3 (Matriz normalizada TOPSIS).

Tabla 5.30 Matriz Normalizada TOPSIS

Matriz 3						
Alternativa/ Criterios	Condiciones geológicas	Condiciones geotécnicas	Capacidad almacenamiento	Geometría de boquilla	Producción sedimentos	Asp. socio-ambientales
Presa 1	0.275010	0.356348	0.223764	0.623610	0.376119	0.721995
Presa 2	0.550019	0.623610	0.516379	0.445435	0.493064	0.412568
Presa 3	0.458349	0.445435	0.516379	0.534522	0.549956	0.515711
Presa 4	0.641689	0.534522	0.645473	0.356348	0.559438	0.206284

5.2.5.3. Ponderación y determinación de las soluciones ideal positiva y negativa

A continuación, se procede a multiplicar cada elemento de la matriz normalizada (Matriz 3) por su respectivo peso o ponderación obtenida mediante el método AHP. El resultado es la Matriz 4, conocida como matriz normalizada ponderada, la cual se muestra en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31 Matriz normalizada ponderada

Matriz 4						
Alternativa/ Criterios	Condiciones geológicas	Condiciones geotécnicas	Capacidad almacenamiento	Geometría de boquilla	Producción sedimentos	Asp. socio-ambientales
Presa 1	0.079478	0.102985	0.042291	0.046147	0.038364	0.041154
Presa 2	0.158956	0.180223	0.097596	0.032962	0.050293	0.023516
Presa 3	0.132463	0.128731	0.097596	0.039555	0.056096	0.029396
Presa 4	0.185448	0.154477	0.121994	0.026370	0.057063	0.011758
A+	0.185448	0.180223	0.121994	0.046147	0.038364	0.011758
A-	0.079478	0.102985	0.042291	0.026370	0.057063	0.041154

La matriz resultante permite establecer los valores que adoptan las alternativas respecto a cada criterio, ya incorporando la importancia relativa de cada uno (ponderaciones). Esta matriz constituye la base para identificar las soluciones ideal positiva (A^+) e ideal negativa (A^-), necesarias en el método TOPSIS.

En este contexto:

- La solución ideal positiva (A^+) corresponde a los valores más altos para criterios de beneficio (como capacidad de almacenamiento o condiciones geológicas favorables) y valores más bajos para criterios de costo o impacto (como producción de sedimentos o afectación socioambiental).
- La solución ideal negativa (A^-) representa lo opuesto: los peores valores para criterios de beneficio y los mejores valores (más bajos) para criterios de impacto.

De esta forma, la tabla incluye los valores extremos de cada criterio, marcados como A^+ y A^- respectivamente, que servirán como referencia para calcular la cercanía relativa de cada alternativa a la solución óptima.

5.2.5.4. Cálculo de la distancia euclidiana

A continuación, se procede a calcular la distancia euclidiana entre cada alternativa y las soluciones ideal positiva y negativa. Para ello, se sigue el siguiente procedimiento:

A) <u>Distancia a la solución ideal positiva A^+</u>

Se resta a cada elemento de la Matriz 4 el valor correspondiente de la solución ideal positiva (A^+), y el resultado se eleva al cuadrado. Luego, se suman horizontalmente los valores de cada fila y se extrae la raíz cuadrada de dicha suma. Esto da como resultado la distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva, representada como D^+. Ver tabla 5.32.

Tabla 5.32 Cálculo de la distancia euclidiana a la solución ideal positiva

Alternat./ Criterios	Cond. Geológ.	Cond. Geotécnic.	Capacidad almacen.	Geomet. boquilla	Prod. Sediment.	Asp. socio-ambientales	Suma	Di^+
Presa 1	0.011230	0.005966	0.006353	0.000000	0.000000	0.000864	0.024412	0.156244
Presa 2	0.000702	0.000000	0.000595	0.000174	0.000142	0.000138	0.001752	0.041851
Presa 3	0.002807	0.002651	0.000595	0.000043	0.000314	0.000311	0.006723	0.081995
Presa 4	0.000000	0.000663	0.000000	0.000391	0.000350	0.000000	0.001404	0.037465

B) <u>Distancia a la solución ideal negativa A^-</u>

De manera análoga, se calcula la distancia a la solución ideal negativa (A^-) restando a cada elemento de la Matriz 4 el valor correspondiente de la solución A^-, elevando al cuadrado el resultado. Nuevamente, se suman horizontalmente los valores obtenidos y se calcula la raíz cuadrada para cada alternativa. Esto permite obtener la distancia a la solución negativa, representada como D^-. Ver tabla 5.33.

Tabla 5.33 Cálculo de la distancia euclidiana a la solución ideal negativa

Alternat./ Criterios	Cond. Geológ.	Cond. Geotécnic.	Capacidad almacen.	Geomet. boquilla	Prod. Sediment.	Asp. socio-ambientales	Suma	Di^-
Presa 1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000391	0.000350	0.000000	0.000741	0.027217
Presa 2	0.006317	0.005966	0.003059	0.000043	0.000046	0.000311	0.015741	0.125465
Presa 3	0.002807	0.000663	0.003059	0.000174	0.000001	0.000138	0.006842	0.082716
Presa 4	0.011230	0.002651	0.006353	0.000000	0.000000	0.000864	0.021098	0.145251

5.2.5.5. Cálculo del índice de cercanía (Ci) y jerarquización final de alternativas

El índice de cercanía Ci representa la proximidad relativa de cada alternativa con respecto a la solución ideal. Este valor se obtuvo dividiendo la distancia al ideal negativo entre la suma de ambas distancias.

Las alternativas se ordenan de mayor a menor según su valor de Ci, siendo preferible aquella con mayor cercanía a la solución ideal. En este estudio, los valores obtenidos para cada eje de presa se presentan en la Tabla 5.34.

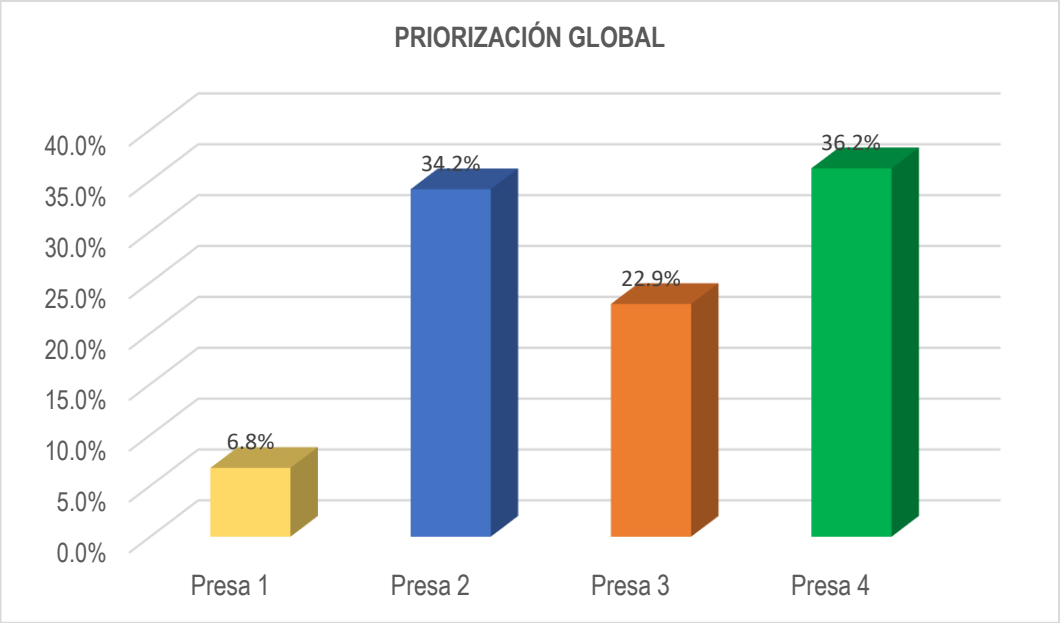
Tabla 5.34 Resultados del método TOPSIS

Alternativa	Índice de cercanía	Ranking	Priorización
Presa 1	0.14835	4	6.8 %
Presa 2	0.74987	2	34.2 %
Presa 3	0.50219	3	22.9 %
Presa 4	0.79495	1	36.2%

Fuente: Elaboración propia.

A modo ilustrativo, en la Figura 5.30 se presenta la priorización global de las alternativas de eje de presa, evidenciando la alternativa con mayor idoneidad para el emplazamiento.

Figura 5.30 Porcentaje de priorización global de Eje de presas



Fuente: Elaboración propia

5.2.6. Conclusión del análisis TOPSIS

El análisis multicriterio mediante el método TOPSIS permitió establecer con claridad que la Alternativa 4 es la más idónea para el emplazamiento de la presa, al obtener el mayor índice de cercanía (Ci = 0.79495), lo que la posiciona en el primer lugar del ranking, con un 36.2 % de preferencia. Esta alternativa destaca por ofrecer una alta capacidad de almacenamiento, condiciones geológicas y geotécnicas favorables, y una reducida afectación socioambiental en comparación con las demás opciones evaluadas.

En contraste, la Alternativa 1 resultó ser la menos favorable, ubicándose en el último lugar del ranking, con un 6.8 %, debido principalmente a su baja capacidad de almacenamiento y una mayor afectación a zonas urbanas.

Con base en este resultado, se selecciona la Alternativa 4 como el eje definitivo para la construcción de la presa en la cuenca del río Lurín. En el siguiente ítem se procederá con la evaluación del tipo de presa óptimo que mejor se adapte a las condiciones del sitio seleccionado.

5.3. Selección del tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín

Una vez identificado el sitio más adecuado para el emplazamiento de la presa (Alternativa 4), resulta necesario definir el tipo de estructura más conveniente para dicho contexto. La selección del tipo de presa constituye una decisión estratégica que debe considerar múltiples factores técnicos, geotécnicos, constructivos, económicos y ambientales. En este sentido, se ha optado por aplicar el método Analytic Hierarchy Process (AHP) propuesto por Saaty (1980), el cual permite estructurar decisiones complejas a través de comparaciones por pares entre alternativas y criterios.

Para la implementación del AHP, se utilizó el software Expert Choice, y el análisis fue realizado por el autor del estudio, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos para la consistencia de los juicios. El objetivo es determinar la tipología de presa que mejor se adapte a las condiciones particulares del eje seleccionado en la cuenca del río Lurín.

5.3.1. Planteamiento de alternativas de tipos de presa

Se definieron cinco alternativas representativas de presas, seleccionadas en función de las tipologías más empleadas en proyectos hidráulicos de características similares al presente estudio, abarcando tanto presas de materiales sueltos como presas de concreto. La formulación de estas alternativas responde a la necesidad de contar con un abanico de opciones técnicamente viables que permitan realizar un análisis comparativo integral.

Estas cinco alternativas se plantean con el fin de evaluar comparativamente sus ventajas y limitaciones en términos técnicos, económicos y constructivos. Cada alternativa se describe en función de su configuración estructural, materiales constitutivos, comportamiento hidráulico y condiciones constructivas.

Asimismo, para cada alternativa se elaboró un presupuesto referencial de construcción, con precios unitarios actualizados a agosto de 2024, tomando como base proyectos de presas de características similares en el ámbito nacional. Los metrados incluyeron las partidas principales de cuerpo de presa y tratamiento de fundación, a lo que se sumó un porcentaje asignado a obras conexas (aliviadero, toma de fondo, sistema de desvío, ataguías y obras complementarias), dada su significativa incidencia en el costo total.

En el caso de las presas de materiales sueltos, se consideró un 25 % adicional, debido a que la mayoría de sus obras conexas deben construirse fuera del cuerpo de presa (por ejemplo, ataguías de desvío, canales de coronación o estructuras independientes). En contraste, para las presas de concreto, se aplicó un 10 % adicional, ya que gran parte de sus obras conexas pueden integrarse dentro del propio cuerpo de presa (aliviaderos o tomas embebidas), reduciendo su incidencia relativa en el presupuesto.

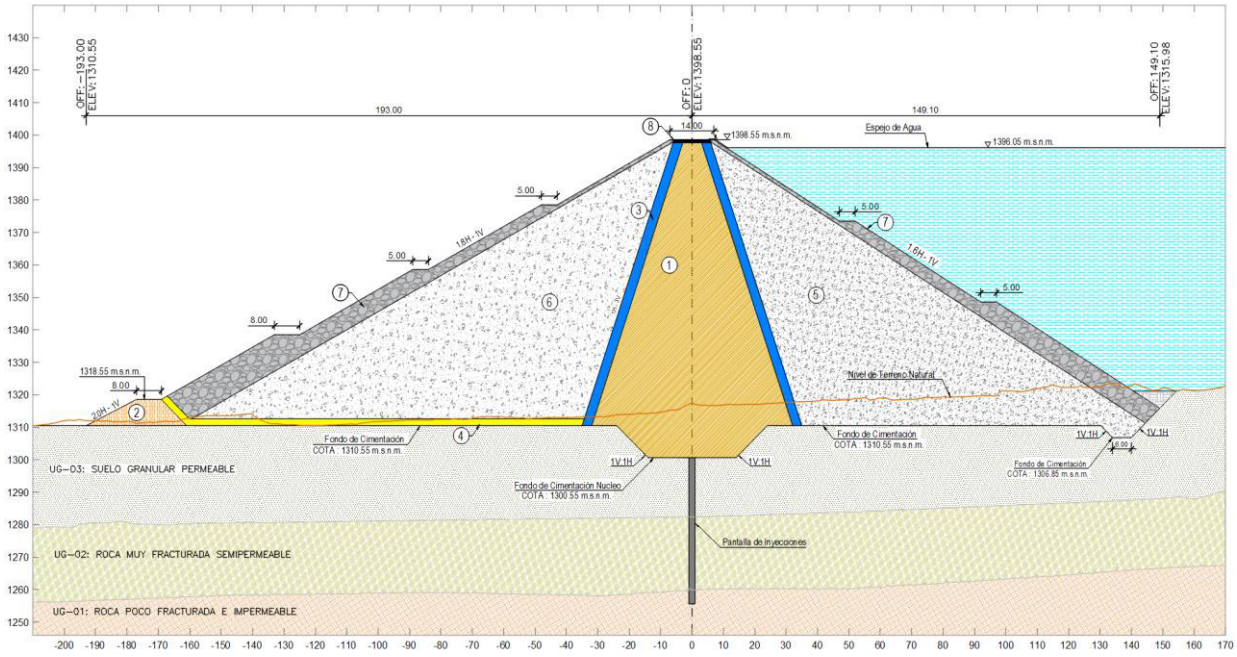
De este modo, los costos directos presentados permiten una comparación homogénea entre alternativas, constituyendo un insumo fundamental para la evaluación técnico-económica en el marco del análisis multicriterio.

Alternativa A: Presa de Tierra y Enrocado con Núcleo Central Impermeable (TENCI)

Se plantea una presa de tierra y enrocado con núcleo central impermeable, conformada por un núcleo arcilloso de baja permeabilidad ubicado en posición central, que actúa como elemento impermeabilizante. Este núcleo se encuentra confinado por espaldones de enrocado o material granular de mayor resistencia, que proporcionan estabilidad global y control de esfuerzos. La disposición central del núcleo favorece una distribución simétrica de presiones hidrostáticas y un trayecto de filtración más largo, reduciendo gradientes hidráulicos y el riesgo de erosión interna.

En la Figura 5.31 se presenta la sección transversal típica de esta alternativa, en la que se distinguen el núcleo impermeable, los espaldones aguas arriba y aguas abajo, los filtros, drenes y el enrocado de protección.

Figura 5.31 Sección transversal típica de presa Alternativa A



Fuente: Elaboración propia

Leyenda:

1) *Núcleo Impermeable (CL, SC/SM, GC);* ***2)*** *Dren;* ***3)*** *Filtro fino (arena);* ***4)*** *Filtro grueso (grava);* ***5)*** *Espaldón aguas arriba (SM-GC-GM);* ***6)*** *Espaldón aguas abajo (SM-GC-GM);* ***7)*** *Enrocado de protección* ***8)*** *Afirmado para camino de acceso en corona.*

Parámetros principales de diseño:

- Nivel de agua mínimo (NAMIN) 1 345.30 msnm
- Nivel de agua máx. ordinario (NAMO) 1 396.05 msnm
- Nivel de agua máx. extraordinario (NAME) 1 397.38 msnm
- Bordo libre 2.50 m
- Elevación de la coronación 1 398.55 msnm
- Elevación del cauce (sitio de presa) 1 317.35 msnm
- Altura máxima de la presa 98.00 m
- Volumen útil de embalse 13.00 MMC
- Volumen muerto 2.00 MMC
- Longitud de coronación 346.00 m
- Talud aguas arriba 1.6H:1V
- Talud aguas abajo 1.8H:1V

Presupuesto referencial de obra: S/ 296,819,057.06

Tabla 5.35 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa A (TENCI)

ALT. A	PRESA TENCI				
ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	METRADOS	P.U. (S/.)	P. PARCIAL (S/.)
1.00	**Cuerpo de Presa**				229,956,979.79
1.01	Relleno compactado de núcleo arcilloso	m3	1,206,780.46	74.5	89,905,144.27
1.02	Relleno compactado de espaldones	m3	2,010,809.40	46.08	92,658,097.15
1.03	Relleno para filtros	m3	147,704.70	68.26	10,082,323.10
1.04	Enrocado de los taludes	m3	513,390.23	68.02	34,920,803.44
1.05	Relleno para dren de protección	m3	5,676.26	68.26	387,461.17
1.06	Concreto en pantalla de inyecciones	m3	3,748.06	534.45	2,003,150.67
2.00	**Tratamiento de fundación**				7,498,265.85
2.01	Excavación de material aluvial seco	m3	6,245.94	8.50	53,090.49
2.02	Excavación de material aluvial húmedo	m3	2,058.00	14.08	28,976.64
2.03	Excavación de roca seca	m3	352.00	45.36	15,966.72
2.04	Inyecciones de impermeabilización	m	6,166.86	1,200.00	7,400,232.00
2.05	Inyecciones de consolidación	m	0.00	1,200.00	0.00
3.00	**Obras conexas (25% del costo total)**				59,363,811.41
		Costo Directo Total			**296,819,057.06**

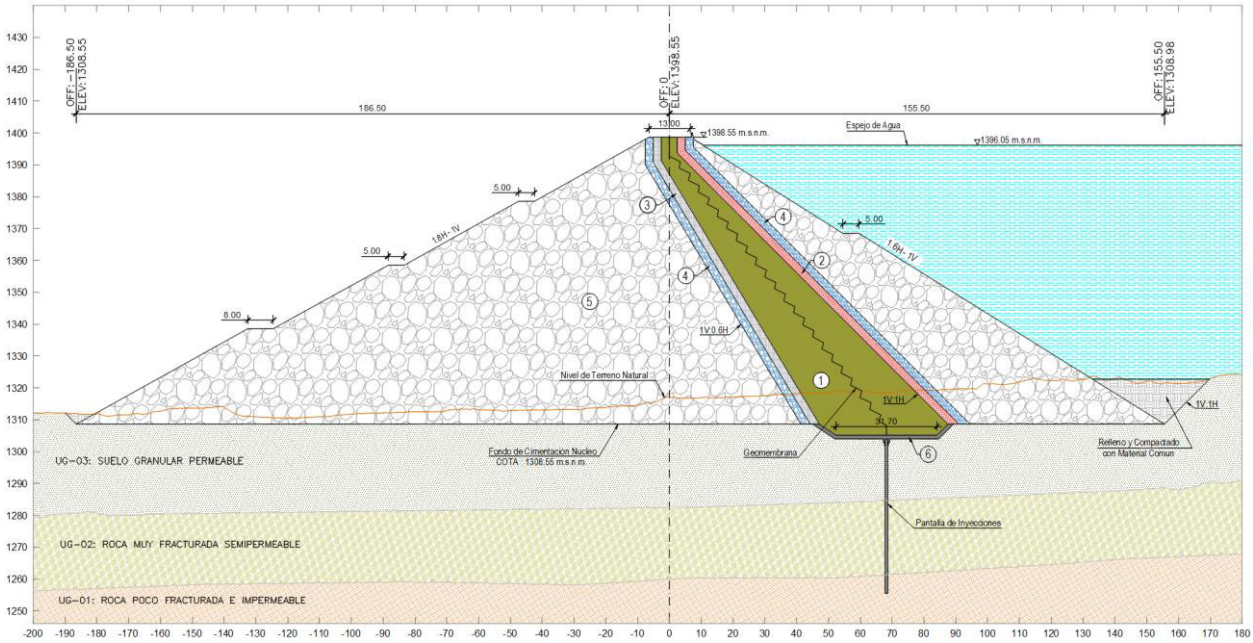
Fuente: Elaboración propia

Alternativa B: Presa de Enrocado con Núcleo Inclinado Impermeable (ENII)

Se plantea una presa de enrocado con núcleo inclinado impermeable (ENII), conformada por un macizo principal de enrocado que actúa como estructura resistente, dentro del cual se dispone un núcleo arcilloso de baja permeabilidad inclinado hacia el paramento de aguas arriba. Esta configuración permite reducir el volumen de material impermeable respecto a un núcleo central, facilitando la construcción cuando la disponibilidad de arcilla es limitada. El enrocado externo brinda estabilidad estructural y protege al núcleo frente a la acción hidráulica y sísmica.

En la Figura 5.32 se presenta la sección transversal típica de esta alternativa, donde se distinguen el núcleo impermeable inclinado, las zonas de transición, los espaldones de enrocado y el sistema de filtros y drenes de protección.

Figura 5.32 Sección transversal típica de presa Alternativa B



Fuente: Elaboración propia

Leyenda:

***1)** Núcleo Impermeable (CL, SC/SM, GC); **2)** Filtro fino (arena); **3)** Filtro grueso (arena); **4)** Transición; **5)** Enrocado; **6)** Concreto f´c=280 kg/cm2 en base de núcleo.*

Parámetros principales de diseño:

- Nivel de agua mínimo (NAMIN) 1 345.30 msnm
- Nivel de agua máx. ordinario (NAMO) 1 396.05 msnm
- Nivel de agua máx. extraordinario (NAME) 1 397.38 msnm
- Bordo libre 2.50 m
- Elevación de la coronación 1 398.55 msnm
- Elevación del cauce (sitio de presa) 1 317.35 msnm
- Altura máxima de la presa 94.65 m
- Volumen útil de embalse 13.00 MMC
- Volumen muerto 2.00 MMC
- Longitud de coronación 346.00 m
- Talud aguas arriba 1.6H:1V
- Talud aguas abajo 1.8H:1V

Presupuesto referencial de obra: S/ 269,721,559.81

Tabla 5.36 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa B (ENII)

ALT. B	PRESA ENII				
ITEM	**DESCRIPCIÓN**	**UND**	**METRADOS**	**P.U. (S/.)**	**P. PARCIAL (S/.)**
1.00	**Cuerpo de Presa**				205,812,878.00
1.01	Relleno compactado de núcleo arcilloso	m3	797,407.30	74.5	59,406,843.78
1.02	Relleno compactado de espaldones	m3	2,120,647.52	43.08	91,357,495.16
1.03	Relleno para filtros	m3	147,704.70	68.26	10,082,323.10
1.04	Relleno para zonas de transición	m3	613,390.23	68.02	41,722,803.44
1.05	Relleno compactado en cauce	m3	5,676.26	42.05	238,686.52
1.06	Concreto en pantalla de inyecciones	m3	5,622.09	534.45	3,004,726.00
2.00	**Tratamiento de fundación**				9,964,369.85
2.01	Excavación de material aluvial seco	m3	6,445.94	8.50	54,790.49
2.02	Excavación de material aluvial húmedo	m3	2,058.00	14.08	28,976.64
2.03	Excavación de roca seca	m3	352.00	45.36	15,966.72
2.04	Inyecciones de impermeabilización	m	6,266.86	1,200.00	7,520,232.00
2.05	Inyecciones de consolidación	m	1,953.67	1,200.00	2,344,404.00
3.00	**Obras conexas (25% del costo total)**				53,944,311.96
		Costo Directo Total			**269,721,559.81**

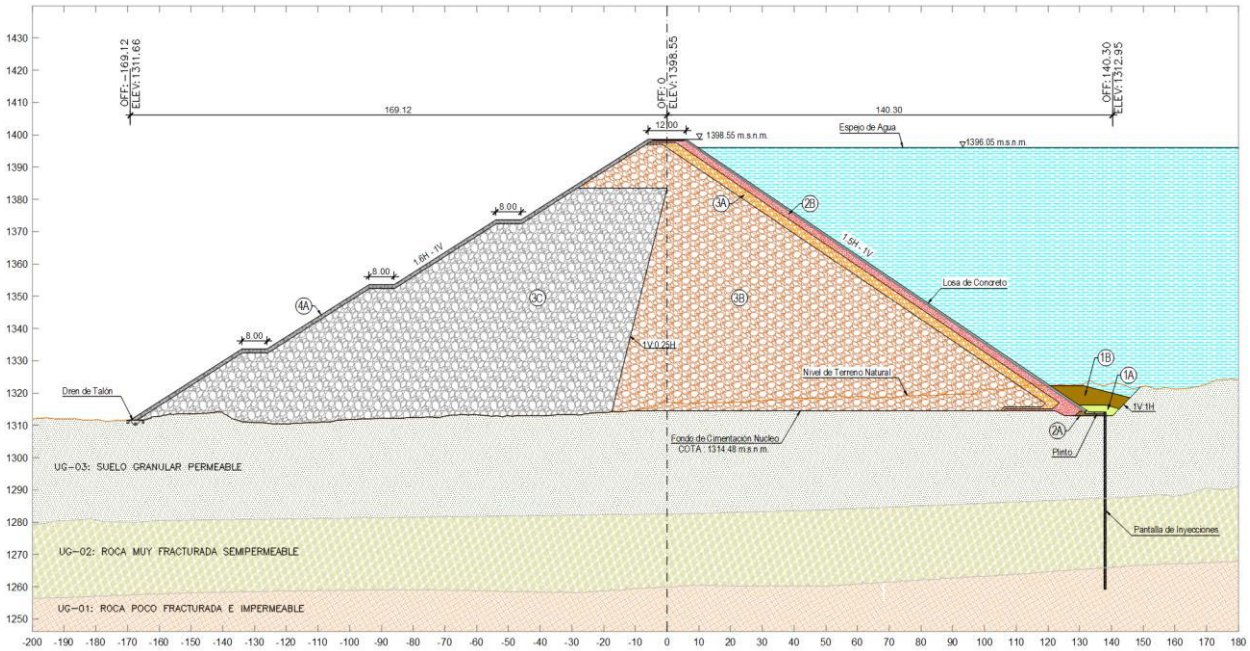
Fuente: Elaboración propia

Alternativa C: Presa de enrocado con cara de concreto (CFRD)

Se plantea una presa de enrocado con cara de concreto (CFRD), conformada por un macizo principal de enrocado que proporciona resistencia estructural y estabilidad global, revestido en su paramento aguas arriba por una losa de concreto armado. Esta losa, apoyada en un plinto de cimentación, constituye el elemento impermeabilizante de la presa. La tipología permite aprovechar el enrocado proveniente de canteras cercanas, reduciendo costos de acarreo y acelerando el proceso constructivo, al tiempo que la cara de concreto asegura la estanqueidad de la estructura y el control de filtraciones. La experiencia internacional demuestra que este tipo de presas ofrece un comportamiento satisfactorio frente a cargas sísmicas y condiciones de operación exigentes, consolidándose como una de las soluciones más competitivas técnica y económicamente.

En la Figura 5.33 se muestra la sección transversal típica de esta alternativa, donde se observan las distintas zonas de enrocado (materiales 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 3C, 4A), así como la pantalla de concreto armado, el plinto de fundación y los sistemas de impermeabilización.

Figura 5.33 Sección transversal típica de presa Alternativa C



Fuente: Elaboración propia

Leyenda:

***1A)** Suelo limo – arenoso no cohesivo; **1B)** Rezaga de protección; **2A)** Grava procesada, Filtro Tam. Max. 19 mm; **2B)** Grava muy bien graduada (transición de alta compacidad) **3A)** Grava bien graduada transición entre 2B y 3B; **3B)** Piedra o grava arenosa (bien graduada, altamente compactada); **3C)** Piedra pequeña a mediana (bien graduada, altamente compactada); **3C)** Protección de talud aguas abajo, Tam. Max. 500 mm.*

Parámetros principales de diseño:

- Nivel de agua mínimo (NAMIN) 1 345.30 msnm
- Nivel de agua máx. ordinario (NAMO) 1 396.05 msnm
- Nivel de agua máx. extraordinario (NAME) 1 397.38 msnm
- Bordo libre 2.50 m
- Elevación de la coronación 1 398.55 msnm
- Elevación del cauce (sitio de presa) 1 317.35 msnm
- Altura máxima de la presa 85.00 m
- Volumen útil de embalse 13.00 MMC
- Volumen muerto 2.00 MMC
- Longitud de coronación 346.00 m
- Talud aguas arriba 1.5H:1V
- Talud aguas abajo 1.6H:1V

Presupuesto referencial de obra: S/ 239,668,959.94

Tabla 5.37 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa C (CFRD)

ALT. C	PRESA CFRD				
ITEM	**DESCRIPCIÓN**	**UND**	**METRADOS**	**P.U. (S/.)**	**P. PARCIAL (S/.)**
1.00	**Cuerpo de Presa**				182,171,202.11
1.01	Relleno con material 1A	m3	1,416.48	45.52	64,478.17
1.02	Relleno con material 1B	m3	4,890.47	46.08	225,352.86
1.03	Relleno con material 2A	m3	354.12	54.6	19,334.95
1.04	Relleno con material 2B	m3	105,503.36	61.92	6,532,768.05
1.05	Relleno con material 3A	m3	109,787.71	67.31	7,389,810.76
1.06	Relleno con material 3B	m3	1,226,780.46	48.08	58,983,604.52
1.07	Relleno con material 3C	m3	1,424,028.94	64.83	92,319,796.18
1.08	Relleno con material 4A	m3	1,953.67	68.02	132,888.63
1.09	Concreto reforzado de pantalla, plinto y corona, f'c = 280 kg/cm2 (Incluye encofrados y acero)	m3	19,777.30	834.45	16,503,167.99
2.00	**Tratamiento de fundación**				9,563,965.85
2.01	Excavación de material aluvial seco	m3	6,445.94	8.50	54,790.49
2.02	Excavación de material aluvial húmedo	m3	2,058.00	14.08	28,976.64
2.03	Excavación de roca seca	m3	352.00	45.36	15,966.72
2.04	Inyecciones de impermeabilización	m	6,266.86	1,200.00	7,520,232.00
2.05	Inyecciones de consolidación	m	1,620.00	1,200.00	1,944,000.00
3.00	**Obras conexas (25% del costo total)**				47,933,791.99
		Costo Directo Total			**239,668,959.94**

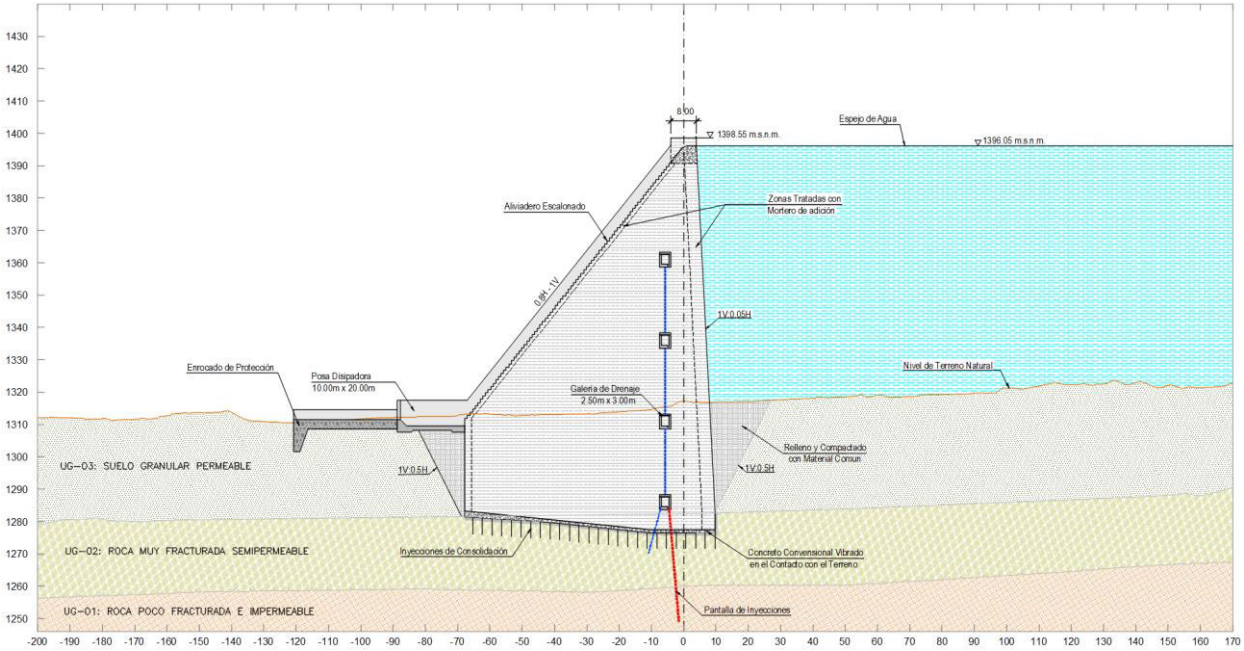
Fuente: Elaboración propia

Alternativa D: Presa de concreto compactado con rodillo (RCC)

Se plantea una presa de concreto compactado con rodillo (RCC), conformada por un macizo de concreto colocado en capas horizontales de espesor reducido y compactado mediante rodillos vibratorios. Esta técnica constructiva permite disminuir de manera significativa el uso de encofrados y los tiempos de ejecución en comparación con el concreto convencional, manteniendo una adecuada resistencia estructural y durabilidad. La RCC integra dentro de su propio cuerpo obras complementarias como aliviaderos, galerías o tomas, reduciendo la magnitud de estructuras externas. Su aplicación ha mostrado alto desempeño en proyectos de gran envergadura y en zonas sísmicas, lo que la convierte en una alternativa segura y moderna.

En la Figura 5.34 se presenta la sección transversal típica de esta alternativa, en la que se observa la zonificación de mezclas de concreto RCC y concreto convencional en zonas críticas, así como los tratamientos de fundación e inyecciones.

Figura 5.34 Sección transversal típica de presa Alternativa D



Fuente: Elaboración propia

Parámetros principales de diseño:

- Nivel de agua mínimo (NAMIN) 1 345.30 msnm
- Nivel de agua máx. ordinario (NAMO) 1 396.05 msnm
- Nivel de agua máx. extraordinario (NAME) 1 397.38 msnm
- Bordo libre 2.50 m
- Elevación de la coronación 1 398.55 msnm
- Elevación del cauce (sitio de presa) 1 317.35 msnm
- Altura máxima de la presa 122.12 m
- Volumen útil de embalse 13.00 MMC
- Volumen muerto 2.00 MMC
- Longitud de coronación 346.00 m
- Talud aguas arriba 0.05H:1V
- Talud aguas abajo 0.8H:1V

Presupuesto referencial de obra: S/ 310,242,983.17

Tabla 5.38 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa D (RCC)

ALT. D	PRESA CCR				
ITEM	**DESCRIPCIÓN**	**UND**	**METRADOS**	**P.U. (S/.)**	**P. PARCIAL (S/.)**
1.00	**Cuerpo de Presa**				254,805,502.65
1.01	CCR mezcla tipo I	m3	1,821,554.98	127.51	232,274,373.76
1.02	CCR mezcla tipo II (Contorno)	m3	80,277.75	148.35	11,909,204.21
1.03	Concreto convencional f'c=210 kg/cm2	m3	41,638.88	150.50	6,266,650.69
1.04	Concreto convencional f'c=280 kg/cm2	m3	20,819.44	185.62	3,864,503.99
1.05	Relleno y compactado con material común	m3	10,500.00	46.74	490,770.00
2.00	**Tratamiento de fundación**				27,233,572.96
2.01	Excavación de material aluvial seco	m3	813,607.20	12.02	9,779,558.54
2.02	Excavación de material aluvial húmedo	m3	95,623.36	14.08	1,346,376.98
2.03	Excavación de roca fracturada a prof.	m3	98,829.00	65.36	6,459,463.44
2.04	Inyecciones de impermeabilización	m	4,700.15	1,200.00	5,640,174.00
2.05	Inyecciones de consolidación	m	3,340.00	1,200.00	4,008,000.00
3.00	**Obras conexas (10% del costo total)**				28,203,907.56
		Costo Directo Total			**310,242,983.17**

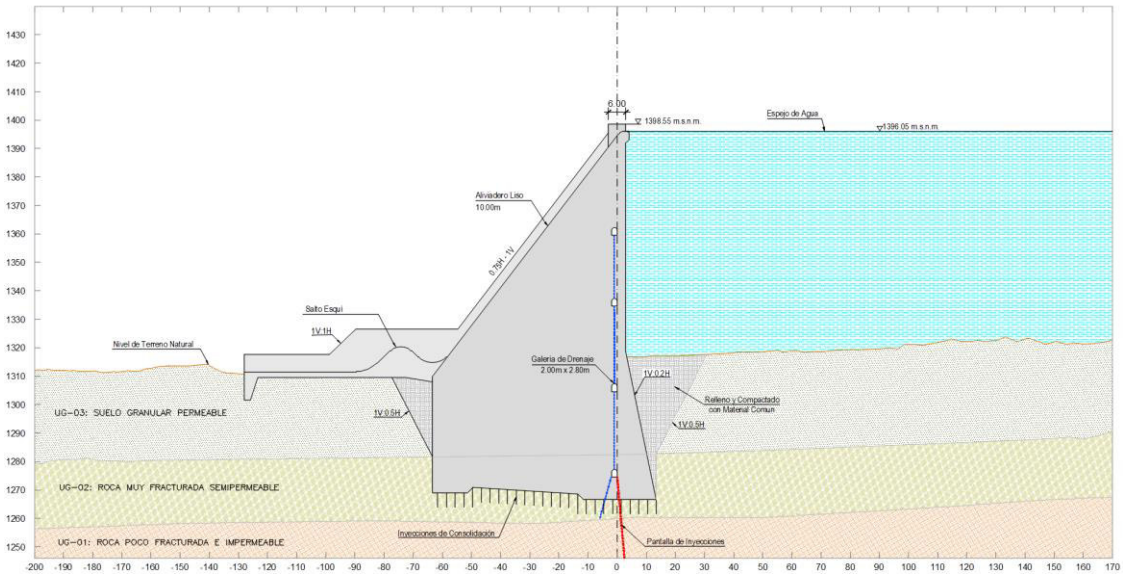
Fuente: Elaboración propia

Alternativa E: Presa de concreto convencional (CC)

Se plantea una presa de concreto convencional (CC), conformada por un macizo estructural construido mediante encofrados sucesivos y vaciado de concreto vibrado en bloques de gran espesor. Este tipo de presa se caracteriza por su alta resistencia estructural, gran durabilidad y adecuado comportamiento frente a solicitaciones hidráulicas y sísmicas. Además, permite la incorporación de galerías de inspección, aliviaderos y tomas dentro del propio cuerpo de la presa, lo que facilita la operación y el mantenimiento. Presenta como desventaja la elevada demanda de cemento, encofrados y tiempos prolongados de construcción, lo que incrementa sustancialmente los costos de inversión. Asimismo, su ejecución requiere un control estricto de la temperatura del concreto y de los procesos de curado, para evitar la aparición de agrietamientos térmicos en el macizo estructural.

En la Figura 5.35 se presenta la sección transversal típica de esta alternativa, en la que se distinguen los bloques de concreto convencional, las juntas de contracción, los drenes de fundación y las estructuras embebidas.

Figura 5.35 Sección transversal típica de presa Alternativa E



Fuente: Elaboración propia

Parámetros principales de diseño:

- Nivel de agua mínimo (NAMIN) 1 345.30 msnm
- Nivel de agua máx. ordinario (NAMO) 1 396.05 msnm
- Nivel de agua máx. extraordinario (NAME) 1 397.38 msnm
- Bordo libre 2.50 m
- Elevación de la coronación 1 398.55 msnm
- Elevación del cauce (sitio de presa) 1 317.35 msnm
- Altura máxima de la presa 132.00 m
- Volumen útil de embalse 13.00 MMC
- Volumen muerto 2.00 MMC
- Longitud de coronación 346.00 m
- Talud aguas arriba 0.00H:1V
- Talud aguas abajo 0.75H:1V

Presupuesto referencial de obra: S/ 330,513,852.21

Tabla 5.39 Presupuesto referencial de construcción de la presa Alternativa E (CC)

ALT. E	PRESA CC				
ITEM	**DESCRIPCIÓN**	**UND**	**METRADOS**	**P.U. (S/.)**	**P. PARCIAL (S/.)**
1.00	**Cuerpo de Presa**				279,200,900.75
1.01	Concreto convencional f'c=280 kg/cm2 (Incluye encofrados)	m3	1,368,497.70	204.02	279,200,900.75
2.00	**Tratamiento de fundación**				21,266,237.62
2.01	Excavación de material aluvial seco	m3	813,607.20	6.00	4,881,643.20
2.02	Excavación de material aluvial húmedo	m3	95,623.36	14.08	1,346,376.98
2.03	Excavación de roca seca	m3	101,829.00	45.36	4,618,963.44
2.04	Inyecciones de impermeabilización	m	4,700.15	1,200.00	5,640,174.00
2.05	Inyecciones de consolidación	m	3,140.00	1,522.00	4,779,080.00
3.00	**Obras conexas (10% del costo total)**				30,046,713.84
		Costo Directo Total			**330,513,852.21**

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Definición de criterios para tipos de presas

Los criterios de evaluación se establecieron considerando la experiencia en el diseño de presas, la bibliografía técnica especializada y las características particulares del proyecto en el Eje 4 de la cuenca del río Lurín. Se contemplaron aspectos físicos, geotécnicos, constructivos, económicos y ambientales, con el fin de garantizar la selección de la tipología más adecuada.

Para la aplicación del método AHP se definieron nueve criterios principales, que recogen de manera integral los aspectos determinantes en la selección de la tipología de presa para el Eje 4 de la cuenca del río Lurín:

- *C1. Topografía del sitio*: condiciones geomorfológicas del valle y su influencia en la geometría y estabilidad de la presa.
- *C2. Condiciones geológicas y geotécnicas*: características del macizo de cimentación, estratigrafía y calidad de la roca de fundación.
- *C3. Disponibilidad de materiales locales*: acceso a enrocado, agregados, suelos impermeables y su impacto en la logística de obra.
- *C4. Seguridad de la presa*: comportamiento estructural frente a sismos, crecidas extraordinarias y sobrevertimiento.
- *C5. Obras conexas y auxiliares*: complejidad de aliviaderos, tomas de fondo y sistemas de desvío asociados a cada tipología.
- *C6. Procedimiento constructivo y requerimientos técnicos*: tecnologías disponibles, secuencia de construcción y mano de obra necesaria.
- *C7. Plazo de construcción*: duración estimada del cronograma de ejecución considerando volumen de obra y condiciones climáticas.
- *C8. Costo de obra estimado*: análisis comparativo de costos paramétricos según volúmenes de materiales y tratamientos de cimentación.
- *C9. Impacto ambiental y social*: magnitud y extensión de los impactos generados por la construcción y operación de cada tipología.

A continuación, se presenta la descripción detallada de cada criterio, considerando las condiciones específicas del Eje 4 de la cuenca del río Lurín.

C1: Topografía del sitio

El eje 4 se ubica en un tramo de valle encajonado, caracterizado por flancos montañosos abruptos y escarpados, conformados por laderas rocosas con pendientes superiores al 60%. La sección transversal muestra una cerrada angosta, con un ancho de boquilla reducido (≈ 320 m en la cota de coronación), lo que genera una relación ancho/altura menor a 4, típica de cañones profundos.

La topografía longitudinal evidencia un cauce bien definido, sin extensas planicies aluviales, lo que favorece la localización de un cierre hidráulico eficiente. No obstante, esta configuración obliga a que la cimentación de la presa se apoye sobre laderas inclinadas y profundos depósitos aluviales en el fondo, lo que representa un reto para la excavación y tratamiento de fundación.

Desde el punto de vista constructivo, el encajonamiento topográfico favorece tipologías de presas de menor longitud de coronación y mayor compacidad estructural, como las de concreto (RCC o gravedad), mientras que representa una dificultad para presas de materiales sueltos (TENCI, ENII, CFRD), que requieren secciones más anchas y, por tanto, mayor volumen de relleno.

C2: Condiciones geológicas y geotécnicas

El Eje 4 presenta un macizo heterogéneo compuesto por tres unidades principales: un depósito superficial granular permeable (UG-03), una zona de roca muy fracturada y semipermeable (UG-02), y en profundidad una base de roca sana, poco fracturada e impermeable (UG-01), ubicada aproximadamente a 50 m bajo el nivel del cauce. Esta estratigrafía condiciona de manera crítica la selección del tipo de presa, al influir en la estabilidad de la cimentación y en el control de filtraciones.

Desde el punto de vista de la fundación, la presencia de depósitos aluviales y roca muy fracturada en la superficie implica la necesidad de tratamientos extensivos, como pantallas de inyecciones y galerías de drenaje, para garantizar la impermeabilidad y estabilidad. La roca competente en profundidad ofrece un buen cimiento, pero la gran sobrecarga de materiales permeables incrementa los costos y riesgos de excavación

para tipologías de concreto (RCC o gravedad), que requieren cimentaciones directas sobre roca firme.

En contraste, las presas de materiales sueltos (TENCI, ENII, CFRD) presentan mayor adaptabilidad a estas condiciones, ya que distribuyen mejor las cargas sobre fundaciones heterogéneas y permiten implementar cortinas impermeables profundas para controlar la percolación. Sin embargo, el carácter altamente fracturado de la roca intermedia y la permeabilidad del aluvión exigen un diseño cuidadoso de filtros y drenes para prevenir fenómenos de piping y pérdida de estabilidad.

En síntesis, las condiciones geológicas del Eje 4 favorecen relativamente a las presas de materiales sueltos con sistemas de impermeabilización robustos, mientras que suponen un desafío mayor para las presas de concreto, debido a la profundidad de la roca sana requerida para cimentación segura.

C3: Disponibilidad de materiales locales

En las inmediaciones del Eje 4 se identifican canteras naturales de roca andesítica, gravas y arenas, como la cantera La Palma y depósitos aluviales de Ocurure, que ofrecen un abastecimiento adecuado de enrocado y agregados. Esta disponibilidad favorece principalmente a las tipologías que requieren grandes volúmenes de material pétreo, como las presas de enrocado (TENCI, ENII, CFRD), y también a las de concreto (RCC y CC) en lo que respecta a los áridos para la mezcla.

No obstante, existe una limitación crítica: la ausencia de depósitos locales de suelos finos impermeables (arcillas de baja permeabilidad). Esto afecta de manera directa a las presas con núcleo central o inclinado (TENCI y ENII), pues obligaría a transportar material impermeable desde zonas más alejadas, incrementando costos y logística. En contraste, las alternativas CFRD y RCC no dependen de arcillas, dado que la impermeabilidad se garantiza mediante la cara de concreto o el propio cuerpo monolítico.

Desde el punto de vista logístico, el acceso al valle encajonado supone un reto para el transporte de grandes volúmenes, tanto de roca como de cemento. Las presas de enrocado (TENCI, ENII, CFRD) aprovechan la abundancia local de roca,

minimizando la importación de materiales, mientras que las presas RCC y CC requieren, además de áridos locales, un suministro constante de cemento, aditivos y equipos especializados, lo que implica un esquema de transporte más complejo.

En síntesis, la disponibilidad de materiales locales favorece principalmente a las presas CFRD, al poder aprovechar de forma intensiva el enrocado disponible sin necesidad de arcillas, mientras que representa una desventaja significativa para TENCI y ENII por la carencia de suelos impermeables en el área. Las alternativas RCC y CC se mantienen viables, aunque sujetas a una mayor dependencia de insumos externos (cemento y aditivos).

C4: Seguridad de presas (estructural e hidráulica)

La seguridad constituye el criterio prioritario en el diseño y selección de tipología de presa, especialmente en el contexto sísmico y de crecidas extremas que caracterizan a la cuenca del río Lurín. En el Eje 4, las condiciones geotécnicas heterogéneas (aluviales permeables, roca fracturada y roca competente profunda) imponen exigencias adicionales en materia de estabilidad e impermeabilidad.

Las presas de concreto, tanto en su variante de concreto compactado con rodillo (RCC) como de gravedad convencional (CC), presentan ventajas significativas en términos de seguridad estructural. Su naturaleza monolítica les otorga alta resistencia frente a solicitaciones sísmicas, reduciendo el riesgo de deformaciones excesivas o colapsos progresivos. Además, estas tipologías toleran el sobrevertimiento temporal, ya que su coronación puede diseñarse como vertedero libre, lo que minimiza la vulnerabilidad frente a avenidas extremas.

Por su parte, las presas de enrocado con cara de concreto (CFRD) ofrecen un comportamiento intermedio: la flexibilidad del cuerpo de enrocado permite disipar parte de la energía sísmica, y la cara de concreto proporciona impermeabilidad confiable. Sin embargo, su desempeño depende de la correcta ejecución de juntas y del control de asentamientos diferenciales, que podrían afectar la estanqueidad en sismos severos.

Las alternativas de enrocado con núcleo impermeable, tanto central (TENCI) como inclinado (ENII), presentan mayores vulnerabilidades. Estas tipologías dependen del comportamiento del núcleo de arcilla frente a cargas dinámicas, siendo susceptibles a fisuración, deformaciones y fenómenos de piping en caso de fallas en los filtros o drenajes. Asimismo, no toleran el sobrevertimiento, lo que obliga a sobredimensionar vertederos y mantener estrictos márgenes de seguridad hidráulica.

En síntesis, bajo las condiciones del Eje 4, las tipologías de concreto (RCC y CC) se destacan como las más seguras frente a sismos y sobrevertimiento, mientras que la CFRD constituye una opción intermedia con buen desempeño si se controla la interacción entre el enrocado y la cara de concreto. Las alternativas TENCI y ENII requieren medidas adicionales de seguridad pasiva y resultan menos confiables en el contexto geológico y sísmico de la zona.

C5: Obras conexas (aliviadero, toma de fondo, sistema de desvío temporal)

El criterio de obras conexas abarca las estructuras complementarias necesarias para el funcionamiento y seguridad de la presa: sistema de desvío temporal del río, aliviadero de demasías y tomas de fondo. La configuración topográfica del Eje 4, de valle encajonado y angosto, condiciona de manera significativa la ubicación y complejidad de estas obras.

En las presas de concreto (RCC y CC), las obras auxiliares pueden integrarse en el propio cuerpo de la presa, lo que simplifica el diseño y reduce la cantidad de frentes constructivos. Es posible proyectar el aliviadero como vertedero de coronación o frontal escalonado, mientras que las tomas de fondo y galerías de inspección pueden incorporarse en el macizo de concreto con altos niveles de seguridad. De esta manera, el sistema de desvío temporal puede aprovechar parcialmente las galerías o túneles que luego quedarán como estructuras permanentes, acortando los plazos y reduciendo costos.

En contraste, las presas de materiales sueltos (TENCI, ENII y CFRD) requieren que las obras auxiliares se construyan de forma independiente al cuerpo principal. El aliviadero debe ejecutarse como un canal excavado en roca o un túnel lateral, con mayores volúmenes de excavación y estructuras de concreto adicionales. La toma de

fondo suele atravesar la cimentación mediante un túnel revestido o una tubería, lo que implica zonas de transición de concreto y disipadores de energía aguas abajo. El desvío temporal del río también demanda un túnel dedicado, lo que incrementa el número de frentes de obra y el riesgo constructivo.

En este contexto, las tipologías RCC y CC presentan ventajas claras al integrar aliviaderos, tomas y desvíos en el mismo cuerpo estructural, reduciendo la extensión de obras externas y facilitando la operación y el mantenimiento. En cambio, las alternativas CFRD, ENII y TENCI requieren obras auxiliares más complejas y voluminosas, lo que se traduce en mayores costos, plazos y exposición a riesgos durante la construcción.

En síntesis, el Eje 4 favorece desde el punto de vista de obras conexas a las presas de concreto (RCC y CC), que concentran las estructuras hidráulicas en el cuerpo de presa, mientras que penaliza a las presas de materiales sueltos, que necesitan sistemas auxiliares independientes y de mayor envergadura.

C6: Procedimiento constructivo y requerimientos técnicos

El procedimiento constructivo en el Eje 4 está condicionado por la topografía encañonada, el clima de la zona andina y la disponibilidad de equipos y mano de obra calificada en el país. Cada tipología de presa implica tecnologías y requerimientos técnicos distintos, con repercusiones directas en la duración y complejidad de la construcción.

La presa RCC (concreto compactado con rodillo) ofrece ventajas significativas en este criterio. La experiencia previa en proyectos similares en el Perú y Latinoamérica demuestra la factibilidad técnica de esta solución, con la disponibilidad local de maquinaria pesada, plantas de producción de concreto y personal entrenado en técnicas de extendido y compactación. Su método constructivo continuo y mecanizado permite trabajar en campañas prolongadas, incluso reduciendo la influencia de la estacionalidad, lo que convierte al RCC en la alternativa más eficiente desde el punto de vista del procedimiento constructivo.

La presa CFRD (enrocado con cara de concreto) también representa una opción viable y conocida en el contexto nacional, dado que existen equipos y contratistas especializados en movimiento masivo de roca y ejecución de obras de concreto. Su procedimiento es relativamente más simple que el de RCC en cuanto al cuerpo de presa, aunque requiere un estricto control en la colocación del enrocado y en la ejecución de la losa de concreto, la cual es crítica para la impermeabilidad de la estructura.

En contraste, la presa de concreto convencional (CC) demanda encofrados, vertidos en bloques y control térmico por el calor de hidratación, lo que genera un procedimiento más lento y complejo. A pesar de que existe experiencia y mano de obra capacitada en el país para este tipo de estructuras, la magnitud del volumen de concreto hace que el procedimiento sea más costoso y prolongado en comparación con RCC o CFRD.

Las alternativas de presas de enrocado con núcleo impermeable (TENCI y ENII) presentan los mayores retos constructivos en este sitio. El proceso requiere la colocación de núcleos de arcilla en capas delgadas, con control estricto de humedad y compactación, lo cual es altamente dependiente de la estacionalidad climática. Además, la ausencia de fuentes locales de arcilla de calidad incrementa la complejidad logística. Estos factores convierten al procedimiento constructivo de TENCI y ENII en más vulnerable a retrasos y riesgos técnicos.

En síntesis, desde el punto de vista del procedimiento constructivo y los requerimientos técnicos, el Eje 4 favorece principalmente a la presa RCC, seguida por la CFRD, mientras que las presas CC, ENII y TENCI resultan menos eficientes por su mayor complejidad y dependencia de condiciones externas.

C7: Plazo de construcción

El plazo de construcción en el Eje 4 depende directamente del volumen de materiales a colocar, la tecnología empleada, la disponibilidad de insumos y las restricciones climáticas propias de la sierra central. La duración total de las obras constituye un factor clave en la planificación, ya que influye en los costos generales del proyecto y

en los riesgos asociados a la exposición prolongada del valle al régimen hidrológico del río Lurín.

La presa RCC se presenta como la alternativa más eficiente en términos de plazo. Su método de construcción mecanizado, mediante colocación continua de franjas de concreto compactado con rodillo, permite avanzar rápidamente en altura (decenas de metros por mes bajo régimen de trabajo intensivo). Además, este procedimiento reduce la dependencia de las estaciones secas, lo que posibilita completar la presa en un horizonte relativamente corto (aproximadamente 1.5 a 2 años para una estructura de gran altura).

La presa CFRD también ofrece plazos competitivos, al basarse en el uso intensivo de roca disponible localmente y en la ejecución de una cara de concreto que, aunque crítica en su etapa final, no prolonga significativamente la duración del cronograma. Sin embargo, los grandes volúmenes de enrocado a movilizar requieren una logística de transporte y compactación sostenida, lo que puede alargar los tiempos respecto al RCC.

La presa de concreto convencional (CC) resulta menos ventajosa, pues el procedimiento constructivo basado en encofrados, vertidos por bloques y períodos de fraguado genera un avance lento y secuencial. Esto implica que la construcción de una presa de este tipo en el Eje 4 demandaría un plazo considerablemente mayor (potencialmente el doble que una RCC), con riesgos de acumulación de retrasos.

Las presas de enrocado con núcleo impermeable (TENCI y ENII) requieren plazos aún más prolongados. La colocación de núcleos de arcilla en capas delgadas depende de condiciones climáticas secas, lo que obliga a suspender actividades durante la temporada de lluvias. Este factor puede extender la obra a más de 3 años, dependiendo de la magnitud del embalse y de la disponibilidad de arcillas, cuyo acarreo adicional también aumenta la duración.

En conclusión, desde la perspectiva del plazo de construcción, el Eje 4 favorece a la presa RCC como alternativa más rápida y eficiente, seguida por la CFRD, mientras que las presas CC, ENII y TENCI resultan menos competitivas debido a la mayor duración y a su dependencia de factores climáticos y técnicos.

C8: Costo de obra estimado

El costo de construcción en el Eje 4 está fuertemente condicionado por los volúmenes de materiales requeridos y, especialmente, por las condiciones de cimentación. La presencia de depósitos aluviales y roca fracturada hasta una profundidad de aproximadamente 50 m obliga a evaluar con detalle los costos de excavación y tratamientos de fundación, pues representan una partida significativa en el presupuesto total.

Las presas de concreto (RCC y CC), al ser tipologías monolíticas, requieren cimentaciones directas sobre roca sana competente. En este sitio, ello implicaría excavaciones profundas y extensos trabajos de consolidación e impermeabilización (pantallas de inyecciones, drenes, concreto ciclópeo), lo que eleva de manera notable los costos iniciales. Aunque el RCC reduce volúmenes de encofrado y permite un proceso más industrializado que el concreto convencional, ambos tipos de presa están penalizados económicamente por la profundidad de la roca firme. En este contexto, la presa RCC resulta más competitiva que la CC, pero ambas alternativas se ubican en el rango de mayor costo relativo.

Las presas de materiales sueltos (TENCI, ENII y CFRD) presentan ventajas al distribuir las cargas sobre una cimentación más amplia, reduciendo la necesidad de excavaciones profundas. Sin embargo, en el caso de TENCI y ENII, la carencia de materiales arcillosos impermeables en la zona incrementa los costos, al tener que acarrear arcilla de depósitos lejanos y ejecutar controles estrictos de compactación. La CFRD, en cambio, evita esta limitación al emplear una cara de concreto impermeable, lo que la convierte en la tipología más económica en el contexto del Eje 4.

Adicionalmente, las presas de materiales sueltos requieren obras auxiliares externas (túneles de desvío, canales de aliviadero, estructuras de toma), lo que añade partidas importantes de concreto, aunque de menor magnitud que la excavación profunda exigida por las tipologías de concreto. En cambio, las presas RCC y CC pueden integrar parte de estas obras en su propio cuerpo, equilibrando parcialmente los costos adicionales.

En síntesis, en el Eje 4 la presa CFRD se perfila como la alternativa de menor costo relativo, gracias al uso intensivo de roca local y a la ausencia de necesidad de arcillas impermeables, mientras que las presas ENII y TENCI resultan más costosas por la logística de materiales. Las presas RCC y CC, aunque técnicamente seguras y eficientes, se ubican como las opciones más caras debido a la profundidad de la roca competente y a los tratamientos de fundación que ello demanda.

C9: Impacto ambiental y social

El impacto ambiental y social de la construcción de la presa en el Eje 4 se relaciona con la magnitud de la intervención física en el valle, la explotación de materiales, las emisiones asociadas a la obra y la alteración de las dinámicas ecológicas y sociales locales.

Las presas de materiales sueltos (TENCI, ENII y CFRD) generan los impactos más significativos durante la etapa constructiva, debido a los grandes volúmenes de enrocado y suelos que deben ser extraídos, transportados y compactados. Este proceso implica la apertura de extensas canteras y zonas de préstamo, con la consiguiente afectación paisajística, generación de polvo, ruido, vibraciones y tránsito intenso de vehículos pesados en áreas rurales. Adicionalmente, en el caso de TENCI y ENII, la necesidad de transportar arcillas impermeables desde depósitos lejanos incrementa tanto la huella ambiental como los impactos sociales asociados a la movilización de materiales.

La presa CFRD, aunque también demanda grandes volúmenes de roca, presenta un impacto ligeramente menor al evitar el uso de núcleos de arcilla. Su efecto ambiental se concentra en la explotación de canteras locales de enrocado y en la colocación de la cara de concreto, lo que reduce el transporte de materiales externos y, por ende, la huella logística.

Las presas de concreto (RCC y CC), por su menor volumen de obra, generan una huella física reducida en la boquilla del valle. Sin embargo, estas alternativas concentran un impacto ambiental de carácter industrial, asociado principalmente a la producción y transporte de cemento y aditivos, así como a la instalación y operación de plantas de hormigonado en obra. Estos procesos implican emisiones significativas de CO_2 y la

generación de efluentes líquidos que deben ser gestionados adecuadamente. No obstante, al centralizar las operaciones en un solo frente de obra y reducir la extensión de canteras locales, los impactos en el ecosistema inmediato pueden ser menores en comparación con las presas de enrocado.

En el aspecto social, todas las tipologías implican la reubicación parcial de terrenos y la afectación de actividades locales por la creación del embalse. Sin embargo, las presas de enrocado generan mayor dispersión territorial de impactos, debido a la apertura de canteras y caminos auxiliares, mientras que las presas de concreto concentran las actividades en el eje mismo del proyecto.

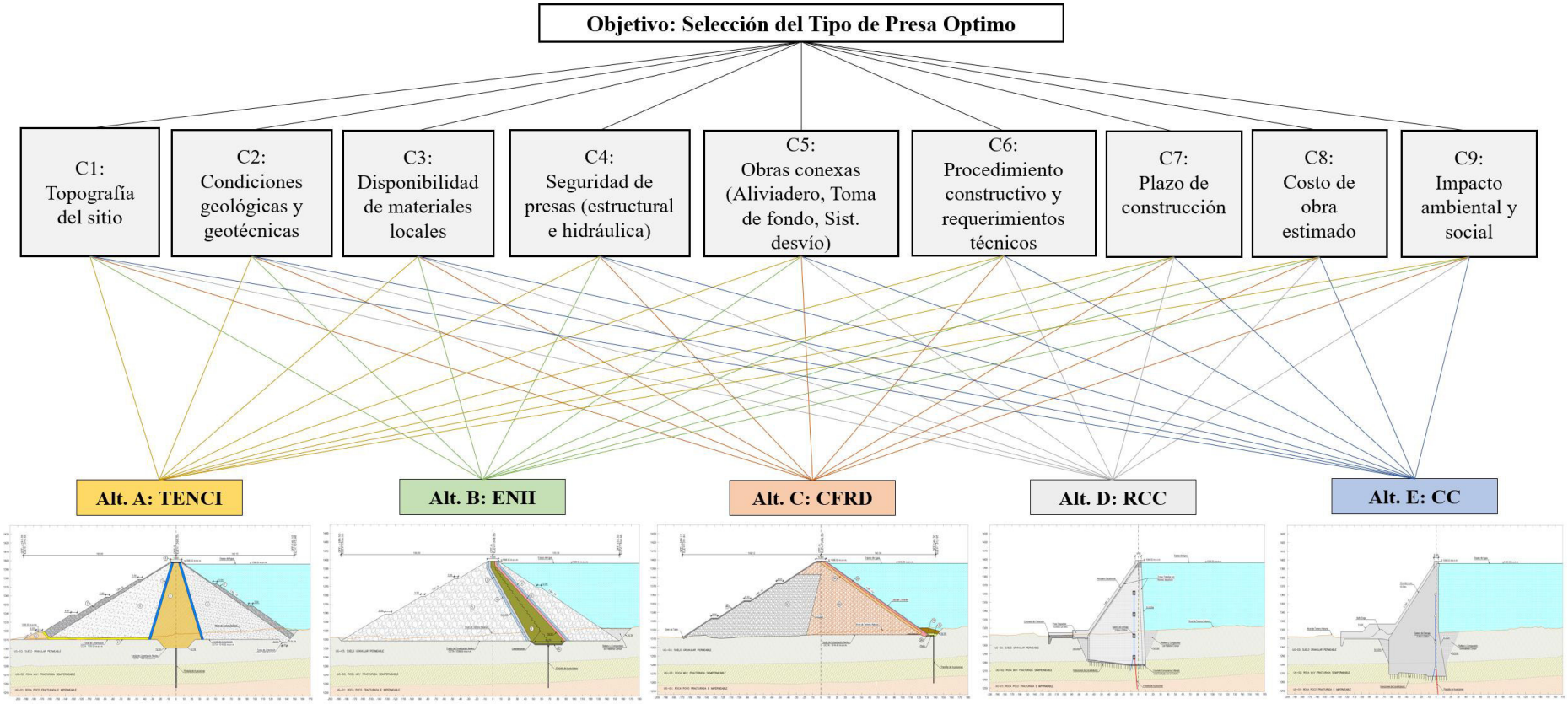
En conclusión, bajo las condiciones del Eje 4, las presas RCC y CC presentan los impactos locales más concentrados pero con mayor huella de carbono industrial, mientras que las presas de enrocado (CFRD, ENII, TENCI) producen impactos más extensivos en el territorio. Entre ellas, la CFRD se posiciona como la alternativa con menor impacto relativo, al optimizar el uso de materiales locales y reducir la dependencia de fuentes externas de arcilla.

5.3.3. Creación de árbol de jerarquía para selección del tipo de presas

Una vez establecidas las alternativas y definidos los criterios de evaluación para el Eje 4 de la cuenca del río Lurín, se procedió a estructurar el modelo jerárquico del proceso de decisión. El árbol de jerarquía se organiza en tres niveles: en el nivel superior se encuentra el objetivo general (seleccionar el tipo de presa óptimo), en el segundo nivel los criterios de evaluación (C1–C9), y en el nivel inferior las cinco alternativas de tipología de presa consideradas (TENCI, ENII, CFRD, RCC y CC).

En la Figura 5.36 se muestra dicho árbol jerárquico, que constituye la base metodológica para el desarrollo de las comparaciones por pares y la posterior obtención de prioridades mediante el método AHP.

Figura 5.36 Estructura jerárquica del modelo AHP para la selección del tipo de presa.



Fuente: Elaboración propia

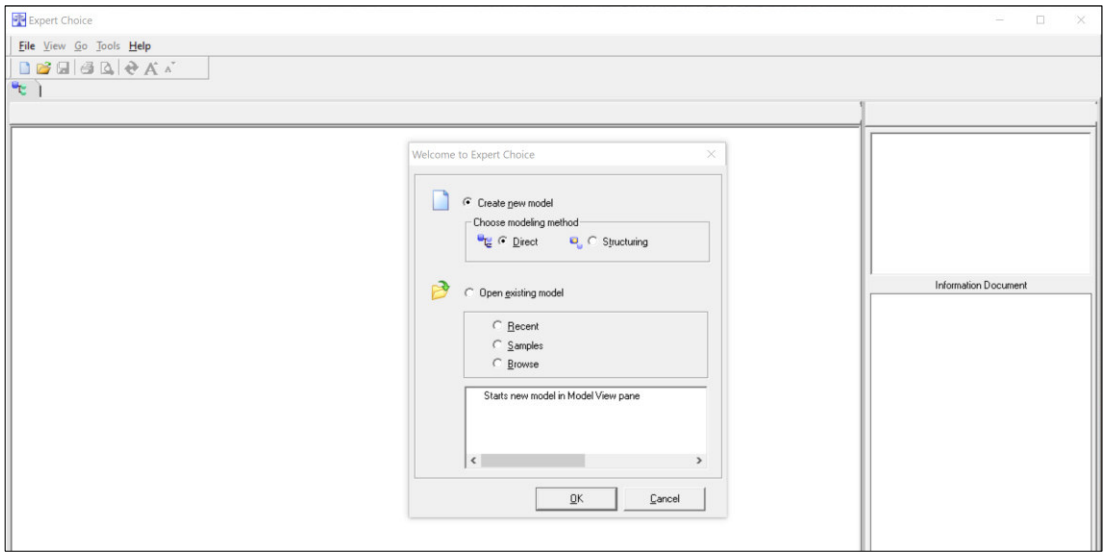
5.3.4. Aplicación del método AHP

Para la aplicación del método AHP se emplea el software Expert Choice, herramienta especializada que permite estructurar el problema de decisión en forma jerárquica y realizar comparaciones por pares entre criterios y alternativas. Esta plataforma facilita el cálculo automático de los pesos relativos, la verificación de la consistencia de los juicios emitidos y la síntesis global de resultados, garantizando un proceso de evaluación sistemático, transparente y confiable. El procedimiento se desarrolla en cinco pasos principales:

5.3.4.1. Configuración del modelo jerárquico en el programa

Al iniciar el programa se selecciona la opción Create new model para generar un nuevo modelo de análisis. El software ofrece dos modalidades: Direct y Structuring. En este caso se opta por la opción Direct, que permite construir el modelo de manera más rápida y sencilla, facilitando la definición del objetivo, los criterios y las alternativas.

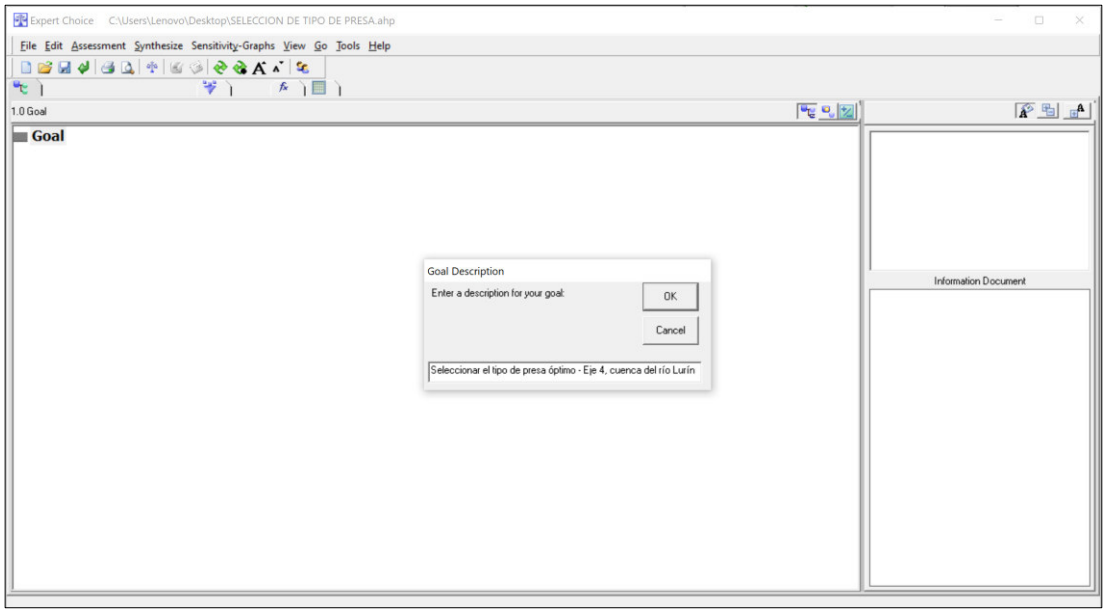
Figura 5.37 Creación del nuevo modelo en el programa Expert Choice.



Fuente: Elaboración propia

Una vez creado el nuevo modelo, el primer paso consiste en definir el objetivo del análisis. En este caso, se establece como meta la “Selección del tipo de presa óptimo en el Eje 4, cuenca del río Lurín”, el cual servirá como nivel superior de la jerarquía en el software Expert Choice.

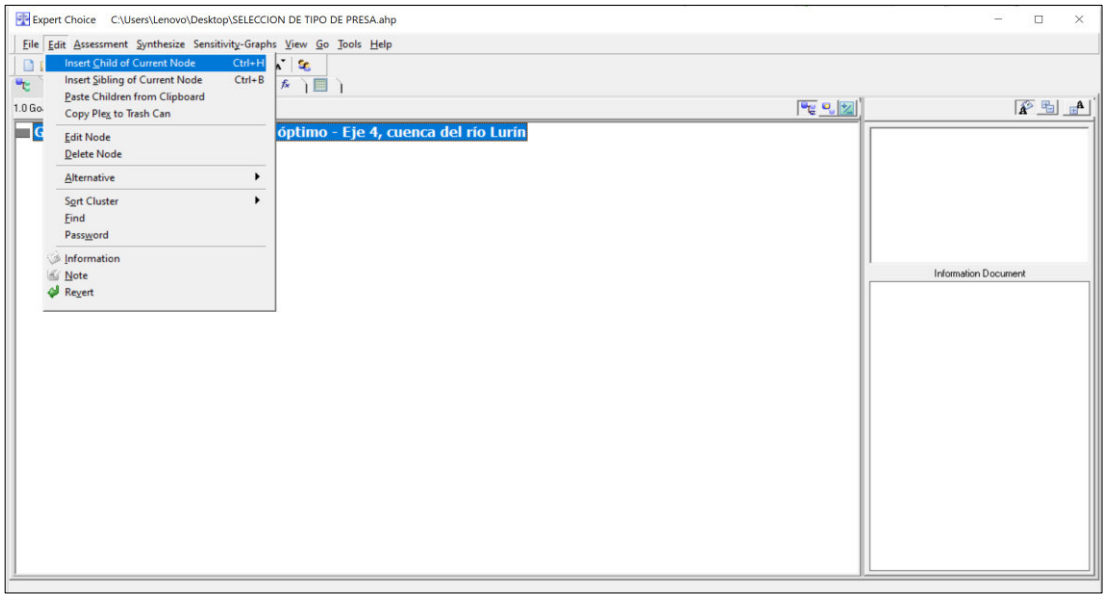
Figura 5.38 Definición del objetivo en el programa Expert Choice.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procede a ingresar los criterios definidos para la investigación dentro del modelo jerárquico. Para ello, en el menú Edit del programa Expert Choice se selecciona la opción Insert Child of Current Node, lo que permite añadir cada criterio como un nodo dependiente del objetivo general.

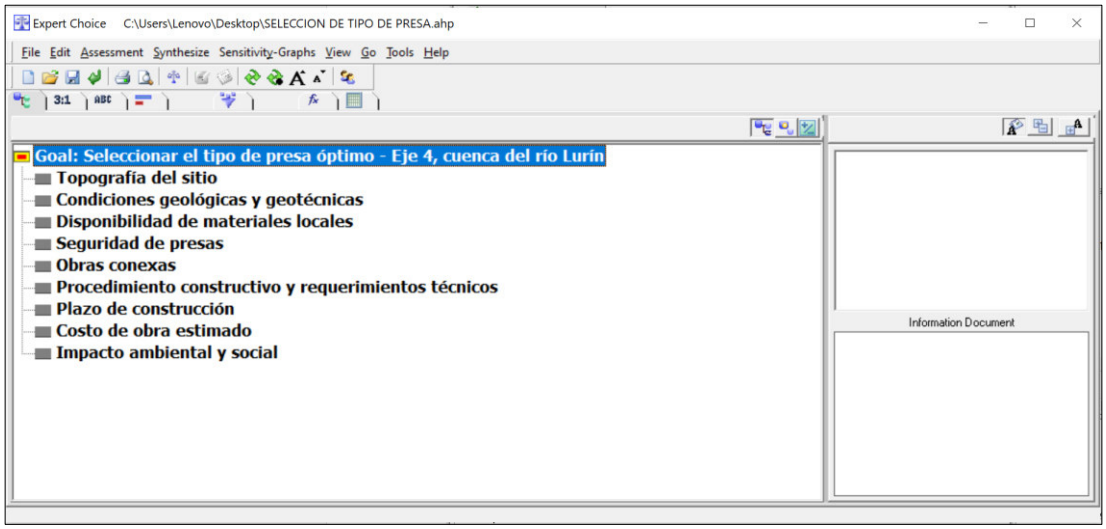
Figura 5.39 Inserción de los criterios en el modelo jerárquico.



Fuente: Elaboración propia

Se muestran los 9 criterios incorporados en el programa, los cuales fueron definidos previamente en el marco de la investigación.

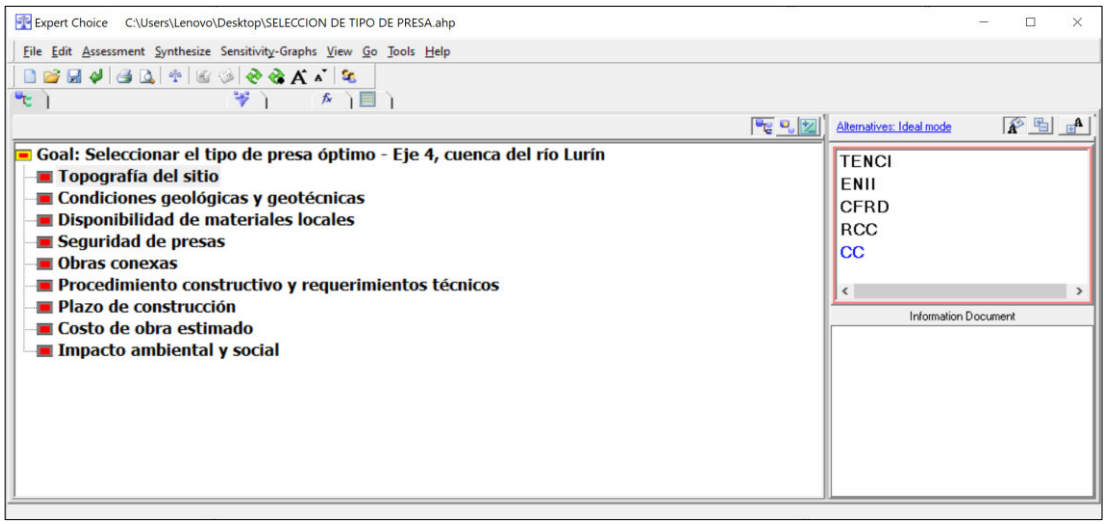
Figura 5.40 Criterios del modelo jerárquico.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se procederá a añadir las alternativas correspondientes al modelo jerárquico de la investigación. Para ello, nos ubicaremos en la barra de menú, seleccionaremos la opción Edit, y dentro del menú desplegable, haremos clic en Alternative y luego en la opción Insert.

Figura 5.41 Ingreso de alternativas al modelo.



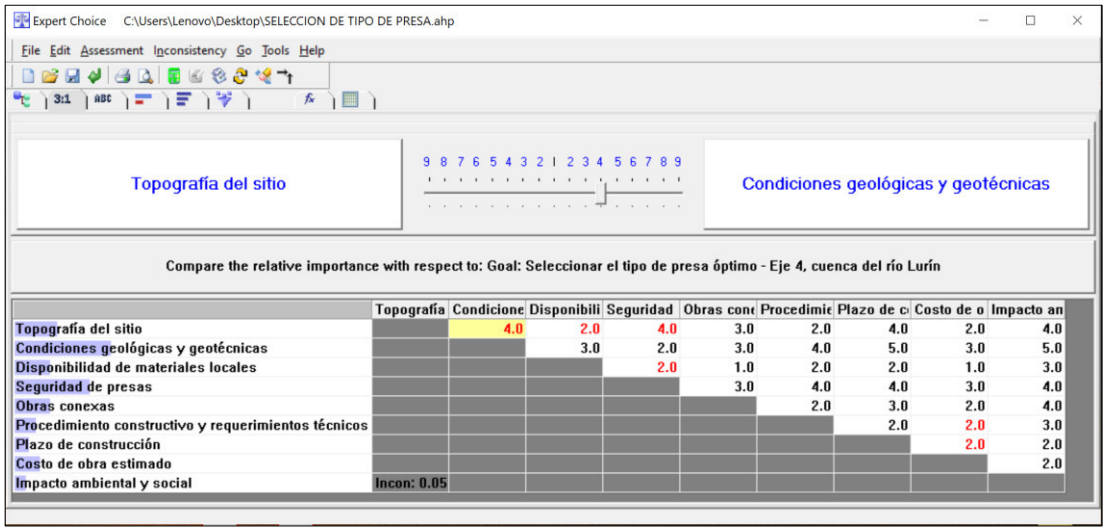
Fuente: Elaboración propia

5.3.4.2. Construcción de la matriz de comparación de criterios

Para establecer la importancia relativa de cada criterio en la selección del tipo de presa en el Eje 4 de la cuenca del río Lurín, se construyó la matriz de comparación por pares en el software Expert Choice. En esta etapa se asignaron juicios de preferencia entre

los criterios definidos previamente, empleando la escala fundamental de Saaty (1–9), lo que permitió cuantificar el grado de relevancia relativa de cada par de criterios. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente figura.

Figura 5.42 Matriz de comparación por pares de criterios en el software Expert Choice.



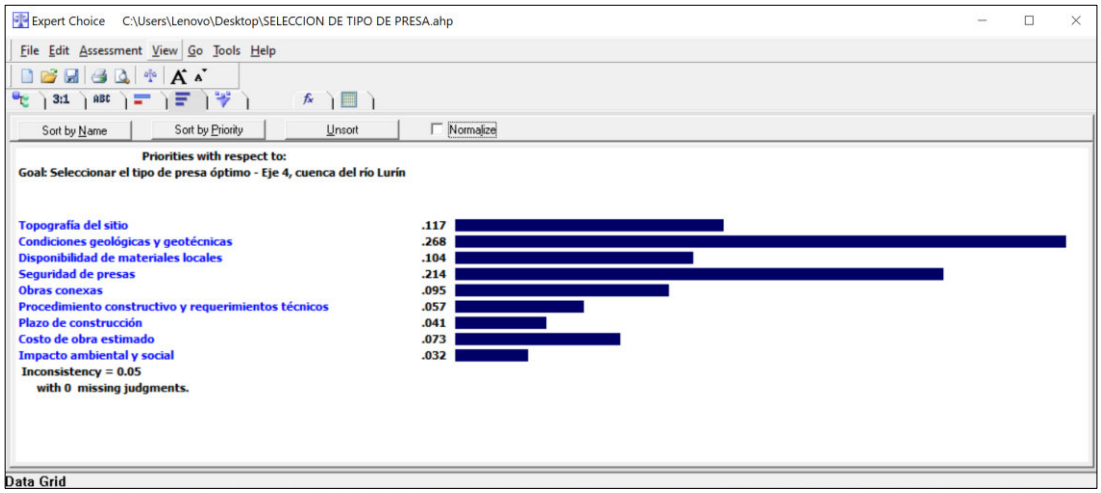
	Topografía	Condicione	Disponibili	Seguridad	Obras con	Procedimie	Plazo de c	Costo de o	Impacto an
Topografía del sitio		4.0	2.0	4.0	3.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Condiciones geológicas y geotécnicas			3.0	2.0	3.0	4.0	5.0	3.0	5.0
Disponibilidad de materiales locales				2.0	1.0	2.0	2.0	1.0	3.0
Seguridad de presas					3.0	4.0	4.0	3.0	4.0
Obras conexas						2.0	3.0	2.0	4.0
Procedimiento constructivo y requerimientos técnicos							2.0	2.0	3.0
Plazo de construcción								2.0	2.0
Costo de obra estimado									2.0
Impacto ambiental y social	Incon: 0.05								

Fuente: Elaboración propia

Los valores numéricos de la matriz de comparación por pares se asignaron siguiendo la escala fundamental de Saaty (1–9), la cual permite expresar en forma cuantitativa la importancia relativa entre dos criterios. En esta escala, el valor 1 indica igual importancia, mientras que valores crecientes hasta 9 reflejan niveles de preferencia desde leve hasta extrema. Por ejemplo, en la comparación entre Topografía del sitio y Condiciones geológicas y geotécnicas, se asignó un valor de 4, lo que significa que las condiciones geológicas y geotécnicas se consideran moderadamente a fuertemente más importantes que la topografía para la selección del tipo de presa. Este procedimiento se aplicó de manera sistemática para cada par de criterios, asegurando coherencia en la priorización establecida por los expertos.

Una vez completada la matriz de comparación por pares, el software Expert Choice calcula automáticamente los pesos relativos de cada criterio, los cuales reflejan su importancia en el proceso de decisión. Estos valores se obtienen mediante la normalización de los juicios emitidos y permiten identificar qué factores tienen mayor influencia en la selección del tipo de presa óptimo. A continuación, se presentan los resultados de las prioridades globales asignadas a los nueve criterios considerados.

Figura 5.43 Ponderación relativa de los criterios para la selección del tipo de presa.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el criterio más influyente corresponde a las Condiciones geológicas y geotécnicas (0.268), seguido por la Seguridad de presas (0.214) y la Topografía del sitio (0.117). Estos tres factores concentran la mayor parte de la ponderación total, lo que evidencia la relevancia de las condiciones físicas y de seguridad para la viabilidad del proyecto. En un nivel intermedio se ubican la Disponibilidad de materiales locales (0.104) y las Obras conexas (0.095), mientras que otros criterios como Costo de obra estimado (0.073), Procedimiento constructivo (0.057) y Plazo de construcción (0.041) tienen un peso menor. Finalmente, el Impacto ambiental y social (0.032) presenta la ponderación más baja, lo que sugiere que, si bien es considerado, tiene menor influencia comparativa en la priorización establecida por los expertos.

5.3.4.3. Construcción de las matrices de alternativas por criterio

Una vez ponderados los criterios principales, se procedió a comparar las cinco alternativas de tipología de presa (TENCI, ENII, CFRD, RCC y CC) con respecto a cada criterio de evaluación definido. Para ello, se elaboraron matrices de comparación por pares en el software Expert Choice, aplicando la escala fundamental de Saaty (1–9). Este proceso permitió determinar el grado de adecuación de cada alternativa frente a las condiciones específicas del Eje 4 de la cuenca del río Lurín, obteniendo así prioridades locales por cada criterio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada criterio.

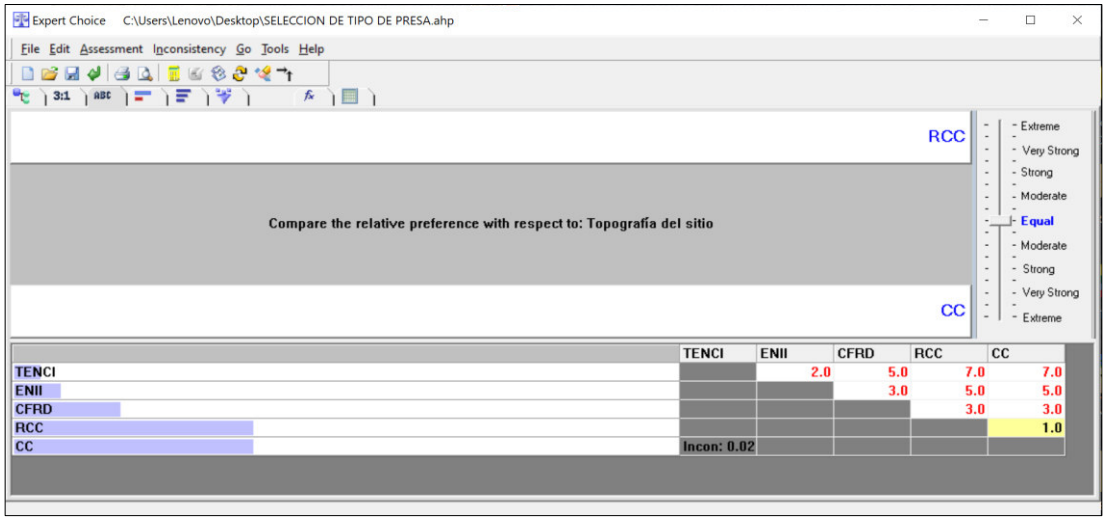
- *Criterio C1: Topografía de sitio:*

  El Eje 4 es encañonado, angosto y con flancos escarpados.

  - Esto favorece presas esbeltas de concreto (RCC y CC), porque requieren menos ancho de base y aprovechan los estribos.
  - CFRD también puede adaptarse, pero necesita más huella que las de concreto.
  - ENII (núcleo inclinado) se acomoda mejor que TENCI (núcleo central), ya que distribuye cargas y se ajusta a laderas inclinadas.
  - TENCI es la menos favorable en topografía estrecha, porque necesita mucha base y volumen.

  Orden de preferencia topográfica: RCC ≈ CC > CFRD > ENII > TENCI.

Figura 5.44 Matriz de comparación de alternativas respecto al criterio Topografía del sitio.



Fuente: Elaboración propia

- *Criterio C2: Condiciones geológicas y geotécnicas:*

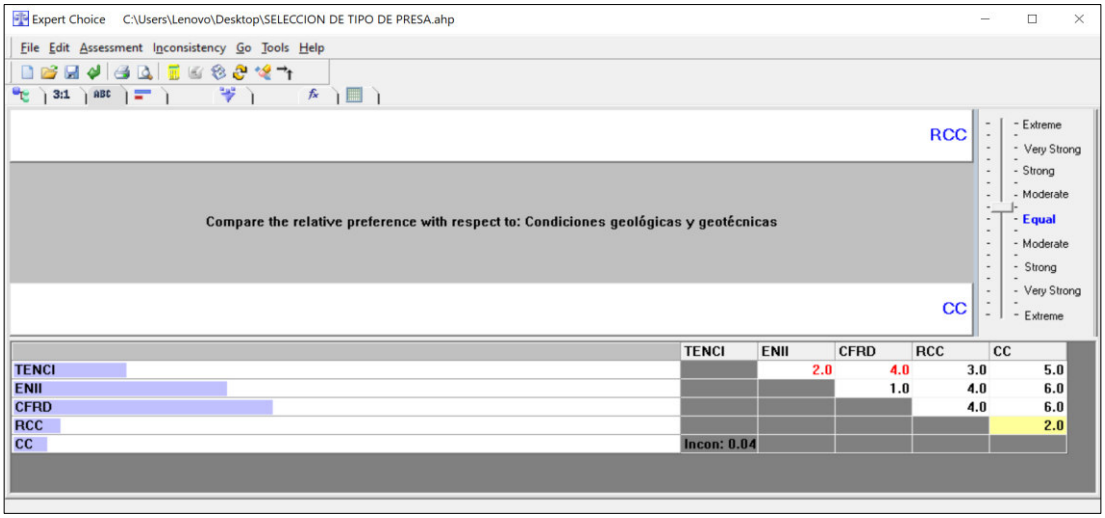
  En el Eje 4 la roca competente está a 50 m de profundidad, con sobrecarga de materiales aluviales muy permeables y roca fracturada.

  - Esto penaliza las presas de concreto (RCC, CC) porque requieren cimentar directamente sobre roca sana; excavaciones masivas e inyecciones profundas.

- Las presas de materiales sueltos (TENCI, ENII, CFRD) se adaptan mejor, pues distribuyen cargas en superficie amplia y pueden incorporar pantallas/cortinas impermeables para controlar filtraciones.
- TENCI queda un poco más comprometida (núcleo central en material heterogéneo).
- En el fondo, RCC es más viable que CC (por menor peso unitario y mejor comportamiento en roca fracturada).

Orden de preferencia geológica: CFRD ≈ ENII > TENCI > RCC > CC.

Figura 5.45 Matriz de comparación de alternativas respecto al criterio Condiciones geológicas.



Fuente: Elaboración propia

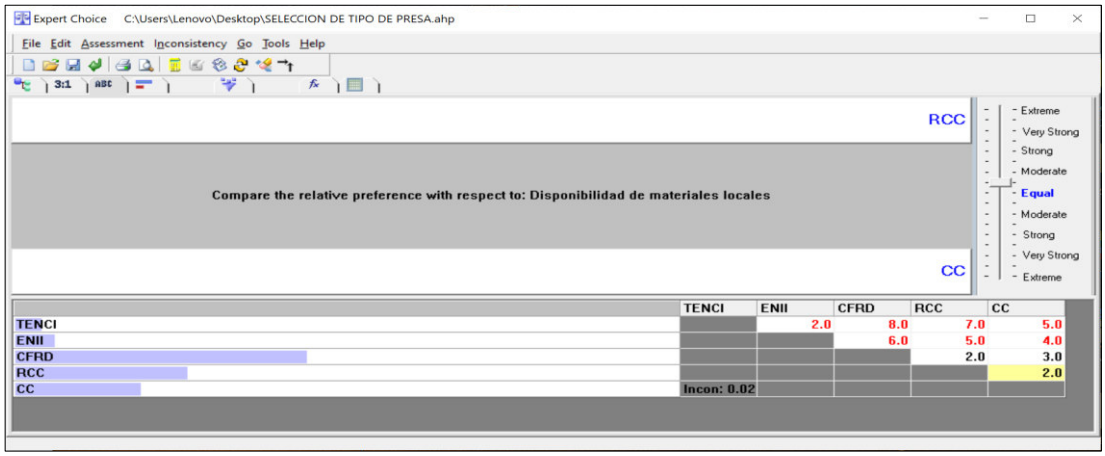
- *Criterio C3: Disponibilidad de materiales locales:*

En el Eje 4 hay mucha roca y agregados cercanos (canteras), pero escasea la arcilla impermeable.

- Esto penaliza TENCI/ENII (necesitan núcleo de arcilla y control fino de humedad).
- CFRD se beneficia porque no requiere arcilla (cara de concreto) y usa gran volumen de enrocado local.
- RCC/CC también aprovechan los áridos locales; el cemento se importa pero es manejable logísticamente.

Orden de preferencia: CFRD ≈ RCC > CC > ENII > TENCI.

Figura 5.46 Matriz de comparación de alternativas respecto a Disponibilidad de materiales.



Fuente: Elaboración propia

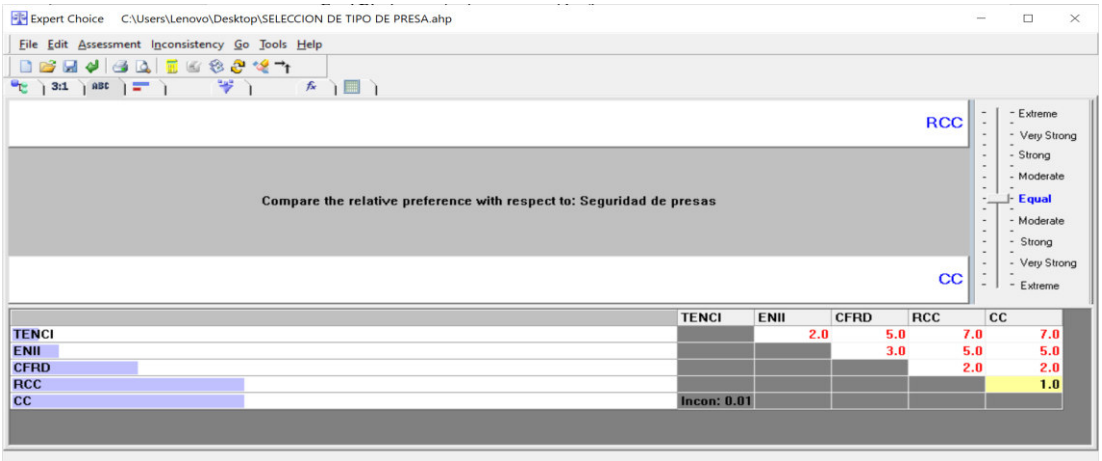
- *Criterio C4: Seguridad de presas:*

En el Eje 4, zona sísmica y con crecidas fuertes:

- RCC y CC son muy seguras (soportan sobrevertimiento y sismos).
- CFRD también tiene buen desempeño (cara de concreto y flexibilidad del cuerpo de enrocado).
- ENII más segura que TENCI porque el núcleo inclinado permite mejor control de presiones y drenaje.
- TENCI es la menos favorable, más vulnerable a piping y fisuración del núcleo en sismos.

Orden de preferencia: RCC ≈ CC > CFRD > ENII > TENCI.

Figura 5.47 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Seguridad de presas.



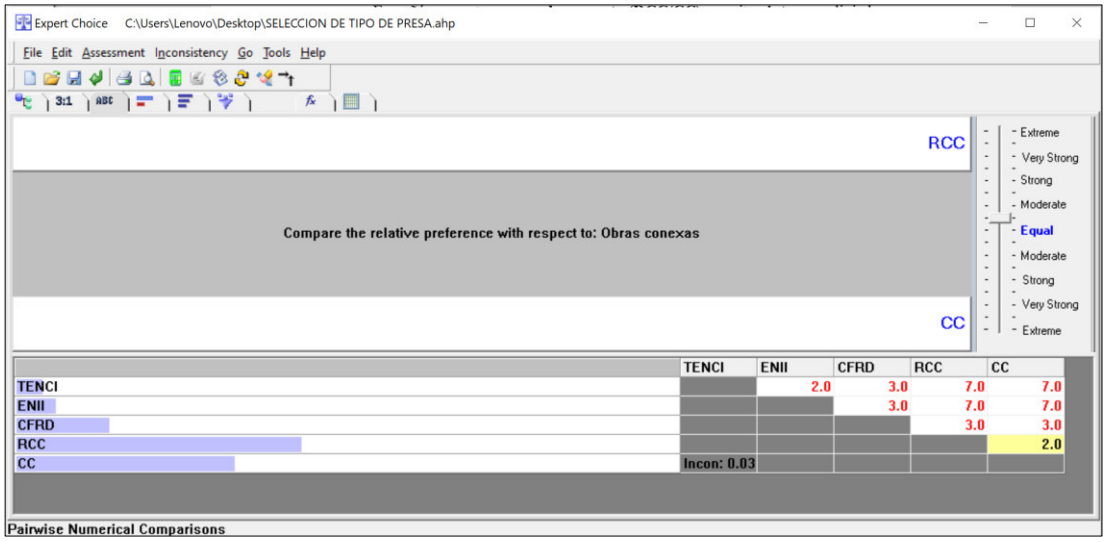
Fuente: Elaboración propia

- *Criterio C5: Obras conexas:*

  - En cañón angosto, presas de concreto (RCC/CC) permiten integrar aliviadero y tomas dentro del cuerpo, y a veces usar conducciones del propio bloque para el desvío → menos frentes de obra y menor complejidad.
  - En presas de materiales sueltos (TENCI/ENII/CFRD) el aliviadero y el desvío suelen ir externos (túnel o canal en roca) y la toma de fondo atraviesa la cimentación con transiciones → más obras e interfaces.
  - RCC suele ser la mejor para integrar aliviaderos escalonados, galerías y tomas; CC muy parecido, pero algo menos eficiente. CFRD mejor que ENII/TENCI porque admite mejor a estructuras de concreto adosadas.

  Orden de preferencia: RCC > CC > CFRD > ENII > TENCI.

Figura 5.48 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Obras conexas.



Fuente: Elaboración propia

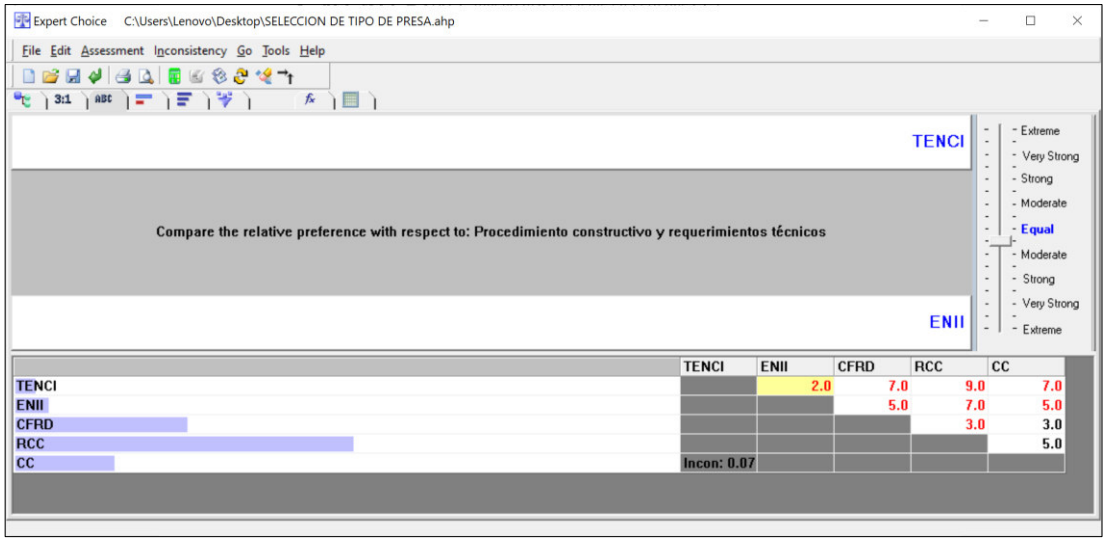
- *Criterio C6: Procedimiento constructivo y requerimientos técnicos:*

  - RCC → el más ventajoso: construcción continua, experiencia reciente en el país + rapidez + disponibilidad de tecnología.
  - CFRD → Muy viable en el contexto peruano: abundancia de roca, equipos de movimiento de tierras disponibles, mano de obra local entrenada.

- CC → Factible pero lento (encofrados, fraguado, control térmico) y más costoso en operación; aunque la técnica es bien conocida, no es la preferida por plazo/costo.
- ENII → Posible, pero dependiente de clima y materiales (déficit de arcillas locales).
- TENCI → Menos recomendable en este eje: dificultades técnicas, dependencia de arcilla y mayor riesgo constructivo.

Orden de preferencia: RCC > CFRD > CC > ENII > TENCI.

Figura 5.49 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Procedimient constructivo.



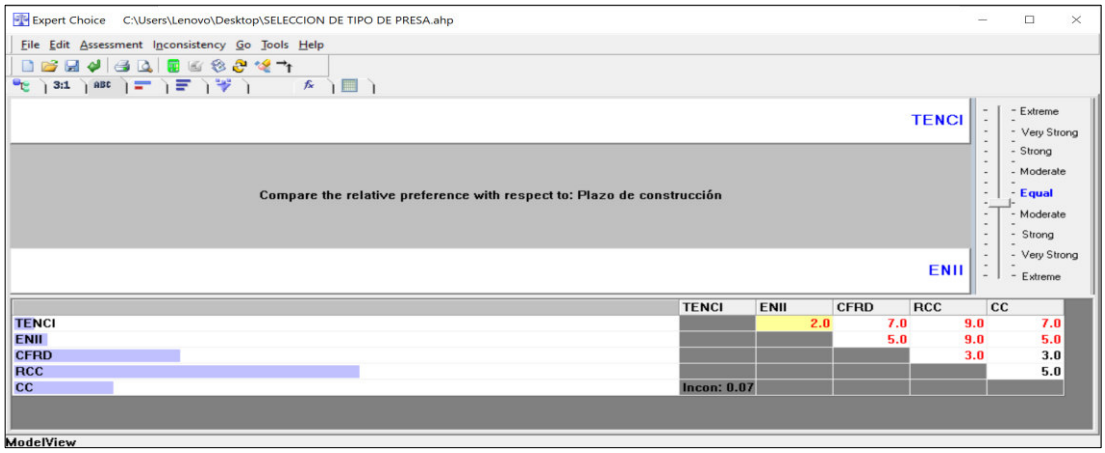
Fuente: Elaboración propia

- *Criterio C7: Plazo de construcción:*

- RCC: ritmo continuo 24/7; poco sensible a lluvias → más rápido.
- CFRD: rápido (sin núcleo arcilloso) pero requiere gran movimiento de roca.
- CC: más lento por encofrados/curado, aunque menos sensible a lluvias que los núcleos de arcilla.
- ENII/TENCI: colocación de núcleo en capas con control de humedad → altamente estacional (paradas en época de lluvias). TENCI suele ser el más lento.

Orden de preferencia: RCC > CFRD > CC > ENII > TENCI.

Figura 5.50 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Plazo de construcción.

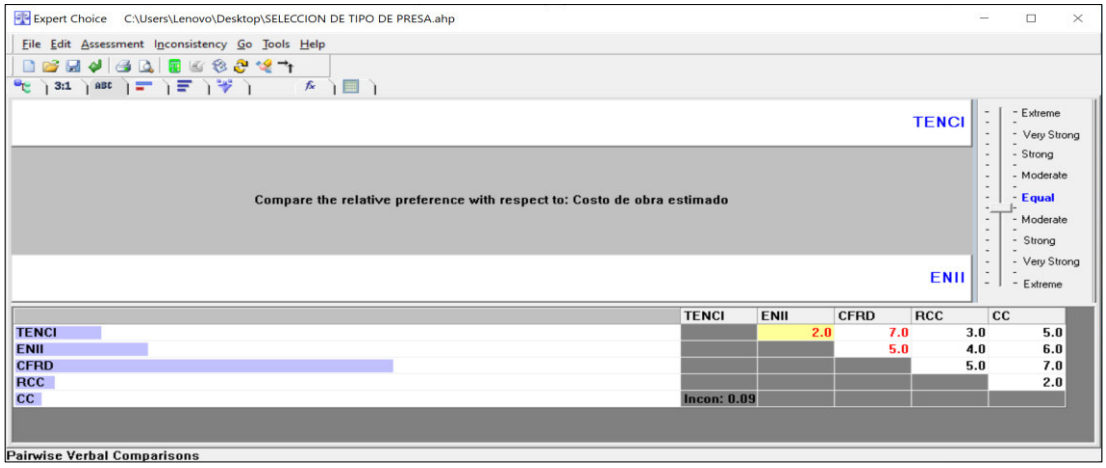


Fuente: Elaboración propia

- *Criterio C8: Costo de obra:*
  - Excavación/fundación: Presas de concreto (RCC/CC) exigen excavar hasta roca sana o consolidar roca fracturada → fuerte costo inicial.
  - Volúmenes de cuerpo: Presas de relleno tienen gran volumen, pero con material local barato; CFRD evita núcleo arcilloso (que aquí escasea) y se apoya en enrocado cercano → ventaja de costo.
  - Núcleo arcilloso: ENII/TENCI suben costo por acarreo/colocación de arcilla y controles; ENII suele ser algo más eficiente que TENCI.
  - RCC vs CC: RCC reduce volumen y encofrados frente a CC, aunque consume cemento; aun así, CC tiende a ser el más costoso en este sitio.

Orden de preferencia: CFRD > ENII > TENCI > RCC > CC.

Figura 5.51 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Costo directo.

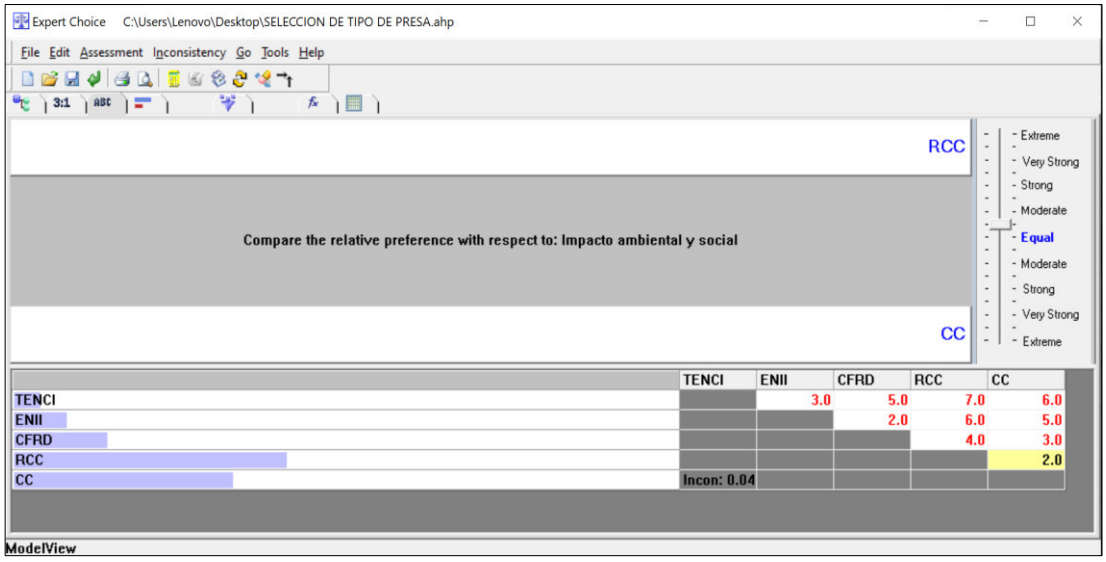


Fuente: Elaboración propia

- *Criterio C9: Impacto ambiental y social:*
  - Presas de materiales sueltos (TENCI, ENII, CFRD):
    - Mayor huella ecológica por los grandes volúmenes de roca/tierra y áreas de cantera.
    - TENCI y ENII generan impactos adicionales por el acarreo de arcillas (no disponibles localmente).
    - CFRD, aunque mueve mucha roca, evita el transporte de arcillas → impacto algo menor.
  - Presas de concreto (RCC, CC):
    - Huella física menor (estructura esbelta, menos volumen de obra).
    - Sin embargo, impacto industrial alto: fabricación de cemento, energía, emisiones de CO_2.
    - Socialmente, concentran el trabajo en un solo frente de obra, menos dispersión territorial.
    - En este valle, probablemente el impacto local es menor con RCC/CC que con TENCI/ENII.

Orden de preferencia: RCC > CC > CFRD > ENII > TENCI.

Figura 5.52 Matriz de comparación de alternativas respecto a criterio Impacto ambiental.

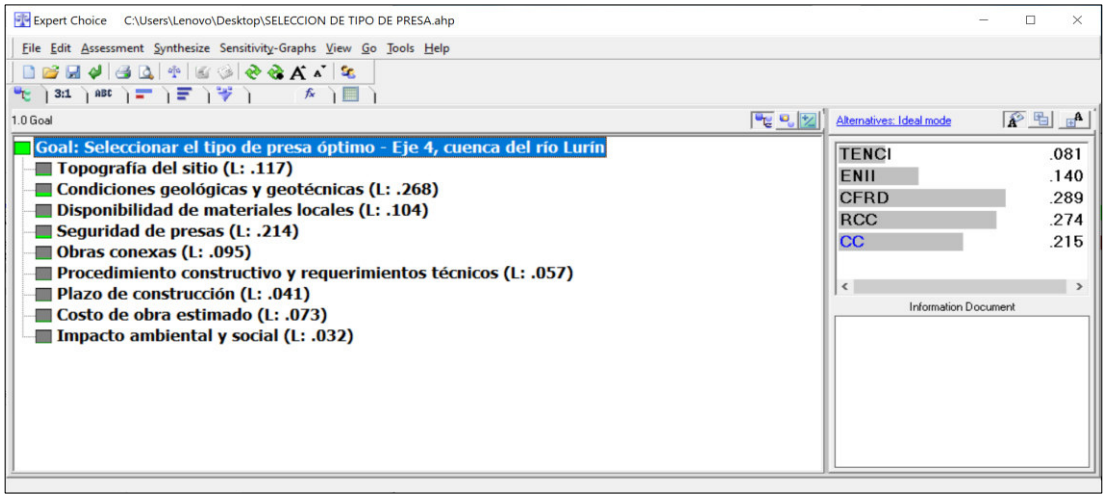


Fuente: Elaboración propia

5.3.4.4. Síntesis global de resultados

Para integrar los resultados de todas las comparaciones por pares realizadas en los criterios definidos, el software Expert Choice efectúa la síntesis global, calculando los pesos relativos de cada alternativa de presa respecto al objetivo general. Este procedimiento combina la importancia de los criterios (nivel 1) con la evaluación de las alternativas (nivel 2), obteniendo así una priorización final (nivel 3). El resultado permite identificar qué tipología de presa presenta mayor adecuación al Eje 4 de la cuenca del río Lurín, de acuerdo con la metodología AHP. En la siguiente figura se muestran los valores finales obtenidos para cada alternativa.

Figura 5.53 Resultados globales del modelo AHP en Expert Choice.



Fuente: Elaboración propia

La síntesis global de resultados refleja el peso consolidado de cada alternativa de presa en función de los nueve criterios evaluados. El gráfico muestra que la presa CFRD (0.289) y la presa RCC (0.274) son las opciones con mayor prioridad relativa, indicando que ambas presentan un desempeño muy competitivo en el Eje 4 de la cuenca del río Lurín. En tercer lugar, se posiciona la presa de concreto convencional (CC) con 0.215, seguida por la presa ENII (0.140) y finalmente la presa TENCI (0.081).

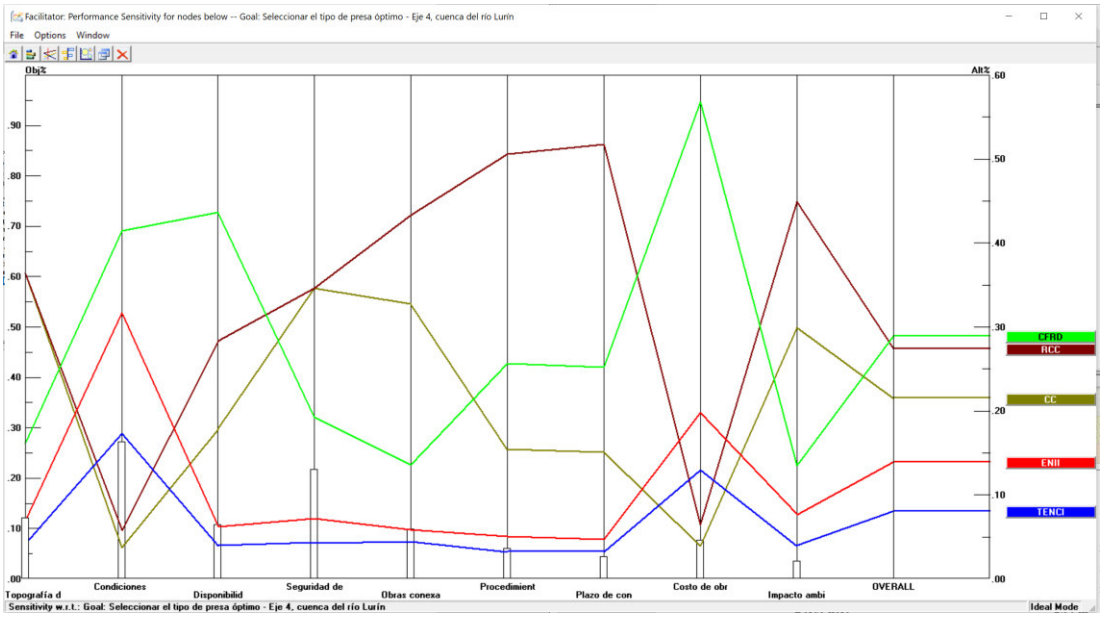
Estos resultados evidencian que las tipologías de concreto, particularmente CFRD y RCC, se ajustan mejor a las condiciones topográficas, geológicas, constructivas y de seguridad del sitio, mientras que las alternativas con núcleo impermeable presentan menor viabilidad relativa. El ranking obtenido proporciona una base objetiva para

orientar la selección técnica hacia las alternativas más robustas en el contexto del área de estudio.

5.3.4.5. Análisis de sensibilidad

Para complementar la interpretación de los resultados obtenidos, se realizó un análisis de sensibilidad en el software Expert Choice. Esta herramienta permite evaluar cómo varían las prioridades de las alternativas en función de los cambios en la ponderación de los criterios. En la Figura 5.54 se observa el gráfico de sensibilidad en líneas, donde cada alternativa mantiene una tendencia diferente frente a los criterios evaluados, mostrando de manera dinámica la robustez de la selección final.

Figura 5.54 Análisis de sensibilidad por criterios en la selección del tipo de presa.

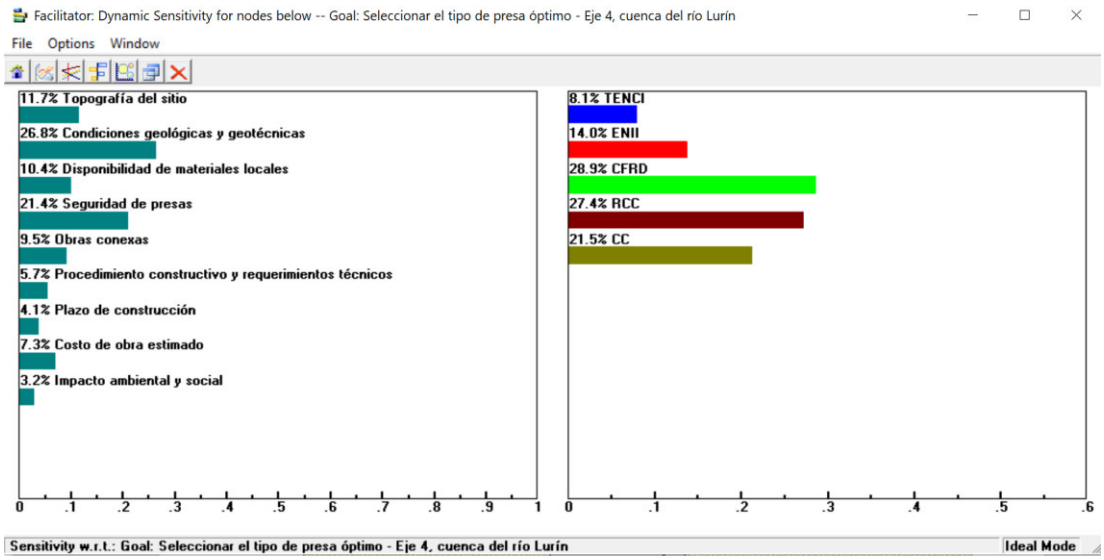


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de sensibilidad por criterios, se observa que los factores más influyentes son las condiciones geológicas y geotécnicas (26.8%) y la seguridad de presas (21.4%), seguidos de la topografía del sitio (11.7%) y la disponibilidad de materiales locales (10.4%). Estos criterios concentran más del 70% de la ponderación total, lo que refleja la importancia de la estabilidad geológica, el desempeño estructural y las características físicas del valle para la toma de decisiones. En contraste, aspectos como el impacto ambiental y social (3.2%) o el plazo de construcción (4.1%) tienen menor peso relativo en el modelo.

Por otro lado, en el gráfico de resultados globales por alternativas, se evidencia que las presas de enrocado con cara de concreto (CFRD, 28.9%) y de concreto compactado con rodillo (RCC, 27.4%) presentan las mayores prioridades, siendo prácticamente competitivas entre sí. Les siguen las presas de concreto convencional (CC, 21.5%), mientras que las alternativas de tierra con núcleo inclinado (TENCI, 8.1%) y de enrocado con núcleo impermeable (ENII, 14.0%) presentan menor preferencia.

Figura 5.55 Sensibilidad dinámica de criterios y alternativas.



Fuente: Elaboración propia

En síntesis, el análisis multicriterio concluye que las alternativas CFRD y RCC son las más viables para el Eje 4, ya que logran equilibrar los factores técnicos, geológicos y de seguridad. La decisión final dependerá de la priorización entre el aprovechamiento de materiales locales (que favorece a CFRD) y la compacidad estructural asociada a RCC.

5.3.4.5. Selección final del tipo de presa

En la aplicación del método AHP, se obtuvo el siguiente orden de preferencia:

- CFRD (28.9%)
- RCC (27.4%)
- CC (21.5%)
- ENII (14.0%)
- TENCI (8.1%)

Se aprecia que la presa CFRD (Concrete Face Rockfill Dam) resulta la opción más ventajosa, ligeramente por encima de la RCC, debido a su mejor adaptación a las condiciones geológicas del Eje 4, donde la roca competente se encuentra a mayor profundidad y existen estratos fracturados y aluviales permeables. Esta tipología permite reducir la necesidad de excavaciones masivas hasta alcanzar roca sana, incorporando en su diseño una pantalla de inyecciones para controlar filtraciones, lo que la hace técnicamente más viable y económicamente más competitiva en este sitio.

La presa RCC (Roller Compacted Concrete) aparece como la segunda alternativa más competitiva, respaldada por su mayor seguridad estructural y rapidez constructiva; sin embargo, la profundidad de la fundación y los elevados costos asociados a los tratamientos del macizo reducen su ventaja relativa.

Las alternativas de concreto convencional (CC), aunque técnicamente factibles, resultan menos competitivas por el mayor tiempo y costo constructivo. En contraste, las presas de materiales sueltos con núcleo impermeable (ENII, TENCI) quedaron relegadas al último lugar, principalmente por la escasez de arcillas locales de baja permeabilidad y las exigencias de control de filtraciones en un macizo altamente fracturado.

En síntesis, el proceso de evaluación multicriterio concluye que la presa tipo CFRD constituye la opción óptima para el Eje 4 de la cuenca del río Lurín, al alcanzar el mayor puntaje global en el balance de criterios, ofreciendo una solución técnicamente segura, económicamente competitiva y constructivamente viable en las condiciones geológicas y topográficas del sitio.

6. CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan e interpretan los hallazgos obtenidos en la investigación, relacionándolos con los objetivos planteados, la literatura existente y la realidad práctica. Se profundiza en los aspectos técnicos, metodológicos, geológicos y sociales de los resultados, resaltando la contribución del enfoque combinado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos multicriterio (AHP y TOPSIS) en la planificación de presas. Asimismo, se comparan los resultados con estudios previos nacionales e internacionales, se validan con casos reales relevantes y se establecen principios y generalizaciones derivadas del estudio, culminando con una síntesis final de la discusión.

6.1. Síntesis de Resultados

6.1.1. Mapa de idoneidad (Objetivo Específico 1)

El primer objetivo específico consistía en generar un mapa de idoneidad para la ubicación de presas en la cuenca del río Lurín mediante SIG y AHP. Los resultados muestran claramente la distribución espacial de las zonas más aptas, moderadamente aptas y menos aptas para emplazar una presa. En general, las áreas identificadas con alta idoneidad se concentran en sectores de la cuenca que reúnen condiciones favorables: valles estrechos y de pendiente adecuada (facilitando una mayor capacidad de embalse con menor longitud de presa), presencia de formaciones geológicas competentes para cimentación, disponibilidad de materiales de construcción cercanos (como roca para enrocados) y menor impacto sobre asentamientos humanos y zonas agrícolas. Por el contrario, las zonas de baja idoneidad tienden a corresponder a tramos con valles amplios (que requerirían presas muy largas o altas para embalsar agua suficiente), terrenos con geología poco favorable (por ejemplo, presencia de suelos poco consolidados o fallas geológicas) o proximidad a áreas ambientalmente sensibles o densamente pobladas que desaconsejan la construcción. La elaboración del mapa integró múltiples criterios físicos, geológicos, hidrológicos y de uso del suelo, ponderados según su importancia mediante AHP, lo que permitió obtener una visión objetiva y jerarquizada del territorio. Este resultado cumple el primer objetivo específico, proporcionando una herramienta visual y cuantitativa para la planificación: se identificaron claramente los sectores óptimos donde enfocar estudios más

detallados. Cabe resaltar que la inclusión explícita de criterios geotécnicos en el análisis es fundamental, ya que un sitio con condiciones geológicas adversas difícilmente sería viable sin importar otras ventajas; por ejemplo, la presencia de estratos deleznables como evaporitas en la cimentación puede inviabilizar por completo un emplazamiento de presa. El mapa de idoneidad, por tanto, no solo muestra dónde podría ubicarse una presa, sino también por qué ciertas zonas son más favorables que otras, en función de la combinación de factores evaluados.

6.1.2. Selección del eje óptimo (Objetivo Específico 2)

El segundo objetivo específico buscaba identificar, entre las alternativas viables, el sitio exacto (eje) más adecuado para la construcción de la presa, aplicando la técnica TOPSIS a los ejes previamente seleccionados en el mapa de idoneidad. Los resultados del análisis multicriterio discreto indicaron que el Eje 4 es la alternativa óptima, al presentar la mayor cercanía a la solución ideal y la mayor distancia a la solución negativa en la evaluación TOPSIS. Este eje superó a los demás candidatos en el ranking final, lo que significa que logra el mejor equilibrio relativo entre todos los criterios considerados. La selección de Eje 4 sugiere que este sitio en particular combina de manera sobresaliente las características deseadas: probablemente ofrece una topografía ventajosa (estrechamiento natural del cauce que maximiza el volumen retenido por metro de presa), una base geológica sólida y estable, suficiente aportación hídrica (cuenca de drenaje y caudal adecuados), accesibilidad y proximidad razonable a infraestructuras existentes, así como un impacto social y ambiental manejable en comparación con las otras opciones evaluadas. En otras palabras, Eje 4 resultó ser el punto de convergencia óptimo de criterios técnicos (geología, pendiente, altura de presa requerida), económicos (costos de construcción y materiales) y ambientales-sociales (mínima interferencia con comunidades o ecosistemas sensibles) dentro de la cuenca. Este hallazgo satisface el segundo objetivo específico al identificar, con sustento cuantitativo, el emplazamiento más prometedor. Es importante destacar que la utilización de TOPSIS añadió rigor al proceso decisional: a diferencia de un simple ordenamiento visual del mapa, TOPSIS permitió comparar de forma objetiva a los candidatos en una matriz de decisión multicriterio, reduciendo sesgos y considerando simultáneamente unidades de medida distintas. El hecho de que el Eje 4 surgiera como ganador robusto en este análisis brinda confianza en que la metodología pudo discernir

efectivamente la mejor opción disponible. No obstante, debe recordarse que la ventaja de Eje 4 sobre otros ejes depende de las ponderaciones y datos utilizados; una variación significativa en criterios (por ejemplo, si cambiara drásticamente la importancia relativa de la cercanía a centros de demanda o la prioridad dada a minimizar impactos ambientales) podría modificar el orden de preferencia. Aun así, con los parámetros definidos en esta investigación, Eje 4 se consolida como la alternativa óptima, consolidando el aporte práctico del estudio al acotar la decisión de localización a un sitio específico de alto potencial.

6.1.3. Tipología de presa óptima (Objetivo Específico 3)

El tercer objetivo específico fue determinar la alternativa óptima de tipología de presa para el sitio seleccionado, mediante el método AHP. Los resultados evidenciaron que la presa de enrocado con cara de concreto (CFRD, Concrete Face Rockfill Dam) es la tipología preferida para las condiciones de la cuenca del río Lurín, al obtener la mayor prioridad relativa en la comparación multicriterio de alternativas. En el análisis se consideraron varias opciones típicas de presas (por ejemplo, presa de gravedad de concreto, presa de materiales sueltos homogénea o zonificada, presa de enrocado con núcleo impermeable o cara de concreto, presa de RCC –concreto compactado con rodillo–, entre otras), evaluadas frente a un conjunto de criterios de decisión adecuados. Aunque los detalles de las ponderaciones específicas se presentan en el capítulo de resultados, cualitativamente se puede inferir que la CFRD sobresalió debido a varias ventajas que concuerdan con las características del sitio y los criterios valorados: Adecuación geológico-estructural: una presa CFRD tolera de manera eficiente asentamientos diferenciales y sismos, ya que su cuerpo de enrocado proporciona estabilidad y disipación de energía sísmica, mientras la cara de concreto garantiza impermeabilidad; esto es especialmente relevante en la zona central del Perú, de alta sismicidad, lo que habría incrementado el peso del criterio de seguridad sísmica a favor de este tipo de presa. Disponibilidad de materiales y costos: la cuenca Lurín cuenta con abundancia de materiales pétreos (rocas y gravas) aptos para enrocado, reduciendo costos de transporte; a su vez, una CFRD requiere menor volumen de concreto que una presa de gravedad, lo que podría ser económicamente ventajoso si el cemento es costoso o debe traerse de lejos. Consideraciones de construcción y plazo: las presas de enrocado suelen permitir una construcción relativamente expedita, con

flexibilidad para adaptar el diseño a las condiciones del terreno, y suelen presentar menos complejidades en el desvío del río durante la obra en comparación con grandes presas de concreto. Criterios ambientales y sociales: una CFRD típicamente no requiere infraestructura tan masiva como una presa de concreto (p. ej., planta de cementos in situ de gran escala), lo que reduce la huella temporal de construcción; además, su diseño puede adaptarse para mantener cierto caudal ecológico aguas abajo. Estos factores, entre otros, explican que la CFRD haya obtenido la mayor puntuación compuesta en el AHP realizado, convirtiéndose en la alternativa óptima de tipología para el proyecto. Este resultado cumple el tercer objetivo específico y proporciona una orientación de ingeniería valiosa: no solo tenemos dónde construir la presa (Eje 4), sino también qué tipo de presa construir en dicho emplazamiento, alineando las características de diseño con las condiciones locales. Conviene comparar este resultado con prácticas en proyectos similares: la preferencia por presas de enrocado con cara de concreto en regiones montañosas y sísmicas es coherente con la experiencia internacional, donde este tipo de presa ha demostrado buen desempeño; sin embargo, la elección óptima de tipología siempre debe ser confirmada mediante estudios de factibilidad detallados, pues depende de especificaciones de altura de presa, capacidad de almacenamiento requerida y estudios geotécnicos in situ. En el caso de la cuenca Lurín, la priorización de la CFRD sugiere que, bajo los criterios ponderados, esta tipología ofrece el mejor compromiso entre seguridad, costo, tiempo de construcción y adaptación al medio para la presa propuesta. Este análisis tipológico complementa y completa los hallazgos de localización: una vez elegido Eje 4 como el sitio, la selección de la presa CFRD asegura que el diseño sea congruente con las condiciones de ese emplazamiento óptimo.

En síntesis, la interpretación de los resultados por cada objetivo específico confirma la validez de la hipótesis central de la investigación: la integración de SIG con métodos multicriterio (AHP para ponderación de criterios y TOPSIS para priorización de alternativas) permite determinar de forma sistemática el sitio y tipo de presa óptimos en una cuenca. Cada resultado logrado (mapa de idoneidad, elección del eje 4, selección de la presa CFRD) aporta una pieza clave al objetivo general de planificar una presa óptimamente localizada y diseñada para la cuenca del río Lurín. Además, estos hallazgos realzan la importancia de abordar la planificación de presas desde un enfoque holístico: consideraciones técnicas (topografía, geología, disponibilidad de

materiales), ambientales (uso del suelo, áreas protegidas), sociales (proximidad a comunidades, necesidades hídricas locales) y económicas (costos, accesibilidad) fueron incorporadas explícitamente o implícitamente en el modelo. La discusión a continuación situará estos resultados en el contexto de otras investigaciones y casos reales, para contrastar su coherencia y extraer lecciones más amplias.

6.2. Comparación con estudios previos

Los resultados obtenidos en esta investigación pueden contextualizarse y contrastarse con la literatura técnica disponible, tanto a nivel nacional como internacional. En general, se observa una congruencia notable con las tendencias metodológicas reportadas en estudios previos, a la vez que emergen algunas diferencias atribuibles a las particularidades del caso de estudio (cuenca del río Lurín) y a las preferencias de criterios adoptadas.

En primer lugar, desde una perspectiva metodológica amplia, múltiples investigaciones coinciden en la utilidad de integrar SIG con métodos de análisis multicriterio para la selección de sitios de presas. De hecho, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la técnica TOPSIS figuran entre las herramientas multicriterio más difundidas en la gestión de recursos hídricos, incluyendo problemas de localización de embalses. Una revisión sistemática reciente sobre decisiones multicriterio en gestión de presas destaca que AHP es el método más frecuente, seguido precisamente por combinaciones híbridas que incorporan TOPSIS, lo que evidencia la creciente preferencia por enfoques complementarios en la toma de decisiones complejas (Marzouk et al., 2020). Asimismo, se identifica la ubicación de presas como una de las áreas principales donde se ha aplicado exitosamente la integración de AHP con SIG para determinar sitios óptimos (Dai, 2016). Los hallazgos de este estudio se inscriben dentro de esta corriente metodológica, validando su eficacia: el hecho de haber empleado AHP para generar el mapa de idoneidad y TOPSIS para refinar la selección del sitio coincide con la práctica recomendada en la literatura de combinar la fortaleza de AHP en la ponderación de criterios con la capacidad de TOPSIS para jerarquizar alternativas de manera más precisa (Jozaghi et al., 2018).

En cuanto a la comparación con estudios nacionales, es ilustrativo contrastar nuestro resultado de tipología óptima con investigaciones peruanas similares. Por ejemplo, Arbaiza y Quisca (2023) aplicaron el método AHP para seleccionar el tipo óptimo de presa en el proyecto "Presa Toma Grande" (Arequipa, Perú), considerando múltiples alternativas de diseño y un conjunto amplio de criterios técnicos, económicos y ambientales. En ese caso, la tipología priorizada fue una presa de gravedad, decisión respaldada por la presencia de roca sana emergente en superficie y condiciones de cimentación favorables, además de una topografía adecuada y disponibilidad de materiales. En contraste, en la cuenca del río Lurín las condiciones geológicas son distintas, pues la roca competente se encuentra a mayor profundidad y se identifican estratos fracturados y depósitos aluviales permeables, lo que favorece la selección de una CFRD como alternativa más viable. Esta comparación evidencia que, aun utilizando la misma metodología, los resultados pueden diferir según las condiciones locales, pero en ambos casos se confirma la validez del AHP como herramienta de apoyo en la selección tipológica de presas.

Al comparar nuestro mapa de idoneidad con estudios internacionales, se aprecia que hemos incorporado un número amplio de factores en relación con trabajos previos más simplificados. Qureshi (2015), en Pakistán, utilizó SIG con evaluación multicriterio (combinación lineal ponderada) para seleccionar sitios de presas, pero se restringió a tres criterios principales (precipitación, pendiente y proximidad a asentamientos). Aunque logró identificar sitios viables, los autores reconocen que dejar de lado criterios como tipo de suelo y áreas protegidas podría llevar a seleccionar emplazamientos subóptimos. En contraste, nuestro trabajo integró criterios geológicos, de uso del suelo, hidrológicos y de accesibilidad, alineándose con las recomendaciones de Dai (2016) en China, quien subraya la necesidad de emplear fuentes de datos de alta resolución e incluir múltiples factores para mapas de idoneidad más realistas.

Adicionalmente, Rahim et al. (2025), en Irak, integraron AHP, TOPSIS y SIG para la selección de sitios de presas considerando además criterios relacionados con riesgos de inundación y fallas potenciales. Este estudio evidencia la versatilidad de estas herramientas y refuerza la utilidad de hibridar métodos, aunque advierte sobre la necesidad de rigurosidad metodológica. En esta línea, nuestra investigación se suma a

la tendencia creciente de combinar técnicas multicriterio con SIG como un enfoque transparente, estructurado y adaptable.

En síntesis, lo encontrado en la cuenca del Lurín es consistente con el conocimiento existente: los sitios óptimos suelen ser escasos y requieren un equilibrio de múltiples criterios, la aplicación de AHP+SIG es sólida para mapear zonas potenciales, TOPSIS mejora la selección puntual, y la elección de la presa CFRD se alinea con prácticas recomendadas en contextos sísmicos y montañosos, mientras que divergencias con otros casos refuerzan la importancia de adaptar la decisión a las condiciones locales.

6.3. Validación con casos reales

La validación de los resultados obtenidos en un análisis multicriterio es crucial para evaluar su confiabilidad práctica. Dado que en la cuenca del río Lurín no existe aún una presa construida para contrastar directamente la ubicación propuesta, se recurrió a enfoques indirectos de validación y a la comparación con experiencias documentadas. En primer lugar, se constató que el sitio seleccionado como óptimo cumple con los lineamientos técnicos habituales: presenta condiciones geológicas estables, topografía favorable (valle angosto aguas arriba con amplia capacidad de embalse) y cercanía a cauces con suficiente aportación hídrica, criterios todos respaldados por la literatura y la normativa peruana. Esta verificación cualitativa en campo y gabinete sugiere que la alternativa priorizada es consistente con lo que ingenieros y planificadores considerarían un sitio viable, lo cual brinda una validez interna al modelo aplicado.

Adicionalmente, al carecer de un caso real local para validar, se recurrió a evidencias de otros estudios aplicados. Por ejemplo, Jozaghi et al. (2018) emplearon los lugares de presas existentes en Sistán y Baluchistán (Irán) para comprobar sus predicciones de sitios óptimos; encontraron que el método TOPSIS logró identificar ubicaciones muy cercanas a las reales, superando al AHP en correspondencia con las presas construidas. De manera similar, Othman et al. (2020) compararon sus 11 sitios propuestos en Irak con 21 emplazamientos preseleccionados por las autoridades hidráulicas, obteniendo que 3 de los sitios identificados coincidían plenamente con los planes oficiales. Los índices de coincidencia y exactitud en ese estudio oscilaron entre 76% y 92%, lo que respaldó la fiabilidad del enfoque GIS-MCDA utilizado. Estas experiencias

internacionales demuestran que las metodologías basadas en SIG y análisis multicriterio pueden predecir con acierto lugares factibles de presa, validándose al confrontar resultados con la realidad.

En el contexto nacional, un caso emblemático es el proyecto Yanapuquio–Arapa en Moquegua. Originalmente se había proyectado una presa de RCC en la zona de Yanapuquio como parte del Proyecto de Mejoramiento del Servicio de Agua para Riego del Sistema de Riego Yanapujo–Valle de Tambo. Sin embargo, los estudios de estabilidad del estudio definitivo identificaron la presencia de evaporitas en la cimentación, lo cual comprometía la seguridad estructural y generaba riesgo de filtraciones (PSI, 2024). Como consecuencia, el eje fue reubicado hacia el sector Arapa–Ccota, aproximadamente 5.3 km aguas abajo, donde las condiciones geotécnicas eran más estables. En este nuevo emplazamiento se mantuvo la tipología de presa de RCC, dado que el macizo rocoso en Arapa ofrecía condiciones de cimentación adecuadas para este tipo de estructura. La reubicación significó, sin embargo, una reducción significativa del volumen útil de embalse, de 33.27 a 21 millones de m^3, así como cambios en la altura y longitud de la presa. Este caso confirma que la geología es un criterio decisivo en la selección de sitio y valida la importancia de que en la cuenca del Lurín nuestro modelo penalizara automáticamente zonas con estratos fracturados o depósitos aluviales, priorizando así el Eje 4 con mejores condiciones. Asimismo, evidencia que un análisis multicriterio integral aplicado en etapas tempranas puede prevenir la selección de emplazamientos inviables y orientar desde el inicio hacia sitios geotécnicamente seguros, evitando pérdidas de tiempo, recursos técnicos y económicos.

La experiencia Yanapuquio refleja también la importancia de aplicar metodologías multicriterio desde fases tempranas. De haberse desarrollado un análisis integral que incorporara criterios como la calidad geológica de cimentación, el riesgo sísmico, la estabilidad del macizo rocoso y la vulnerabilidad a disolución, el eje original de Yanapuquio habría obtenido una baja puntuación y el proyecto se habría orientado desde el inicio hacia emplazamientos más seguros como Arapa. Esto habría evitado no solo la pérdida de tiempo y recursos técnicos, sino también pérdidas económicas significativas, ya que el expediente original de Yanapuquio representaba una inversión aproximada de 9 millones de soles, finalmente descartada. Así, la lección de

Yanapuquio–Arapa constituye una validación indirecta de la metodología propuesta en esta investigación, reforzando su utilidad práctica para prevenir errores en la selección de sitio y tipología de presas en contextos andinos complejos.

En síntesis, aunque no se ha construido aún la presa propuesta en la cuenca del Lurín para una verificación in situ, la convergencia de nuestros hallazgos con la teoría, con estudios internacionales y con casos reales como Yanapuquio–Arapa y Toma Grande refuerza la robustez del enfoque aplicado. La consistencia entre el modelo teórico y las condiciones del mundo real indica que la combinación SIG + AHP + TOPSIS produce soluciones viables y fundamentadas, validando su aplicabilidad práctica en la toma de decisiones de ingeniería.

6.4. Principios y generalizaciones

Del análisis realizado y de la comparación con estudios previos y casos reales, emergen varios principios que pueden generalizarse más allá del caso específico de la cuenca del río Lurín.

En primer lugar, se reafirma que la selección de sitios de presa es un problema multidimensional que involucra factores técnicos, geológicos, hidrológicos, sociales, ambientales y económicos, los cuales deben evaluarse de manera integrada. El uso combinado de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con métodos multicriterio como AHP y TOPSIS constituye un marco robusto para abordar dicha complejidad, ya que permite integrar datos espaciales heterogéneos y transformarlos en información objetiva y jerarquizada para la toma de decisiones (Dai, 2016; Marzouk et al., 2020).

En segundo lugar, se establece la primacía de la geología en la viabilidad de proyectos de presas. Tal como lo evidencian casos reales como Yanapuquio–Arapa, ninguna ventaja hidráulica, social o económica compensa una cimentación deficiente o la presencia de formaciones inestables como evaporitas. Por ello, los criterios geotécnicos deben recibir un peso prioritario en cualquier modelo multicriterio de selección de sitios (PSI, 2024). Este principio es aplicable de manera general en regiones andinas, donde la complejidad geológica es alta y los riesgos asociados al sismo y a la inestabilidad del terreno son relevantes (Othman et al., 2020).

Un tercer principio es la necesidad de incorporar criterios socioambientales desde las fases iniciales de planificación. Si bien los factores técnicos y económicos suelen dominar, la sostenibilidad de los proyectos depende también de minimizar los impactos sociales (como reasentamientos) y ambientales (alteración de ecosistemas). Estudios recientes destacan la importancia de incluir estos aspectos en la ponderación de criterios para garantizar que las decisiones finales sean técnica y socialmente viables (Balioti et al., 2018; Rahim et al., 2025).

Finalmente, se confirma la utilidad del análisis multicriterio en etapas tempranas. Esta metodología no sustituye los estudios de ingeniería de detalle, pero constituye una herramienta de filtrado inicial que permite priorizar los sitios más prometedores antes de invertir en costosos estudios de campo. La experiencia muestra que esta práctica puede ahorrar tiempo y recursos, a la vez que orienta la planificación hacia alternativas realistas y seguras (Jozaghi et al., 2018; Cuzco, 2022).

En síntesis, los principios derivados de esta investigación pueden generalizarse en tres recomendaciones clave para futuros proyectos: (a) otorgar prioridad a la geología y la estabilidad del terreno, (b) integrar variables técnicas, ambientales y sociales de manera equilibrada, y (c) aplicar modelos multicriterio apoyados en SIG desde fases iniciales de estudio para garantizar decisiones informadas y sostenibles.

6.5. Síntesis final de la discusión

La discusión desarrollada permite sintetizar que la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con métodos de análisis multicriterio, específicamente AHP y TOPSIS, constituye una herramienta eficaz para abordar la complejidad inherente a la selección de sitios y tipologías de presas. Esta metodología permitió, en el caso de la cuenca del río Lurín, jerarquizar criterios técnicos, geológicos, ambientales y socioeconómicos de forma estructurada, identificando al Eje 4 como la localización óptima y a la CFRD como la tipología más adecuada. Los resultados confirman que la aplicación de modelos multicriterio contribuye a reducir la subjetividad en la toma de decisiones, a la vez que proporciona un marco transparente y reproducible (Marzouk et al., 2020; Jozaghi et al., 2018).

Asimismo, la comparación con estudios previos evidencia que esta investigación se alinea con la tendencia internacional de combinar SIG con técnicas multicriterio para problemas de planificación hidráulica (Dai, 2016; Othman et al., 2020). A nivel nacional, los casos de Toma Grande (Arbaiza & Quisca, 2023) y Yanapuquio–Arapa (PSI, 2024; Prensa Regional, 2025) validan indirectamente los resultados obtenidos, al demostrar que la geología de cimentación es un criterio decisivo y que la tipología óptima depende del contexto específico de cada proyecto. Estos ejemplos refuerzan la pertinencia de la metodología aplicada en el río Lurín, mostrando su capacidad de anticipar problemáticas que, de no ser detectadas en etapas tempranas, pueden generar pérdidas económicas y retrasos significativos.

Finalmente, los principios extraídos permiten generalizar que (a) la geología debe recibir un peso prioritario en cualquier evaluación de emplazamiento de presas, (b) la inclusión de criterios socioambientales es clave para la sostenibilidad, y (c) el uso de análisis multicriterio en fases tempranas de planificación permite orientar recursos hacia alternativas viables antes de ejecutar estudios de detalle. En conclusión, la síntesis confirma que la metodología SIG + AHP + TOPSIS aplicada en la cuenca del río Lurín no solo resolvió los objetivos de esta investigación, sino que también aporta un marco replicable y validado para la planificación de presas en contextos andinos y en regiones con condiciones geológicas complejas.

7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La investigación demostró que la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con métodos de análisis multicriterio, específicamente AHP y TOPSIS, constituye una herramienta eficaz y replicable para la selección de sitios y tipologías de presas en contextos geológicos y ambientales complejos como la cuenca del río Lurín.
- El mapa de idoneidad elaborado permitió identificar zonas óptimas y no aptas para la construcción de presas, mostrando que los factores con mayor influencia en la selección fueron la geología de cimentación, la pendiente del valle y la disponibilidad de materiales locales.
- El análisis AHP determinó a la CFRD como la tipología óptima para la cuenca del río Lurín, dado que responde mejor a las condiciones locales de cimentación profunda, presencia de estratos fracturados y alta sismicidad, lo que refuerza la importancia de adaptar el tipo de presa a las particularidades geotécnicas del sitio.
- La comparación con experiencias previas, como el caso Yanapuquio-Arapa en Moquegua y el proyecto Toma Grande en Arequipa, validó los resultados de esta investigación: allí donde existió roca sana superficial, la tipología óptima fue la gravedad, mientras que en condiciones adversas como Yanapuquio fue necesario reubicar el eje. En el río Lurín, la CFRD surgió como solución más coherente con el contexto geológico.
- La investigación evidenció que aplicar metodologías multicriterio desde fases tempranas puede evitar pérdidas significativas de tiempo y recursos, como ocurrió en Yanapuquio, cuyo expediente original costó millones de soles y fue descartado. Este hallazgo refuerza la utilidad práctica del modelo propuesto para mejorar la eficiencia y efectividad en la planificación de infraestructura hidráulica.
- Los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología propuesta no solo cumplió con los objetivos planteados, sino que también constituye un aporte metodológico para la ingeniería de presas en el Perú, al ofrecer un marco técnico que puede ser replicado en otras cuencas andinas con características similares.

7.2. Recomendaciones

- Aplicar modelos multicriterio apoyados en SIG durante los estudios preliminares de preinversión de proyectos hidráulicos, con el fin de priorizar tempranamente alternativas viables y descartar emplazamientos con deficiencias geotécnicas o ambientales.
- Asignar un peso decisivo a los criterios geológicos, geotécnicos y sísmicos, considerando que la seguridad de la cimentación es el factor fundamental para la estabilidad de una presa.
- Complementar los análisis multicriterio con estudios de campo detallados (sondeos geológicos, ensayos de laboratorio, estudios sísmicos e hidrológicos), para validar los resultados antes de elaborar el expediente definitivo.
- Incorporar con mayor profundidad criterios socioambientales y culturales en la ponderación, de modo que la selección de sitios no solo sea técnicamente adecuada, sino también socialmente aceptada y ambientalmente sostenible.
- Replicar y perfeccionar la metodología en otras cuencas de la vertiente del Pacífico y de la sierra peruana, donde la escasez de agua y la variabilidad climática hacen necesaria la construcción de presas de regulación.
- Incluir en los análisis variables asociadas al cambio climático, como proyecciones de disponibilidad hídrica, riesgos de sequías y crecidas extremas, para garantizar la resiliencia de los proyectos en el largo plazo.
- Fortalecer las capacidades técnicas de las entidades públicas y privadas en el uso de herramientas multicriterio y SIG, mediante programas de capacitación y transferencia tecnológica.
- Fomentar la transparencia y participación de actores locales en la definición y ponderación de criterios, a fin de legitimar el proceso de selección y reducir conflictos sociales durante la ejecución de los proyectos.
- Priorizar la creación de bases de datos geoespaciales actualizadas (geología, hidrología, uso de suelo, riesgos naturales), que permitan alimentar con mayor precisión los modelos multicriterio y mejorar la confiabilidad de los resultados.

8. CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adinarayana, J., Krishna, N.R. & Rao, K.G., 1995. *An Integrated Approach for Prioritization of Watersheds. Journal of Environmental Management*, 44(4), pp.375–384.

Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Yilmaz, A.G., Idris, A., Mukherjee, S., Khalil, M.A., Gibril, M.B.A. (2019) *Dam Site Suitability Mapping and Analysis Using an Integrated GIS and Machine Learning Approach*. Water 1880 (11).

Arbaiza Ocrospoma, H. Y., & Quisca Astocahuana, S. I. (2023). *Selección de alternativa óptima de la presa Toma Grande aplicando el método de Análisis Jerárquico, Arequipa*. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Arreguín, F. I., Valdés, J. B., & Marengo, J. A. (1987). *Ingeniería de presas: conceptos básicos y aplicaciones*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Autoridad Nacional del Agua – ANA. (2016). *Guía para el diseño y construcción de presas en el Perú*. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.

Autoridad Nacional del Agua – ANA. (2019). *Reglamento de seguridad de presas públicas de embalse de agua*. Dirección de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hídricos, Unidad Técnica de Presas. (1a edición). Lima. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3902.

Baban, S.M.J. & Wan-Yusof, K., 2003. *Modelling optimum sites for locating reservoirs in tropical environments*. Water Resources Management, 17(1), pp.1–17.

Balioti, V., Tzimopoulos, C., & Evangelides, C. (2018). *Multi-criteria decision making using TOPSIS method under fuzzy environment: Application to dam selection in Greece*. Water Resources Management, 32(2), 493–509. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1814-7.

Buraihi, F.H.; Shariff, A.R.M. *Selection of rainwater harvesting sites by using remote sensing and GIS technique: A case of Kirkuk,Iraq*. J. Teknol. 2015, 76, 75–81.

Cánovas Del Castillo, E. V. (1998). Tratado básico de presas (4ta ed.). Madrid.

Cuzco Damian, A.S. (2022). *Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método para seleccionar el sitio y tipo de presa en proyectos hidráulicos*. [Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil]. UCE. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/26647.

Dai, X. (2016). *Dam site selection using an integrated method of AHP and GIS for decision making support in Bortala, Northwest China [Lund University].* En Lund University GEM thesis series (Número 14). http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8886448.

Emiroglu, M. E., Kisi, O., & Yalcin, A. (2002). *The use of GIS for dam location selection: A case study*. Water Resources Management, 16(6), 429–444.

Gómez-Delgado, M. & Barredo, J. I. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Madrid, ES: RA-MA.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6° edición). Mc Graw Hill Education. https://www.uncuyo.edu.ar/ices/librometodologia-de-la-investigacion-6ta-edicion.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag*.

ICOLD. (2011). Selecting the type of dam. Bulletin 148. International Commission on Large Dams.

ICOLD. (2016). *Bulletin 181: Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences*. International Commission on Large Dams.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025). Perú: Población total proyectada al 30 de junio de cada año, según departamento, provincia y distrito, 2018-2025. INEI.

Jozaghi, A., Alizadeh, B., Hatami, M., Flood, I., Khorrami, M., Khodaei, N. y Ghasemi Tousi, E. (2018). *Un estudio comparativo de las técnicas AHP y TOPSIS para la selección de sitios de represas mediante SIG: un estudio de caso de la provincia de*

Sistán y Baluchistán, Irán. Geosciences, 8 (12), 494. https://doi.org/10.3390/geosciences8120494.

Malczewski, J. (2006). *GIS-based multicriteria decision analysis*: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science.

Martínez Ruiz, Francisco Javier. (2019). *El problema de selección del tipo de presa en un proyecto: criterios y métodos de apoyo a la toma de decisiones* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Digital de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Marzouk, M., Metwally, M., & El-Said, M. (2020). *Multi-criteria decision making for dam site selection using AHP and TOPSIS*. International Journal of Civil Engineering, 18(3), 265–278. https://doi.org/10.1007/s40999-019-00467-7.

Njiru, F.M., Siriba, D.N. (2018). *Site Selection for an Earth Dam in Mbeere North, Embu County—Kenya*. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2018, 6, 113-133.

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2001). *Hydraulic Structures*. Taylor & Francis.

NRCS, *"Hydrologic soil-cover complexes", in Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Natural Resources Conservation Service*, Ed. USA: USDA, 2004, cap. 9, pp. 1-3.

Ñaupas, H., Jesús Palacios, Romero, H., & Valdivia, M. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis. (5a Edición)*. Bogotá: Ediciones de la U. https://edicionesdelau.com/producto/metodologia-de-la-investigacion-cuantitativa-cualitativa-y-redaccion-de-la-tesis-5a-edicion/.

ONU-Agua. (2012). *Managing water under uncertainty and risk*. The United Nations World Water Development Report 4.

Othman, A. A., Yaseen, Z. M., & Al-Ansari, N. (2020). *Dam site suitability mapping using remote sensing, GIS and multi-criteria decision analysis*. Water, 12(6), 1647. https://doi.org/10.3390/w12061647.

Pérez Zereceda, G. A., & Vasconcellos Orejuela, G. (2017). *Evaluación de tres alternativas de proyecto de presa para el embalse Palo Redondo*. Repositorio UPC. http://hdl.handle.net/10757/621839.

Prensa Regional. (2023, diciembre 11). *El nuevo proyecto Arapa reemplazará a la fallida presa Yanapuquio*. Prensa Regional. https://prensaregional.pe/controversia-de-yanapujio-arapa/.

Proyecto Subsectorial de Irrigación (PSI). (2024). *Informe de resolución contractual y evaluación geotécnica del eje Yanapuquio*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú.

Qureshi, M. A., (2015). *Application of GIS and multi-criteria analysis for dam site selection in Pakistan.* Arabian Journal of Geosciences, 8(6), 4013–4025. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1485-6.

Quisca, S. I. (2021). Expediente técnico del proyecto Mejoramiento del servicio de agua para riego - Represa Toma Grande - Sector Toma Grande, Distrito Mollebaya - Provincia Arequipa - Región Arequipa (Informe técnico). [M. D. Mollebaya].

Rahim, A. A., Ahmed, S. M., & Al-Samarrai, H. (2025). *Integration of GIS and multi-criteria decision-making for dam site selection in Iraq*. Journal of Water and Climate Change, 16(2), 233–248. https://doi.org/10.2166/wcc.2025.040.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill*.

Saaty, T. L. (1994). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

Sedano Areche, J. A. (2021). *Identificación de sitios potenciales de presas mediante las técnicas de la geomática en la subcuenca del río Ichu*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Huancavelica.

SPANCOLD. (2010). Guía para la selección de tipos de presas. Comité Español de Grandes Presas.

Tyndall, Centre for Climate Change Research. (2004). *New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity*. Technical Report.

World Commission on Dams (WCD). (2000). *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Earthscan Publications.

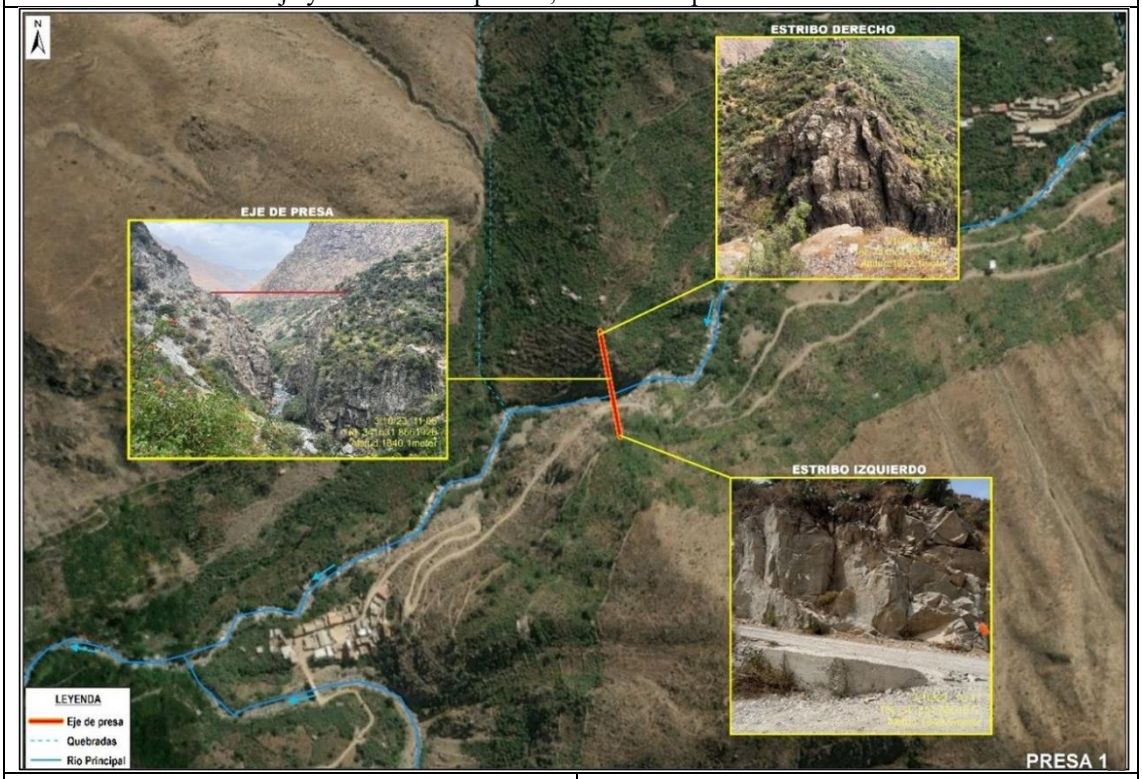
World Bank. (2014). *A Guide to the World Bank Group's High Dam Portfolio: Lessons from Implementation*. Washington, DC: World Bank.

Zapata-Cruz, J. D., Ramos-Rivera, J., Bustamante, A., & Echeverri-Ramírez, O. (2020). *Propuesta metodológica para la selección óptima del tipo de presa mediante el uso de técnicas multicriterio (MCDM)*. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges (pp. 1885–1894). IOS Press. https://doi.org/10.3233/STAL190246.

9. CAPÍTULO IX. ANEXOS

9.1. Panel Fotográfico

Vistas del eje y estribos de la presa 1, así como la planta del vaso del embalse



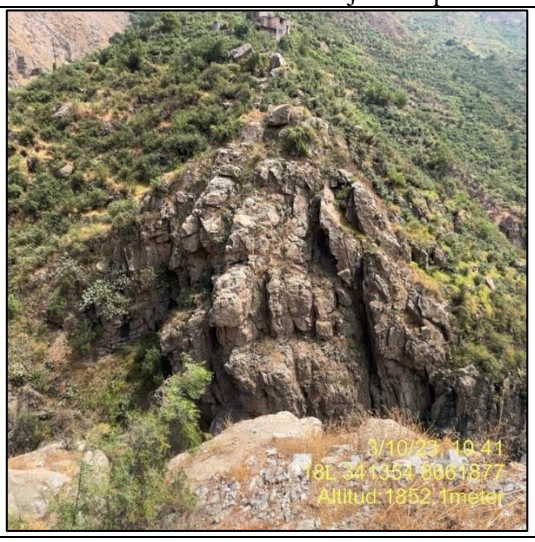
Vista aguas abajo del eje de la presa 1



Vista aguas arriba del eje de la presa 1



Vista del estribo derecho del eje de la presa 1



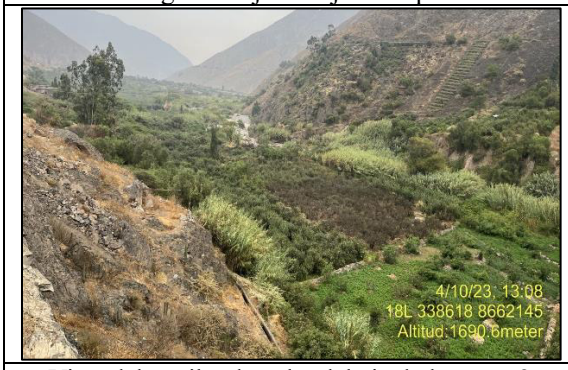
Vista del estribo izquierdo del eje de la presa 1



Vistas del eje y estribos de la presa 2, así como la planta del vaso del embalse



Vista aguas abajo del eje de la presa 2



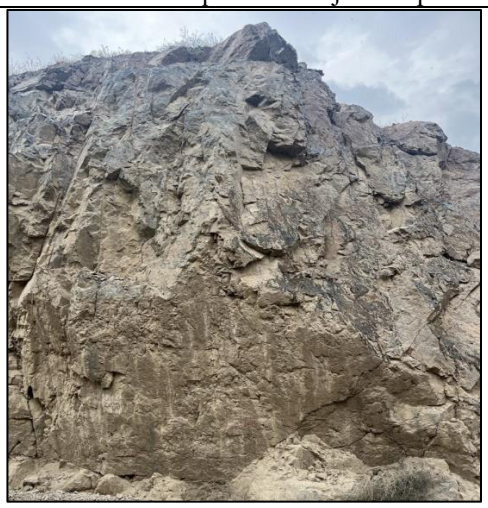
Vista aguas arriba del eje de la presa 2



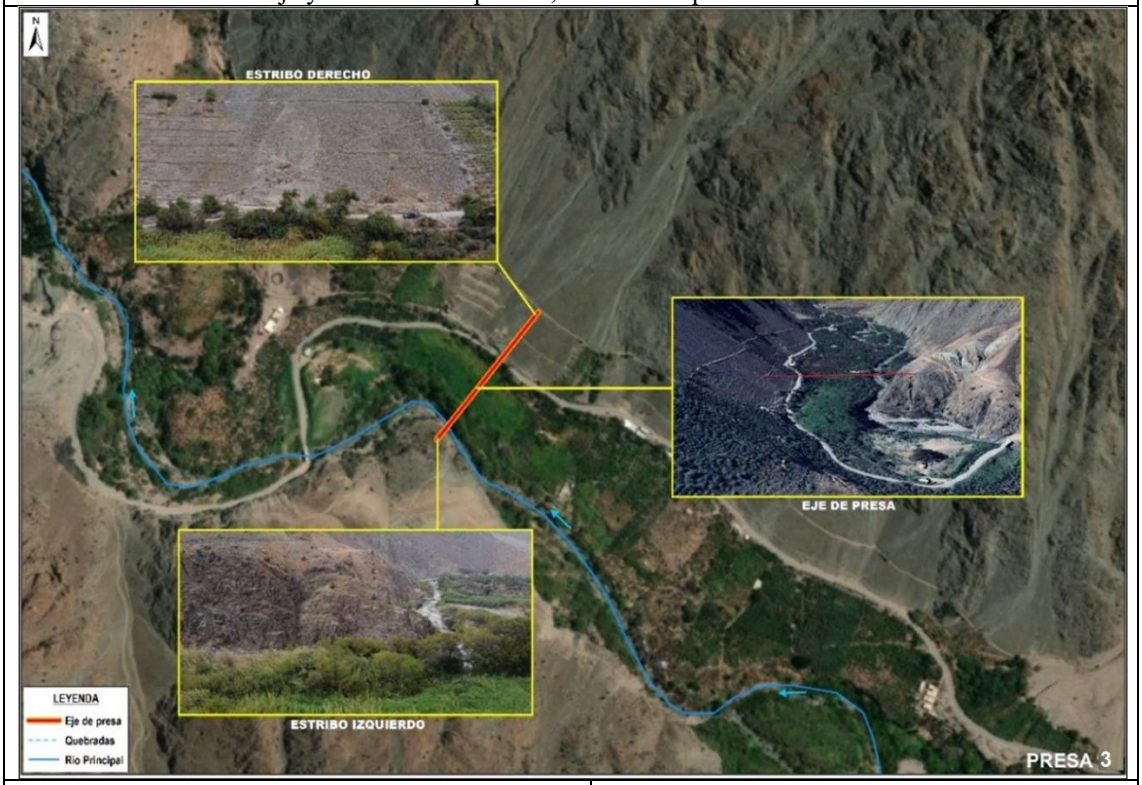
Vista del estribo derecho del eje de la presa 2



Vista del estribo izquierdo del eje de la presa 2



Vistas del eje y estribos de la presa 3, así como la planta del vaso del embalse



Vista aguas abajo del eje de la presa 3



Vista aguas arriba del eje de la presa 3



Vista del estribo derecho del eje de la presa 3



Vista del estribo izquierdo del eje de la presa 3



Vistas del eje y estribos de la presa 4, así como la planta del vaso del embalse



Vista aguas abajo del eje de la presa 4



Vista aguas arriba del eje de la presa 4



Vista del estribo derecho del eje de la presa 4



Vista del estribo izquierdo del eje de la presa 4



Vuelo de Captura de Datos LiDAR



Nivelación	Monumentación del Punto Geodésico
	
Monumentación del Punto Geodésico orden C	Lectura GNSS del Punto Geodésico
	

Excavación de calicatas en las zonas de eje de presas



Ensayos de densidad natural



Descripción estratigráfica por el especialista



Ensayo de Refracción Sísmica – Equipo SQA



Sondeo Eléctrico Vertical – Equipo SQA





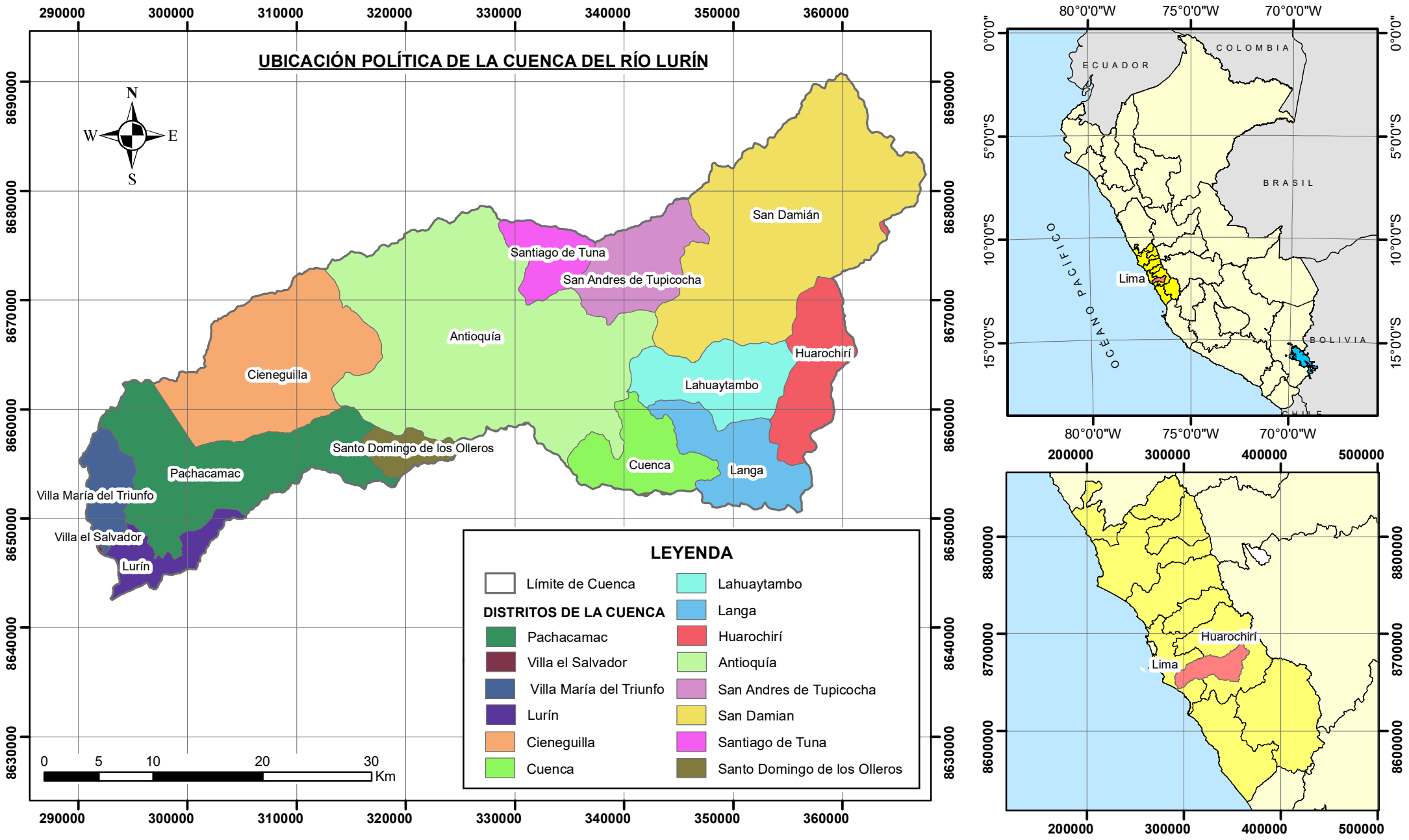
9.2. Mapas y Planos

Mapas:

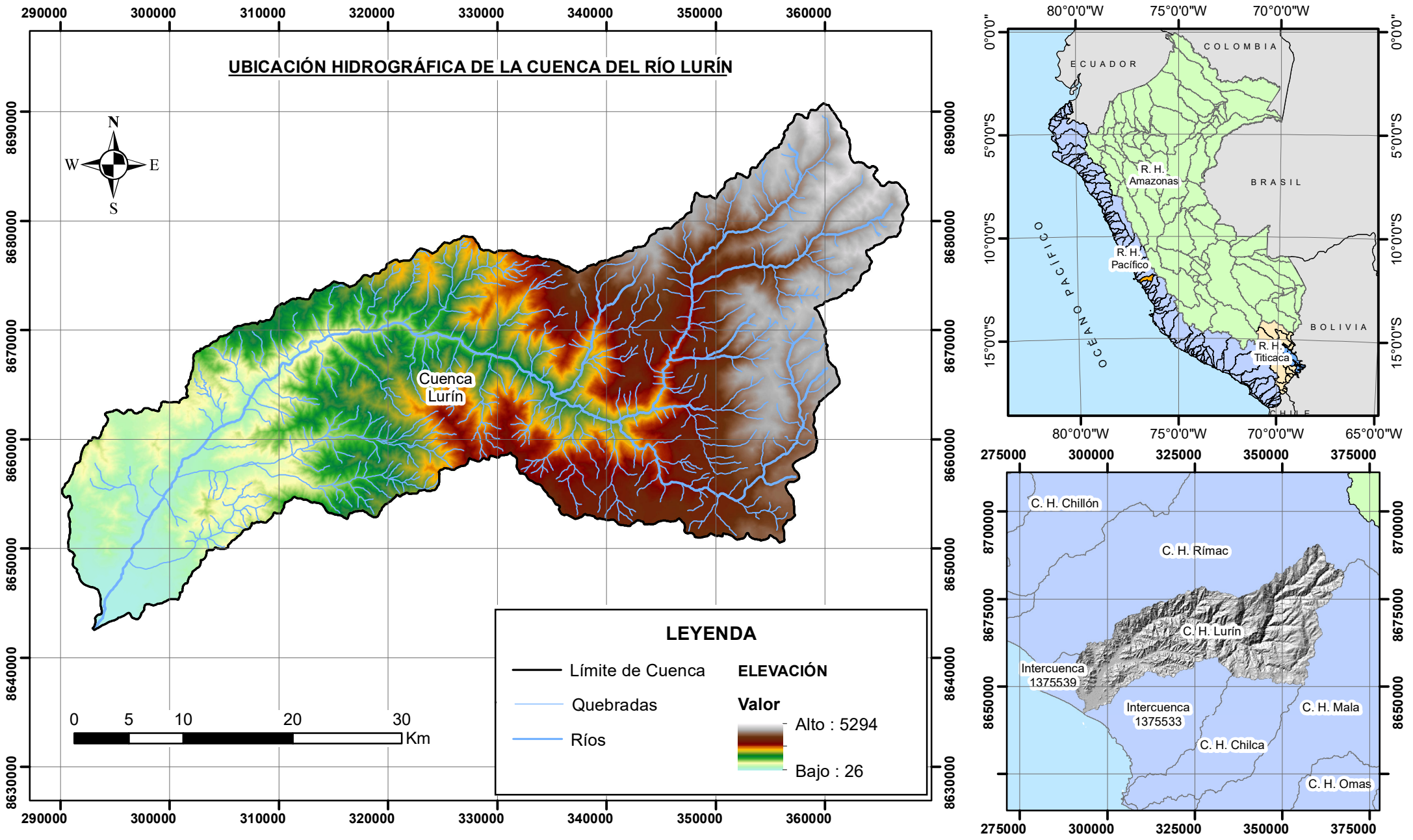
- U1 – Ubicación política de la cuenca del río Lurín
- U2 – Ubicación hidrográfica de la cuenca del río Lurín
- M1 – Red hidrográfica de la cuenca del río Lurín
- M2 – Mapa de pendientes de la cuenca del río Lurín
- M3 – Mapa geológico de la cuenca del río Lurín
- M4 – Mapa geológico – estructural de la cuenca del río Lurín
- M5 – Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Lurín
- M6 – Mapa de curva numero de la cuenca del río Lurín
- M7 – Reclasificación de pendientes de la cuenca del río Lurín
- RC1 – Reclasificación de pendientes de la cuenca del río Lurín
- RC2 – Reclasificación de geología de la cuenca del río Lurín
- RC3 – Reclasificación de cobertura vegetal de la cuenca del río Lurín
- RC4 – Reclasificación de curva número de la cuenca del río Lurín
- RC5 – Reclasificación de distancia a ríos de la cuenca del río Lurín
- RC6 – Reclasificación de distancia a fallas de la cuenca del río Lurín
- MI – Mapa de idoneidad para ubicación de presas
- AL – Mapa de alternativas de presas propuesto

Planos:

- P-01 – Vista en planta de embalse y eje de Presa 1
- P-02 – Vista en planta de embalse y eje de Presa 2
- P-03 – Vista en planta de embalse y eje de Presa 3
- P-04 – Vista en planta de embalse y eje de Presa 4
- ST-01 – Presa de tierra y enrocado con núcleo central impermeable (TENCI)
- ST-02 – Presa de enrocado con núcleo inclinado impermeable (ENNI)
- ST-03 – Presa de enrocado con pantalla de concreto (CFRD)
- ST-04 – Presa de concreto compactado con rodillo (RCC)
- ST-05 – Presa de concreto convencional (CC)



TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** UBICACIÓN POLÍTICA DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**U1**



TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** UBICACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**U2**

MAPA DE RED HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA LURÍN





300000 320000 340000 360000

8680000 8660000 8640000

LEYENDA

LIMITE_CUENCA

DRENAJE_CUENCA

TIPO

- Quebrada Intermitente
- Quebrada Secundaria
- Río

0 3.75 7.5 15 22.5 Km

Datum: WGS84

ESC: 1 : 350 000

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Mapa:	RED HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN		
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		**M1**
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	

MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA LURÍN





LEYENDA

LIMITE_CUENCA

PENDIENTE

<VALUE>

- 0 - 21.04808134
- 21.04808135 - 39.75748698
- 39.75748699 - 58.46689262
- 58.46689263 - 77.17629825
- 77.17629826 - 98.2243796
- 98.22437961 - 128.6271638
- 128.6271639 - 180.0780293
- 180.0780294 - 596.3623047

300000 320000 340000 360000 380000

8680000 8660000 8640000

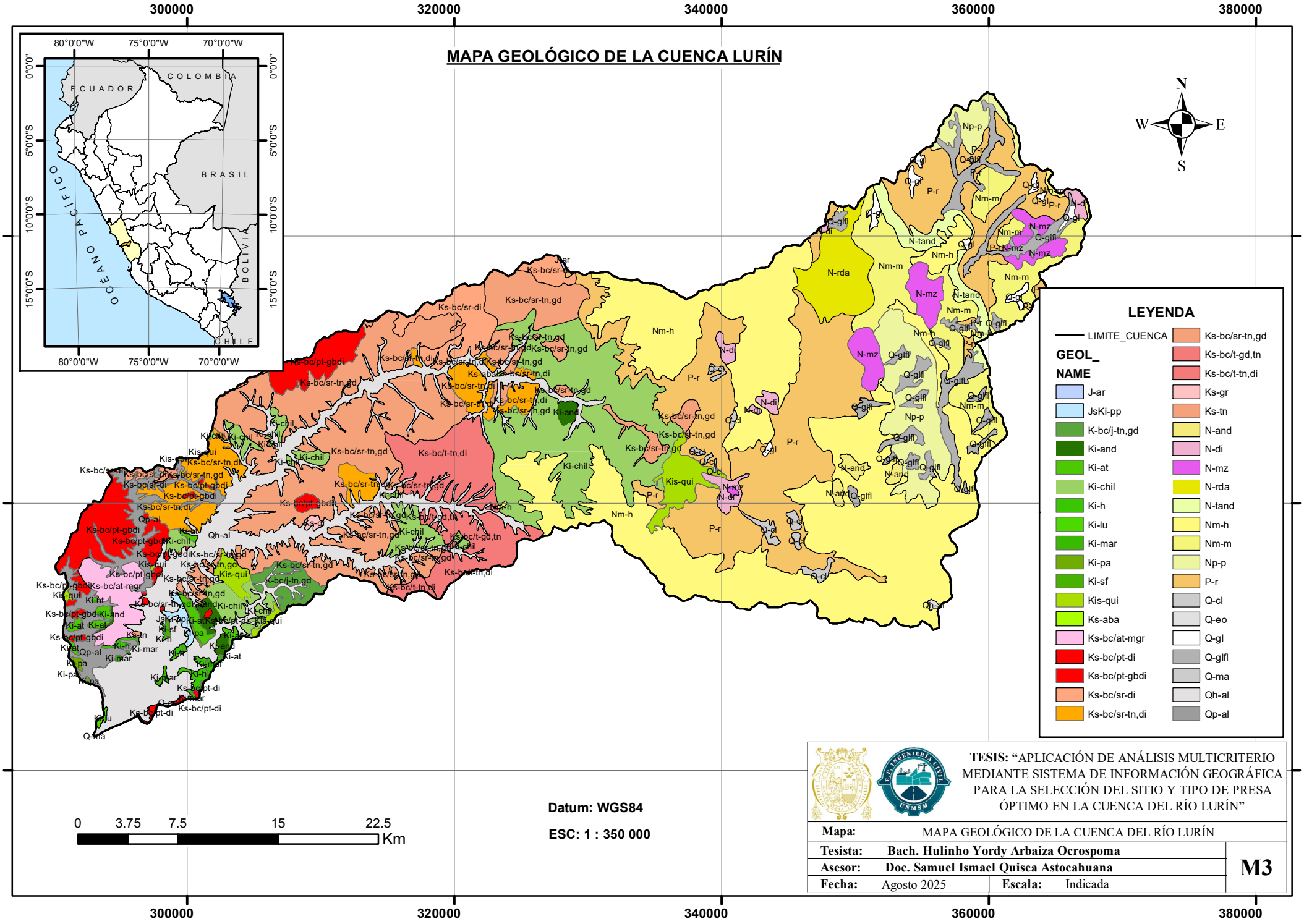
0 3.75 7.5 15 22.5 Km

Datum: WGS84

ESC: 1 : 350 000

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Mapa:	MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN		
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		**M2**
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	


MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA LURÍN
300000
320000
340000
360000
380000
8680000
8660000
8640000
80°0'0"W
75°0'0"W
70°0'0"W
0°0'0"
5°0'0"S
10°0'0"S
15°0'0"S
ECUADOR
COLOMBIA
BRASIL
BOLIVIA
CHILE
OCEANO PACIFICO
N
S
E
W
LEYENDA
LIMITE_CUENCA
GEOL_
NAME
J-ar
JsKi-pp
K-bc/j-tn,gd
Ki-and
Ki-at
Ki-chil
Ki-h
Ki-lu
Ki-mar
Ki-pa
Ki-sf
Kis-qui
Ks-aba
Ks-bc/at-mgr
Ks-bc/pt-di
Ks-bc/pt-gbdi
Ks-bc/sr-di
Ks-bc/sr-tn,di
Ks-bc/sr-tn,gd
Ks-bc/t-gd,tn
Ks-bc/t-tn,di
Ks-gr
Ks-tn
N-and
N-di
N-mz
N-rda
N-tand
Nm-h
Nm-m
Np-p
P-r
Q-cl
Q-eo
Q-gl
Q-glfl
Q-ma
Qh-al
Qp-al
Datum: WGS84
ESC: 1 : 350 000
0
3.75
7.5
15
22.5
Km
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"
Mapa: MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN
Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma
Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana
Fecha: Agosto 2025
Escala: Indicada
M3

MAPA DE FALLAS GEOLÓGICAS EN LA CUENCA LURÍN





LEYENDA

- LIMITE_CUENCA
- <all other values>

DESCRIPCIO

- Falla
- Falla Cubierta
- Falla Inferida
- Falla de Rumbo Dextral
- Falla de Rumbo Sinestral
- Falla normal de alto ángulo
- Lineamiento (fractura)

300000 320000 340000 360000 380000

8680000 8660000 8640000

0 3.75 7.5 15 22.5 Km

Datum: WGS84

ESC: 1 : 350 000

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Mapa:	MAPA GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN		**M4**
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	

MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA LURÍN



300000 320000 340000 360000

8680000 8660000 8640000

N W E S

LEYENDA

LIMITE_CUENCA

COBERTURA_VEGETAL

Simbolo

- Agricultura andina
- Agricultura costera
- Bofedal
- Cardonal
- Desierto costero
- Área alt. c escasa vegetación
- Glaciar
- Lagunas/Lagos/Cochas
- Lomas
- Matorral arbustivo
- Pajonal andino
- Área urbana

0 3.75 7.5 15 22.5 Km

Datum: WGS84

ESC: 1 : 350 000

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Mapa:	MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN		**M5**
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	

MAPA DE CURVA NÚMERO (NORMAL) DE LA CUENCA LURÍN





LEYENDA

LIMITE_CUENCA

Rango

- 55 - 62
- 62-66
- 66 - 72
- 72-77
- 77-85
- 85-100

300000 320000 340000 360000

8680000 8660000 8640000

0 3.75 7.5 15 22.5 Km

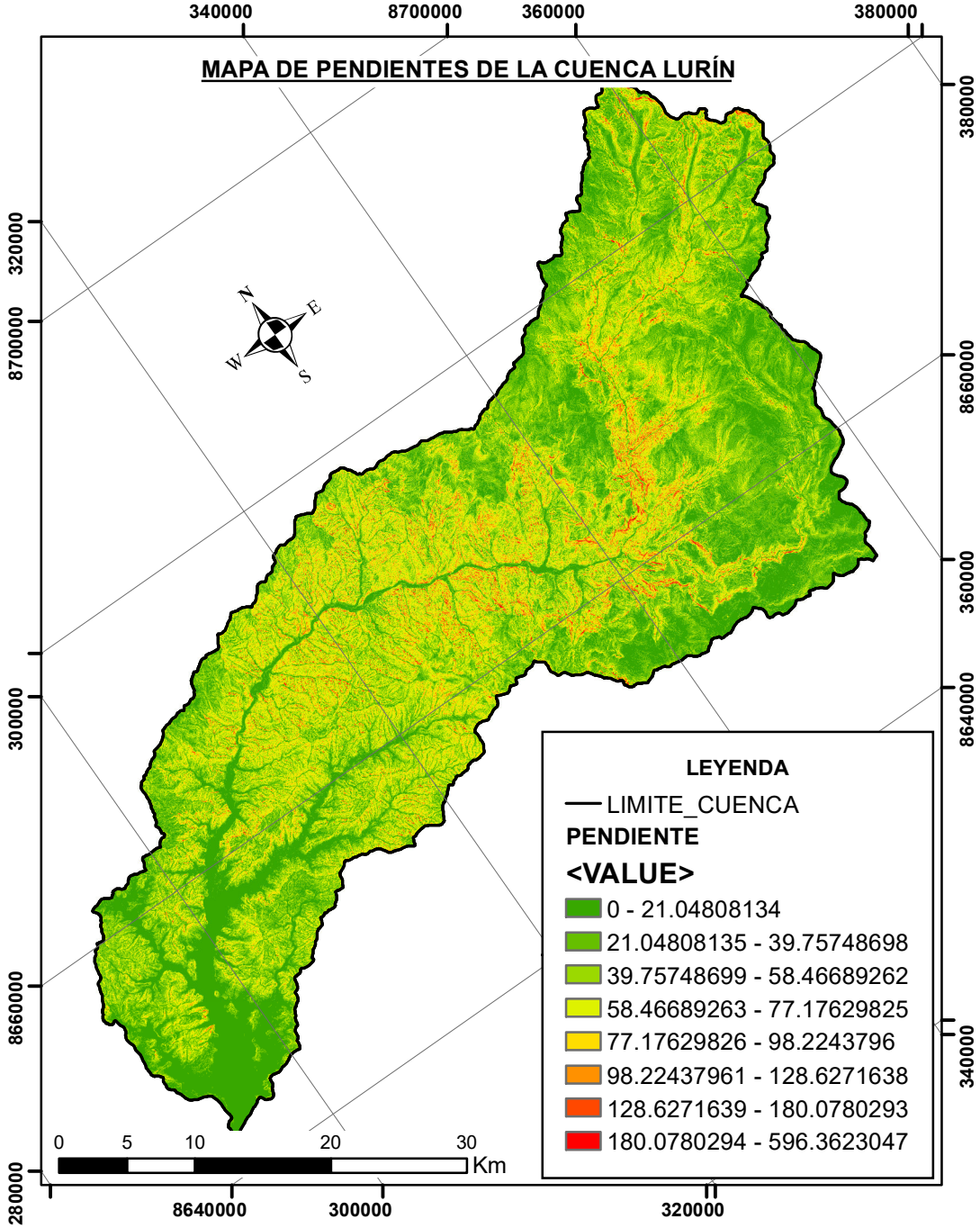
Datum: WGS84

ESC: 1 : 350 000

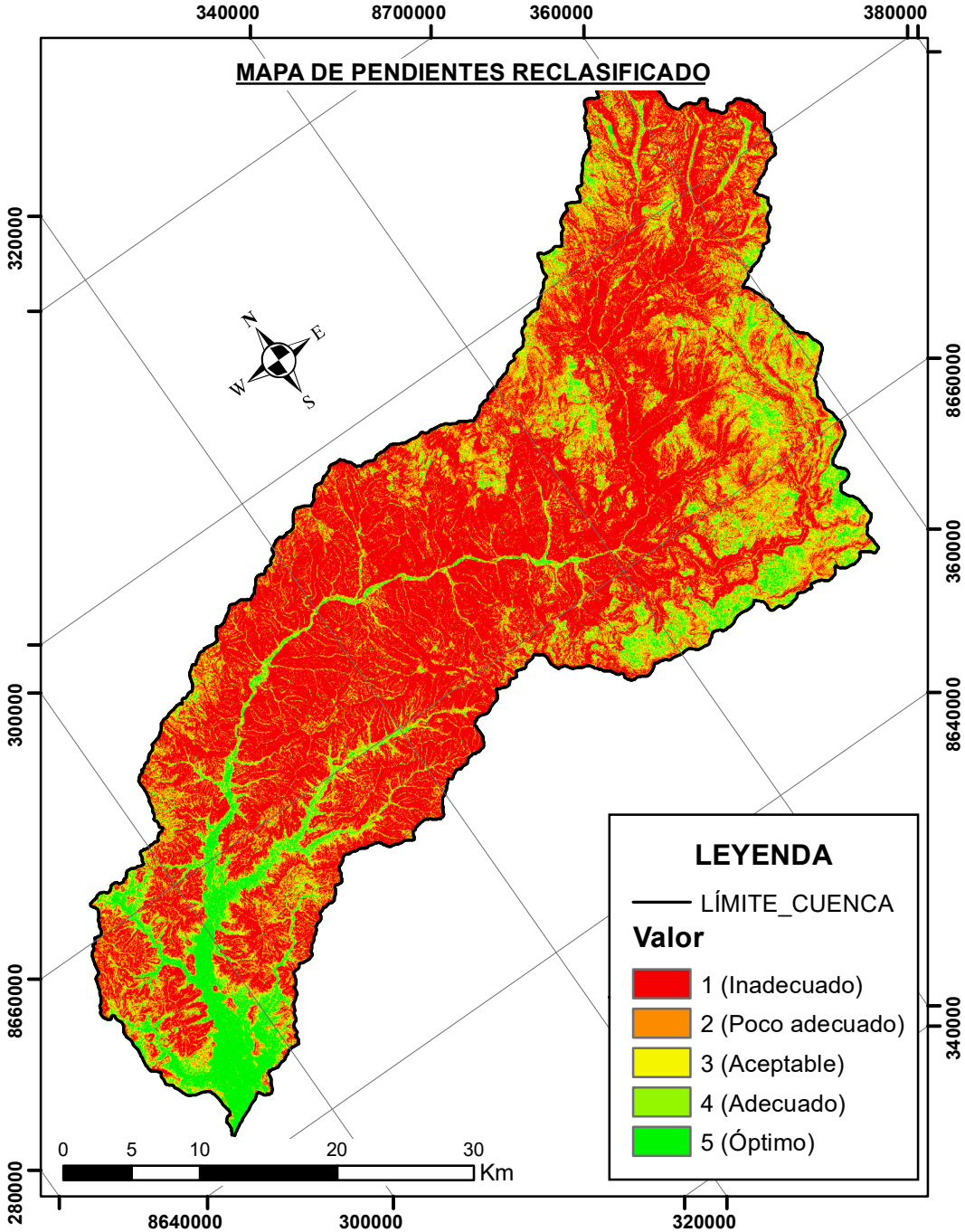
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Mapa:	MAPA DE CURVA NÚMERO DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN		**M6**
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	

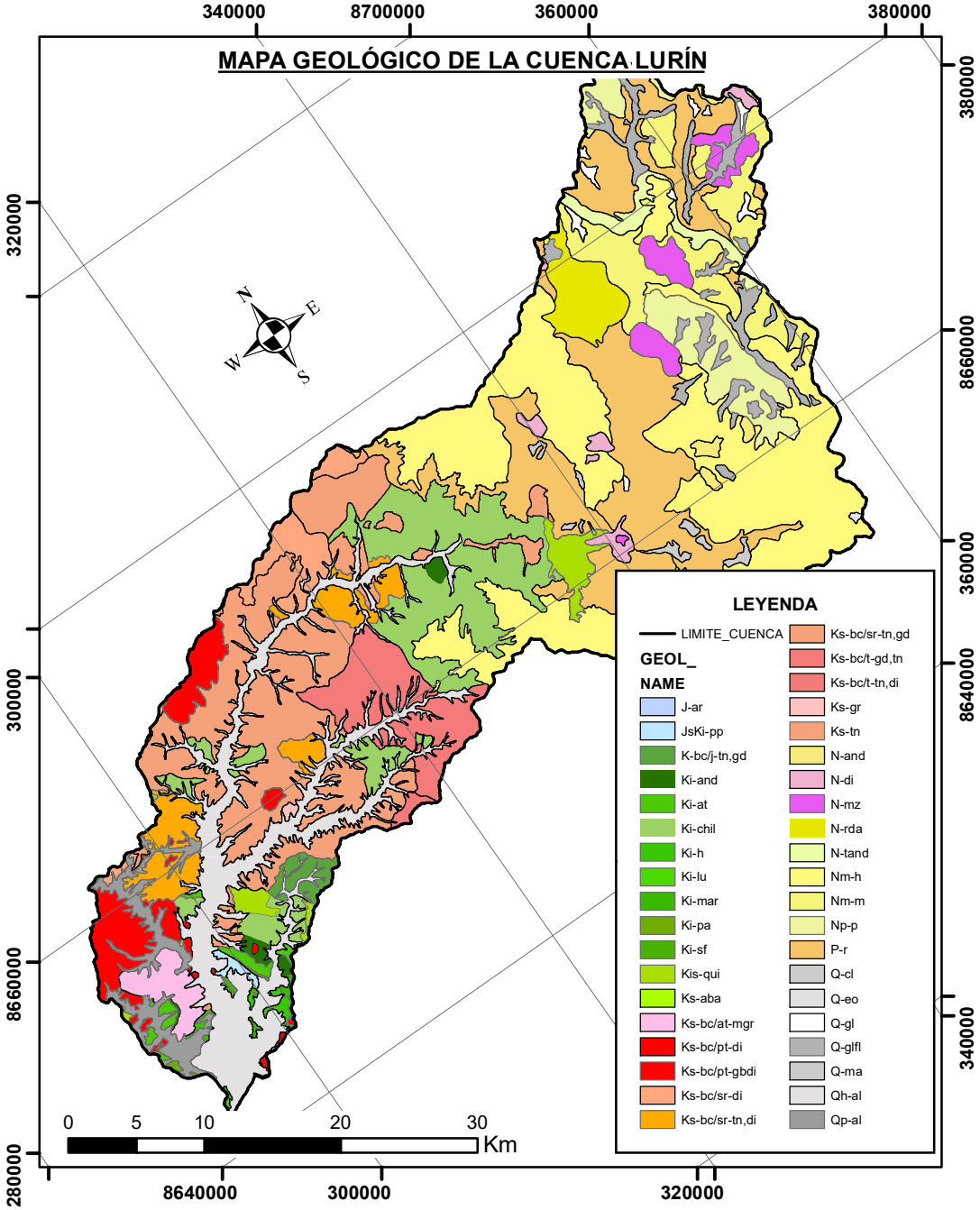
MAPA DE PENDIENTES DE LA CUENCA LURÍN

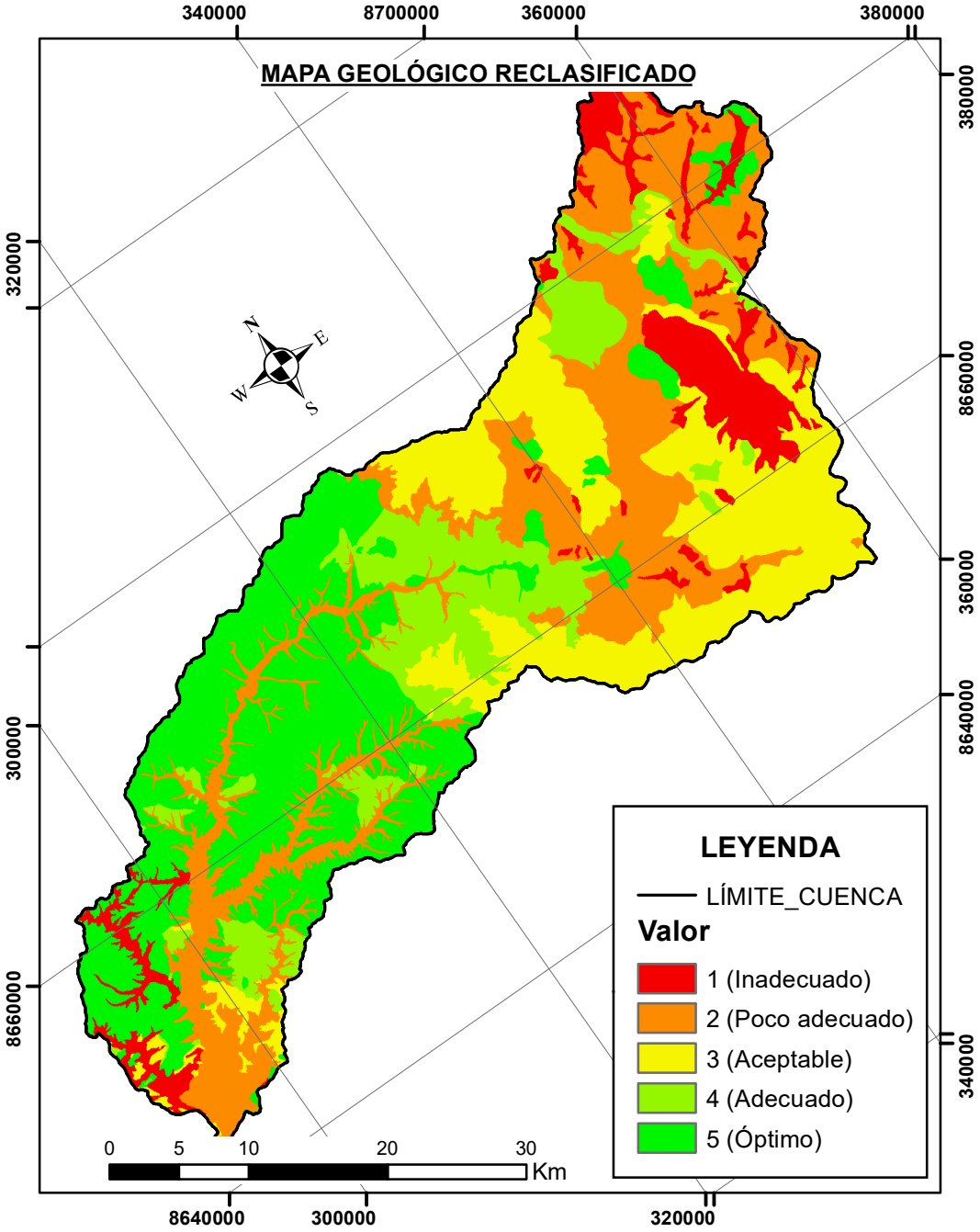


MAPA DE PENDIENTES RECLASIFICADO



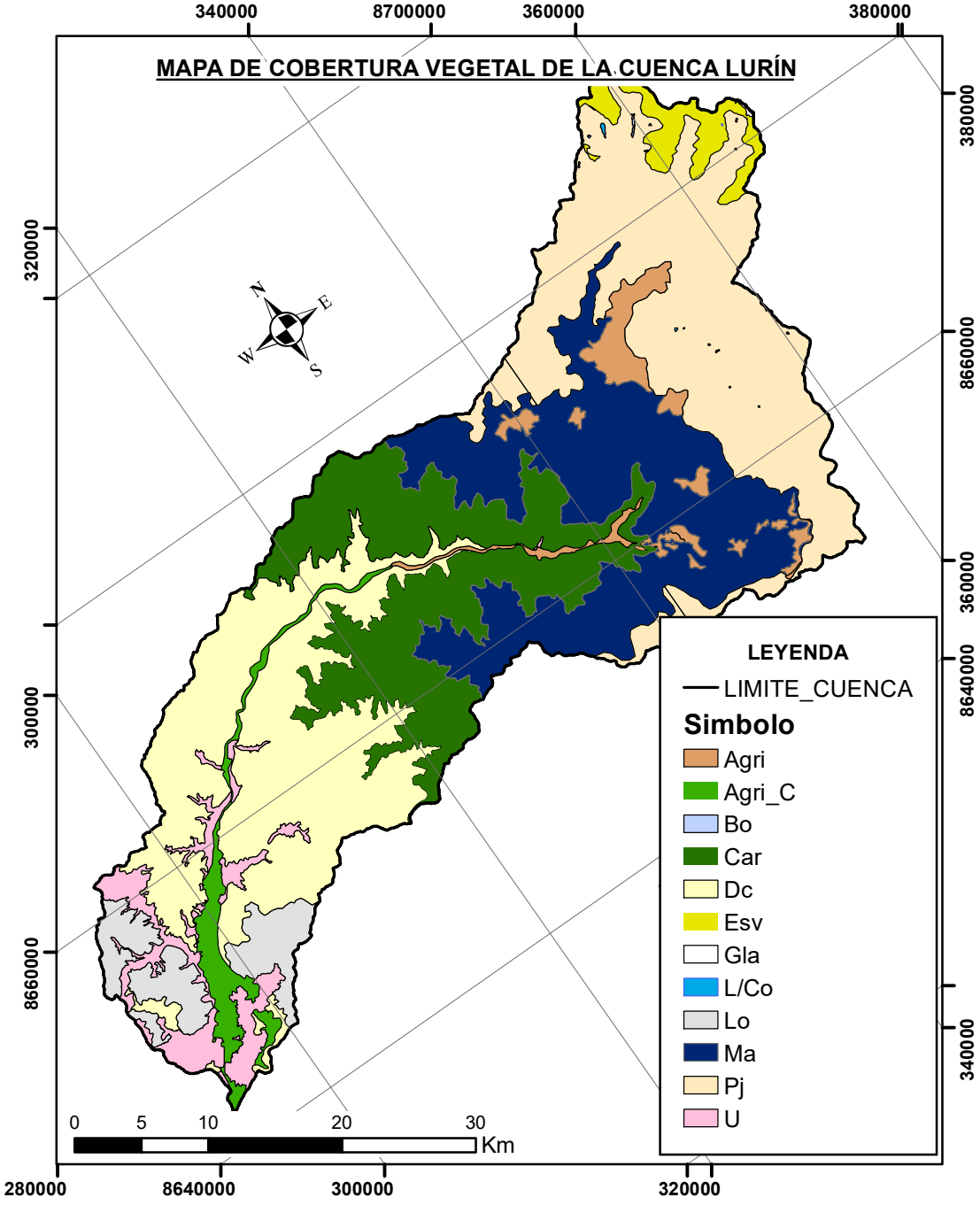
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE PENDIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC1**



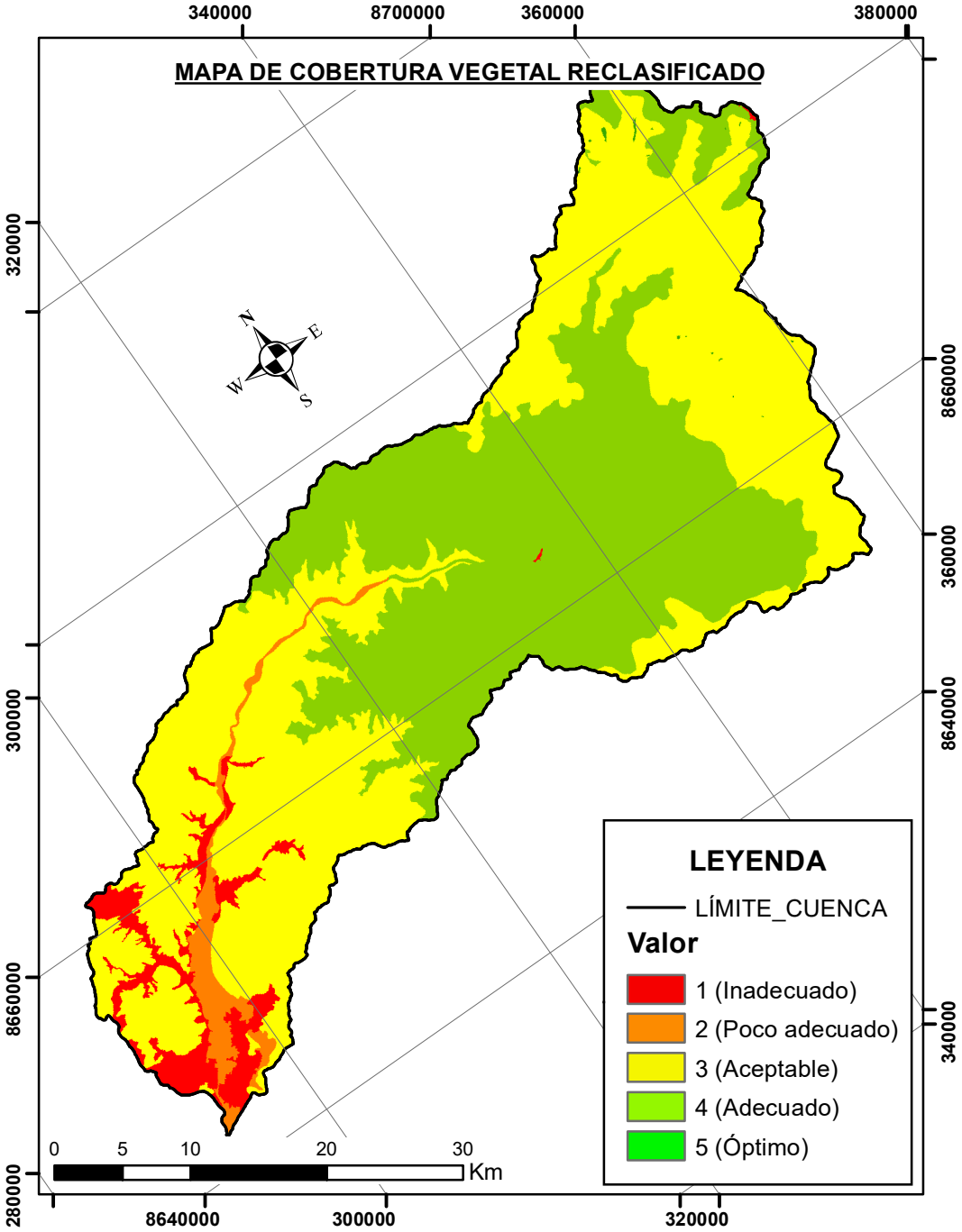


TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC2**

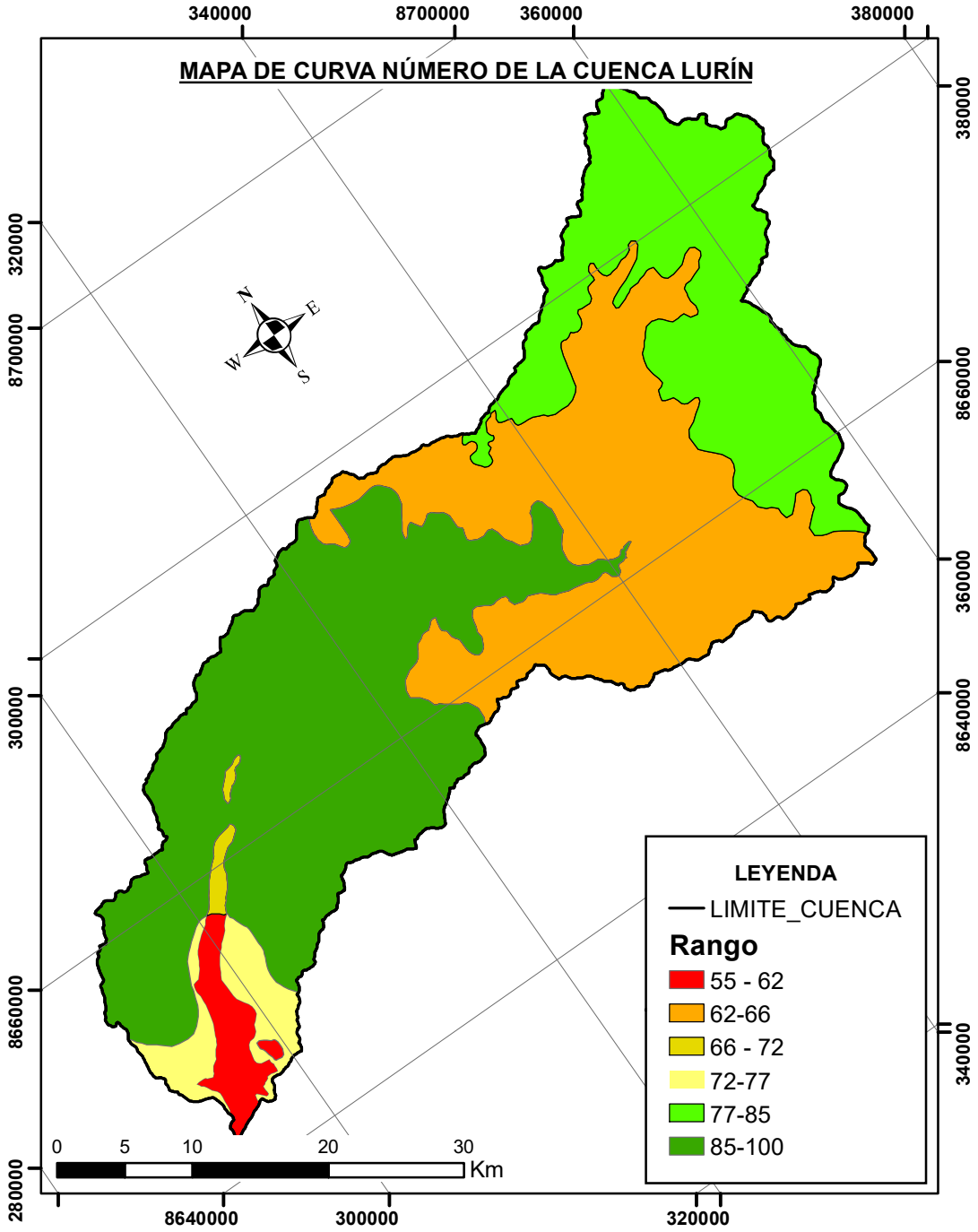
MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA LURÍN

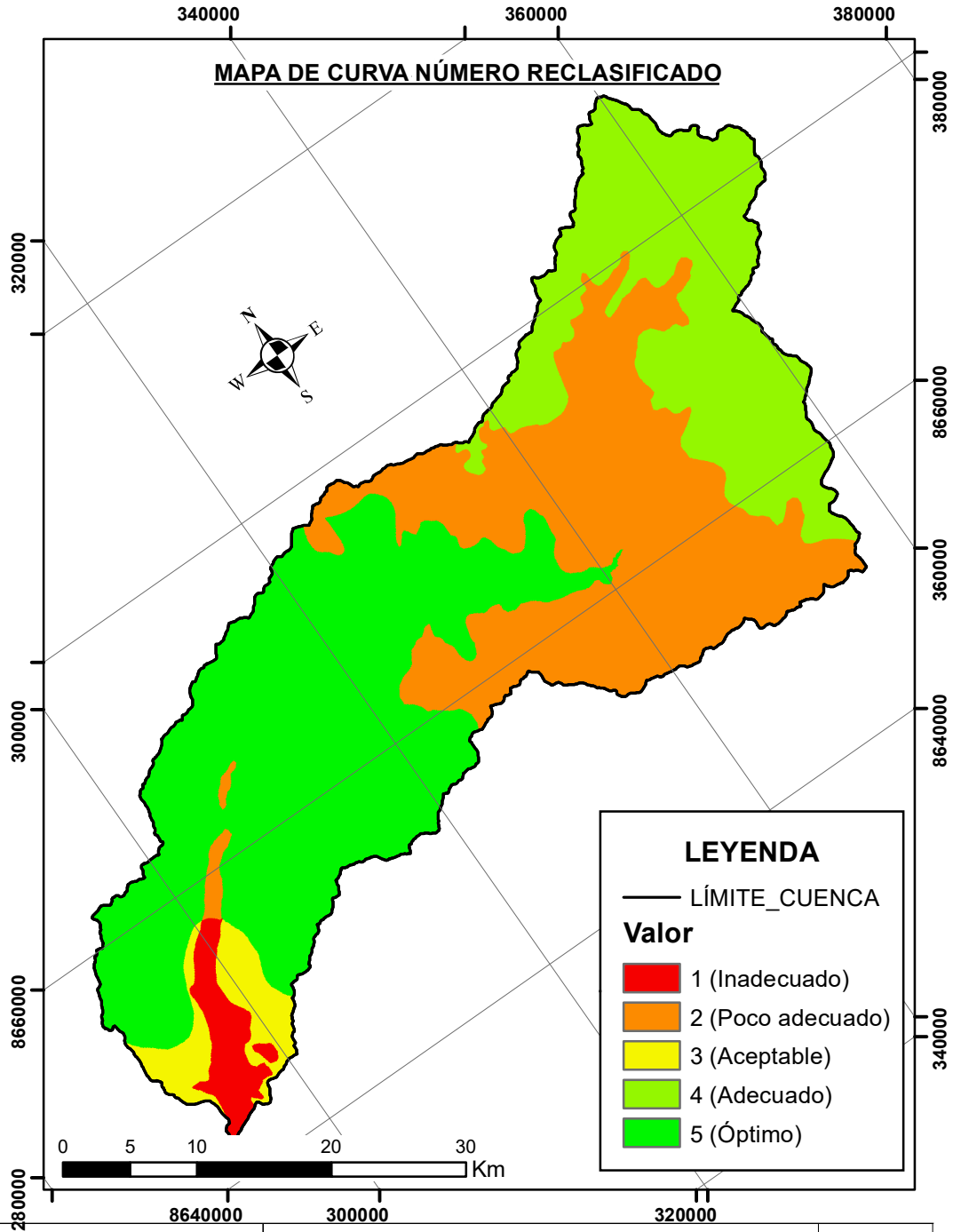


MAPA DE COBERTURA VEGETAL RECLASIFICADO

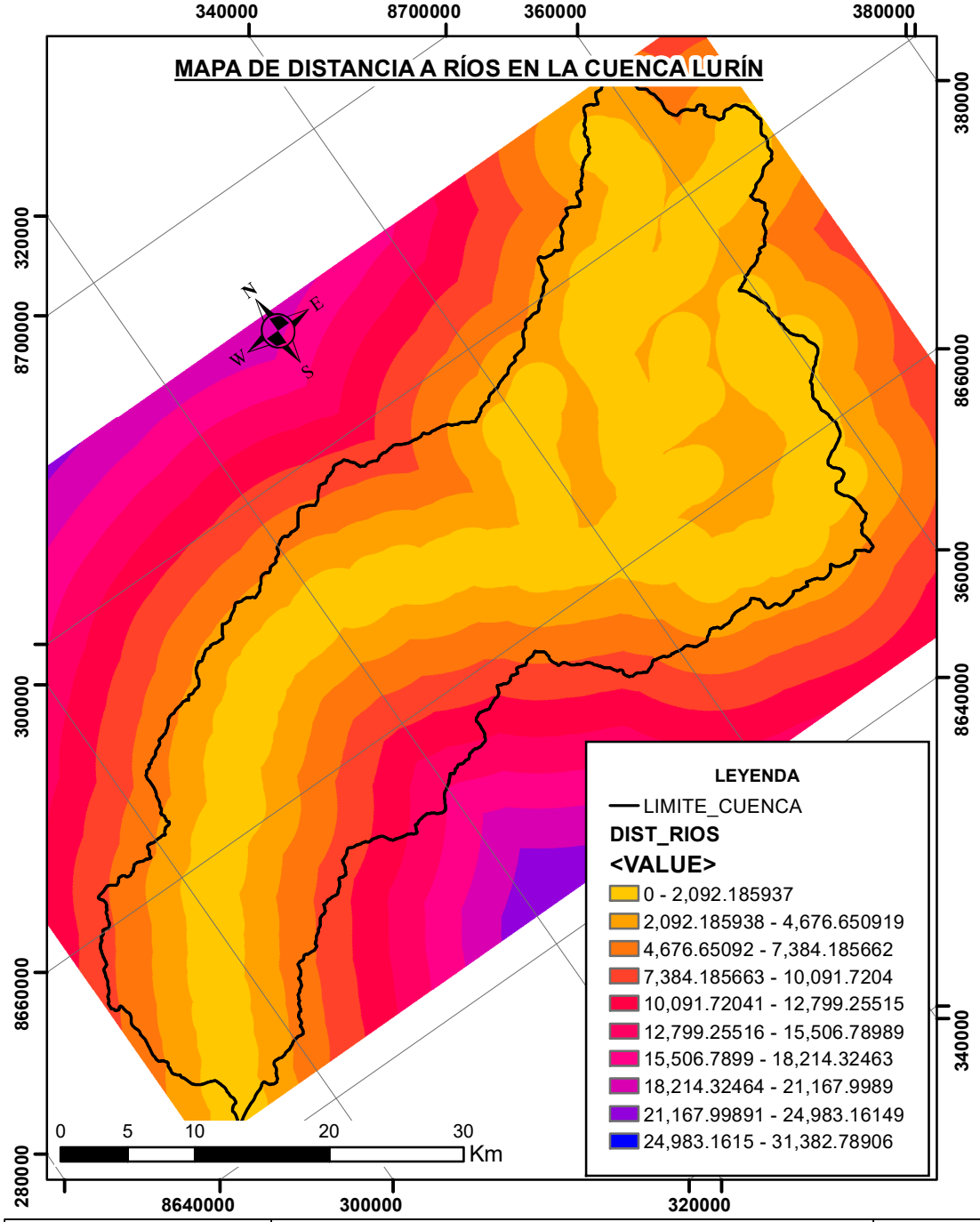


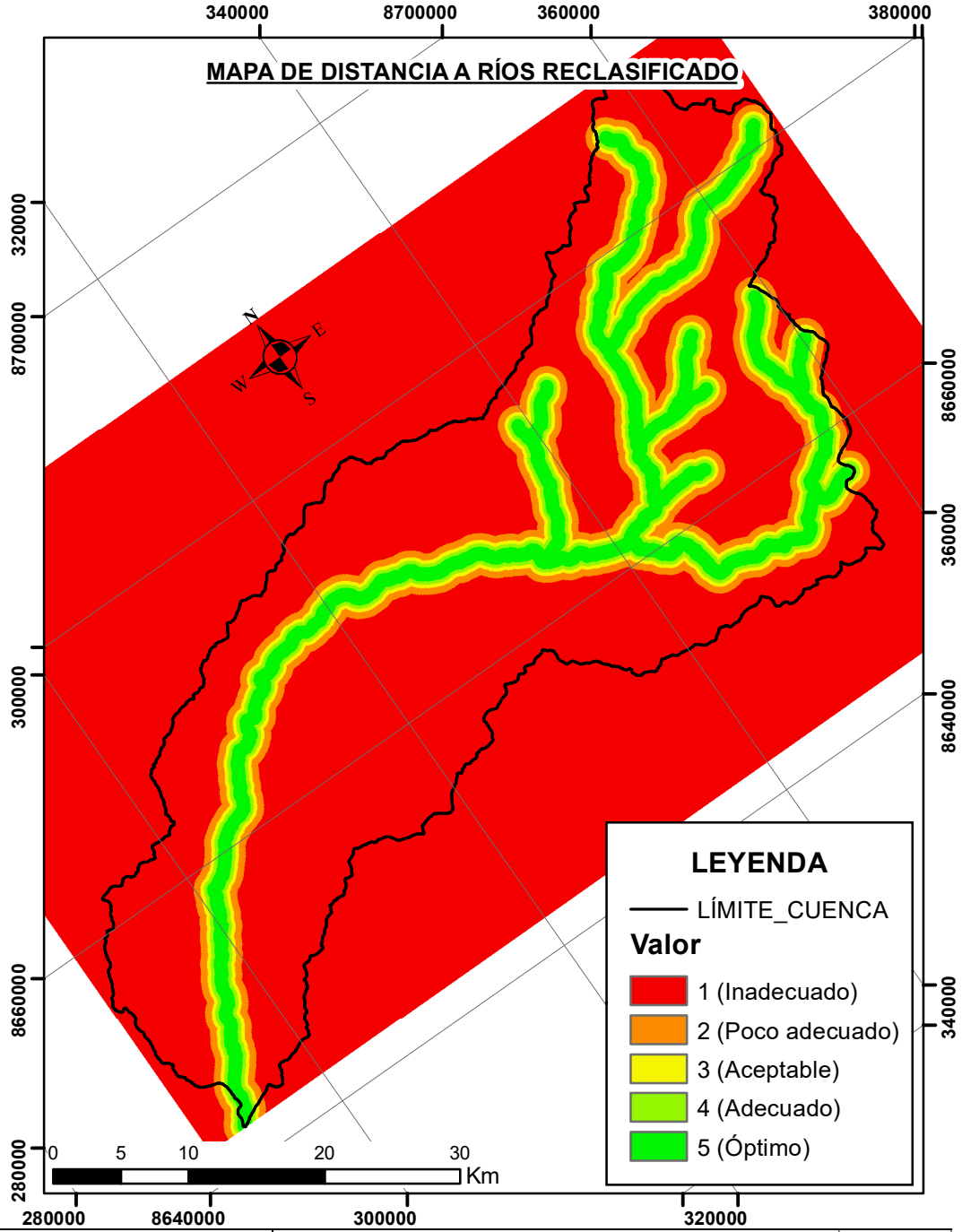
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC3**





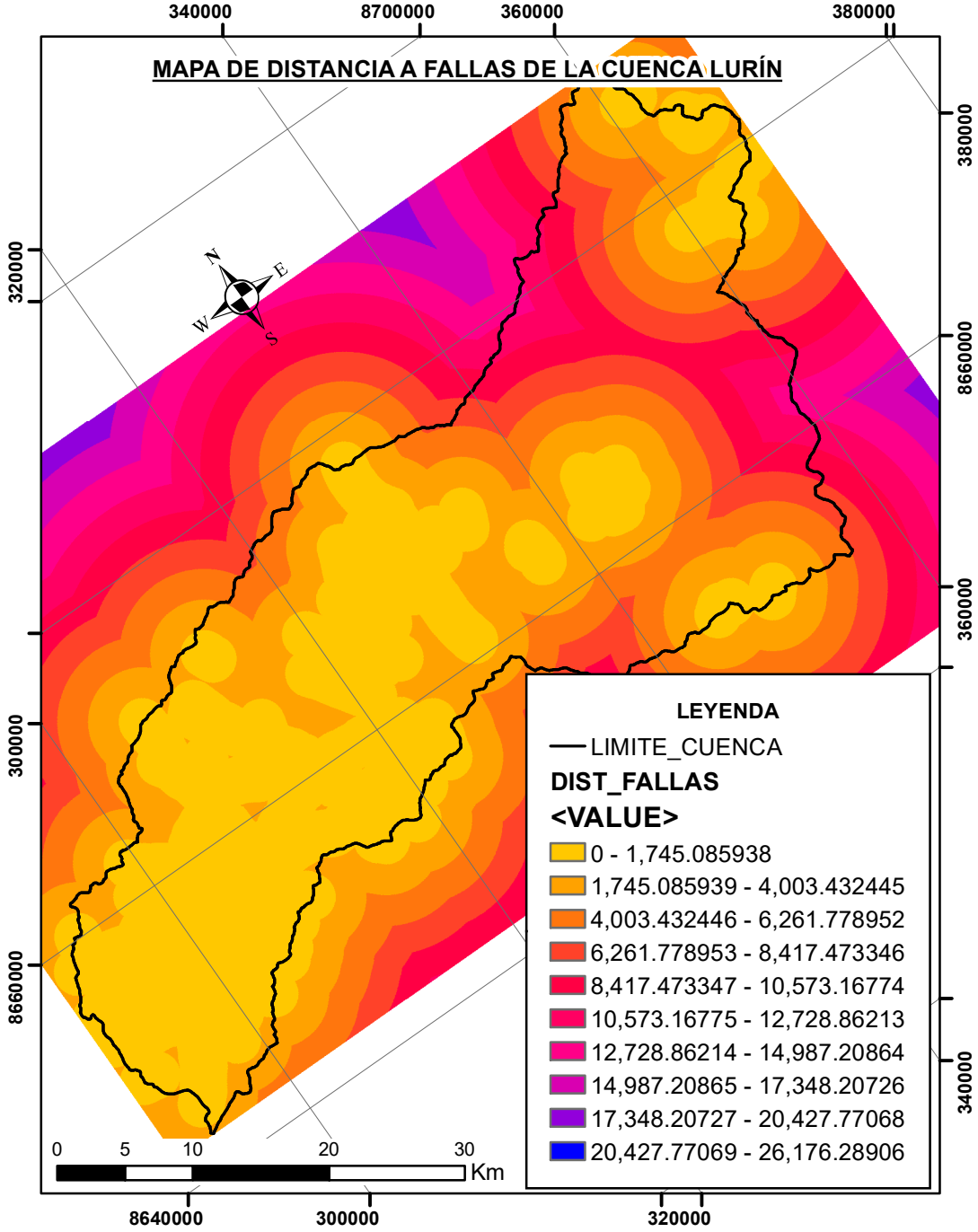
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE CURVA NÚMERO DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC4**



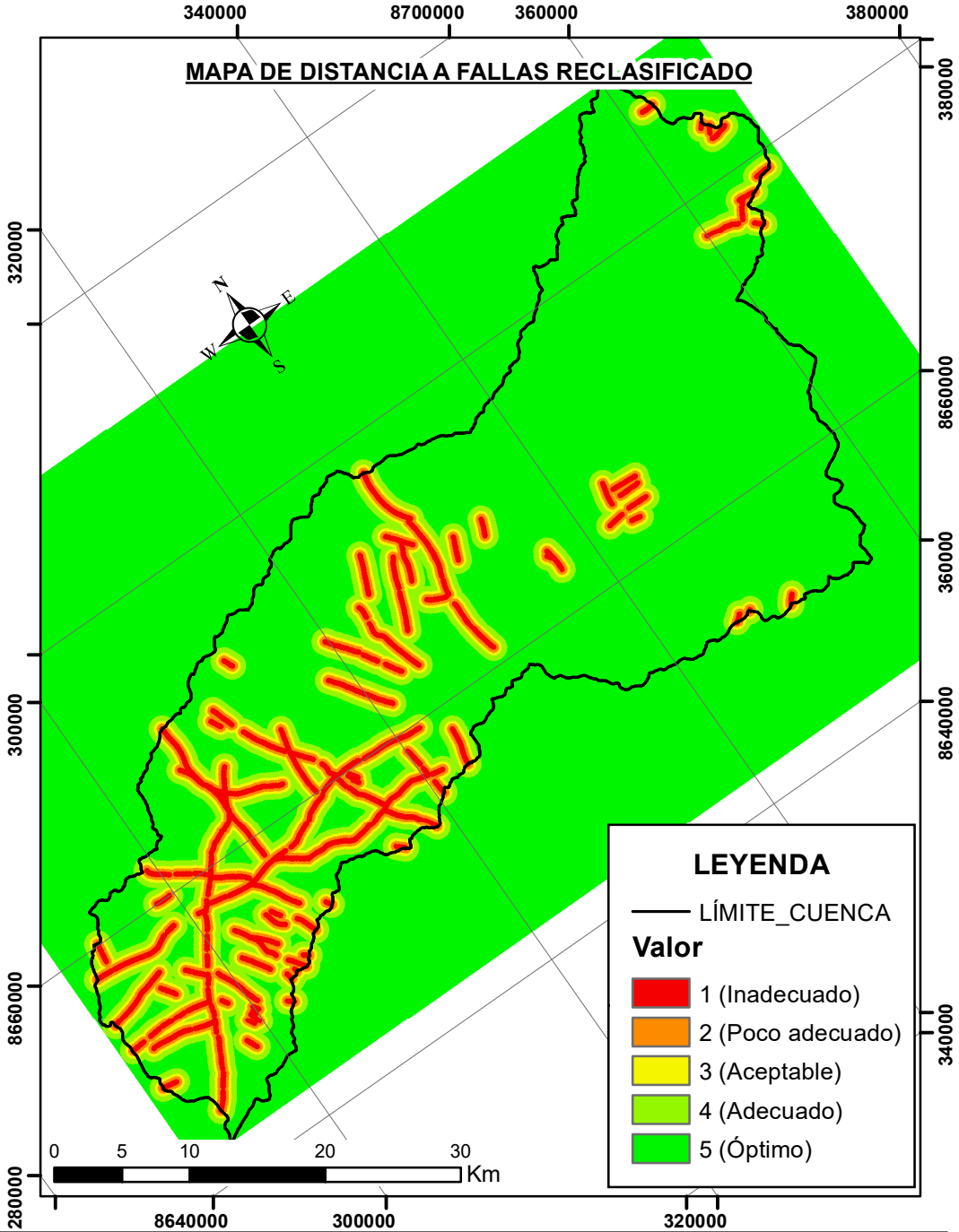


TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE DISTANCIA A RÍOS DE LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC5**

MAPA DE DISTANCIA A FALLAS DE LA CUENCA LURÍN



MAPA DE DISTANCIA A FALLAS RECLASIFICADO



TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"	**Mapa:** RECLASIFICACIÓN DE DISTANCIA AFALLAS EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN	**Tesista:** Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma **Asesor:** Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana **Fecha:** Agosto 2025 **Escala:** Indicada	**RC6**

MAPA DE IDONEIDAD PARA UBICACIÓN DE PRESAS EN LA CUENCA LURÍN



300000 320000 340000 360000

8680000 8660000 8640000

N
W E
S

LEYENDA

LÍMITE_CUENCA

Valor

- 1 (Inadecuado)
- 2 (Poco adecuado)
- 3 (Aceptable)
- 4 (Adecuado)
- 5 (Óptimo)

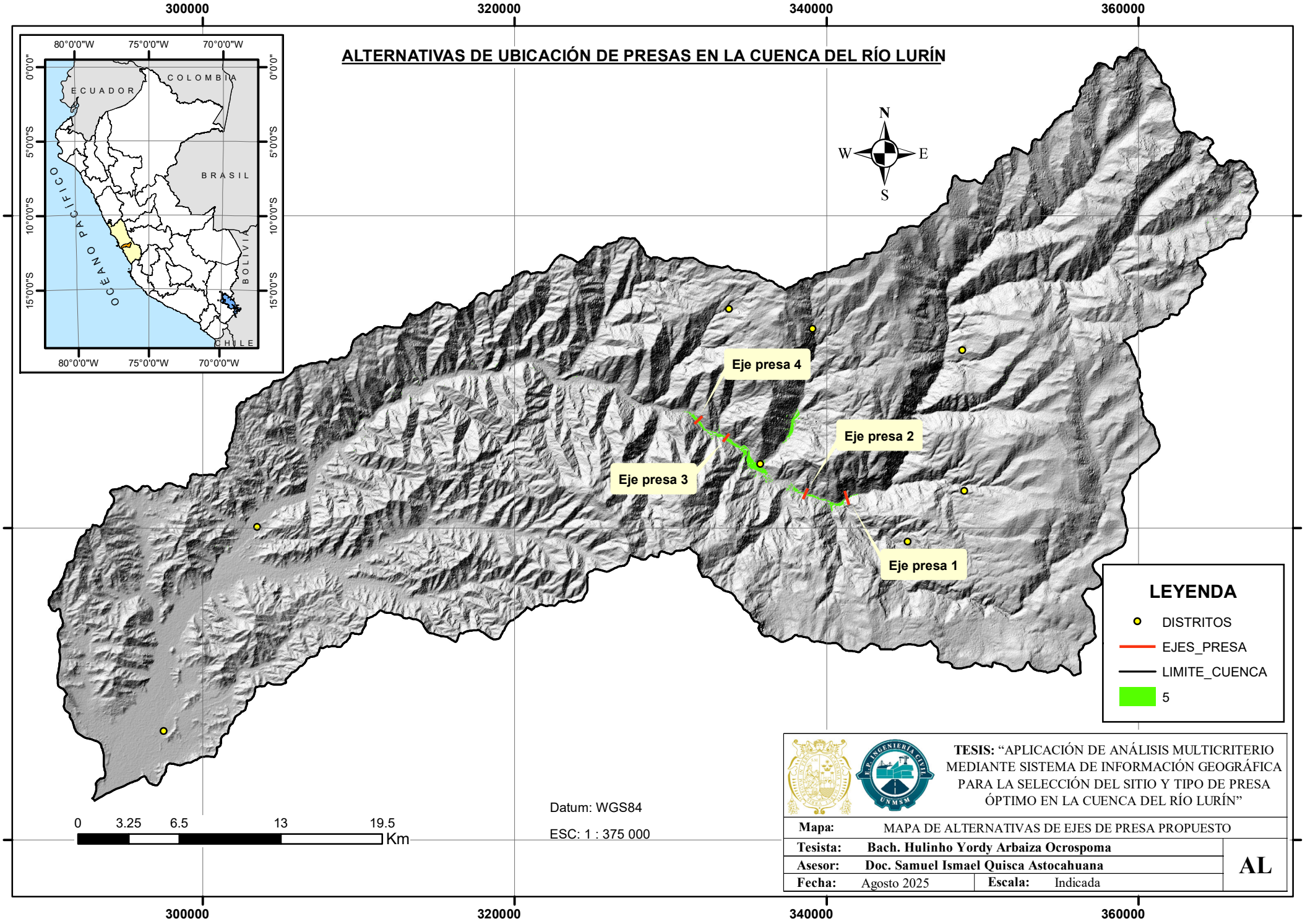
Datum: WGS84

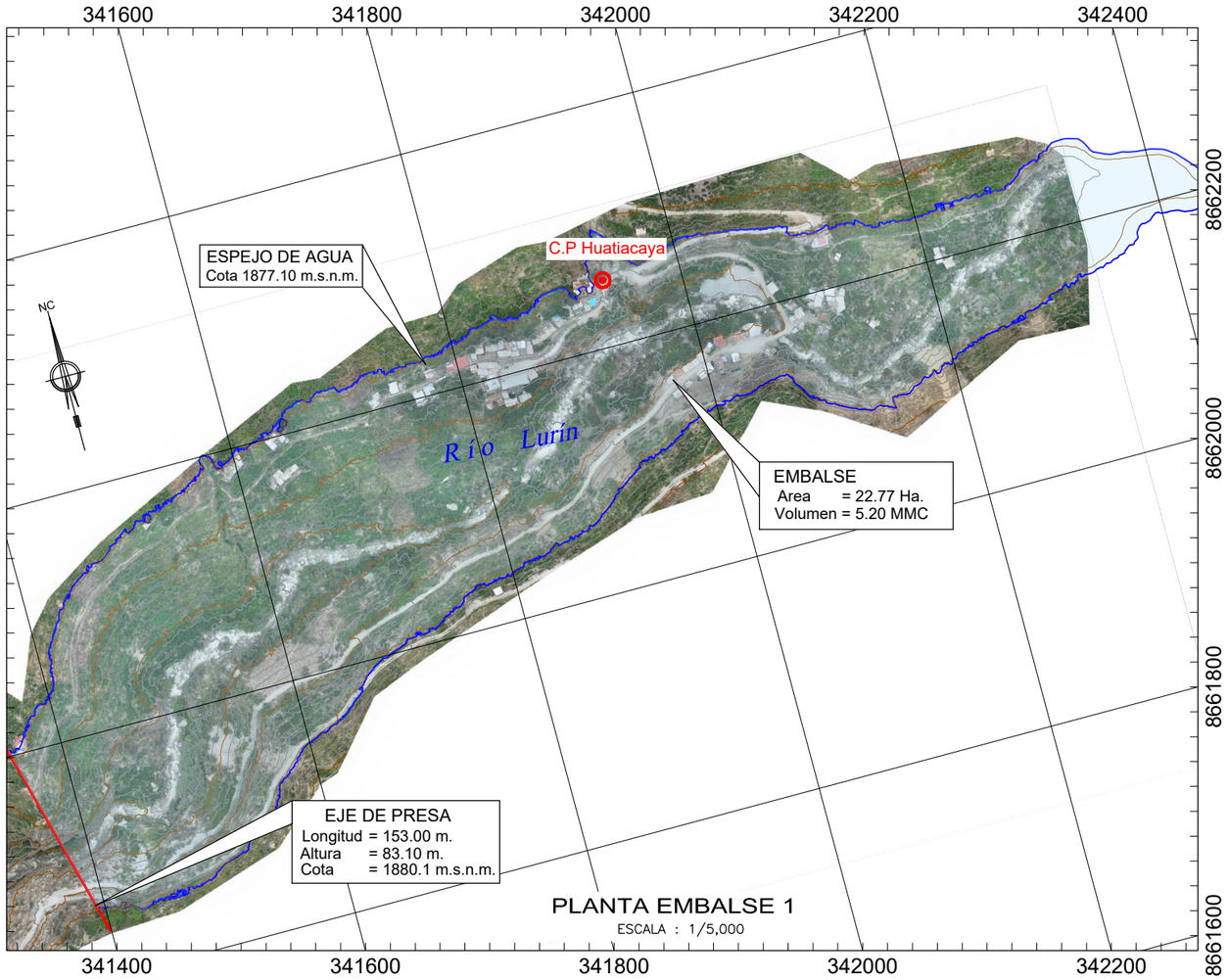
ESC: 1 : 300 000

0 3.25 6.5 13 19.5 Km

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

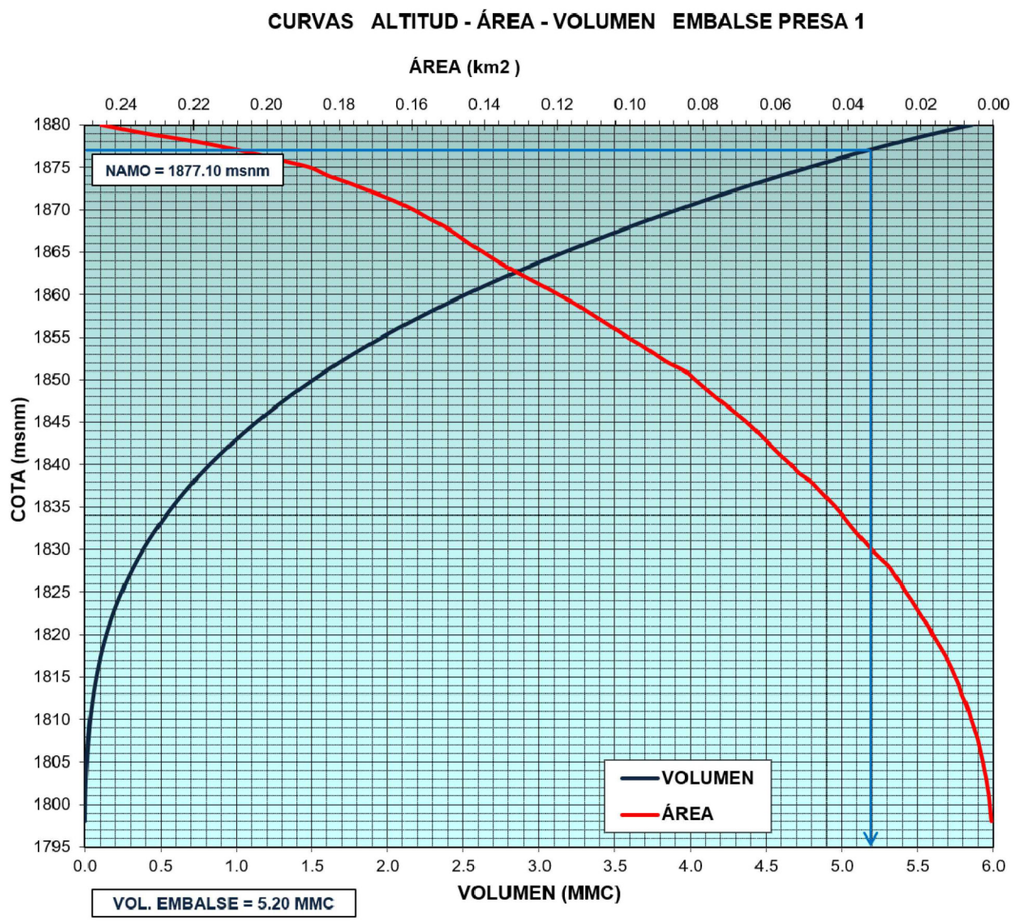
Mapa:	MAPA DE IDONEIDAD PARA UBICACIÓN DE PRESAS		
Tesista:	**Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma**		**MI**
Asesor:	**Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**		
Fecha:	Agosto 2025	**Escala:** Indicada	

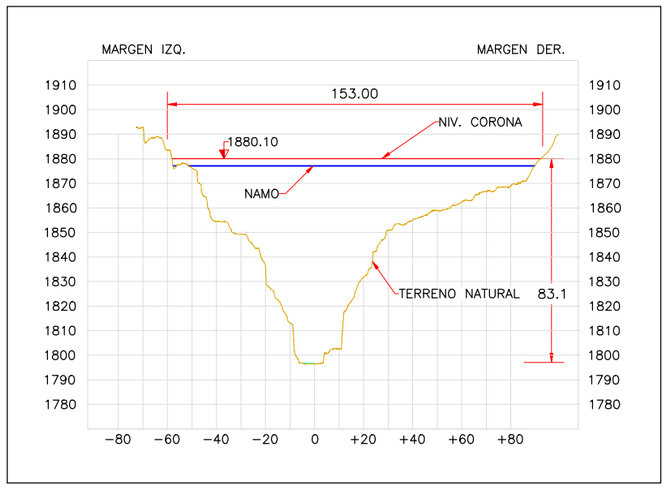

ALTERNATIVAS DE UBICACIÓN DE PRESAS EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN
300000
320000
340000
360000
8680000
8660000
8640000
N
W
E
S
80°0'0"W
75°0'0"W
70°0'0"W
0°0'0"
5°0'0"S
10°0'0"S
15°0'0"S
ECUADOR
COLOMBIA
BRASIL
BOLIVIA
CHILE
OCEANO PACIFICO
Eje presa 4
Eje presa 2
Eje presa 3
Eje presa 1
LEYENDA
DISTRITOS
EJES_PRESA
LIMITE_CUENCA
5
0
3.25
6.5
13
19.5
Km
Datum: WGS84
ESC: 1 : 375 000
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"
Mapa: MAPA DE ALTERNATIVAS DE EJES DE PRESA PROPUESTO
Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma
Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana
Fecha: Agosto 2025
Escala: Indicada
AL



PLANTA EMBALSE 1

ESCALA : 1/5,000





SECCION DE BOQUILLA

ESCALA : 1/2 500

CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE			
Descripción	Leyenda	Und.	Valor
Volumen util	Vu	MMC	3.20
Volumen muerto	Vm	MMC	2.00
Volumen Total	Vt	MMC	5.20
Area de embalse	AE	Ha.	22.77
Niv. de corona	Nc	m.s.n.m.	1880.10
Niv. (NAMO)	No	m.s.n.m.	1877.10
Niv. fondo de cauce	Nfc	m.s.n.m.	1796.50
Altura de presa	H	m	83.10
Longitud de corona	L	m	153.00

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano: VISTA EN PLANTA DE EMBALSE Y EJE DE PRESA 1

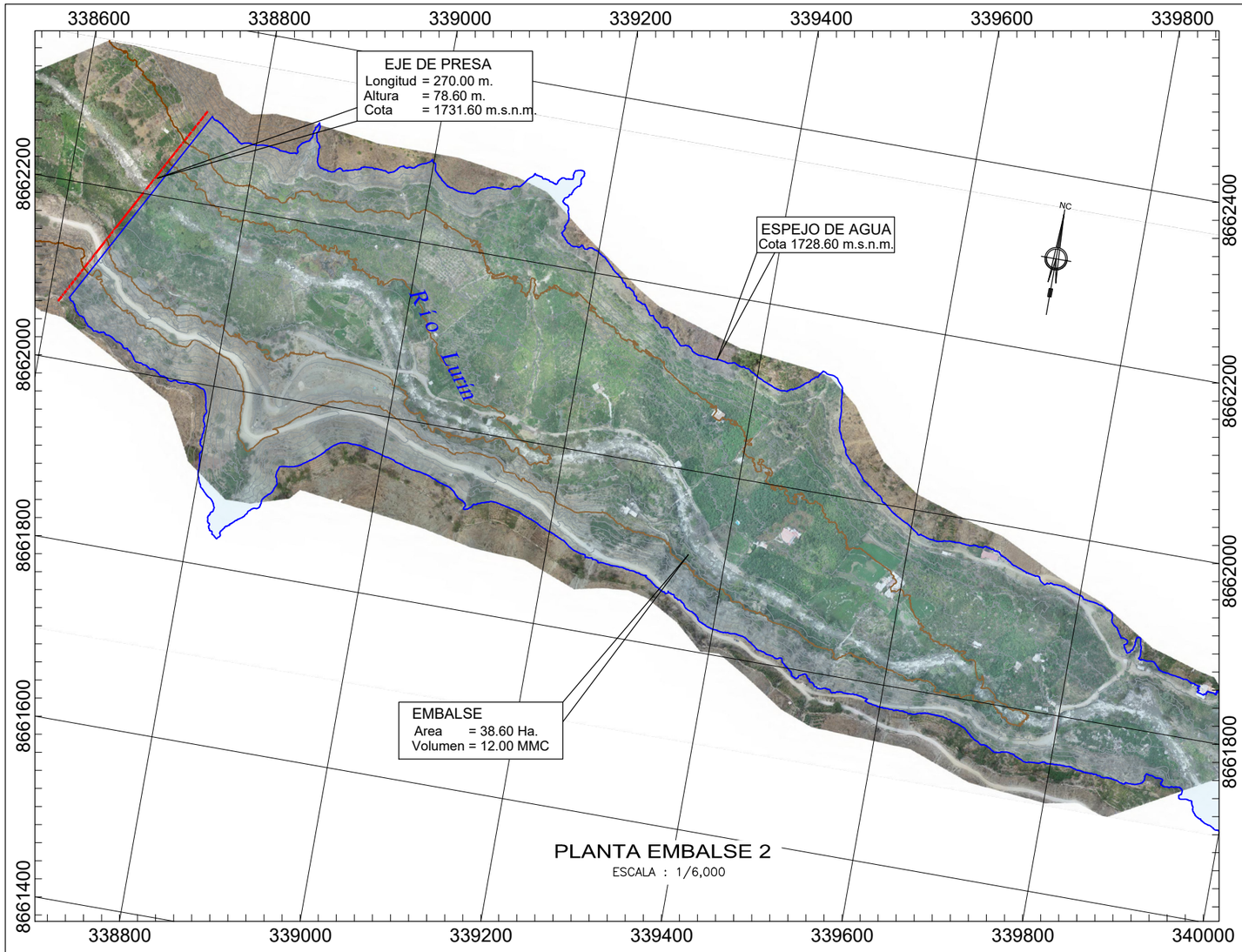
Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma

Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana

Fecha: Agosto 2025

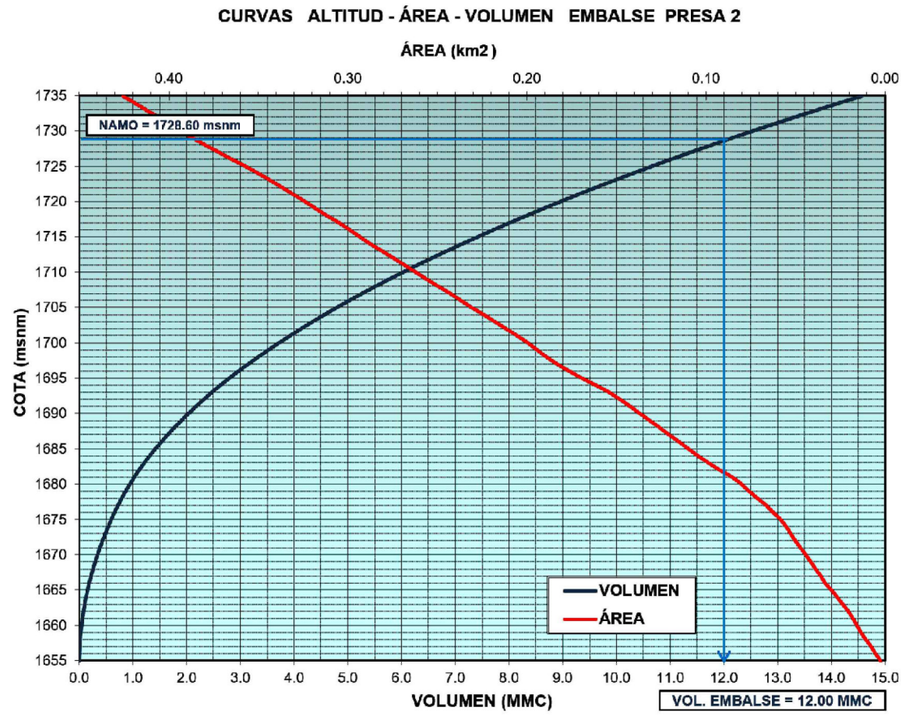
Escala: Indicada

Código: P-01

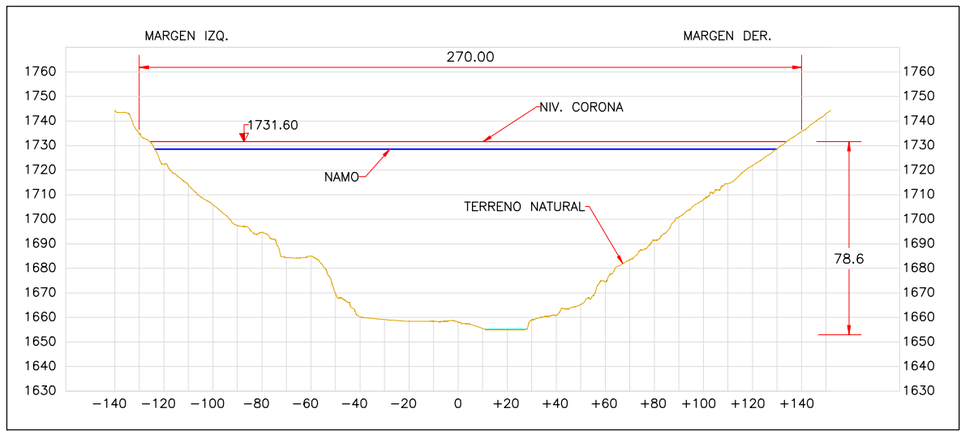


PLANTA EMBALSE 2

ESCALA : 1/6,000



CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE			
Descripción	Leyenda	Und.	Valor
Volumen util	Vu	MMC	9.40
Volumen muerto	Vm	MMC	2.60
Volumen Total	Vt	MMC	12.00
Area de embalse	AE	Ha.	38.60
Niv. de corona	Nc	m.s.n.m.	1731.60
Niv. (NAMO)	No	m.s.n.m.	1728.60
Niv. fondo de cauce	Nfc	m.s.n.m.	1653.00
Altura de presa	H	m	78.60
Longitud de corona	L	m	270.00

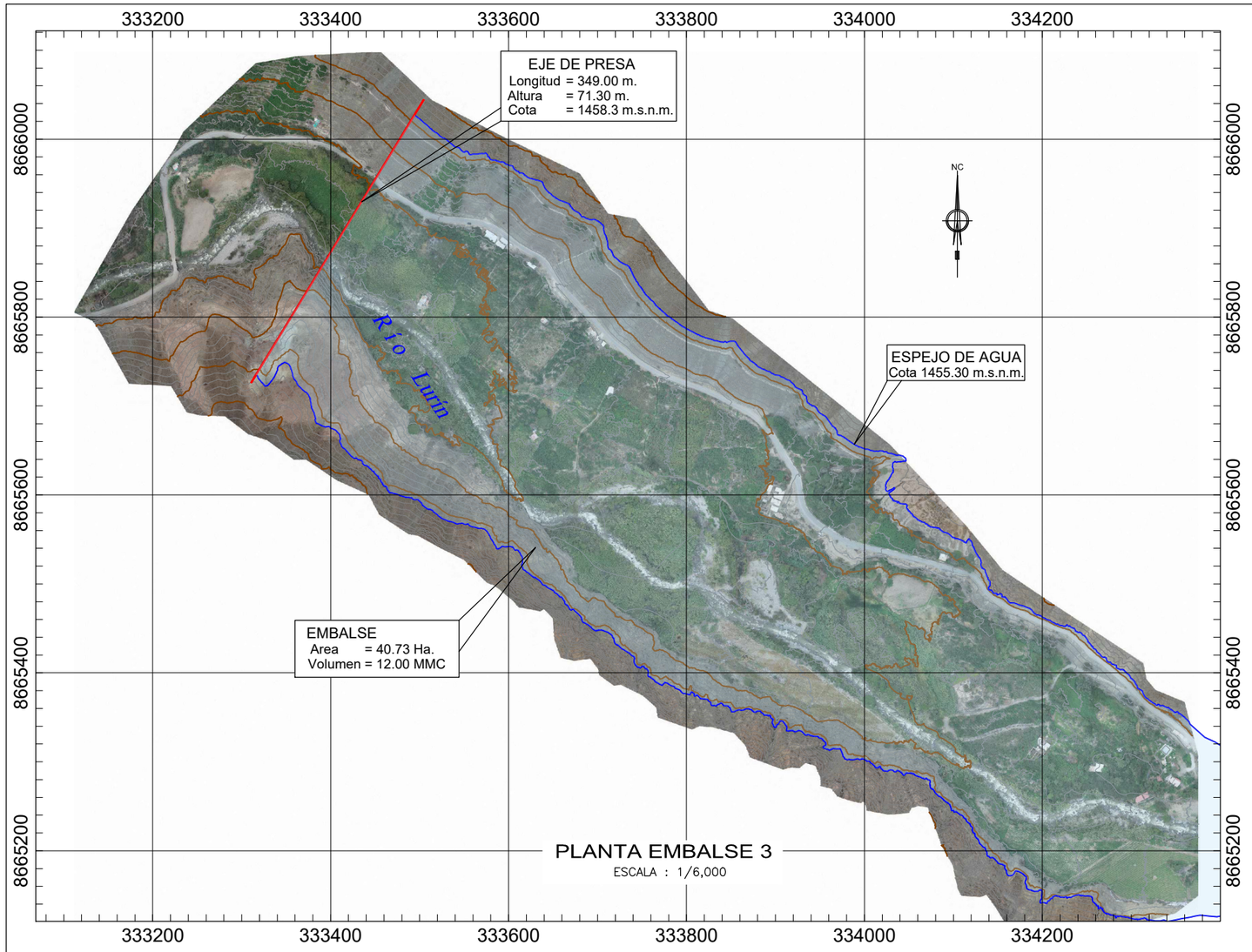


SECCION DE BOQUILLA

ESCALA : 1/2 500

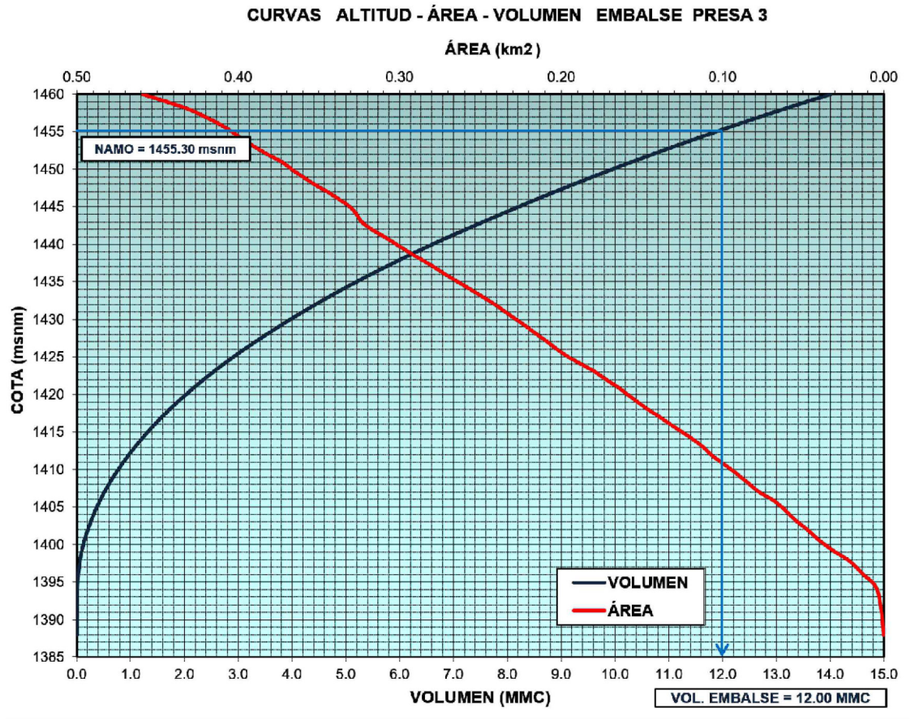
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano: VISTA EN PLANTA DE EMBALSE Y EJE DE PRESA 2		
Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma		Código: P-02
Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana		
Fecha: Agosto 2025	Escala: Indicada	

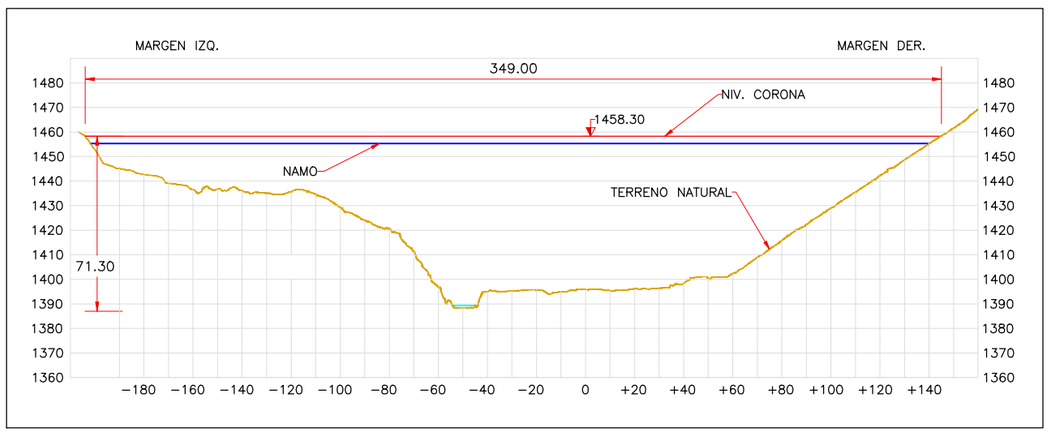


PLANTA EMBALSE 3

ESCALA : 1/6,000



CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE			
Descripción	Leyenda	Und.	Valor
Volumen util	Vu	MMC	9.20
Volumen muerto	Vm	MMC	2.80
Volumen Total	Vt	MMC	12.00
Area de embalse	AE	Ha.	40.73
Niv. de corona	Nc	m.s.n.m.	1458.30
Niv. (NAMO)	No	m.s.n.m.	1455.30
Niv. fondo de cauce	Nfc	m.s.n.m.	1388.50
Altura de presa	H	m	71.30
Longitud de corona	L	m	196.00

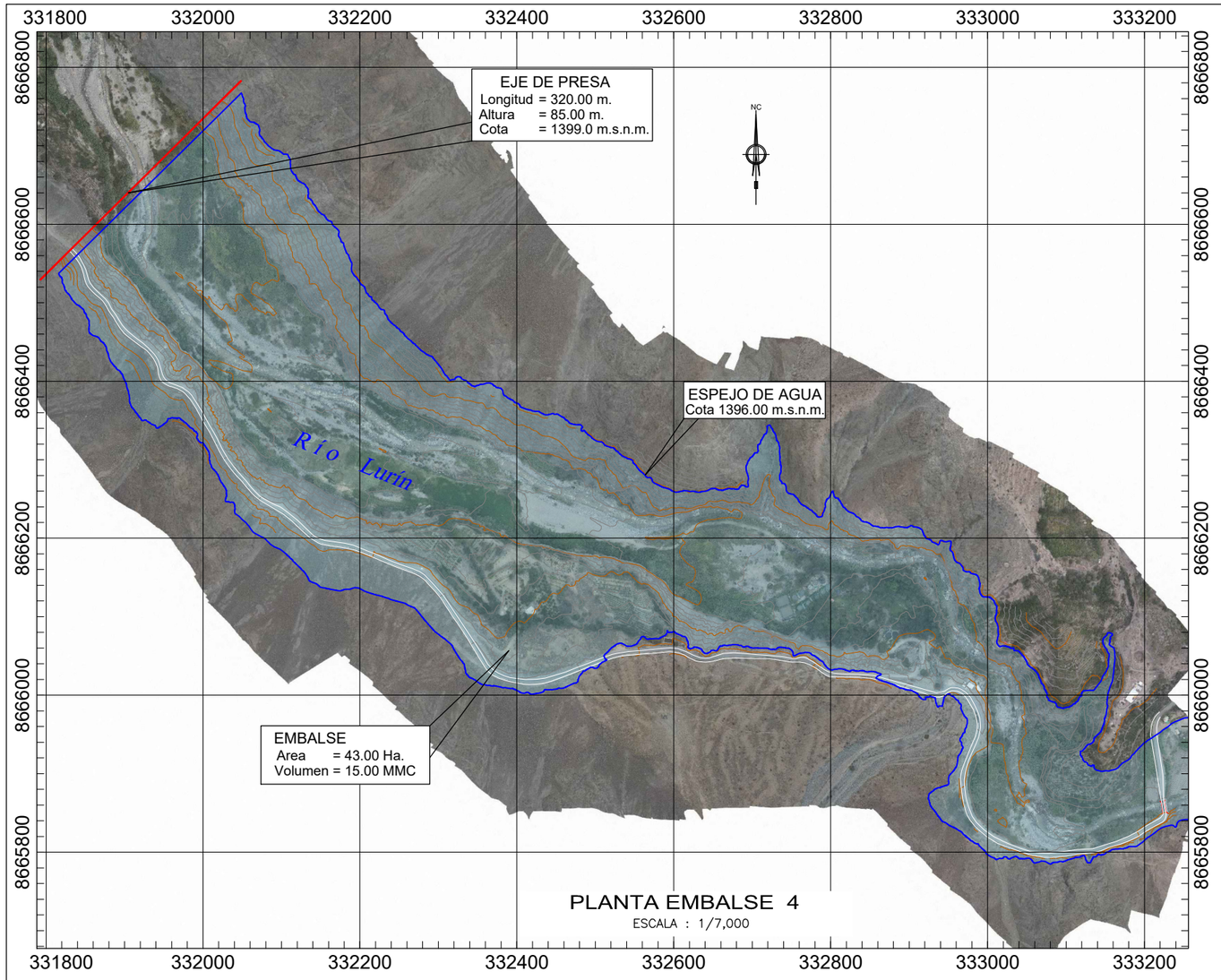


SECCION DE BOQUILLA

ESCALA : 1/2 500

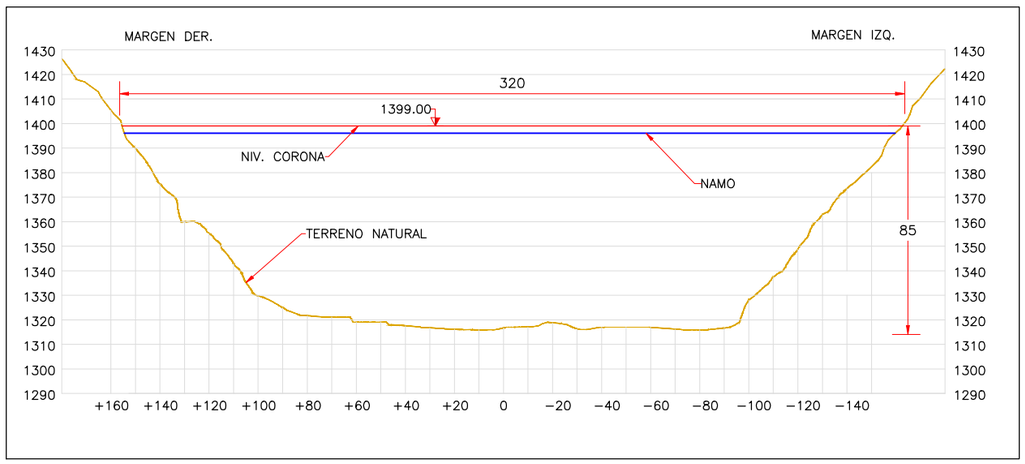
TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano: VISTA EN PLANTA DE EMBALSE Y EJE DE PRESA 3		
Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma		Código: P-03
Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana		
Fecha: Agosto 2025	Escala: Indicada	



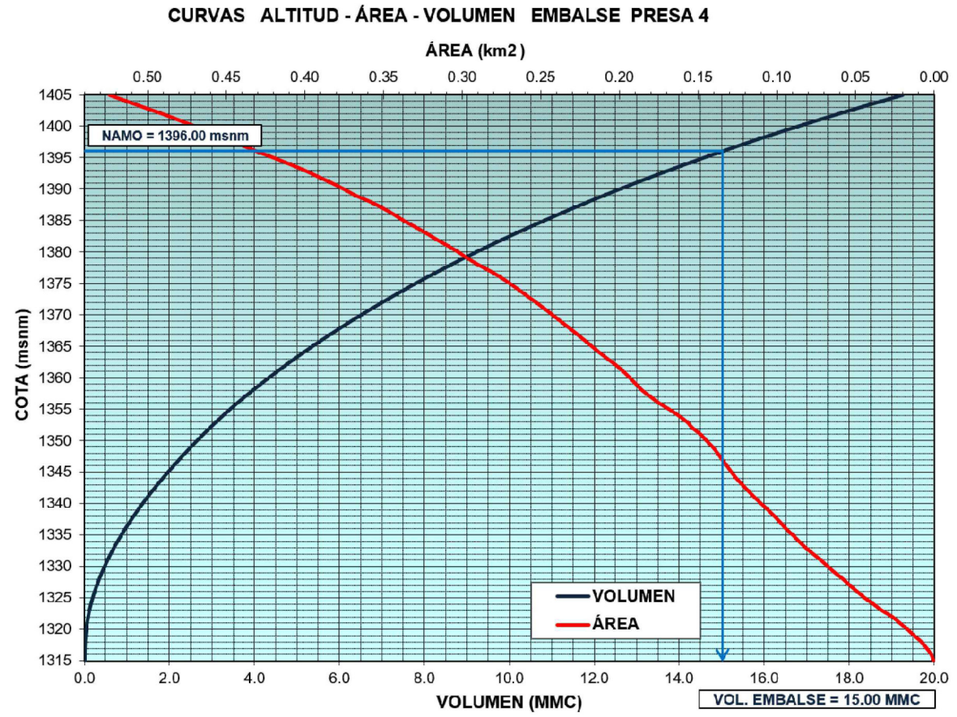
PLANTA EMBALSE 4

ESCALA : 1/7,000



SECCION DE BOQUILLA

ESCALA : 1/2 500



CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE			
Descripción	Leyenda	Und.	Valor
Volumen util	Vu	MMC	12.15
Volumen muerto	Vm	MMC	2.85
Volumen Total	Vt	MMC	15.00
Area de embalse	AE	Ha.	43.00
Niv. de corona	Nc	m.s.n.m.	1399.00
Niv. (NAMO)	No	m.s.n.m.	1396.00
Niv. fondo de cauce	Nfc	m.s.n.m.	1316.00
Altura de presa	H	m	85.00
Longitud de corona	L	m	320.00

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano: VISTA EN PLANTA DE EMBALSE Y EJE DE PRESA 4

Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma

Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana

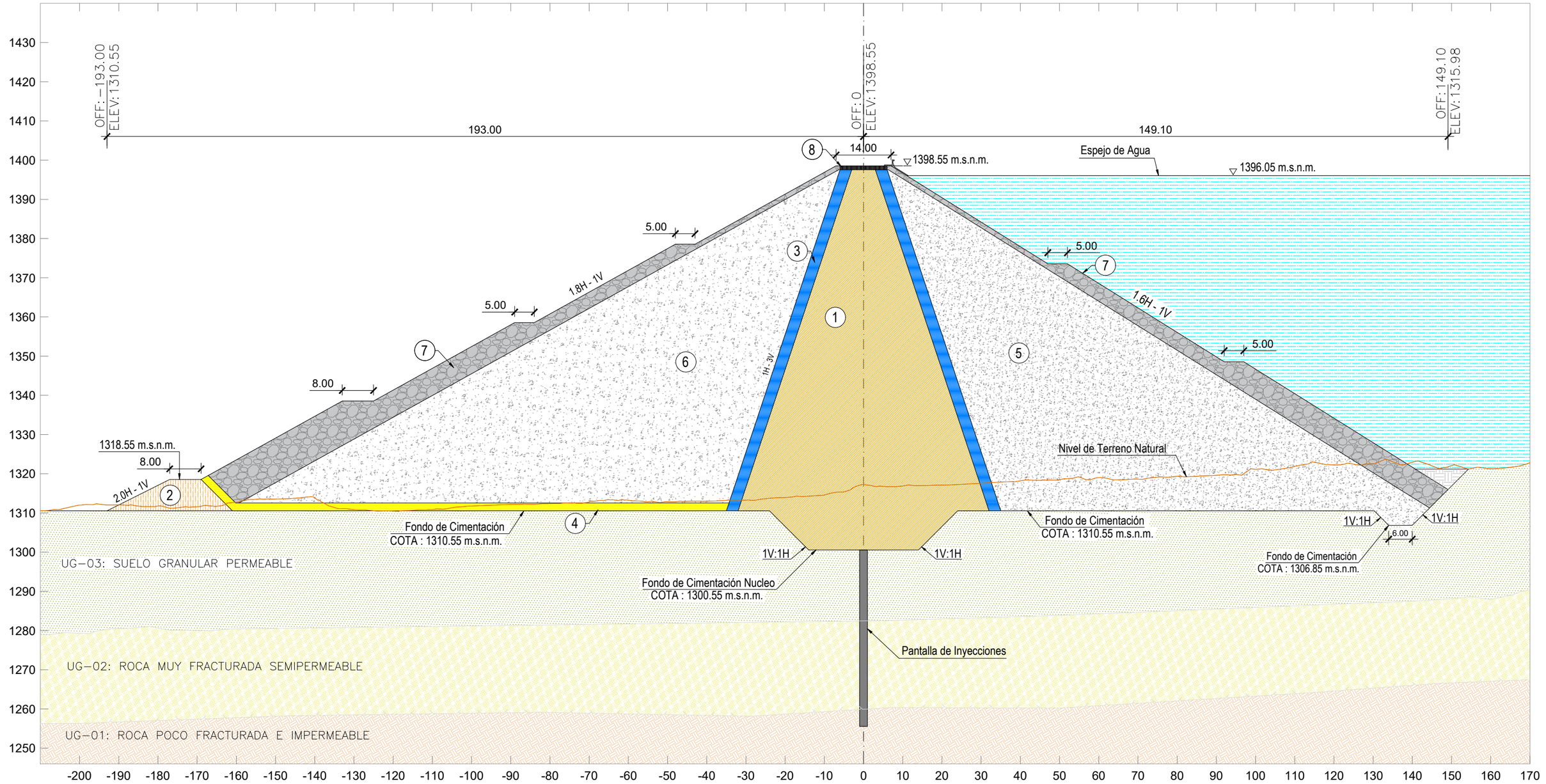
Fecha: Agosto 2025

Escala: Indicada

Código: P-04

SECCIÓN TÍPICA DE PRESA DE TIERRA Y ENROCADO CON NÚCLEO CENTRAL IMPERMEABLE

ESC. 1/500



SIMBOLOGÍA - CAPAS PRESA DE TIERRA Y ENROCADO CON NÚCLEO CENTRAL IMPERMEABLE(TENCI)

① Núcleo impermeable	④ Filtro de arena 2	⑦ Enrocado de protección
② Dren	⑤ Espaldón aguas arriba	⑧ Afirmado en corona
③ Filtro de arena 1	⑥ Espaldón aguas abajo	

NOTA: PLANO ELABORADO EN HOJA A1, EN CASO DE IMPRIMIRSE EN A3 DUPLICAR LA ESCALA.

TITULO:

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano:

PRESA DE TIERRA Y ENROCADO CON NÚCLEO CENTRAL IMPERMEABLE (TENCI) SECCIÓN TÍPICA

Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma

Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana

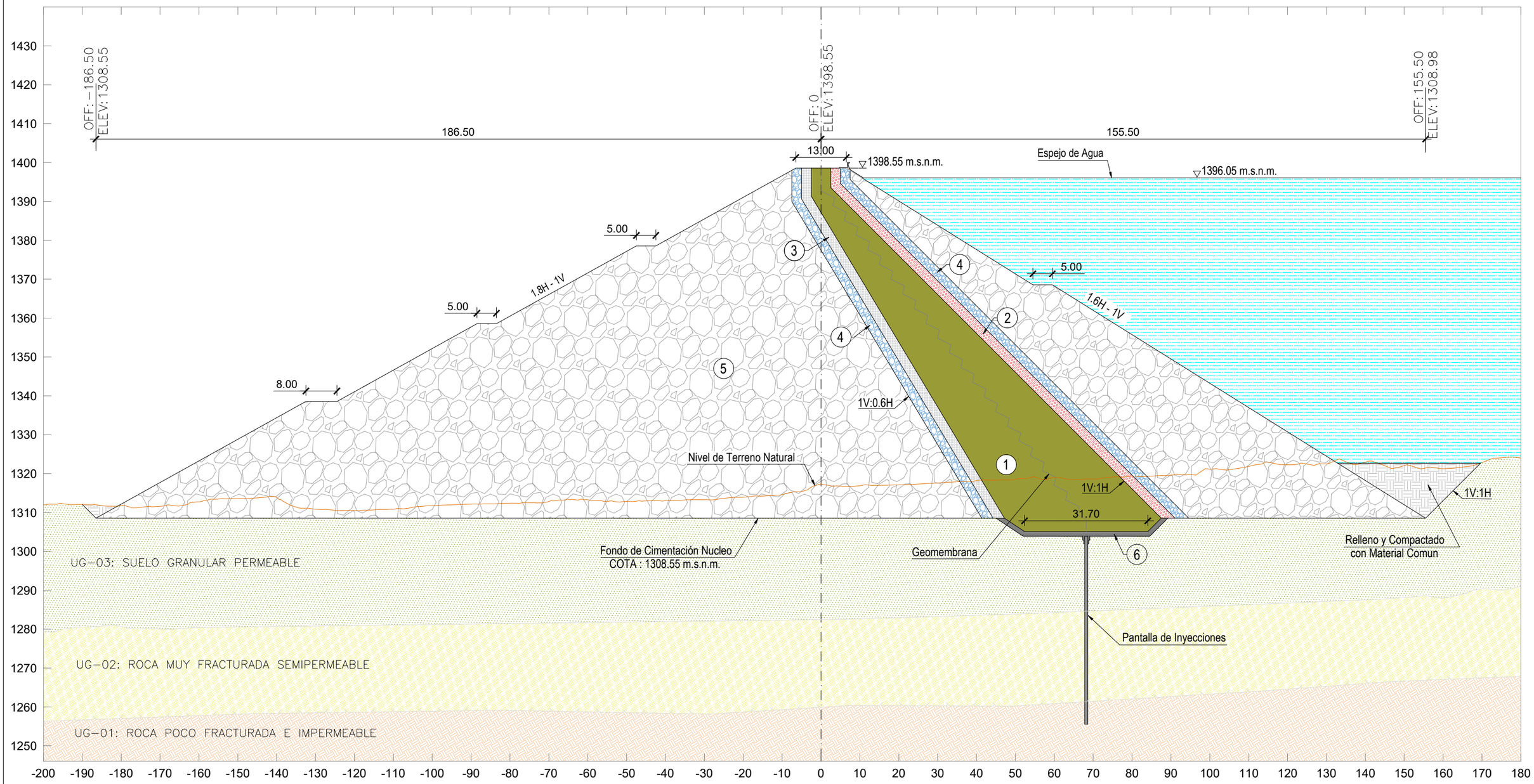
Fecha: Agosto 2025

Escala: Indicada

Código: ST-01

SECCIÓN TÍPICA DE PRESA DE ENROCADO CON NÚCLEO INCLINADO IMPERMEABLE

ESC. 1/500



SIMBOLOGÍA - CAPAS PRESA DE ENROCADO CON NÚCLEO INCLINADO (ENI)

① Núcleo impermeable	④ Transición	Relleno compactado
② Filtro 1	⑤ Enrocado	
③ Filtro 2	⑥ Concreto f´c=280 kg/cm2	

NOTA: PLANO ELABORADO EN HOJA A1, EN CASO DE IMPRIMIRSE EN A3 DUPLICAR LA ESCALA.

TITULO:

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

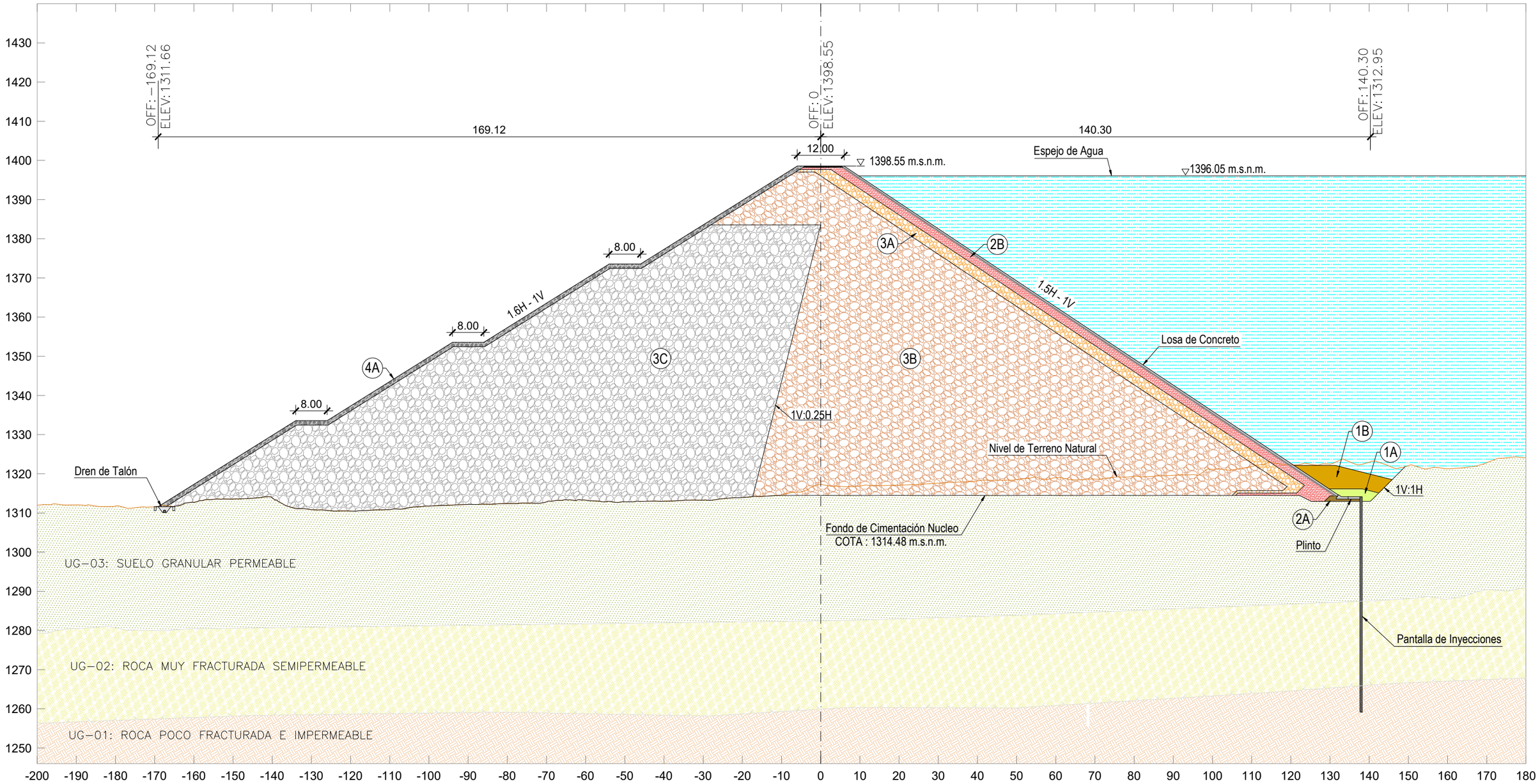
Plano:

PRESA DE ENROCADO CON NÚCLEO INCLINADO IMPERMEABLE (ENII) SECCIÓN TÍPICA

Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma		Código: ST-02
Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana		
Fecha: Agosto 2025	Escala: Indicada	

SECCIÓN TÍPICA DE PRESA DE ENROCADO CON PANTALLA DE CONCRETO

ESC. 1/500



SIMBOLOGÍA - CAPAS PRESA DE ENROCADO CON CARA DE CONCRETO (CFRD)

1A Suelo limo - arenoso no cohesivo	2B Grava muy bien graduada (transición alta compacidad)	3C Piedra pequeña a mediana (bien graduada, altamente compactada)
1B Rezaga de protección	3A Grava bien graduada transición entre 2B y 3B	4A Protección de talud aguas abajo, Tam. Max. 500 mm
2A Grava procesada, Filtro Tam. Max. 19mm	3B Piedra o grava arenosa (bien graduada, altamente compactada)	Concreto en pantalla y plinto f´c=280 kg/cm2

NOTA: PLANO ELABORADO EN HOJA A1, EN CASO DE IMPRIMIRSE EN A3 DUPLICAR LA ESCALA.

TITULO:

TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"

Plano:

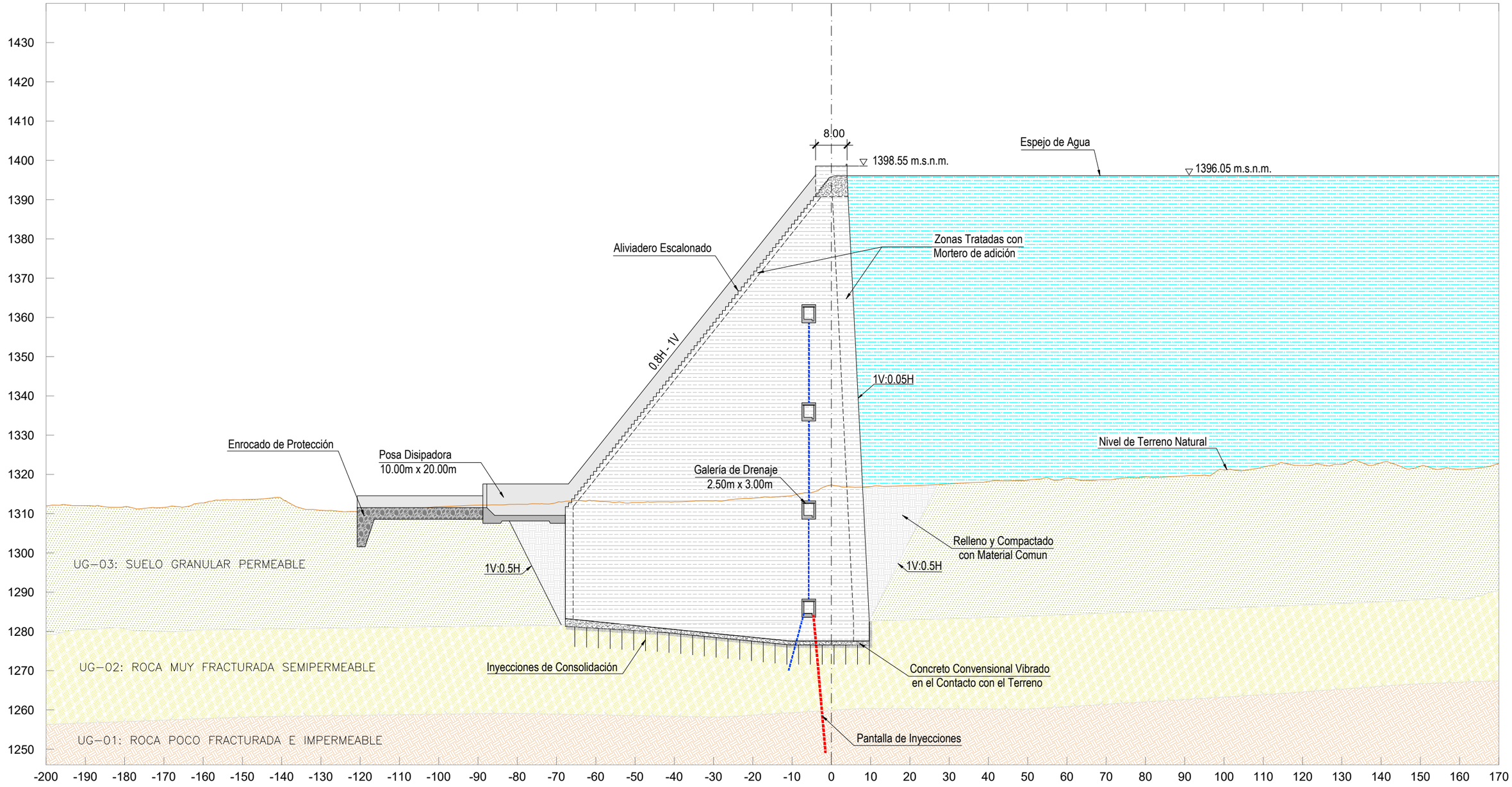
PRESA DE ENROCADO CON PANTALLA DE CONCRETO (CFRD) SECCIÓN TÍPICA

Tesista:	Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma
Asesor:	Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana
Fecha:	Agosto 2025
Escala:	Indicada

Código: ST-03

SECCIÓN TÍPICA DE PRESA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

ESC. 1/500



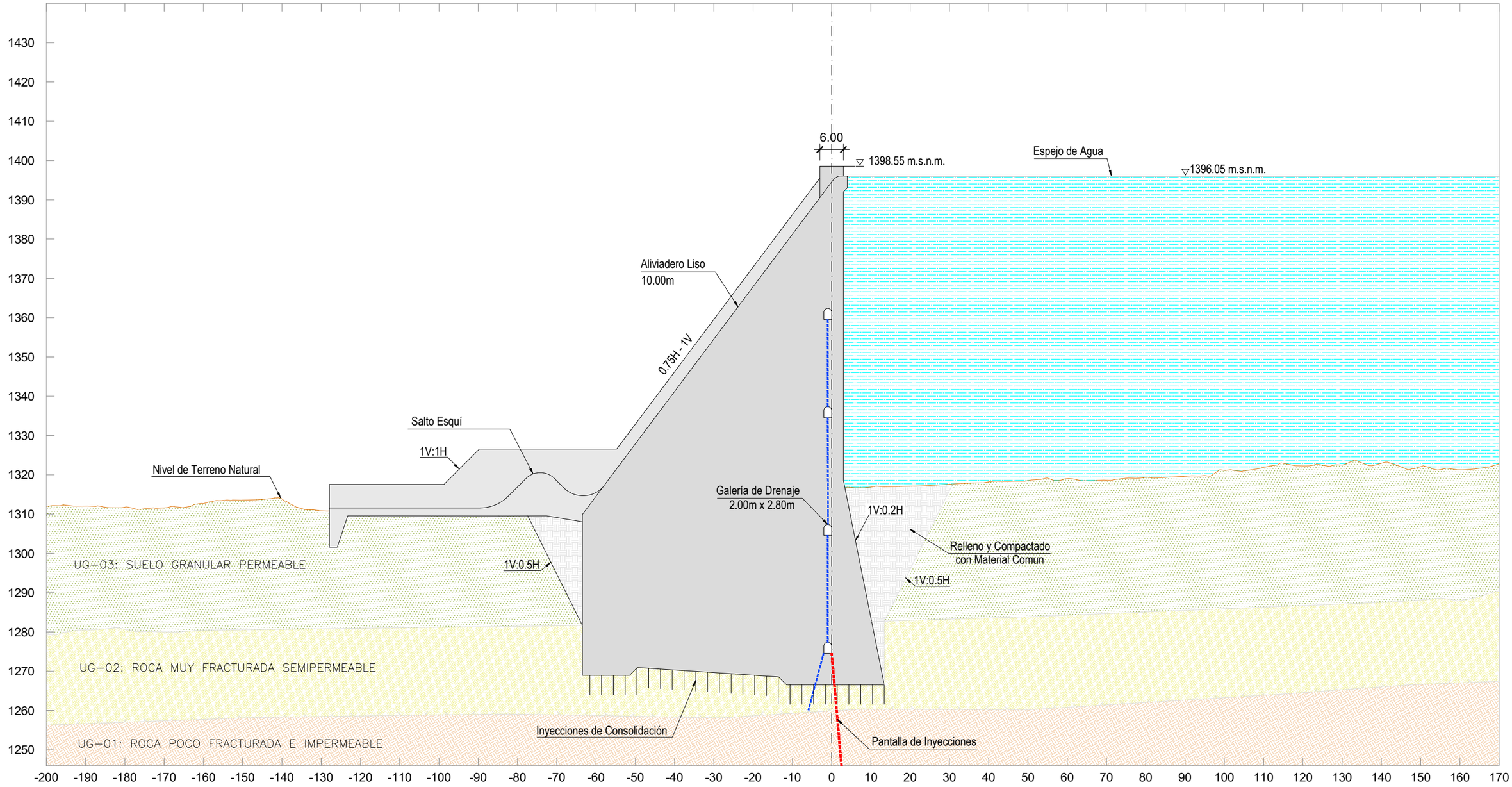
SIMBOLOGÍA - CAPAS PRESA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (RCC)

- Concreto compactado con rodillo
- Concreto convecional vibrado f´c= 175 kg/cm2
- Concreto convensional f´c=280kg/cm2
- Relleno común compactado

NOTA: PLANO ELABORADO EN HOJA A1, EN CASO DE IMPRIMIRSE EN A3 DUPLICAR LA ESCALA.

TITULO: **TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"**	Plano: **PRESA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (RCC)**	Tesista: **Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma** Asesor: **Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana** Fecha: **Agosto 2025** Escala: **Indicada**	Código: **ST-04**

SECCIÓN TÍPICA DE PRESA DE CONCRETO CONVENCIONAL
ESC. 1/500



SIMBOLOGÍA - CAPAS PRESA DE CONCRETO CONVENCIONAL (CC)

- Concreto convecional vibrado f´c= 175 kg/cm2
- Concreto convensional f´c=280kg/cm2
- Relleno común compactado

NOTA: PLANO ELABORADO EN HOJA A1, EN CASO DE IMPRIMIRSE EN A3 DUPLICAR LA ESCALA.

TITULO: **TESIS: "APLICACIÓN DE ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN"**	Plano: **PRESA DE CONCRETO CONVENCIONAL (CC) SECCIÓN TÍPICA**	Tesista: Bach. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma Asesor: Doc. Samuel Ismael Quisca Astocahuana Fecha: Agosto 2025 / Escala: Indicada	Código: **ST-05**

9.3. Artículos presentados a revistas indexadas, conferencias y congresos nacionales e internacionales

9.3.1. Presentación de articulo en el VII Congreso Nacional del Agua – CONA 2025

9.3.2. Constancia de presentación oral en el XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Medellín, Colombia, 2024.

9.3.3. Artículo presentado en la Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Vol. 26 N° 51, 2023.

9.3.4. Constancia de Conferencia EAPIC 2021

9.3.5. Certificado de conferencista y presentación de artículo al I Congreso Nacional de Grandes Presas – COPEGP – 2021

9.3.6. Paper y proceedings del 2nd IAHR Young Professionals Congress – International, Online - 2021

ANÁLISIS MULTICRITERIO MEDIANTE SIG PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO Y TIPO DE PRESA ÓPTIMO EN LA CUENCA DEL RÍO LURÍN

Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma[1], Samuel Ismael Quisca Astocahuana[2]

[1]Bach. de la EPIC Ing. Civil - UNMSM, [2]Docente Principal de la EPIC Ing. Civil - UNMSM
[1]hulinho.arbaiza@unmsm.edu.pe, [2]squiscaa@unmsm.edu.pe

Introducción

La cuenca del río Lurín, ubicada al sur de Lima, constituye una fuente hídrica estratégica para la zona sur metropolitana, pero presenta marcada estacionalidad y carencia de infraestructura de regulación. Frente a la creciente demanda de agua para uso agrícola y urbano, se plantea una metodología de análisis multicriterio asistida por SIG, orientada a identificar el sitio y tipo de presa óptimos.

El enfoque integra los métodos Analytic Hierarchy Process (AHP) y TOPSIS, que permiten ponderar criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos, reduciendo la subjetividad en la toma de decisiones. De acuerdo con Saaty (1980), el AHP posibilita jerarquizar factores de decisión; mientras que TOPSIS permite seleccionar la mejor alternativa en función de su proximidad al ideal positivo. La integración en un entorno SIG proporciona una evaluación espacial coherente y verificable (ANA, 2023).

Metodología

La metodología se desarrolló conforme al diagrama de flujo metodológico propuesto (Figura 1), que estructura el proceso en cuatro etapas principales:

1. Recopilación y análisis de datos base. Se integraron capas temáticas de geología, topografía, geotecnia, hidrología y ambiente, utilizando ArcGIS Pro para la georreferenciación y control de calidad de datos.
2. Evaluación espacial multicriterio (SIG). Se aplicó el método de superposición ponderada (weighted overlay) tras normalizar los criterios en escala 1–5. Las ponderaciones se definieron mediante AHP, validando un índice de consistencia CR < 0.1.
3. Jerarquización de alternativas mediante TOPSIS. Se priorizaron los ejes potenciales (E1–E4) según su distancia al ideal positivo, considerando geología, geotecnia, accesibilidad, capacidad de almacenamiento, impacto y costo.
4. Determinación del tipo de presa. Finalmente, se aplicó AHP para comparar alternativas tipológicas (CFRD, RCC, gravedad de concreto, homogénea) con base en criterios estructurales, sísmicos y constructivos.

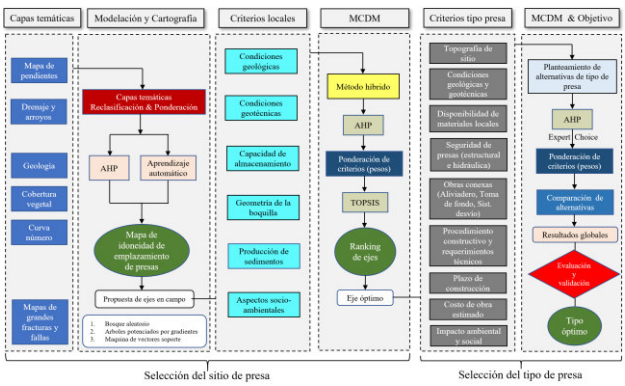


Figura 1.- Flujo metodológico de la investigación; Fuente: Elab. propia.

Resultados y Discusión

1. Reclasificación de factores de análisis

La reclasificación de los factores temáticos (pendiente, geología, cobertura vegetal, curva número, distancia a ríos y distancia a fallas) se realizó asignando valores de 1 a 5, donde 1 representa condiciones desfavorables y 5 condiciones óptimas para el emplazamiento de presas. Esta normalización permitió homogeneizar las distintas unidades de medida de cada variable, facilitando su integración en el modelo multicriterio.

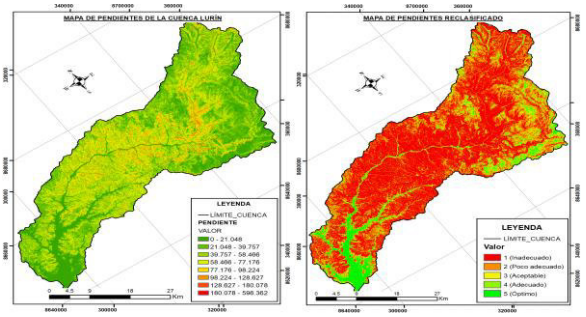


Figura 2.- Reclasificación factor Pendiente; Fuente: Elab. propia.

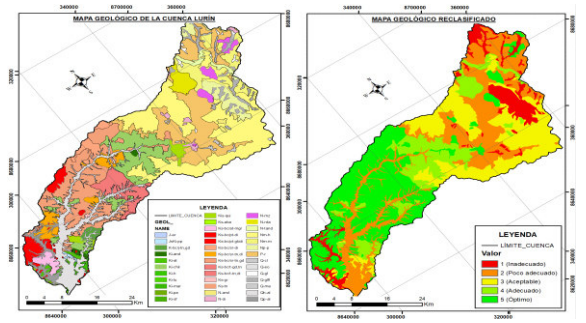


Figura 3.- Reclasificación factor Geología; Fuente: Elab. propia.

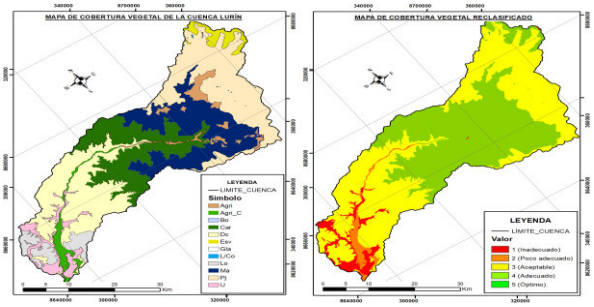


Figura 4.- Reclasificación factor Cobertura veg.; Fuente: Elab. propia.

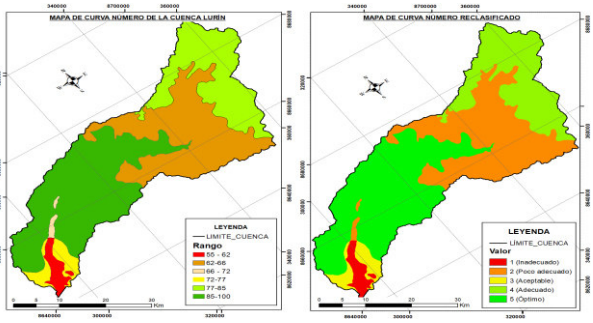


Figura 5.- Reclasificación factor Curva número; Fuente: Elab. propia.

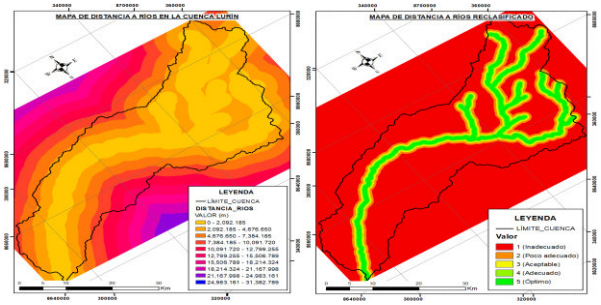


Figura 6.- Reclasificación factor Distancia ríos; Fuente: Elab. propia.

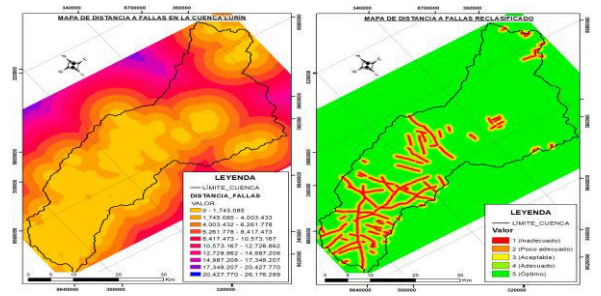


Figura 7.- Reclasificación factor Distancia fallas; Fuente: Elab. propia.

2. Mapa de idoneidad y selección del sitio con TOPSIS

El resultado de la superposición ponderada arrojó un mapa de idoneidad que distingue zonas de alta, media y baja aptitud. Las áreas más aptas se concentraron en el sector medio-alto de la cuenca del río Lurín.

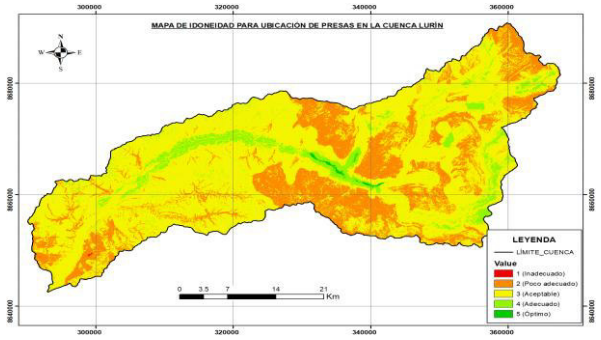


Figura 8.- Mapa de idoneidad de sitio de presas; Fuente: Modelo GIS.

De las zonas con alta aptitud se definieron cuatro ejes potenciales (Eje Presa 1, Eje Presa 2, Eje Presa 3, Eje Presa 4)

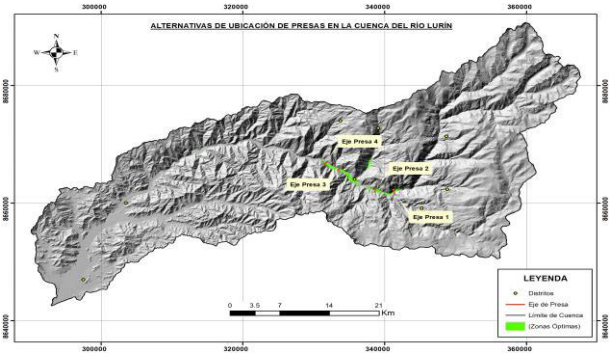


Figura 9.- Alternativas de ubicación de presas; Fuente: Elab. Propia

El método TOPSIS permitió jerarquizarlos mediante su distancia al ideal positivo, obteniéndose los siguientes índices de cercanía (Ci): Eje 4 = 0.79495 (36.2 %), Eje 2 = 0.74731 (34.2 %), Eje 3 = 0.65741 (22.9%), Eje1= 0.51324 (6.8%).

El Eje 4, sobre roca andesítica con GSI > 60, pendiente moderada y buena accesibilidad, resultó el sitio óptimo para el emplazamiento de la presa.

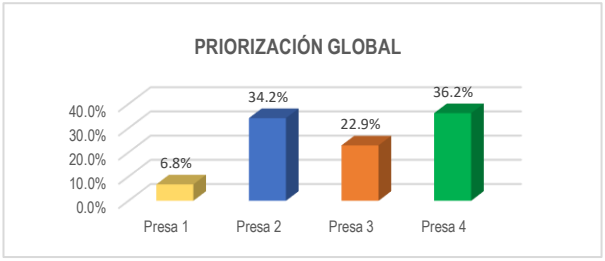


Figura 10.- Priorización global de Eje de presas; Fuente: Elab. propia.

3. Selección del tipo de presa con AHP

Una vez identificado el eje óptimo, se aplicó el método AHP para evaluar las alternativas tipológicas: CFRD, RCC, gravedad de concreto y homogénea.

Se ponderaron criterios de seguridad sísmica, condiciones de fundación, costo, disponibilidad de materiales, facilidad constructiva y mantenimiento. Los mayores pesos correspondieron a seguridad sísmica (0.284) y condiciones de fundación (0.245). El análisis indicó que la presa de materiales sueltos con cara de concreto (CFRD) obtuvo la mayor prioridad global (0.41), por su adaptabilidad geotécnica, desempeño sísmico y economía constructiva, en concordancia con las guías SPANCOLD (2012) e ICOLD (2019).

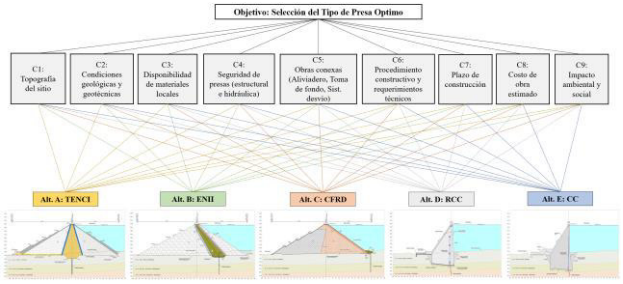


Figura 11.- Árbol de jerarquía método AHP; Fuente: Elab. propia.

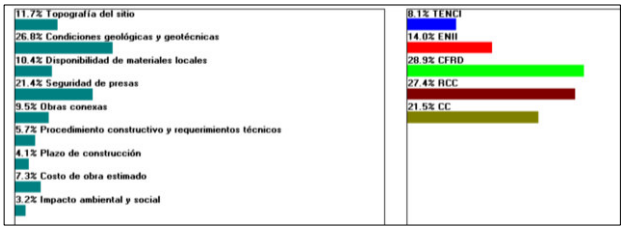


Figura 12.- Determinación del tipo de presa; Fuente: Expert Choice.

Conclusiones

- El modelo SIG–AHP–TOPSIS, basado en el análisis espacial y jerarquización multicriterio, constituye una herramienta eficaz y objetiva para la selección de sitios de presas.
- La integración de factores geológicos, topográficos, ambientales y sísmicos permitió delimitar zonas de alta aptitud representadas en las figuras temáticas.

Referencias Bibliográficas

ANA (2023). *Guía para estudios de preinversión de presas en el Perú*. Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú.

Arbaiza, H. Y. (2025). *Aplicación de análisis multicriterio mediante SIG para la selección del sitio y tipo de presa óptimo en la cuenca del río Lurín*. Tesis UNMSM, Lima, Perú.

ICOLD (2019). *Bulletin 177: Selection of Dam Type*. International Commission on Large Dams, Paris, France.

Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, USA.

XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica

1 al 4 de octubre de 2024

Medellín, Colombia

Certifica que el trabajo titulado:

5-A-S3.SELECCIÓN DE SITIO DE EMPLAZAMIENTO DE UNA PRESA APLICANDO LOS MÉTODOS MULTICRITERIOS AHP Y TOPSIS

de autoría de:

ARBAIZA OCROSPOMA, HULINHO YORDY, QUISCA ASTOCAHUANA, SAMUEL ISMAEL

Fue presentado de forma Oral en el XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica realizado en la Universidad de Medellín, Colombia del 01 al 04 de octubre de 2024.

José Gilberto Dalfré Filho
Presidente de la división Latinoamericana IAHR

Blanca Adriana Botero Hernández
Presidente Comité Organizador
Universidad de Medellín

SELECCIÓN DE SITIO DE EMPLAZAMIENTO DE UNA PRESA APLICANDO LOS MÉTODOS MULTICRITERIOS AHP Y TOPSIS

Arbaiza Ocrospoma, Hulinho Yordy, y Quisca Astocahuana, Samuel Ismael

Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
hulinho.arbaiza@unmsm.edu.pe y squiscaa@unmsm.edu.pe

Introducción

La selección del mejor sitio de emplazamiento para la construcción de una presa es una de las decisiones más complejas y controvertidas en la gestión del abastecimiento de agua. Un emplazamiento bien seleccionado no sólo proporcionará beneficios directos, sino que su cuidadoso diseño también puede aportar la ventaja adicional en la zona alrededor del embalse. Por el contrario, un emplazamiento mal seleccionado podría causar influencias perjudiciales, como impactos biofísicos, socioeconómicos y geopolíticos negativos.

La selección del sitio de emplazamiento de una presa se ve afectado por múltiples factores; tales como: morfométricos, geológicos, geotécnicos, ambientales, sociales, etc. Existen diversos métodos, para la toma de decisiones como modelos racionales e intuitivos de toma de decisiones. Para la presente investigación en particular y dada las variables y múltiples criterios a considerar es necesario realizar un análisis de decisiones multicriterio con una herramienta que permita reducir los daños colaterales que conlleva un proyecto de este tipo. Por tal motivo se plantea el desarrollo de un método híbrido de análisis multicriterio que utiliza la técnica de análisis jerárquico (AHP) y la técnica de ordenación de preferencias por similitud con la solución ideal (TOPSIS) con un enfoque específico en la selección de emplazamientos para presas.

Metodología

El método híbrido utilizado en este estudio se basa en la integración de los métodos de ordenación jerárquica AHP y TOPSIS. En primer lugar, se aplica el método AHP para determinar cuáles son los criterios y subcriterios que deben tenerse en cuenta y el peso que éstos deben tener a la hora de evaluar las posibles alternativas. A continuación, se aplica el método TOPSIS para seleccionar la solución más cercana al ideal entre todas las posibles alternativas existentes, haciendo uso de un índice de similitud que se construye combinando la proximidad al ideal positivo y la distancia al ideal negativo. La toma de decisiones en este método integrado implica varios pasos esenciales.

Método Analítico Jerárquico (AHP)

Toskano (2005) señala que este proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia en relación a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio (p. 23). Este método emplea una escala con valores de 1 a 9 para valorar las preferencias relativas de los dos elementos.

Tabla 1. Escala de comparación de Saaty.

ESCALA DE COMPARACIÓN DE SAATY		
Valor numérico	**Escala verbal**	**Explicación**
1	Igual	Los dos elementos contribuyen igualmente
3	Moderado	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento sobre otro
5	Fuerte	Un elemento está fuertemente favorecido
7	Muy fuerte	Un elemento domina muy fuertemente sobre otro
9	Extremos	Un elemento esta favorecido por al menos un orden de magnitud
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usan para el compromiso entre dos juicios
Inversos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	

Fuente: Arquero A. (2010)

Método TOPSIS

El método TOPSIS evalúa la matriz de decisión obtenida con el método AHP, que se refiere a m alternativas A_i, i =1, 2, ..., m, que se valoran en función de n criterios Cj, j=1, ..., n. Donde x_{ij} denota la valoración de la alternativa i^{th} en términos de j^{th} criterios. Y donde $\vec{w} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]$. es el vector de pesos asociados a C_j. A continuación, las dimensiones de los distintos criterios se convierten en criterios adimensionales. Un elemento $\overline{n_{ij}}$ de la matriz de decisión normalizada $N = [\overline{n_{ij}}]_{mxn}$ se calcula como:

$$\overline{n_{ij}} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(x_{ij})^2}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \qquad [1]$$

El valor normalizado ponderado $\overline{v_{ij}}$ de la matriz de decisión normalizada ponderada $V = [\overline{v_{ij}}]_{mxn}$ se calcula como:

$$\overline{v_{ij}} = w_j \otimes \overline{n_{ij}}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \qquad [2]$$

Donde w_j es tal que $1 \in \sum_{j=1}^{n} w_j$ es el peso del atributo o criterio j^{th}. La solución ideal positiva minimiza los

criterios de costo; a la inversa, la solución ideal negativa maximiza los criterios de costo y minimiza los criterios de beneficio. El conjunto de valores ideales positivos $\bar{A}^+$ se determinan como:

$$\bar{A}^+ = \{\overline{v_1}^+, \dots, \overline{v_n}^+\} = \{(max_i \overline{v_{ij}}, j \in J)(min_i \overline{v_{ij}}, j \in J')\}; i = 1,2, \dots m \quad [3]$$

La determinación de las medidas de distancia entre las alternativas y soluciones ideales positivas viene dada como:

$$\bar{d}_i^{\,+} = \left\{\sum_{j=1}^{n} \left(\overline{v_{ij}} - \overline{v_{ij}}^+\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}; i = 1, \dots, m. \quad [4]$$

Cálculo del rendimiento de cada alternativa se expresa del siguiente modo:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^{\,-}}{\bar{d}_i^{\,+} + \bar{d}_i^{\,-}}; i = 1, \dots, m. \quad [5]$$

Cuanto más se acerque el valor de $\bar{R}_i$ a 1, mayor prioridad tendrá la alternativa i[th]

Procedimientos y Resultados

Se seleccionaron los factores más representativos para proceder al análisis mediante el método AHP; llamaremos criterios de estos factores.

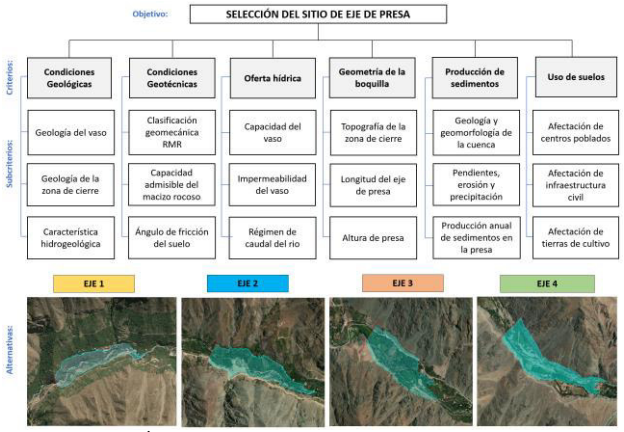


Figura 1. Árbol de jerarquía para la selección del eje de presa

Obtenido el árbol jerárquico, en el siguiente paso se compararon los criterios de dos en dos. Para esta comparación, atribuimos un valor del 1 al 9, según la escala de Saaty basada en el grado de importancia del criterio 1 sobre el criterio 2.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS													
	Condiciones Geológicas	Condiciones Geotécnicas	Oferta hídrica	Geometría de la boquilla	Producción de sedimentos	Uso de suelos	MATRIZ NORMALIZADA						PESO
Condiciones Geológicas	1.00	1.00	2.00	4.00	3.00	4.00	0.30	0.30	0.33	0.28	0.27	0.25	0.289
Condiciones Geotécnicas	1.00	1.00	2.00	4.00	3.00	4.00	0.30	0.30	0.33	0.28	0.27	0.25	0.289
Oferta hídrica	0.50	0.50	1.00	3.00	3.00	3.00	0.15	0.15	0.17	0.21	0.27	0.19	0.189
Geometría de la boquilla	0.25	0.25	0.33	1.00	0.50	2.00	0.08	0.08	0.06	0.07	0.05	0.13	0.074
Producción de sedimentos	0.33	0.33	0.33	2.00	1.00	2.00	0.10	0.10	0.06	0.14	0.09	0.13	0.102
Uso de suelos	0.25	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	0.08	0.08	0.06	0.03	0.05	0.06	0.058
SUMA	3.33	3.33	6.00	14.50	11.00	16.00							1.00

Una vez obtenidos los vectores de pesos (Valoración cuantitativa) de cada alternativa respecto a cada subcriterio, se acoplan en una matriz de vectores de pesos; en seguida se procede el análisis mediante el método TOPSIS.

Tabla 2. Matriz de evaluación de las alternativas.

Ponderación	0.289	0.289	0.189	0.074	0.102	0.057
Matriz 1						
Alternativa / Criterio	Condiciones Geológicas	Condiciones Geotécnicas	Oferta hídrica	Geometría de la boquilla	Producción de sedimentos	Uso de suelos
EJE 1	3	5	10.00	8	0.33	2
EJE 2	6	6	12.00	5	0.42	4
EJE 3	5	3	12.00	6	0.45	4.5
EJE 4	7	7	15.00	3	0.46	0.5

Esta matriz se normaliza y seguidamente se procede a calcular la solución ideal positiva y la solución ideal negativa. Se determina la distancia entre las alternativas y soluciones ideales positivas y negativas y finalmente se procede a calcular el rendimiento; lo cual nos indica que cuanto más se acerque el valor de $\bar{R}_i$ a 1, mayor prioridad tendrá la alternativa

Tabla 3. Orden jerárquico de las alternativas evaluadas.

Alternativas	Rendimiento	Ranking	Piorización
EJE 1	0.35093	3	16.4%
EJE 2	0.66230	2	30.9%
EJE 3	0.31435	4	14.7%
EJE 4	0.81649	1	38.1%
			100.0%

Como resultado de la utilización del sistema híbrido propuesto, se obtuvo que el eje de presa mejor evaluada o su alternativa resultó ser el eje 4, mientras que la peor evaluada fue el eje 3.

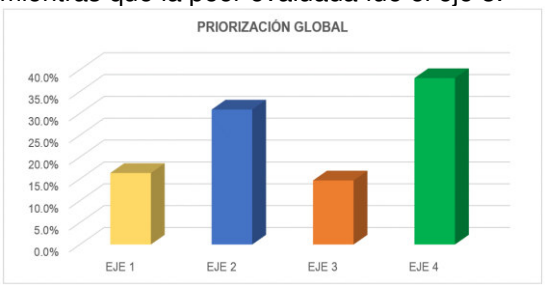


Figura 1. Porcentaje de priorización global

Agradecimiento

Agradezco a la empresa SQ & Ingenieros Consultores Constructores por el apoyo dado a la presente investigación.

Referencias

Toskano Hurtado, G. B. (2005). El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas.

Arquero Hidalgo, A.; Álvarez Alonso, M.; Martínez Izquierdo, E. (2010). Empleo del AHP incorporado en SIG para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios.

Dai, X. (2016). Dam Site Selection Using an Integrated Method of AHP and GIS for Decision Making Support in Bortala, Northwest China. Lund University, Lund.

Rami Al-Ruzouq. Et al (2019). Dam Site Suitability Mapping and Analysis Using an Integrated GIS and Machine Learning Approach.

Jozagui A., Alizadeh B., Hatami M., Flood I., Khorrami M. (2018). A Comparative Study of the AHP and TOPSIS Techniques for Dam Site Selection Using GIS. Sistán y Baluchistán, Irán.

Quisca, S. I. (2023). Estudio de Perfil del Proyecto mejoramiento del servicio de agua para riego – Represa Otoca –Ayacucho, Perú.

Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr. vol 26 n° 51, 2023: e25013 ISSN-L:1561-0888
https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25013

Artículos: Ingeniería Civil

Selección de alternativa óptima de la presa Toma Grande aplicando el método de Análisis Jerárquico

Selection of the optimal alternative for the Toma Grande dam using the Hierarchical Analysis Method

Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma[1,a], Samuel Ismael Quisca Astocahuana[1,b]

Recibido: 26/02//2023 - Aprobado: 02/04/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se aplica el análisis y la selección del tipo óptimo de la presa Toma Grande, mediante el uso del proceso analítico jerárquico (AHP), considerando 4 alternativas de presa (CFRD, RCC, concreto gravedad, tierra y enrocado). Para la aplicación del método se identificaron los factores que influyen en el momento de la selección del tipo de presa, que fueron denominados subcriterios. Estos fueron agrupados en 8 grupos más representativos, mediante un árbol de jerarquías, los cuales fueron denominados criterios (topografía y geología, disponibilidad de materiales, obras conexas, seguridad de presas, sistema de desvío del río, procedimiento constructivo, plazo de construcción y costo de obra). De los estudios básicos de ingeniería se obtuvieron los datos de los criterios, con ellos se construyó una matriz de comparación pareada para obtener las ponderaciones mediante la confrontación de cada uno de los criterios entre sí. Se estableció la relación de consistencia de los criterios de selección, para luego construir la matriz de comparación por pares de la selección del tipo de presa según los criterios. Los resultados del análisis indican que la presa de concreto gravedad es la alternativa óptima de tipo de presa, con una ponderación del 40%.

Palabras claves: Selección de alternativas de presas, análisis jerárquico AHP, tipo óptimo de presa.

ABSTRACT

In this research work, the analysis and selection of the optimal type of the Toma Grande Dam is applied by using the analytical hierarchical process (AHP), considering 4 dam alternatives (CFRD, RCC, Gravity Concrete, Earth and Enrocado). For the application of the method, the factors that influence the selection of the type of dam were identified, which were called Subcriteria. These were grouped into 8 more representative groups, by means of a hierarchy tree, which were called Criteria (topography and geology, availability of materials, related works, dam safety, river diversion system, construction procedure, construction time and cost of work). The data for the Criteria were obtained from the basic engineering studies and a paired comparison matrix was constructed to obtain the weightings by comparing each of the Criteria with each other. The consistency relationship of the selection criteria was established, in order to then construct the pairwise comparison matrix for the selection of the type of dam according to the Criteria. The results of the analysis indicate that the Gravity Concrete dam as the optimal alternative dam type, with a weighting of 40%.

Keywords: Selection of dam alternatives, analytical hierarchical process AHP, optimal dam type.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Lima, Perú.

a Tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Autor para correspondencia: hulinho.arbaiza@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5912-3177

b Docente principal de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. E-mail: squiscaa@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2477-9306

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original. Para mas información, por favor póngase en contacto con iigeo@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Tyndall Center (2004), reporta que el Perú es el tercer país más vulnerable al cambio climático. Una de las medidas de adaptación con el cambio climático es la reducción de las pérdidas de agua de los ríos hacia el mar. Para la implementación de esta medida se deben conformar embalses de almacenamiento de agua mediante la construcción de presas en la costa y sierra del Perú. El planteamiento y desarrollo de alternativas de tipos de presas, así como la selección de la tipología de presa óptima para la construcción, es una de las decisiones más importantes, complejas y controvertidas en la gestión del abastecimiento de agua de los proyectos hidráulicos. Una selección adecuada de la tipología de presa puede mejorar la seguridad física de la presa, la seguridad funcional del embalse, la seguridad operativa de la presa, y la optimización del costo de la obra. Por el contrario, una inadecuada selección en la tipología puede significar una carencia de la seguridad de la presa, incluso su colapso, y causar consecuencias perjudiciales, tanto en daños materiales como en pérdida de vidas humanas. Zapata Cruz et al. (2019), afirma que "en la selección del tipo de presa se relacionan factores morfométricos, geológicos, geotécnicos, ambientales y financieros, entre los cuales se destacan, la topografía del terreno, las características litológicas y condiciones geotécnicas particulares del sitio, la disponibilidad de material de construcción, el costo y las condiciones sísmicas". Estos factores son favorables para ciertas tipologías de presas, y desfavorables para otras, razón por la cual es necesario emplear un método adecuado que permita equilibrar las ventajas y desventajas en cada uno de los factores, a fin de justificar de forma idónea la tipología de presa seleccionada.

Generalmente, la selección de la tipología de presa que se viene construyendo se realiza de manera empírica; que conlleva, en muchas ocasiones, a tener una opinión sesgada y poco sustentada. La gran mayoría de estos factores son evaluados de forma cualitativa, lo que dificulta la comparación y el análisis de las alternativas. Al tratarse la selección del tipo de presa como un problema de decisión multicriterio, los métodos disponibles para abordar este problema son de gran interés. Una de las metodologías más utilizadas en la toma de decisiones multicriterio, que se implementará en el presente estudio, es el método Analítico Jerárquico (AHP). Es un instrumento efectivo para la toma de decisiones complejas; simplifica las decisiones difíciles a una serie de comparaciones pareadas, sintetizando los resultados por medio de pesos estadísticos para cada variable cualitativa o cuantitativa. Por ello, se vincula el método AHP a la selección de la tipología de presa o eje de presa, Jozaghi et al. (2018), AlJubaely et al. (2016) y Dai (2016), y se establece un procedimiento estándar para la elección del tipo de presa óptimo o eje de presa óptimo en función de las variables dependientes.

II. MÉTODOS

2.1 Método Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP es un método multicriterio desarrollado por Thomas Saaty en el año 1980, fue diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. Toskano (2005), señala que "el proceso requiere que quién toma las decisiones, proporcione evaluaciones subjetivas sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios, y que después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión".

2.2 Base matemática del AHP

Saaty (2008), señala que "el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es una teoría de medición a través de comparaciones por pares y se basa en los juicios de expertos para derivar escalas de prioridad". El fundamento matemático se explica en los siguientes términos:

Establecimiento de prioridades con el AHP

"El método AHP, pide a quién toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión, en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de una preferencia global" (Toskano, 2005).

Comparaciones pareadas

La base fundamental del método AHP son las comparaciones por pares; para lo cual se emplea una escala con valores de 1 a 9. para valorar las preferencias relativas de dos elementos.

Tabla 1. Escala de comparación de Saaty

Valor numérico	Escala verbal	Explicación
1	Igual	Los dos elementos contribuyen igualmente.
3	Moderado	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento sobre otro.
5	Fuerte	Un elemento está fuertemente favorecido.
7	Muy fuerte	Un elemento domina muy fuertemente sobre otro.
9	Extremos	Un elemento está favorecido por al menos un orden de magnitud.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usan para el compromiso entre dos juicios.
Inversos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	

Fuente: Arquero (2009)

Matriz de comparaciones pareadas

Es aquella matriz cuadrada que contiene las comparaciones en pares de las alternativas y/o criterios.

Para Toskano (2005), se definen como:

"Sea A una matriz nxn donde n∈ Z+. Sea $a$ij el elemento (i, j) de A, para i = 1, 2, ..., n; y j =1, 2, ..., n. Decimos que A es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si $a$ij es la medida de la preferencia de la alternativa en la fila i cuando se le compara con la alternativa de la columna j. Cuando i = j, el valor de $a$ij será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma".

Además, se cumple que: $a$ij*$a$ji = 1, es decir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Síntesis

Para Toskano (2005), "la sintetización de juicios se realiza para establecer la prioridad de cada uno de los elementos que se comparan en la matriz de comparación por pares. El proceso matemático preciso que se requiere para realizar tal sintetización implica el cálculo de valores y vectores característicos"; el procedimiento se explica a continuación en 3 pasos:

1. Calcular la suma de cada columna de la matriz de comparaciones por pares.

2. Dividir cada uno de los elementos de la matriz entre el valor de la sumatoria de la columna correspondiente: a esta matriz obtenida se le llamará matriz de comparaciones por pares normalizada.

3. Hallar el promedio de los elementos de cada fila de las prioridades relativas de los elementos comparados.

Matriz de prioridades

Las prioridades de cada criterio se consideran en términos de la meta global:

$$\begin{array}{c} \text{Meta global} \\ \begin{matrix} Criterio\ 1 \\ Criterio\ 2 \\ \vdots \\ Criterio\ m \end{matrix} \end{array} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_m \end{bmatrix}$$

siendo, m el número de criterios y P'i la prioridad del criterio i respecto a la meta global, para i = 1, 2, ..., m.

La matriz de prioridades, es aquella matriz que concentra las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas se tiene lo siguiente:

$$\begin{array}{c} \begin{matrix} \quad\quad Criterio\ 1 & Criterio\ 2 & Criterio\ m \end{matrix} \\ \begin{matrix} Alternativa\ 1 \\ Alternativa\ 2 \\ \dots \\ Alternativa\ m \end{matrix} \end{array} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

siendo, Pij la prioridad de la alternativa i respecto al criterio j, para i= 1, 2, ..., n; y j= 1, 2, ..., m.

La prioridad global para cada una de las alternativas de decisión se sintetiza en un vector columna, que resulta de multiplicar la matriz de prioridades por el vector de prioridades de los criterios.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \dots \\ P_{gn} \end{bmatrix} \quad \dots.(1)$$

siendo, Pgi la prioridad global de la alternativa i (i = 1, 2, ..., n).

Consistencia

"Una consideración importante en términos de la calidad de decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas" (Toskano, 2005). El AHP nos proporciona un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas proporcionadas por el tomador de decisión.

Matemáticamente, se sabe que una matriz de comparaciones A nxn es consistente si se cumple lo siguiente: aij*ajk = aik, para i, j, k = 1,2, ..., n.

Esta propiedad exige que todas las columnas (y filas) de la matriz sean linealmente dependientes. Particularmente en una matriz de comparación 2x2 las columnas son dependientes; en consecuencia, una matriz 2x2 siempre será consistente.

El Proceso de Análisis Jerárquico determina la razón de consistencia (RC) como el valor de la división del índice de consistencia de A entre el índice de consistencia aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad \dots\dots(2)$$

siendo, IC es el índice de consistencia de A y se calcula de la siguiente manera:

$$IC = \frac{nmax - n}{n - 1} \quad \dots\dots(3)$$

Se puede demostrar que el IA varía en función del número de elementos a comparar; algunos autores recomiendan usar la siguiente fórmula para calcular el valor del IA:

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad \dots\dots(4)$$

La razón de consistencia, está diseñada de manera que un valor de la razón de consistencia menor o igual al 10%, es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas; mientras que para valores mayores al 10% son señales de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el decisor desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones.

En este estudio, se ha seguido la metodología del Proceso de Análisis Jerárquico que sigue una trayectoria desde el objetivo principal hasta el nivel de los criterios (y subcriterios) que participan en el análisis. En la Figura 1 se muestra en un esquema general, el árbol de jerarquías empleado, donde se visualiza la asociación de los objetivos del análisis en comparación, a saber: criterio con criterio, subcriterio con subcriterio y alternativa con alternativa. Los elementos que pertenecen a un determinado grupo deben compararse entre sí de acuerdo con los axiomas: homogeneidad, reciprocidad, dependencia y expectativas.

Se plantean siete fases sucesivas para el proceso de trabajo a seguir (Figura 2):

2.3 Área de estudio

Políticamente el área de estudio está ubicada en la región Arequipa, provincia de Arequipa, distrito de Mollebaya. Hidrográficamente forma parte de la cuenca del río

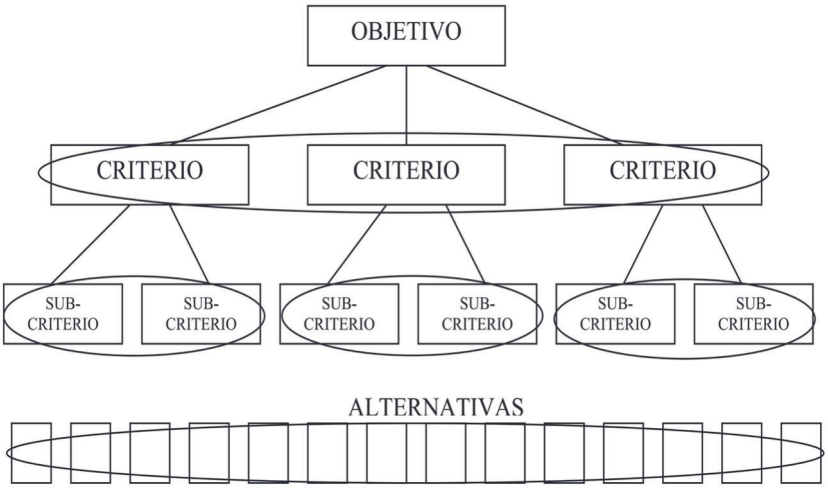


Figura 1. Estructura de la jerarquía AHP
Fuente: Arquero (2009)

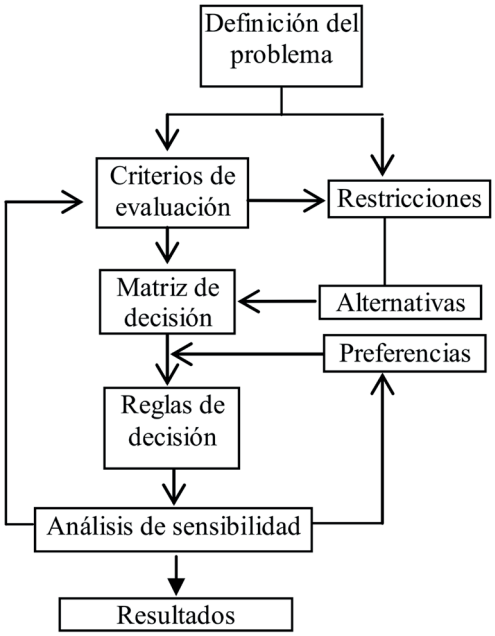


Figura 2. Esquema de la metodología de trabajo
Fuente: Arquero (2009)

Quilca-Chili, subcuenca río Tingo Grande y microcuenca Mollebaya - Pocsi.

Geográficamente la zona del proyecto está localizada en la vertiente occidental de los andes del Perú, entre las coordenadas:

- Latitud sur 235,018 - 238,120
- Longitud oeste 8,174,516 - 8,176,209
- La altitud varía de 2600 msnm hasta 2642 msnm

Ver Figura 3.

El volumen total de almacenamiento del vaso de la presa Toma Grande es de 2.5x10^6 m^3; de las cuales 2.2 x10^6 m^3 son de volumen útil y 0.3 x10^6 m^3 de volumen muerto (almacenamiento de sedimentos). El área máxima del espejo de agua del embalse es de 0.15 km^2.

El eje de la presa está ubicado sobre un valle estrecho en forma de V, formado por el cauce del río Mollebaya. Las condiciones geológicas del eje nos indican que estará emplazada sobre una formación rocosa de gran potencia. (Figura 4).

2.4 Planteamiento de alternativas

Alternativa 1: Presa de tierra y enrocado con núcleo central impermeable (TE)

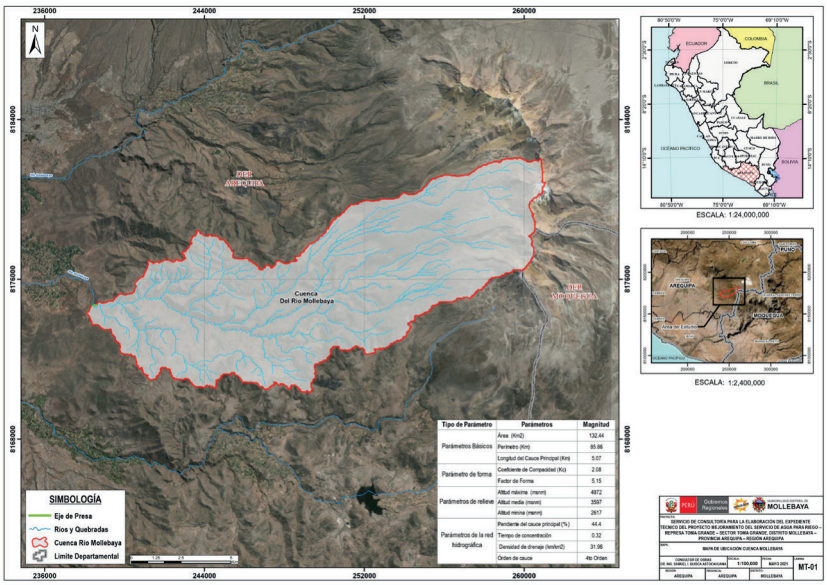


Figura 3. Plano de ubicación de la presa Toma Grande
Fuente: Quisca (2021)

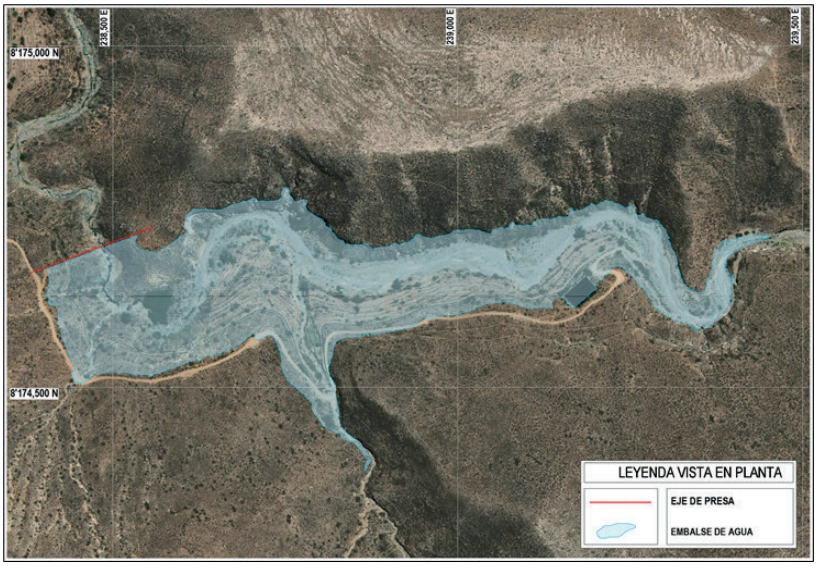


Figura 4. Vista en planta del embalse y eje de la presa Toma Grande
Fuente: Quisca (2021)

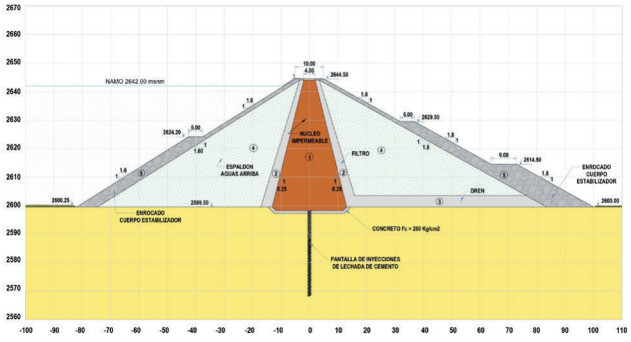


Figura 5. Sección típica de la presa TE
Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 45.00 m
- Longitud total en la cresta: 148.50 m
- Ancho de la corona: 10.00 m
- Corona del núcleo: 4.00 m
- Talud sobre aguas arriba: 1. 6H:1V + 1 berma de 5 m
- Talud sobre aguas abajo: 1. 8H:1V + 2 bermas de 5 y 9 m
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad

Alternativa 2: Presa de enrocado con pantalla de concreto en aguas arriba (CFRD)

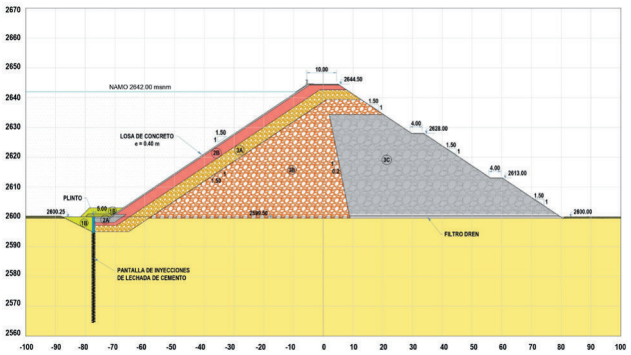


Figura 6. Sección típica de la presa CFRD
Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 45.00 m
- Longitud total en la cresta: 148.5 m
- Ancho de la corona: 10.00 m
- Talud sobre aguas arriba: 1.5 H:1 V
- Talud sobre aguas abajo: 1.5H:1V + 2 bermas de 4 m
- Espesor de losa de concreto: 0.40 m
- Espesor de filtro dren: 1.50 m
- Plinto horizontal de 5 m de longitud
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad

Alternativa 3: Presa de gravedad con concreto masivo (GCM)

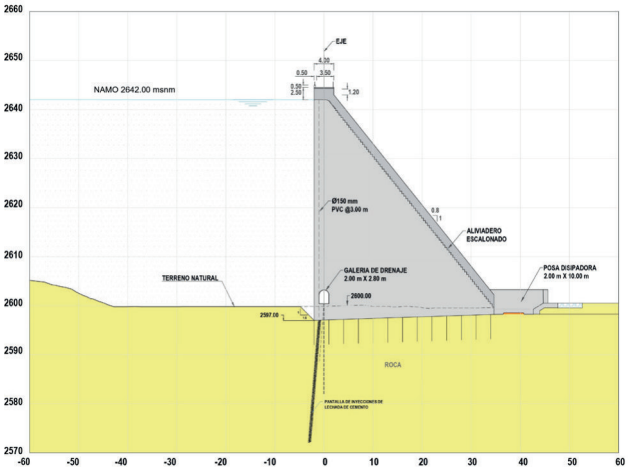


Figura 7. Sección típica de la presa GCM
Fuente: Elaboración propia

- Niveles característicos y dimensiones de la presa:
- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 47.50 m
- Longitud total en la cresta: 145.0 m
- Ancho de la corona: 4.00 m
- Talud sobre aguas arriba: vertical
- Talud sobre aguas abajo: 0.80 H:1 V
- Inyecciones de impermeabilización: 15 m de profundidad
- Aliviadero y toma de fondo en cuerpo de presa

Alternativa 4: Presa de Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

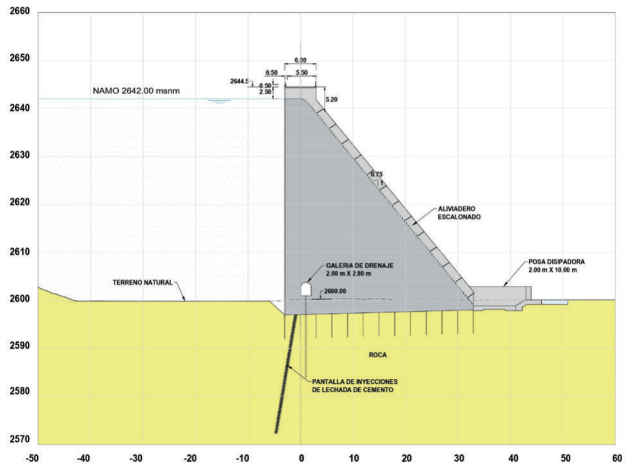


Figura 8. Sección típica de la presa CCR

Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 47.50 m
- Longitud total en la cresta: 145.00 m
- Ancho de la corona: 6.00 m
- Talud sobre aguas arriba: vertical
- Talud sobre aguas abajo: 0.75 H:1 V
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad
- Aliviadero y Toma de Fondo en cuerpo de presa

2.5 Definición de los criterios de evaluación

Se han establecido los criterios para definir el tipo óptimo de presa en función de los estudios básicos realizados en campo y de las alternativas planteadas. Tras una cuidadosa inspección, se consideraron los siguientes criterios, que a su vez se descomponen en una serie de subcriterios:

Topografía y condiciones geológicas (C1)

- Topografía de la cerrada
- Condiciones geotécnicas
- Geología estructural

Disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa (C2)

- Disposición de canteras de agregados y materiales impermeables
- Distancia de ubicación de canteras

Obras conexas (C3)

- Aliviadero de excedencias
- Toma de fondo

Seguridad de la presa (C4)

- Sismicidad
- Rebose de flujo de agua sobre la cresta y cuerpo de la presa
- Inundación de centros poblados
- Afectación de grandes áreas de cultivo
- Peligro de sedimentación del embalse

Sistema de desvió (C5)

- Conducto de desvío de río a través del cuerpo de la presa
- Desvió de río a través de túnel de construcción

Procedimiento constructivo (C6)

- Avance de obra en función del calor de hidratación del concreto
- Tipos de presas similares proyectadas y construidas en el país y el exterior

Plazo de construcción (C7)

- Disposición de materiales
- Clima y tiempo disponible para la construcción
- Tecnología constructiva accesible
- Impacto ambiental

Costo de obra (C8)

- Altura de presa
- Disposición de materiales
- Tecnología constructiva
- Mano de obra calificada y no calificada disponible

2.6 Construcción del modelo de jerarquía

Una vez establecidas las alternativas, definidos y valorados todos los subcriterios correspondientes por los especialistas, realizamos un modelo del proceso, mediante un árbol de jerarquías.

Este árbol de jerarquías consta de 3 niveles, cuyos nudos son los criterios (primer nivel) y subcriterios (segundo nivel) establecidos, tal como se muestra en la Figura 9.

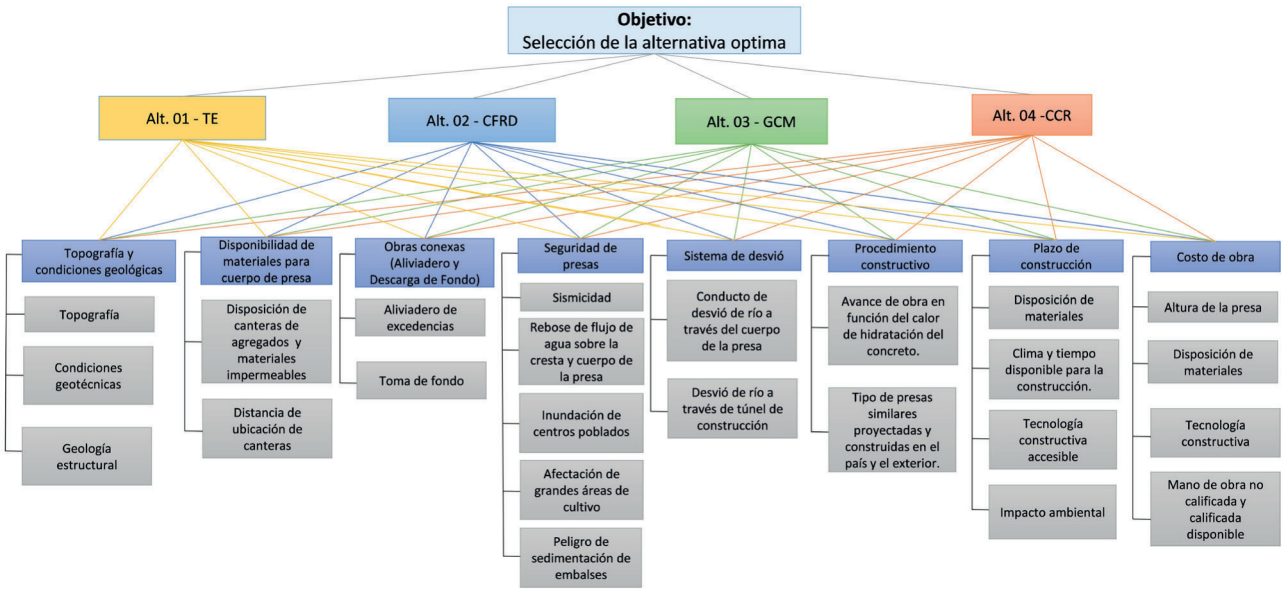


Figura 9. Construcción del Árbol de jerarquías del método AHP para la selección del tipo de presa
Fuente: Elaboración propia

III. RESULTADOS

3.1 Ingreso de juicios y preferencias

Esta fase del método plantea un problema importante; ya que el resultado del análisis puede variar dependiendo de la ponderación o definición de los pesos respectivos.

Construcción de la matriz de comparaciones pareadas

Una vez construido el árbol de jerarquías, en la etapa siguiente comenzamos realizando la comparación en pares de los criterios, se atribuyen valores del 1 al 9, según la escala de Saaty, de acuerdo al grado de importancia del criterio 1 sobre el criterio 2. Si se diera el caso de que el segundo criterio tiene mayor importancia que el primer criterio, será 1/valor de importancia.

Respecto a lo mencionado, nos queda una comparación del nivel superior como se muestra en la Tabla 2:

A continuación, procedemos a dividir cada elemento de tal matriz entre la sumatoria de su columna, a esta matriz resultante se le denominará matriz de comparaciones pareadas normalizadas; ver Tabla 3. Luego se calcula el promedio (ponderación) de los elementos de cada fila de las prioridades relativas de los elementos que se están comparando.

A manera de verificar si los juicios insertados en la matriz son coherentes se procede a calcular el valor de la razón de consistencia, obteniendo un valor 0.08; el cual es una señal de un nivel razonable de consistencia; por lo tanto, se continua con el análisis.

Una vez obtenido los coeficientes de ponderación, se realiza la comparación en pares de cada alternativa, dándole la importancia según los criterios y subcriterios analizados en los cuadros anteriores.

A continuación, se presentan los cuadros de comparaciones pareadas por alternativas y asignación de valores, según la escala de Saaty para la construcción de las matrices; ver Tabla 4.

3.2 Síntesis de resultados

Una vez calculados los pesos de los criterios (vector promedio) en función de cada alternativa, procedemos a construir la matriz de prioridades, la cual está constituida por las alternativas. De esta última matriz, obtenemos los pesos globales de las alternativas en función a los criterios.

Finalmente, multiplicamos esta matriz por los pesos relativos de los criterios que se estén analizando, y se obtienen los porcentajes de priorización de cada alternativa; ver Tabla 5.

Por lo tanto, del cuadro anterior se tiene lo siguiente:

La alternativa 3 (presa de gravedad con concreto masivo), con una ponderación del 40%, es la más conveniente para la ejecución de la presa Toma Grande.

Tabla 2. Matriz de comparación de criterios

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS								
	Topografía y condiciones geológicas	**Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa**	**Obras conexas (Aliviadero y Toma F)**	**Seguridad de presas**	**Sistema de desvio de rio**	**Procedimiento constructivo**	**Plazo de construcción**	**Costo de obra**
Topografía y condiciones geológicas	1.00	6.00	3.00	1.00	4.00	4.00	7.00	4.00
Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	0.17	1.00	0.33	0.14	3.00	0.50	3.00	0.33
Obras conexas (Aliviadero y Toma de Fondo)	0.33	3.00	1.00	0.20	3.00	4.00	5.00	1.00
Seguridad de presas	1.00	7.00	5.00	1.00	7.00	5.00	9.00	5.00
Sistema de desvio de rio	0.25	0.33	0.33	0.14	1.00	0.50	1.00	0.50
Procedimiento constructivo	0.25	2.00	0.25	0.20	2.00	1.00	5.00	0.33
Plazo de construcción	0.14	0.33	0.20	0.11	1.00	0.20	1.00	0.25
Costo de obra	0.25	3.00	1.00	0.20	2.00	3.00	4.00	1.00
SUMA	3.39	22.67	11.12	3.00	23.00	18.20	35.00	12.42

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas normalizadas

	MATRIZ NORMALIZADA								PONDERACIÓN	AXP	Relación de consistencia	
Topografía y condiciones geológicas	0.29	0.26	0.27	0.33	0.17	0.22	0.20	0.32	0.26	2.31	CI=(nmax-n)/(n-1)	0.12
Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	0.05	0.04	0.03	0.05	0.13	0.03	0.09	0.03	0.06	0.45	RI=1.98*(n-2)/n	1.49
Obras conexas (Aliviadero y Toma de Fondo)	0.10	0.13	0.09	0.07	0.13	0.22	0.14	0.08	0.12	1.07	CR=CI/RI	**0.08**
Seguridad de presas	0.29	0.31	0.45	0.33	0.30	0.27	0.26	0.40	0.33	2.94	Ponderacion Razonable!	
Sistema de desvio de rio	0.07	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.32		
Procedimiento constructivo	0.07	0.09	0.02	0.07	0.09	0.05	0.14	0.03	0.07	0.59		
Plazo de construcción	0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.22		
Costo de obra	0.07	0.13	0.09	0.07	0.09	0.16	0.11	0.08	0.10	0.91		
SUMA									1.00	8.81		

Tabla 4. Comparaciones pareadas por alternativas

CRITERIO 1: Topografía y Condiciones Geológicas									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.25	0.20	0.20	0.07	0.02	0.08	0.08	0.06
PRESA CFRD	4.00	1.00	0.20	0.20	0.27	0.09	0.08	0.08	0.13
PRESA GCM	5.00	5.00	1.00	1.00	0.33	0.44	0.42	0.42	0.40
PRESA CCR	5.00	5.00	1.00	1.00	0.33	0.44	0.42	0.42	0.40
SUMA	15.0	11.3	2.4	2.4					1.00

CRITERIO 2: Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	1.00	3.00	3.00	0.38	0.38	0.41	0.30	0.36
PRESA CFRD	1.00	1.00	3.00	3.00	0.38	0.38	0.41	0.30	0.36
PRESA GCM	0.33	0.33	1.00	3.00	0.13	0.13	0.14	0.30	0.17
PRESA CCR	0.33	0.33	0.33	1.00	0.13	0.13	0.05	0.10	0.10
SUMA	2.7	2.7	7.3	10.0					1.00

CRITERIO 3: Obras conexas de la presa (Aliviadero y Descarga de Fondo)									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	1.00	0.14	0.14	0.06	0.06	0.08	0.04	0.06
PRESA CFRD	1.00	1.00	0.14	0.14	0.06	0.06	0.08	0.04	0.06
PRESA GCM	7.00	7.00	1.00	2.00	0.44	0.44	0.56	0.61	0.51
PRESA CCR	7.00	7.00	0.50	1.00	0.44	0.44	0.28	0.30	0.36
SUMA	16.0	16.0	1.8	3.3					1.00

CRITERIO 4: Seguridad de la presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.20	0.11	0.11	0.04	0.02	0.06	0.03	0.04
PRESA CFRD	5.00	1.00	0.20	0.20	0.21	0.09	0.11	0.06	0.12
PRESA GCM	9.00	5.00	1.00	2.00	0.38	0.45	0.55	0.60	0.49
PRESA CCR	9.00	5.00	0.50	1.00	0.38	0.45	0.28	0.30	0.35
SUMA	24.0	11.2	1.8	3.3					1.00

CRITERIO 5: Sistema de desvío del río durante la construcción									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.50	0.14	0.14	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06
PRESA CFRD	2.00	1.00	0.20	0.20	0.12	0.09	0.09	0.09	0.09
PRESA GCM	7.00	5.00	1.00	1.00	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43
PRESA CCR	7.00	5.00	1.00	1.00	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43
SUMA	17.0	11.5	2.3	2.3					1.00

CRITERIO 6: Procedimiento constructivo									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	3.00	6.00	6.00	0.60	0.68	0.49	0.38	0.54
PRESA CFRD	0.33	1.00	5.00	5.00	0.20	0.23	0.41	0.31	0.29
PRESA GCM	0.17	0.20	1.00	4.00	0.10	0.05	0.08	0.25	0.12
PRESA CCR	0.17	0.20	0.25	1.00	0.10	0.05	0.02	0.06	0.06
SUMA	1.7	4.4	12.3	16.0					1.00

CRITERIO 7: Plazo de tiempo disponible para la construcción de la presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.20	0.14	0.14	0.05	0.02	0.03	0.09	0.05
PRESA CFRD	5.00	1.00	0.20	0.14	0.25	0.08	0.05	0.09	0.12
PRESA GCM	7.00	5.00	1.00	0.33	0.35	0.38	0.23	0.21	0.29
PRESA CCR	7.00	7.00	3.00	1.00	0.35	0.53	0.69	0.62	0.55
SUMA	20.0	13.2	4.3	1.6					1.00

CRITERIO 8: Costo de obra									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.33	0.20	0.20	0.07	0.03	0.06	0.11	0.07
PRESA CFRD	3.00	1.00	0.20	0.20	0.21	0.09	0.06	0.11	0.12
PRESA GCM	5.00	5.00	1.00	0.50	0.36	0.44	0.29	0.26	0.34
PRESA CCR	5.00	5.00	2.00	1.00	0.36	0.44	0.59	0.53	0.48
SUMA	14.0	11.3	3.4	1.9					1.00

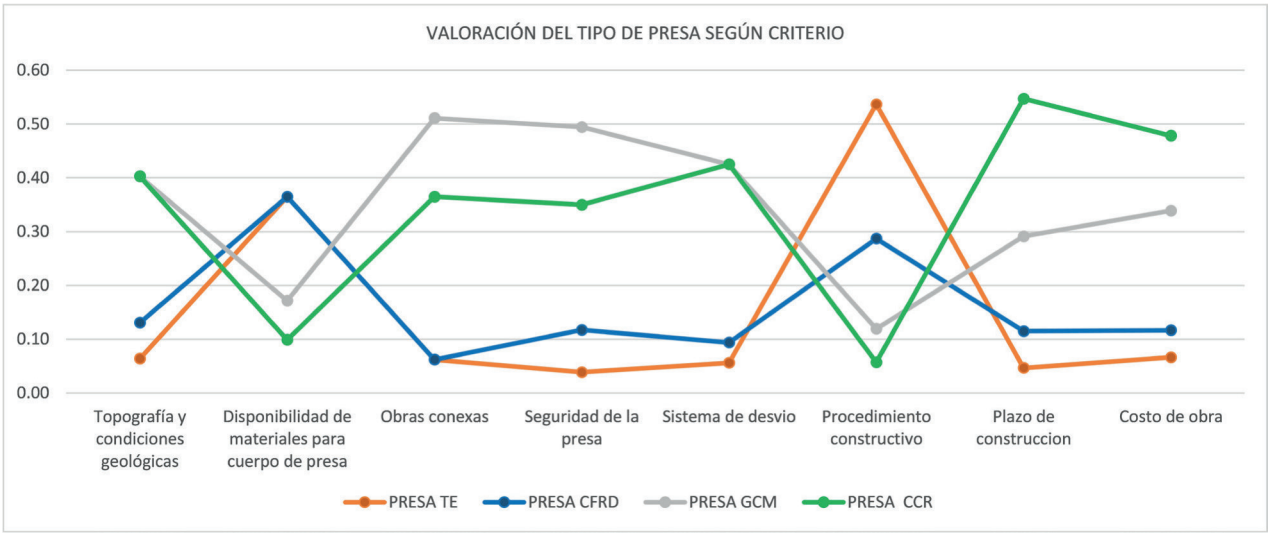


Figura 10. Valoración del eje óptimo de presa según criterio
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Matriz de prioridades

CRITERIO/ ALTERNATIVA	Topografía y condiciones geológicas	Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	Obras conexas	Seguridad de la presa	Sistema de desvio	Procedimiento constructivo	Plazo de construccion	Costo de obra	PRIORIZACIÓN
PRESA TE	0.06	0.36	0.06	0.04	0.06	0.54	0.05	0.07	10%
PRESA CFRD	0.13	0.36	0.06	0.12	0.09	0.29	0.12	0.12	14%
PRESA GCM	0.40	0.17	0.51	0.49	0.43	0.12	0.29	0.34	40%
PRESA CCR	0.40	0.10	0.36	0.35	0.43	0.06	0.55	0.48	35%
PONDERACION	0.26	0.06	0.12	0.33	0.04	0.07	0.03	0.10	100%

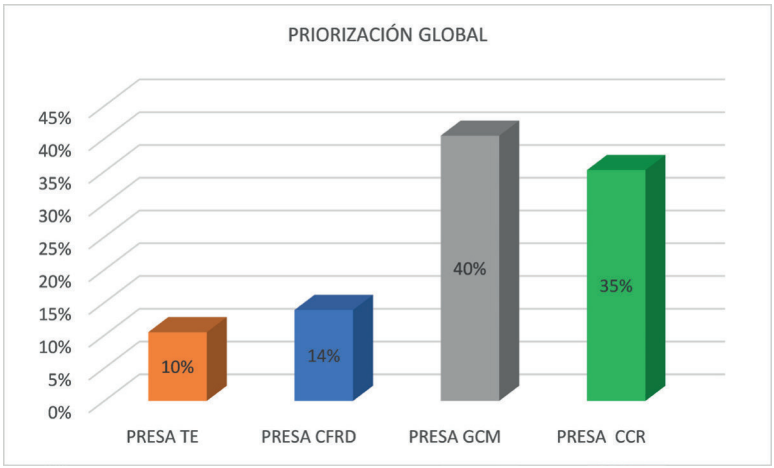


Figura 11. Porcentaje de priorización global
Fuente: Elaboración propia

IV. DISCUSIÓN

De los 8 criterios elegidos (Topografía y condiciones geológicas; Disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa; Obras conexas; Seguridad de presa; Sistema de desvío; Procedimiento constructivo; Plazo de construcción; y Costo de obra), el criterio más limitante y de gran importancia al momento de seleccionar la presa idónea es la Seguridad de la presa, con una ponderación del 33%; lo cual tiene sentido. Estas infraestructuras almacenan una gran cantidad de m3 de agua en el embalse, de modo que, si no se controlan con regularidad y atiende las normas establecidas, podría desencadenar en el fallo estructural de la obra y provocar un desastre con daños irreversibles. El segundo criterio más determinante es la Topografía y condiciones geológicas, con una ponderación del 26%; este factor es considerado de vital importancia para determinar la tipología de presa más adecuada, ya que las condiciones de la fundación dependen de la geología y del espesor de los estratos que van a soportar el peso de la presa, de su inclinación, de su permeabilidad y relación con los estratos subyacentes, de las fallas existentes y de las fisuras. Los otros factores con un peso importante son: Obras conexas y Costo de obras, con una ponderación de 12% y 10%, respectivamente, que están relacionados directamente con el costo de inversión; que siempre será un factor limitante por la gran magnitud de inversión económica que demandan estas infraestructuras.

Martínez Ruiz (2019), en su investigación titulada: *El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto*, obtiene como resultado una valoración mayor para la variable Seguridad (37%); seguida de las variables Funcionalidad y Costo (21%), lo cual refuerza los resultados obtenidos en esta investigación.

De las cuatro alternativas propuestas, según los criterios considerados para el análisis, la presa GCM tiene la mayor prioridad (40%), seguida de la presa RCC (35%); lo cual es lógico, ya que este tipo de presas presenta mejores prestaciones en cuanto a la necesidad de poder hacer frente a condiciones extremas de crecida o sismo; permite la construcción del aliviadero escalonado (disipación eficiente de la energía) en el cuerpo de la presa y el conducto de desvío puede acondicionarse a través del cuerpo de la presa, lo que reduce considerablemente el costo de obra de la misma. Las otras dos alternativas requieren costosos sistemas de desvío de agua durante la construcción de la presa, y las obras relacionadas, como el aliviadero y la descarga de fondo, que deben ubicarse fuera del cuerpo de la presa y requieren costosas estructuras.

V. CONCLUSIONES

La aplicación del Método AHP en el presente estudio, ha permitido obtener, de manera clara y precisa, el tipo de alternativa óptima para la presa Toma Grande. Para el caso estudiado, se emplearon 8 variables principales (denominados criterios) y 4 alternativas. La herramienta multicriterio desarrollada ha permitido transformar esta selección en un proceso sencillo y estandarizado, con resultados muy puntuales.

El método de Análisis Jerárquico (AHP) es multicriterio bastante práctico, posee fundamentos matemáticos, es una herramienta útil para problemas de toma de decisiones en proyectos complejos, que dependen de muchas variables o factores. Se requiere de evaluadores con vastos conocimientos y experiencia en el tema, que puedan definir las características de las alternativas, los criterios y subcriterios, para realizar la evaluación y evitar la subjetividad de los criterios de evaluación. El modelo creado para el presente estudio tiene una gran capacidad de reutilización y permite agregar nuevas alternativas, criterios y subcriterios.

En el caso de proyectos importantes que requieran de una gran inversión, como la construcción de una presa, es vital tomar en cuenta la participación de todos los factores influyentes al momento de seleccionar la tipología de presa adecuada para su diseño. Por ello, se hace imprescindible el empleo del método multicriterio, por la complejidad e importancia de nuestro problema.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la FIGMMG de la Universidad Nacional Mayor De San Marcos; a mi asesor de tesis el Dr. Samuel Quisca Astocahuana por las sugerencias y aportes para el avance de la tesis de investigación; y a la empresa SQ&ICC, por las oportunidades e incentivos para el desarrollo de la presente investigación, así como por el apoyo con el software y hardware de alto desempeño computacional.

VII. REFERENCIAS

AlJubaely. R., Soliman, A., Hamed, K., y El Zawahr, A. (2016). *Dam Site Selection Using GIS-Based AHP-OWA Approach Case Study: El Kebir Shemaly River*, Syria. [Revista del sector de ingeniería de la Universidad de Al Azhar Vol. 11, N° 39, abril de 2016, 447-457]. https://jaes.journals.ekb.eg/article_19446.html

Arquero, A., Álvarez, M., y Martínez, E. (2009). *Decision Management Making by AHP (Analytical Hierarchy Process) trought GIS data.* IEEE Latin America Transactions, Vol. 7, N° 1, March 2009, 101-106

https://www.researchgate.net/publication/224567351_Decision_Management_Making_by_AHP_Analytical_Hierarchy_Process_trought_GIS_data

Jozaghi, A., Alizadeh, B., Hatami, M., Flood, I., Khorrami, M., Khodaei, N., y Tousi, E. (2018). *A Comparative Study of the AHP and TOPSIS Techniques for Dam Site Selection Using GIS: A Case Study of Sistan and Baluchestan Province, Iran*. [Artículo Geociencias 2018, 8 (12), 494]. https://doi.org/10.3390/geosciences8120494

Dai, X. (2016) *Dam Site Selection Using an Integrated Method of AHP and GIS for Decision Making Support in Bortala, Northwest China.* Lund University, Lund. https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2016/msc/gem/dai.pdf

Martínez Ruiz, F. J. (2019). *El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto*: *criterios y métodos de apoyo a la*

toma de decisiones. Universidad Politécnica de Cartagena. http://hdl.handle.net/10317/8145

Quisca, S.I. (2021). *Expediente técnico del proyecto mejoramiento del servicio de agua para riego – Represa Toma Grande – Sector Toma Grande, Mollebaya, Arequipa*, Arequipa, Perú.

Saaty, TL (2008). *Toma de decisiones con el proceso de jerarquía analítica*. Revista Internacional de Ciencias de Servicios, 1, 83. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Toskano Hurtado, G. B. (2005). *El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/toskano_hg.htm

Tyndall Centre for Climate Change Research (2004). Adger, W. N., Brooks, N., Bentham, G., Agnew, M., Eriksen, S. *New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity*. Tyndall Project IT1.11. Technical Report 7. Reino Unido: Tyndal Centre.

Zapata Cruz J. D. Et al. (2019). *Propuesta metodológica para la selección óptima del tipo de presa mediante el uso de técnicas multicriterio*. [Artículo, Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica]. https://www.researchgate.net/publication/339149517

Contribución de autoría

Conceptualización: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Curación de datos: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Análisis formal: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Adquisición de fondos: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Investigación: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Metodología: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Administración del proyecto: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Recursos: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Software: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Supervisión: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Validación: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Visualización: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Redacción - borrador original: Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma; Redacción - revisión y edición: Samuel Ismael Quisca Astocahuana.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Selection of the Optimal Alternative for Toma Grande Dam Applying the Hierarchical Analysis Method AHP

Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma[1]*, Samuel Ismael Quisca Astocahuana[2]

1Bach. Civil Engineer, EPIC-FIGMMG, National University of San Marcos, Perú.

2 Principal Professor, School of Civil Engineering, National University of San Marcos, Perú.

*Correspondence YP: hulinho.arbaiza@gmail.com

Abstract In this research work, the analysis and selection of the optimal dam type of Toma Grande dam was performed by applying the analytical hierarchical process (AHP) to analyze the four dam alternatives (CFRD dam, CCR dam, concrete gravity dam, earth dam and riprap), and to select the optimal dam type alternative. For the application of the method, all factors influencing the selection of the optimal dam type were identified and named Subcriteria (previously called factors). These Subcriteria were grouped into eight more representative groups, by means of a hierarchical tree, which were called Criteria (Topography and structural geology, Availability of materials for the dam body, Related works, Dam safety, Diversion system, Construction procedure, Construction time and Construction cost).

Keywords: Multi-criteria decision making; Decision making criteria; AHP; Optimal dam type selection.

Methods

Analytic Hierarchy Method (AHP)

The Analytic Hierarchy Process, developed by Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1980) is designed to solve complex multi-criteria problems. The process requires the decision maker to provide subjective assessments of the relative importance of each of the criteria and then to specify his preference with respect to each of the decision alternatives and for each criterion.

The result of the AHP is a hierarchy with priorities showing the overall preference for each of the decision alternatives.

Some of the advantages of this method over other multi-criteria decision methods are:

- They present a mathematical support.
- They allow to decompose a problem and analyze it by parts.
- They allow measuring quantitative and qualitative criteria by means of a common scale.
- They include the participation of different people or interest groups and generate a consensus.
- Allow to verify the consistency index and make corrections, if necessary.
- Generate a synthesis and provide the possibility of sensitivity analysis.

the most representative factors were selected to proceed with the analysis using the AHP method; we will call these factors criteria.

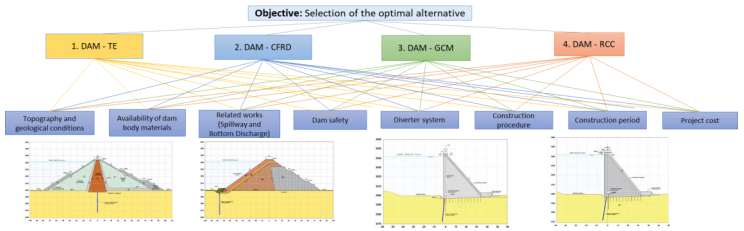


Fig. 1: Hierarchy tree of the AHP Method (Source: Own elaboration).

TE is defined as Soil and Rock Fill; CFRD, Concrete Faced Rock Fill Dam; GCM, Mass Concrete Gravity; and RCC, Roller Compacted Concrete.

Results

Once the hierarchical tree is obtained, in the next step, we compare the criteria two by two. For this comparison, we attribute a value from 1 to 9, according to Saatyen's scale based on the degree of importance of criterion 1 over criterion 2; inverse values will be used when the second element is higher in the criterion to be compared. (Saaty 2008).

CRITERIA COMPARISON MATRIX

	Topography and geological conditions	Availability of dam body materials	Related works (Spillway and Bottom Discharge)	Dam safety	Diverter system	Construction procedure	Constructio n period	Project cost	NORMALIZED MATRIX								WEIGHTING
Topography and geological conditions	1.00	6.00	3.00	1.00	4.00	4.00	7.00	4.00	0.29	0.26	0.27	0.33	0.17	0.22	0.20	0.32	0.26
Availability of dam body materials	0.17	1.00	0.33	0.14	3.00	0.50	3.00	0.33	0.05	0.04	0.03	0.05	0.13	0.03	0.09	0.03	0.06
Related works (Spillway and Bottom Discharge)	0.33	3.00	1.00	0.20	3.00	4.00	5.00	1.00	0.10	0.13	0.09	0.07	0.13	0.22	0.14	0.08	0.12
Dam safety	1.00	7.00	5.00	1.00	7.00	5.00	9.00	5.00	0.29	0.31	0.45	0.33	0.30	0.27	0.26	0.40	0.33
Diverter system	0.25	0.33	0.33	0.14	1.00	0.50	1.00	0.50	0.07	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
Construction procedure	0.25	2.00	0.25	0.20	2.00	1.00	5.00	0.33	0.07	0.09	0.02	0.07	0.09	0.05	0.14	0.03	0.07
Construction period	0.14	0.33	0.20	0.11	1.00	0.20	1.00	0.25	0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03
Project cost	0.25	3.00	1.00	0.20	2.00	3.00	4.00	1.00	0.07	0.13	0.09	0.07	0.09	0.16	0.11	0.08	0.10
SUM	3.39	22.67	11.12	3.00	23.00	18.20	35.00	12.42									1.00

Fig. 2: Matrix of paired comparisons of criteria (Source: Own elaboration).

Once the weights of the sub-criteria (average vector) depending on each alternative are obtained, the priority matrix is assembled, which is composed of the alternatives. From this matrix the global weights of the alternatives in relation to the criteria are obtained. Finally, this matrix is multiplied with the relative weights of the criteria being evaluated and the prioritization percentages of each alternative are obtained.

CRITERION/ ALTERNATIVE	Topography and geological conditions	Availability of dam body materials	Spillway and Bo	Dam safety	Diverter system	Construction procedure	Constructio n period	Project cost	PRIORITIZATION
DAM TE	0.06	0.36	0.06	0.04	0.06	0.54	0.05	0.07	10%
DAM CFRD	0.13	0.36	0.06	0.12	0.09	0.29	0.12	0.12	14%
DAM GCM	0.40	0.17	0.51	0.49	0.43	0.12	0.29	0.34	40%
DAM CCR	0.40	0.10	0.36	0.35	0.43	0.06	0.55	0.48	35%
WEIGHTING	0.26	0.06	0.12	0.33	0.04	0.07	0.03	0.10	100%

Fig. 3: Prioritization matrix and percentages (Source: Own elaboration).

The results of the hierarchical analysis indicate the concrete gravity dam as the optimal dam alternative, with a weighting of 40%, which is the most suitable for the construction of the dam Toma Grande.

Conclusions

Of the four proposed alternatives; according to the criteria considered for the analysis, the GCM dam has the highest priority (40%), followed by the RCC dam (35%); which is logical, since these types of dams present better performance in terms of the need to be able to cope with extreme flood or earthquake conditions; it allows the construction of the stepped spillway (efficient energy dissipation) in the body of the dam and the diversion conduit can be conditioned through the body of the dam, which considerably reduces the cost of the dam. The other two alternatives require expensive diversion systems during dam construction, and related works such as the spillway and bottom discharge must be located outside the dam body and require expensive structures.

This work shows that the AHP Method is suitable for solving complex problems with an infinite number of criteria, such as the selection of the appropriate type of dam. Due to its ease of methodology; and having a graphical component, the complex decision process is divided into manageable sections and a better understanding of the elements by integrating decision criteria through paired comparisons.

Bibliography

Al Khalil MI. 2012. Selecting the appropriate project delivery method using AHP. International Journal of Project Management, 20: 469-474.

F. Martinez (2019), "The Problem of Dam Type Selection in a Project: Criteria and Methods to Support Decision Making", Polytechnic University of Cartagena.

Razifar H (2013)., "Selection optimal type of dam using AHP method", Journal of Novel Applied Sciences, Iran.

Xingi Day (2016). Dam site selection using an integrated method of AHP an Gis for decision making support in Bartola, Northwest, China.



International Association for Hydro-Environment Engineering and Research

Hosted by
Spain Water and IWHR, China

2nd IAHR Young Professionals Congress

Online. 30 Nov. - 2 Dec. 2021

Proceedings

Editors: David Fèrras | Emanuele Quaranta | Eva Fenrich Gaetano Crispino | José M. Carrillo | Livia Pitorac | Manish Pandey



Hosted by
Spain Water and IWHR, China

ISBN: 978-90-824846-7-0

The papers included in this volume were part of 2nd IAHR Young Professionals Congress cited on the cover and title page. Papers were selected and subject to review by the editors and International Scientific Committee. The papers published in these proceedings reflect the work and thoughts of the authors and are published herein as submitted. The publisher is not responsible for the validity of the information or for any outcomes resulting from reliance thereon.

Proceedings of the 2nd IAHR Young Professionals Congress Online. 30 NOV. – 2 Dec. 2021

Editors: Emanuele Quaranta, Eva Fenrich, Gaetano Crispino, José M. Carrillo, Livia Pitorac, Manish Pandey and David Ferras.

Published by: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research - IAHR
Pª Bajo Virgen del Puerto, 3 28005 Madrid, SPAIN
A-1 Fuxing Road, Haidian District, 100038, Beijing, CHINA

Copyright:



ISBN: 978-90-824846-7-0 IAHR publications follow the Ethical Guidelines and Codes of Conduct provided by the Committee of Publication Ethics (COPE).

IAHR, founded in 1935, is a worldwide independent member-based organization of engineers and water specialists working in fields related to the hydro-environmental sciences and their practical application. Activities range from river and maritime hydraulics to water resources development and eco-hydraulics, through to ice engineering, hydro informatics, and hydraulic machinery. IAHR consists of two offices: Madrid Office, Spain and Beijing Office, China.

Proceedings of the 2nd IAHR
Young Professionals Congress
30 Nov-2 Dec. 2021

Selection of the optimal alternative for Toma Grande Dam applying the Hierarchical Analysis Method AHP

Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma[1], Samuel Ismael Quisca Astocahuana[2]
[1]Bach. Civil Engineer, EPIC-FIGMMG, National University of San Marcos, Perú, hulinho.arbaiza@gmail.com
[2] Principal Professor, School of Civil Engineering, National University of San Marcos, Perú, squiscaa@unmsm.edu.pe

ABSTRACT

In this research work, the analysis and selection of the optimal dam type for the Toma Grande dam was performed by applying the analytical hierarchical process (AHP) for the analysis of four dam alternatives (CFRD, CCR, concrete gravity, earth and rockfil), and selecting the optimal alternative. For the application of the method, all the factors that influence the selection of the optimum type of dam were identified, called Subcriteria, which were grouped into eight most representative groups, by means of a hierarchical tree called Criteria (topography and structural geology, availability of materials, related works, dam safety, diversion system, construction procedure, construction time and construction cost). Based on the basic engineering studies, the Criteria data were obtained, which were used to construct the paired comparison matrix and the weightings were obtained by comparing each of the Criteria with each other. The results of the hierarchical analysis indicate that the concrete gravity dam as the optimum dam alternative, with a weighting of 40%, which is the most suitable for the construction of the Toma Grande dam.

Keywords: multi-criteria decision making; decision making criteria; AHP; optimal dam type selection.

1 INTRODUCTION

The process of selecting the optimal dam alternative is influenced by numerous factors such as: topography, geological and geotechnical conditions of the site, climatic and hydrological conditions, availability of materials for dam construction, height of the dam, size and location of the crest spillway, cost of the works, construction time, environmental and social aspects of the region and country where the project is located, and seismicity of the area, among others. Usually, the different types of dams are favorable for some of these factors, and unfavorable for others, being necessary to balance the advantages and disadvantages in each one of them to be able to justify in a suitable way the optimal dam alternative. One of the most widely used methodologies in various fields to support multi-criteria decision making is the Analytical Hierarchical Process (AHP).

2 PROCEDURE AND RESULTS

the most representative factors were selected to proceed with the analysis using the AHP method; we will call these factors criteria.

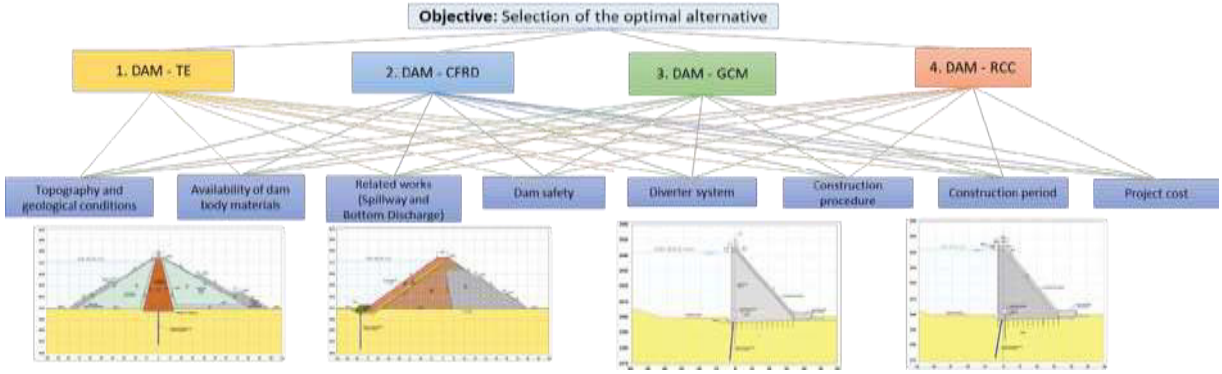


Figure 1 Hierarchy tree of the AHP Method (Source: Own elaboration).
Note: TE is defined as Soil and Rock Fill; CFRD, Concrete Faced Rock Fill Dam; GCM, Mass Concrete Gravity; and RCC, Roller Compacted Concrete.

Once the hierarchical tree is obtained, in the next step, we compare the criteria two by two. For this comparison, we attribute a value from 1 to 9, according to Saatyen's scale based on the degree of importance of criterion 1 over criterion 2; inverse values will be used when the second element is higher in the criterion to be compared. (Saaty 2008).

ISBN: 978-90-824846-7-0



Figure 2 Matrix of paired comparisons of criteria (Source: Own elaboration).

Once the weights of the sub-criteria (average vector) depending on each alternative are obtained, the priority matrix is assembled, which is composed of the alternatives. From this matrix the global weights of the alternatives in relation to the criteria are obtained. Finally, this matrix is multiplied with the relative weights of the criteria being evaluated and the prioritization percentages of each alternative are obtained.

CRITERION/ ALTERNATIVE	Topography and geological conditions	Availability of dam body materials	Spillway and Bot	Dam safety	Diverter system	Construction procedure	Constructio n period	Project cost	PRIORITIZATION
DAM TE	0,06	0.36	0,06	0,04	0.06	0.54	0.05	0.07	10%
DAM CFRD	0.13	0.36	0.06	0.12	0.09	0.29	0.12	0.12	14%
DAM GCM	0.40	0.17	0.51	0.49	0.43	0.12	0.29	0.34	40%
DAM CCR	0.40	0.10	0.36	0.35	0.43	0.06	0.55	0.48	35%
WEIGHTING	0.26	0.06	0.12	0.53	0.04	0.07	0.03	0.10	100%

Figure 3 Prioritization matrix and percentages (Source: Own elaboration).

The results of the hierarchical analysis indicate the concrete gravity dam as the optimal dam alternative, with a weighting of 40%, which is the most suitable for the construction of the dam Toma Grande.

3 CONCLUSIONS

Of the four proposed alternatives; according to the criteria considered for the analysis, the GCM dam has the highest priority (40%), followed by the RCC dam (35%); which is logical, since these types of dams present better performance in terms of the need to be able to cope with extreme flood or earthquake conditions; it allows the construction of the stepped spillway (efficient energy dissipation) in the body of the dam and the diversion conduit can be conditioned through the body of the dam, which considerably reduces the cost of the dam. The other two alternatives require expensive diversion systems during dam construction, and related works such as the spillway and bottom discharge must be located outside the dam body and require expensive structures.

This work demonstrates that the AHP method is suitable for solving complex problems with a large number of criteria, as presented in the problems of selecting the optimal dam alternative. Due to its methodological ease, and having a graphical component, the complex decision-making process is divided into manageable sections and allows a better understanding of the elements by integrating the decision criteria through paired comparisons.

REFERENCES

Al Khalil MI. 2012. Selecting the appropriate project delivery method using AHP. International Journal of Project Management, 20: 469-474.

F. Martinez (2019), "The Problem of Dam Type Selection in a Project: Criteria and Methods to Support Decision Making", Polytechnic University of Cartagena.

Razifar H (2013)., “Selection optimal type of dam using AHP method”, Journal of Novel Applied Sciences, Iran.

Xingi Day (2016). Dam site selection using an integrated method of AHP an Gis for decision making support in Bartola, Northwest, China.

ISBN: 978-90-824846-7-0

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICADO

Otorgado a:

Bach. Ing. Hulinho Yordy Arbaiza Ocrospoma

Por su participación en calidad de PONENTE en el SEMINARIO INTERNACIONAL DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN FERROVIARIO Y AEROPORTUARIO, llevado a cabo del 11 al 13 de Noviembre del 2021 vía online, por el XII ANIVERSARIO DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL de la UNMSM.

UNMSM
Firmado digitalmente por SANTOS RODRIGUEZ Ricardo Ramiro FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.01.2022 18:03:00 -05:00

MG. ING. RICARDO SANTOS RODRIGUEZ

DIRECTOR EPIC UNMSM



2021 GEOINGENIERÍA PERÚ

CERTIFICADO CONGRESO

Otorgado a:

HULINHO ARBAIZA OCROSPOMA

Por su participación como:

CONFERENCISTA

SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA DE LA PRESA TOMAGRANDE APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO AHP.

en el Congreso "I Congreso Peruano de Ingeniería Geotécnica - COPGEO / I Congreso Nacional de GrandesPresas - COPEGP / V Congreso Nacional de Geosintéticos - GEOSPERU, los dias 12, 13 y 14 de Julio del 2021.

APGEO Asociación Peruana de Ingeniería Geotécnica

COPEGP COMITÉ PERUANO DE GRANDES PRESAS

IGS Perú

Ing. César Torres	Ing. Miguel de La Torre	Ing. Fernando Moarri
APGEO	COPEGP	IGS PERÚ

Selección de la Alternativa Óptima de la Presa Tomagrande Aplicando el Método de Análisis Jerárquico AHP

Hulinho Arbaiza Ocrospoma[1] y Samuel Ismael Quisca Astocahuana[2]

[1] Bach. Ingeniería Civil, EPIC-FIGMMG, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

[2]Profesor Principal, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

[1]hulinho.arbaiza@gmail.com, [2]squiscaa@unmsm.edu.pe

RESUMEN

En la fase de proyecto del diseño de presas altas con enfoque de seguridad de presas, el planteamiento y desarrollo de alternativas de tipos de presas es tan importante como la selección de la alternativa óptima. En el proceso de selección de la alternativa óptima de presa influyen numerosos factores como: topografía, condiciones geológicas y geotécnicas del sitio de emplazamiento, condicionantes climáticos e hidrológicos, disponibilidad de materiales para la construcción de la presa, altura de la presa, tamaño y ubicación del aliviadero de excedencias, costo de las obras, tiempo de construcción, aspectos medioambientales y sociales propios de la región y país donde se localiza el proyecto, y la sismicidad de la zona, entre otros. Usualmente, las distintas tipologías de presas son favorables para alguno de estos factores, y desfavorables para otros, siendo necesario equilibrar las ventajas y desventajas en cada uno de ellos para poder justificar de forma idónea la alternativa óptima de presa. Una de las metodologías más utilizadas en diversos campos para el apoyo en la toma de decisiones multicriterio es el Método Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy Process (AHP). En el presente trabajo de investigación, se aplicó el análisis y la selección del tipo óptimo de la Presa Tomagrande, mediante la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) para analizar las tres alternativas de presa (presa CFRD, presa RCC, presa de Tierra y Enrocado), y seleccionar la alternativa de tipo de presa óptima. Para la aplicación del método, se identificaron todos los factores que influyen en el momento de la selección del tipo de presa óptimo, que fueron denominados Subcriterios (anteriormente fueron denominados factores) Estos Subcriterios fueron agrupados en siete grupos más representativos, mediante un árbol de jerarquías, los cuales fueron denominados Criterios. De los estudios básicos de ingeniería obtenemos los datos de los Criterios, de los cuales podemos construir una matriz de comparación pareada y obtenemos las ponderaciones confrontando cada uno de los Criterios entre sí. Se establecieron la relación de consistencia de los criterios de selección, para luego construir la matriz de comparación por pares de la selección del tipo de presa según los Criterios. Los resultados del análisis jerárquico indica a la presa RCC como la alternativa óptima de presa, con una ponderación del 44%, que es la más conveniente para la construcción de la presa Tomagrande.

Palabras clave: Selección de Alternativas de Presas, Análisis Jerárquico, presa RCC, presa CFRD, presa de tierra y enrocado.

OBJETIVO

Formular y analizar 3 alternativas de tipo de presa y seleccionar la alternativa óptima de la presa Toma Grande, aplicando el método de análisis multicriterio APH.

METODOLOGÍA

Método Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1.980) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio.

La ventaja del AHP consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.

1. **Base matemática del AHP**

   "El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión".

2. **Establecimiento de prioridades con el AHP**

   El AHP pide a quien toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático síntesis para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de la preferencia global.

3. **Comparaciones pareadas**

   Las comparaciones pareadas con bases fundamentales del AHP. Este método utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos.

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión).	
Inversos $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

Tabla .1 Escala para comparación por pares (Saaty 2008).

4. **Matriz de comparaciones pareadas**

   Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

   Sea A una matriz nxn donde n a Z+. Sea aij el elemento (i, j) de A, para i = 1, 2, ..., n; y j =1, 2, ..., n. Decimos que A es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas si aij es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j. Cuando i = j, el valor de aij será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma.

   Además, se cumple que: aij*aji = 1; es decir:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & & 1 \end{pmatrix}$$

5. Síntesis

Una vez que se elabora la matriz de comparaciones pareadas se puede calcular lo que se denomina prioridad de cada uno de los elementos que se comparan. A esta parte del AHP se le conoce como sintetización. El proceso matemático preciso que se requiere para realizar tal sintetización implica el cálculo de valores y vectores característicos. El siguiente procedimiento de tres pasos proporciona una buena aproximación de las prioridades sintetizadas.

5.1. Procedimiento para sintetizar juicios.

- Paso 1: Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.
- Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna: a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.
- Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

6. Matriz de prioridades

Se denomina matriz de prioridades a la que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas tenemos:

$$\begin{array}{c} \\ \text{Alternativa 1} \\ \text{Alternativa 2} \\ \dots \\ \text{Alternativa n} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{Criterio 1} & \text{Criterio 2} & \dots & \text{Criterio m} \end{array} \\ \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{pmatrix} \end{array}$$

Pij es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j, para i=1,2, ..., n; y j=1,2, ..., m.

La prioridad global para cada alternativa de decisión se resume en el vector columna que resulta del producto de la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios.

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Pg_1 \\ Pg_2 \\ \dots \\ Pg_n \end{pmatrix}$$

Donde Pgi es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i (i = 1, 2, ...,n).

7. Consistencia

Una consideración importante en términos de la calidad de la decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas.

El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis.

De forma matemática, decimos que una matriz de comparación A nxn es consistente si: aij, ajk = aik, para i, j, k = 1,2, ..., n. Esta propiedad requiere que todas las columnas (y renglones) de A sean linealmente dependientes. En particular, las columnas de cualquier matriz de comparación 2x2 son dependientes y, por tanto, una matriz 2x2 siempre es consistente.

El AHP calcula la razón de consistencia (RC) como el cociente entre el índice de consistencia de A y el índice de consistencia aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde IC es el índice de consistencia de A y se calcula como sigue:

$$IC = \frac{\text{nmáx} - n}{n - 1}$$

IA es el índice de consistencia aleatoria de A. Se puede mostrar que el IA depende del número de elementos que se comparan, Algunos autores sugieren la siguiente estimación para el IA:

$$IA = \frac{1.98(n-2)}{n}$$

La RC, está diseñado de manera que los valores que exceden de 0,10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0,10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

Ubicación Política: Región: Arequipa
Provincia: Arequipa
Distrito: Mollebaya

Ubicación Geográfica: Latitud Sur: 235,018 – 238,120
Longitud Oeste: 8,174,516 – 8,176,209
La altitud varía de: 2600 a 2645 msnm

Hidrográficamente conforma parte de la cuenca del río Quilca-Chili, subcuenca río Tingo Grande y microcuenca Mollebaya - Pocsi.

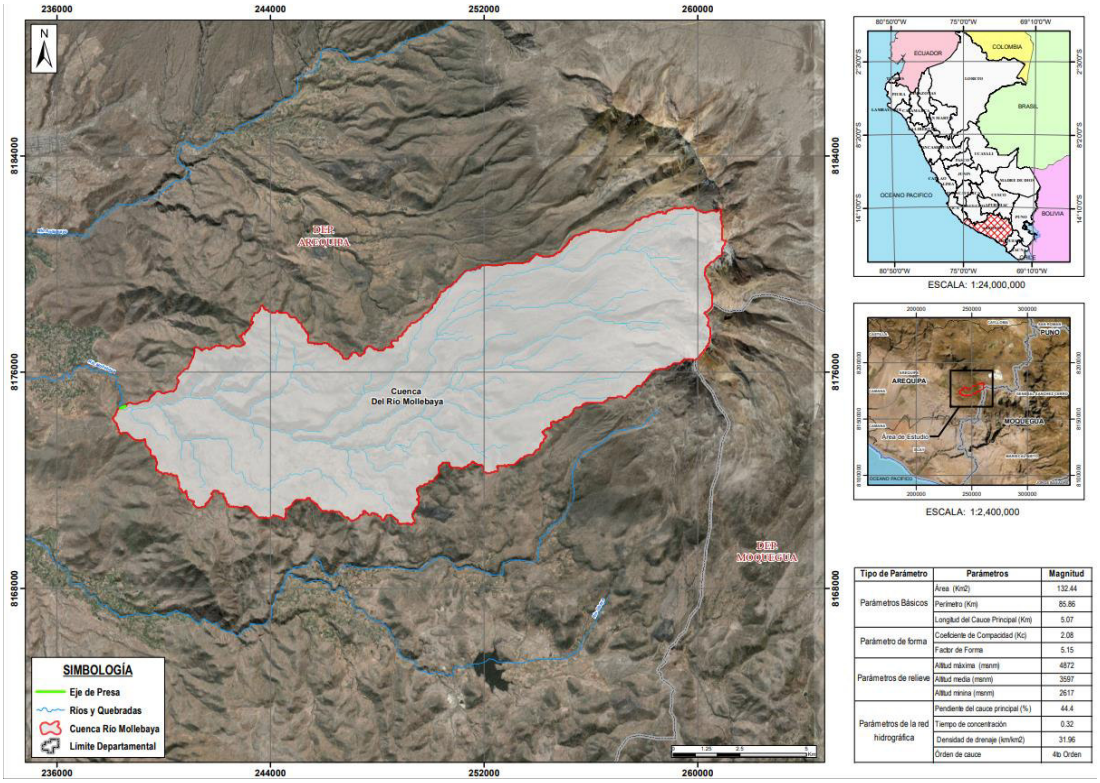


Figura1. Plano de ubicación de la presa Toma Grande y del proyecto en general.

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

ALTERNATIVA 1: Presa de Tierra y Enrocado con Núcleo Central Impermeable

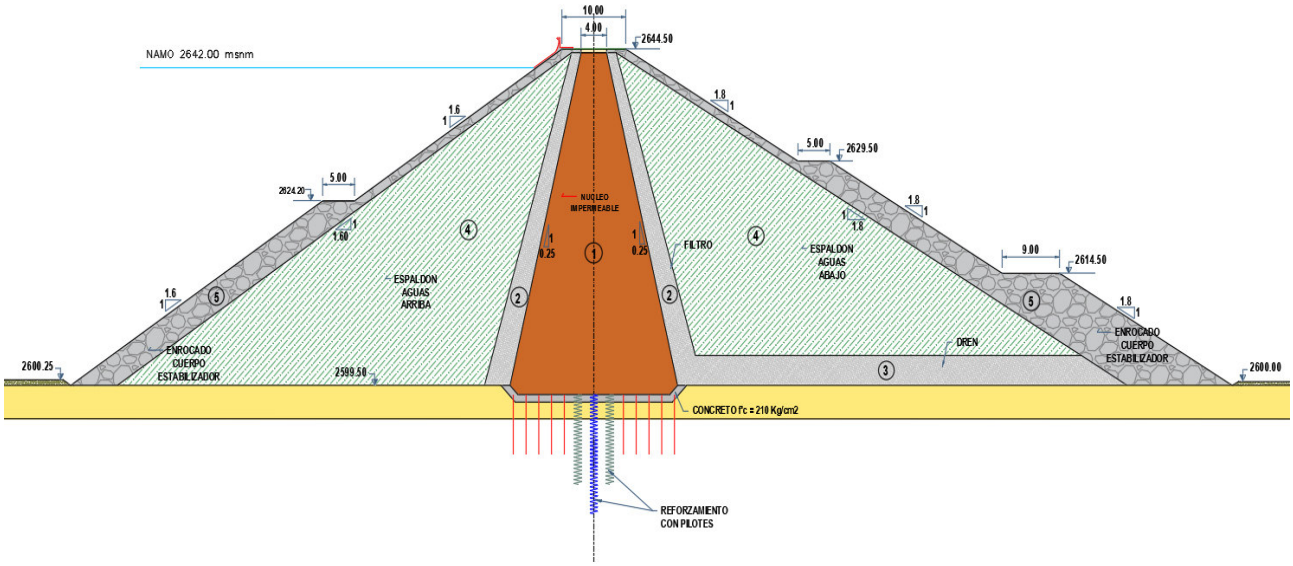


Gráfico 1 *- Sección Transversal Presa de Tierra y Enrocado (Fuente: Elaboración Propia)*

CARACTERISTICAS:

La sección típica de la presa de tierra y enrocado con núcleo central impermeable (Gráfico 1), tiene el siguiente dimensionamiento y parámetros:

Cota de corona:	2644.50 msnm
Cota de NAMO:	2642.00 msnm
Cota de cimentación:	2599.50 msnm
Altura de presa:	45.00 m
Ancho de corona:	10.00 m
Corona del Núcleo:	4.00 m
Borde libre:	2.50 m
Altura de parapeto en corona:	1.50 m
Talud aguas abajo:	1. 8H:1V + 2 bermas de 5.00 y 9.00 m de ancho
Talud aguas arriba:	1. 6H:1V + 1 berma de 5.00 m de ancho
Talud del Núcleo	0.25 H:1V
Espesor del filtro:	1.50 - 4.00 m
Espesor del dren:	4.00 m
Longitud cimentación:	160.00 m
Inyecciones impermeabilización:	8.00m

El cuerpo de la presa estará constituido principalmente con el material fluvioaluvial natural disponible en el cauce del río Mollebaya y otros cercanos. El material de roca será obtenido de la cantera de roca localizada cerca del eje de la presa. El núcleo será de material de suelo impermeable (arcillas con índice de plasticidad apropiada), con sus correspondientes filtros en ambos lados de la pantalla.

ALTERNATIVA 2: Presa de Enrocado con Pantalla de Concreto en talud aguas arriba (CFRD)

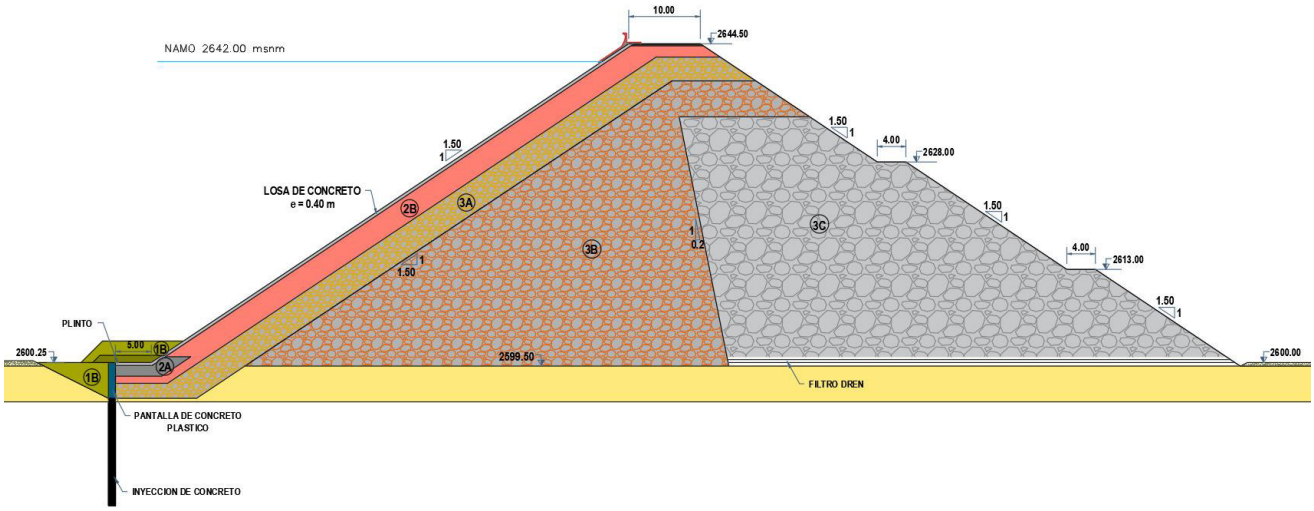


Gráfico 2 - Sección Transversal Presa CFRD (Fuente: Elaboración Propia)

CARACTERISTICAS:

La sección típica de la presa CFRD (Gráfico 2) tiene el siguiente dimensionamiento y parámetros:

Cota de corona:	2644.50 msnm
Cota de NAMO:	2642.00 msnm
Cota de cimentación:	2599.50 msnm
Altura de presa:	45.00 m
Ancho de corona:	10.00 m
Borde libre:	2.50 m
Altura de parapeto en corona:	1.50 m
Talud aguas abajo:	1.5 H:1 V + 2 bermas de 4.00 m de ancho
Talud aguas arriba:	1.5 H:1 V
Espesor de Losa de Concreto:	0.40 m
Espesor de Filtro dren:	1.50 m
Ancho del Plinto:	5.00 m
Espesor del plinto:	0.40 m
Longitud de Pantalla de Concreto:	5.00 m
Inyecciones de Concreto:	8.00m

La presa CFRD aprovecha los materiales de construcción disponibles en la zona del proyecto, es sismorresistente, y su tecnología de construcción es accesible.

Los materiales 2B y 3A se colocan como una capa de transición de alta compacidad, entre la pantalla de concreto y el material de espaldones, para limitar los asentamientos diferenciales de la indicada pantalla de concreto. Este material, que deberá tener una granulometría muy bien graduada, y se confecciona a partir de los materiales aluviales, limitando para ello su tamaño máximo a 10 cm. Su contenido de finos (pasa tamiz N° 200) se limita al 12%. Los espaldones de materiales 3B y 3C serán obtenidos de las canteras de agregados y canteras de rocas disponibles en la zona del proyecto. El material 2A es impermeable y sellante capaz de asegurar la estanqueidad, aún si se presentasen fisuras.

El material 3A actuará como filtro, capaz de retener las partículas finas de la recarga impermeable, si estas tendiesen a migrar, bajo la presión del embalse en caso de fisuras en el nudo pantalla-losa-pared.

ALTERNATIVA 3: Presa de Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

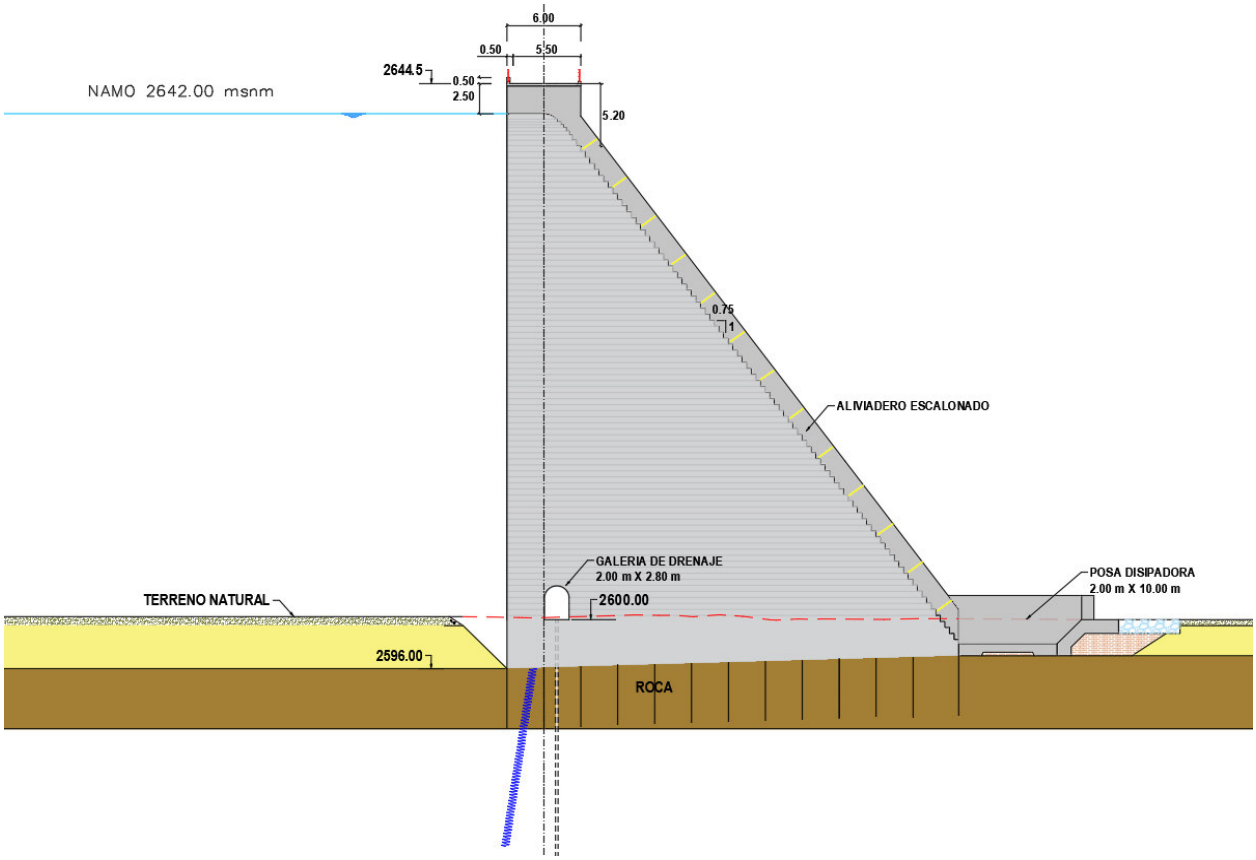


Gráfico 3: Sección Transversal Presa CCR (Fuente: Elaboración Propia)

CARACTERISTICAS:

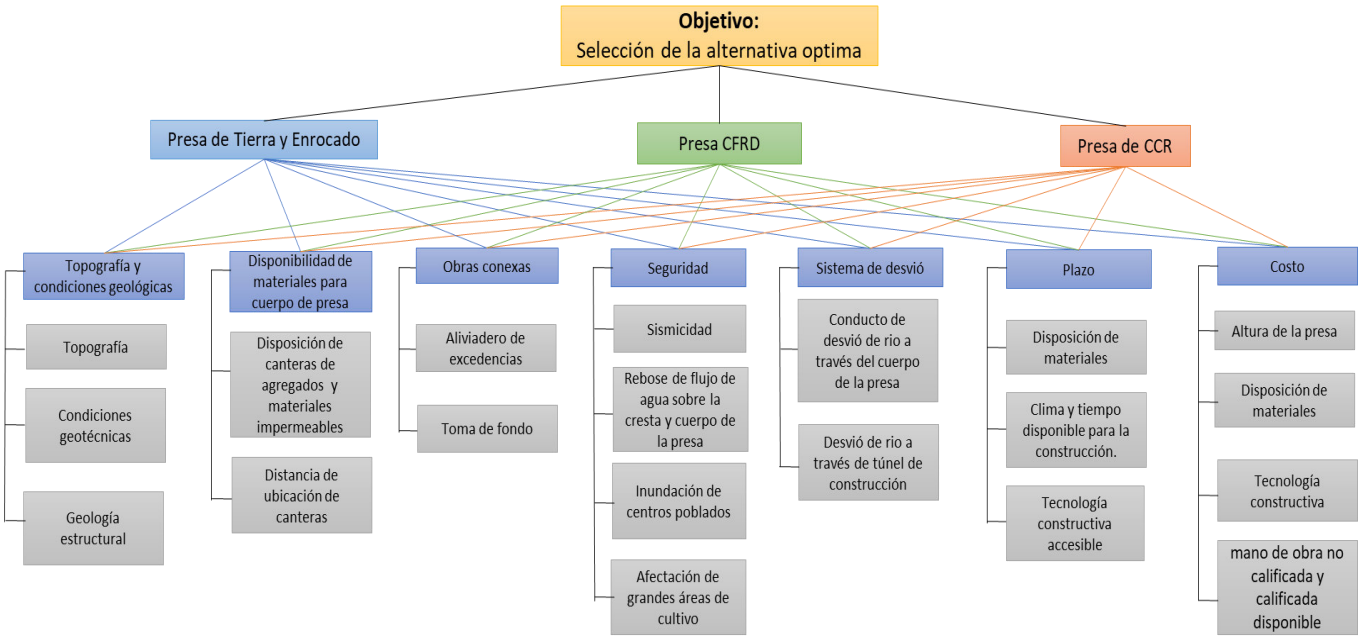
La sección típica de la presa de concreto (Gráfico 3) tiene el siguiente dimensionamiento y parámetros:

Cota de corona:	2644.50 msnm
Cota de NAMO:	2642.00 msnm
Cota de cimentación:	2596.00 msnm
Altura de presa:	48.50 m (desde nivel de cimentación)
Ancho de corona:	6.00 m
Largo de coronación:	142.00 m
Borde libre:	2.50 m
Altura de parapeto en corona:	0.50 m
Talud aguas abajo:	0.75 H:1 V
Talud aguas arriba:	Vertical
Volumen:	15 600 m3
Galería drenaje:	01 unidad

APLICACIÓN DEL METODO AHP

SUBCRITERIOS	CRITERIOS
• Topografía. • Estructura geotécnica y geología del emplazamiento de la presa. • Disponibilidad de material de construcción. • Disponibilidad de oferta hídrica • Parámetros hidrológicos del aliviadero de excedencias y descarga de fondo. • Costo. • Altura de la presa y volumen de embalse. • La condición económica del país. • Tipo de presas similares proyectadas y construidas en el país y el exterior. • Tecnología constructiva accesible para empresas constructoras nacionales • Utilización de mano de obra no-calificada y calificada disponible en la región del proyecto y en el país. • Costos de operación y mantenimiento de la presa. • Clima y tiempo disponible para la construcción. • Sencillez del desvío del río. • Seguridad. • Sismicidad. • Peligro de sedimentación del embalse. • Inundación de centros poblados • Afectación de grandes áreas de cultivo • Impacto ambiental y social	• Topografía y condiciones geológicas. • Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa • Obras conexas • Seguridad. • Sistema de desvió de rio • Plazo de construcción • Costo de obra

Construcción del Árbol de jerarquías



APGEO Asociación Peruana de Ingeniería Geotécnica

COPEGP COMITÉ PERUANO DE GRANDES PRESAS

igs Perú

2021 GEOINGENIERÍA PERÚ

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS																						
	Topografía y condiciones geológicas	Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	Obras conexas	Seguridad	Sistema de desvio	Plazo	Costo	MATRIZ NORMALIZADA							PONDERACIÓN	AXP	Relación de consistencia	
Topografía y condiciones geológicas	1.00	7.00	4.00	1.00	7.00	7.00	4.00	0.34	0.33	0.33	0.35	0.27	0.24	0.34	0.32	2.45	CI=(nmax-n)/(n-1)	0.12
Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	0.14	1.00	0.50	0.14	3.00	4.00	0.33	0.05	0.05	0.04	0.05	0.12	0.14	0.03	0.07	0.49	RI=1.98*(n-2)/n	1.41
Obras conexas	0.25	2.00	1.00	0.20	4.00	5.00	1.00	0.09	0.09	0.08	0.07	0.15	0.17	0.08	0.11	0.80	CR=CI/RI	0.08
Seguridad	1.00	7.00	5.00	1.00	7.00	7.00	5.00	0.34	0.33	0.42	0.35	0.27	0.24	0.42	0.34	2.66	Ponderacion Razonable!	
Sistema de desvio	0.14	1.00	0.25	0.14	1.00	1.00	0.33	0.05	0.05	0.02	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.29		
Plazo	0.14	0.25	0.20	0.14	1.00	1.00	0.25	0.05	0.01	0.02	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.23		
Costo	0.25	3.00	1.00	0.20	3.00	4.00	1.00	0.09	0.14	0.08	0.07	0.12	0.14	0.08	0.10	0.80		
SUMA	2.93	21.25	11.95	2.83	26.00	29.00	11.92								1.00	7.71		

CRITERIO 1: Topografía y condiciones geológicas							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	1.00	3.00	0.43	0.40	0.50	0.44
Presa CFRD	1.00	1.00	2.00	0.43	0.40	0.33	0.39
Presa de CCR	0.33	0.50	1.00	0.14	0.20	0.17	0.17
SUMA	2.3	2.5	6.0				1.00

CRITERIO 2: Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	2.00	3.00	0.55	0.57	0.50	0.54
Presa CFRD	0.50	1.00	2.00	0.27	0.29	0.33	0.30
Presa de CCR	0.33	0.50	1.00	0.18	0.14	0.17	0.16
SUMA	1.8	3.5	6.0				1.00

CRITERIO 3: Obras conexas de la presa							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	1.00	0.14	0.11	0.11	0.11	0.11
Presa CFRD	1.00	1.00	0.14	0.11	0.11	0.11	0.11
Presa de CCR	7.00	7.00	1.00	0.78	0.78	0.78	0.78
SUMA	9.0	9.0	1.3				1.00

CRITERIO 4: Seguridad							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	0.20	0.13	0.07	0.03	0.09	0.07
Presa CFRD	5.00	1.00	0.20	0.36	0.16	0.15	0.22
Presa de CCR	8.00	5.00	1.00	0.57	0.81	0.75	0.71
SUMA	14.0	6.2	1.3				1.00

CRITERIO 5: Sistema de desvío del río durante la construcción							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	0.33	0.20	0.11	0.06	0.14	0.10
Presa CFRD	3.00	1.00	0.25	0.33	0.19	0.17	0.23
Presa de CCR	5.00	4.00	1.00	0.56	0.75	0.69	0.67
SUMA	9.0	5.3	1.5				1.00

CRITERIO 6: Plazo de tiempo disponible para la construcción de la presa							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	0.20	0.17	0.08	0.05	0.11	0.08
Presa CFRD	5.00	1.00	0.33	0.42	0.24	0.22	0.29
Presa de CCR	6.00	3.00	1.00	0.50	0.71	0.67	0.63
SUMA	12.0	4.2	1.5				1.00

CRITERIO 7: Costo de obra (*)							
	Presa de Tierra y Enrocado	Presa CFRD	Presa de CCR	Matriz Normalizada			Vector Promedio
Presa de Tierra y Enrocado	1.00	0.25	3.00	0.19	0.17	0.38	0.24
Presa CFRD	4.00	1.00	4.00	0.75	0.67	0.50	0.64
Presa de CCR	0.33	0.25	1.00	0.06	0.17	0.13	0.12
SUMA	5.3	1.5	8.0				1.00

CRITERIO/ ALTERNATIVA	Topografía y condiciones geológicas	Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	Obras conexas	Seguridad	Sistema de desvio	Plazo	Costo	PRIORIZACIÓN
Presa de Tierra y Enrocado	0.44	0.54	0.11	0.07	0.10	0.08	0.24	24%
Presa CFRD	0.39	0.30	0.11	0.22	0.23	0.29	0.64	31%
Presa de CCR	0.17	0.16	0.78	0.71	0.67	0.63	0.12	44%
PONDERACION	0.32	0.07	0.11	0.34	0.03	0.03	0.10	100%

La Alternativa 3 (PRESA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO), con una ponderación del 44% es la más conveniente para la ejecución de la presa Toma Grande.

CONCLUSIONES

- En cuanto a los resultados obtenidos, después de realizar el estudio, se ha llegado a la conclusión de que, entre los criterios elegidos, el criterio más limitante e importante a la hora de la selección del tipo de presa optimo es la seguridad, lo cual tiene mucho sentido. Estas infraestructuras contienen una gran cantidad de m3 de agua en el embalse, de tal forma que, si algo no se controla con regularidad y atendiendo las normas establecidas, podría desembocar en el fallo estructural de esta y, con ello, provocar un desastre con daños irreversibles.
- De las tres alternativas propuestas; según los criterios considerados para el análisis, la presa RCC tiene mayor priorización respecto a las otras dos (44%); lo cual tiene lógica, pues este tipo de presa presenta mejor comportamiento en cuanto la necesidad de poder hacer frente a las condiciones de inundación extrema o terremoto; permite la construcción del aliviadero escalonado (eficiente disipación de energía) en el cuerpo de la presa y se puede acondicionar el conducto de desvío a través del cuerpo de la presa, lo cual reduce considerablemente el costo de la presa.
- Con este trabajo se pone de manifiesto que el Método AHP es apto para la resolución de problemas complejos y con infinidad de criterios como la selección del tipo de presa adecuado. Debido a su facilidad en la metodología; y al poseer un componente gráfico, puede ser fácilmente comprensible; en otras palabras, el complejo proceso de decisión se divide en secciones manejables y una mejor comprensión de los elementos mediante la integración de criterios de decisiones a través de las comparaciones pareadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Khalil MI. 2012. Selección del método de ejecución del proyecto adecuado utilizando AHP. Revista Internacional de Gestión de Proyectos, 20: 469-474.
- F. Martinez (2019), “El Problema de la Selección del Tipo de Presa en un Proyecto: Criterios y Métodos de Apoyo a la Toma de Decisiones”, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Razifar H (2013)., “Selection optimal type of dam using AHP method”, Journal of Novel Applied Sciences, Iran.
- Xingi Day (2016). Dam site selection using an integrated method of AHP an Gis for decision making support in Bartola, Northwest, C.