



Universidad
Politécnica
de Cartagena



E.T.S. de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos
y de Ingeniería de Minas

EL PROBLEMA DE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE PRESA EN UN PROYECTO: CRITERIOS Y MÉTODOS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

DIRECTOR: LUIS ALTAREJOS GARCÍA

AUTOR: FRANCISCO JAVIER MARTÍNEZ RUIZ

LUGAR: CARTAGENA (2019). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA.



AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo final de máster no habría sido posible sin hubiera contado con el apoyo de todos mis seres queridos.

En primer lugar, dar las gracias a mi familia, ya que, sin ellos, no habría comenzado esta bonita carrera y, mucho menos, terminarla ya que han estado en todos los momentos que más necesitaba su apoyo y sin pedir nada a cambio nunca. Gracias por estar siempre.

También dar las gracias a mis amigos, ya sean los de toda la vida o los conocidos a lo largo de esta carrera de fondo, por los buenos momentos vividos y por los no tan buenos. Siempre habéis estado cuando más lo necesitaba para apoyarme y animarme. Gracias por acompañarme durante todo el camino.

No me olvido, por supuesto, de la persona que más me apoya, no sólo con la carrera y el Máster, sino en todo lo que hago en mi vida. Ella siempre está ahí al pie del cañón. Con esa paciencia que tiene para aguantar todos mis malos momentos y sabiendo siempre qué decir y en el momento oportuno. Este trabajo es tuyo. Un millón de gracias, Aída Juárez Molina.

Y para finalizar, la persona que me ha cautivado para tener un amor especial a la hidráulica y, en especial, a las presas. Mi tutor del TFM, Luis Altarejos. Sin él no podría haber desarrollado ni el Trabajo Fin de Grado ni este trabajo. Siempre atendiéndome cuando lo necesitaba y explicándome los conceptos cuantas veces fueran necesarias porque, lo importante para Luis no es que se apruebe o no, sino que lo entiendas y lo puedas aplicar cuando te haga falta. Desde su primera asignatura, me ha hecho fácil lo difícil. Por eso y mucho más, gracias, Luis.



RESUMEN

Las presas son imprescindibles en la sociedad en la que vivimos debido a que el agua tiene un valor impresionante para todo lo que hacemos en un día cualquiera, se usa agua como puede ser encender una bombilla, regar un campo, beber, ir a nadar... Pero, a su vez, tienen un potencial enormemente destructivo debido a la cantidad de agua que almacenan.

Es por este motivo por lo que se hace imprescindible seleccionar adecuadamente la tipología más idónea de presa atendiendo a diversos factores.

En el proceso de selección del tipo de presa influyen numerosos aspectos: topografía, condiciones geológicas y geotécnicas del emplazamiento, condicionantes climáticos e hidrológicos, disponibilidad de materiales para la construcción, altura de la presa, tamaño y ubicación del aliviadero, coste, tiempo de construcción, aspectos medioambientales y sociales propios del país en el que se realiza el proyecto y sismicidad de la zona, entre otros.

En ocasiones, las distintas tipologías de presas son favorables para alguno de estos aspectos y desfavorables para otros, siendo necesario sopesar las ventajas e inconvenientes en cada uno de ellos para poder justificar de forma robusta la tipología seleccionada.

Al tratarse de un problema de decisión multi-criterio, las metodologías disponibles para abordar este tipo de problemas resultan de gran interés. Una de las metodologías más utilizadas en diversos campos para apoyo a la toma de decisiones multi-criterio es el Método Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy Process (AHP).

En el presente trabajo se examinarán los principales factores que afectan a la decisión relativa a la selección del tipo de presa en un proyecto, y se abordará el planteamiento de cómo ponderar los diferentes criterios de selección utilizando la metodología AHP.



ABSTRACT

Dams are essential in the society in which we live, since water has an impressive qualitative value, since, for everything we develop in a common day, water is used such as lighting a light bulb, watering a field, drinking water, going swimming... But, at the same time, they have an enormous destructive potential due to the amount of water they store.

It is for this reason that it is essential to properly select the most suitable type of dam depending on the land on which it is intended to build.

Numerous factors influence the process of selecting the type of dam: topography, geological and geotechnical conditions of the site, climatic and hydrological aspects, availability of construction materials, height of the dam, size and location of the spillway, cost, construction time, environmental and social aspects of the country in which the project is being carried out and seismicity of the area, among others.

Sometimes, the different types of dams are favourable for some of these aspects and unfavourable for others, and it is necessary to weigh the advantages and disadvantages in each of them in order to be able to robustly justify the selected typology.

As this is a multi-criteria decision problem, the methodologies available to tackle this type of problem are of great interest. One of the most widely used methodologies in various fields to support multi-criteria decision making is the Analytic Hierarchy Process (AHP).

This work examines main factors affecting the decision regarding the selection of the type of dam in a project, and how to determine their weights using the AHP methodology.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO	10
1.1. INTRODUCCIÓN	10
1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	10
1.3. PRESA DE FÁBRICA: PRESA DE GRAVEDAD	11
1.4. PRESAS DE FÁBRICA: PRESA DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO	13
1.5. PRESAS DE FÁBRICA: PRESA DE BÓVEDA.	15
1.6. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS: PRESA DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN	16
1.7. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS: PRESAS HOMOGÉNEAS	17
2. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE PRESA.....	18
2.1. TOPOGRAFÍA	18
2.2. ESTRUCTURA GEOTÉCNICA DEL EMPLAZAMIENTO DE LA PRESA.....	20
2.3. DISPONIBILIDAD DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	21
2.4. TAMAÑO Y UBICACIÓN DEL ALIVIADERO.....	23
2.5. COSTE	23
2.6. MEDIO AMBIENTE Y OPINIÓN PÚBLICA.....	23
2.7. LA CONDICIÓN ECONÓMICA DEL PAÍS.....	24
2.8. CLIMA Y TIEMPO DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN	24
2.9. FALTA DE DISPONIBILIDAD DE PERSONAL AUXILIAR CAPACITADO	25
2.10. SISMICIDAD	25
2.11. ALTURA DE PRESA	26
2.12. FUNCIÓN DEL EMBALSE	27
2.13. RAPIDEZ DE CONSTRUCCIÓN	28
2.14. CONOCIMIENTO Y DECISIÓN DE LOS INGENIEROS	28
2.15. USO PREVISTO DEL AGUA EN EL EMBALSE Y RELACIÓN COSTE-BENEFICIO	28
2.16. CONTRATOS, NORMAS Y DECISIONES CONSERVADORAS PARA CADA PAÍS.....	28
2.17. SENCILLEZ DEL DESVÍO DEL RÍO	28
2.18. SEGURIDAD.....	32
2.19. PROBABLE ACCIÓN DE LAS OLAS.....	32
2.20. PROBABLE ACCIÓN DEL HIELO.	32
2.21. EXCAVACIÓN DE CIMIENTOS.....	32
2.22. ESTRUCTURAS DE TOMA DE AGUA.....	33



2.23.	DESCARGA DEL RÍO	33
2.24.	LOS EFECTOS DEL AGUA EN LAS PRESAS.....	33
2.25.	LA DIFERENCIA DE NIVEL DE AGUA ENTRE AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO	33
2.26.	EFECTOS DE LA FUERZA DE SUBPRESIÓN BAJO LA PRESA	33
2.27.	PELIGRO DE GUERRA Y SABOTAJE.....	33
2.28.	FALTA DE AGUA PARA LA CONSTRUCCIÓN	34
2.29.	ESTÉTICA.....	34
2.30.	TIPOS DE CIMIENTOS.....	34
3.	SELECCIÓN DEL TIPO DE PRESA COMO UN PROBLEMA MULTICRITERIO	36
4.	TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS.....	37
4.1.	INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO	37
4.2.	TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS.....	38
4.2.1.	TEORÍA DE LA UTILIDAD MULTIATRIBUTO (MAUT).....	41
4.2.2.	MÉTODO DE SOBRECASIFICACIÓN (ELECTRE)	44
4.2.3.	MÉTODO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)	49
5.	PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA MEDIANTE AHP	62
5.1.	INTRODUCCIÓN DEL PROBLEMA.....	63
5.2.	PROCEDIMIENTO DEL PROBLEMA.....	67
6.	CONCLUSIONES	77
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	79



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación general de las distintas tipologías de presas.	10
Figura 2. Tensiones que afectan a una presa de gravedad	11
Figura 3. Perfil presa de gravedad.....	12
Figura 4. Presa de Gravedad.....	13
Figura 5. Presa de hormigón compactado con Rodillo. El Val (España).....	14
Figura 6. Tensiones producidas en una presa bóveda.	15
Figura 7 Presa Arco-gravedad. Hoover (Río Colorado, frontera entre los estados de Arizona y Nevada).	16
Figura 8. Perfil de presa de escollera con pantalla de hormigón.	16
Figura 9. Presa de escollera con pantalla de hormigón	17
Figura 10. Tensiones soportadas por la presa de materiales sueltos homogénea.	17
Figura 11. Presa de materiales sueltos homogénea	18
Figura 12 Distintos tipos de valle.	19
Figura 13. Presa de Koyna (india) a la izquierda y Presa de Koyna (india) después del terremoto a la derecha.	25
Figura 14. Perfil de la presa de Koyna. Zona de afección después del sismo	26
Figura 15. Sección de presa Hardfill	27
Figura 16. Embalse de Chanza (Huelva, España).....	29
Figura 17. Etapas de construcción de la presa de Andévalo	29
Figura 18. Presa Breña II.....	31
Figura 19. Perfil presa Breña II	31
Figura 20. Grafo ELECTRE	49
Figura 21. Árbol de Jerarquías del método AHP	57
Figura 22. Árbol de Jerarquías del Método AHP. Edad Temprana. Fuente Propia	66
Figura 23. Árbol de Jerarquías del Método AHP. Etapa posterior. Fuente Propia.....	67
Figura 24. Matriz de comparaciones pareadas del nivel superior	68
Figura 25. Primera iteración para la obtención de los pesos relativos del nivel superior.	68
Figura 26. . Última iteración para la obtención de los pesos relativos del nivel superior	68
Figura 27. Pesos relativos del nivel superior	69
Figura 28. Árbol de jerarquías con ponderación del nivel superior.	69
Figura 29. Comparaciones pareadas del criterio COSTE	69
Figura 30. Matriz de comparaciones pareadas del criterio COSTE	71



Figura 31. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio COSTE	71
Figura 32. Pesos relativos del criterio COSTE	71
Figura 33. Comparaciones pareadas del criterio PLAZO	71
Figura 34. Matriz de comparaciones pareadas del criterio PLAZO	72
Figura 35. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio PLAZO	72
Figura 36. Pesos relativos del criterio PLAZO	72
Figura 37. Comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD	72
Figura 38. Matriz de comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD	73
Figura 39. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD	73
Figura 40. Pesos relativos del criterio FUNCIONALIDAD	73
Figura 41. Comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD.....	74
Figura 42. Matriz de comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD.....	74
Figura 43 . Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD	74
Figura 44 . Pesos relativos del criterio SEGURIDAD	74
Figura 45. Comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL	75
Figura 46. Matriz de comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL.....	75
Figura 47. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL.....	75
Figura 48. Pesos relativos del criterio IMPACTO AMBIENTAL.....	75
Figura 49. Árbol de Jerarquía con ponderación	76



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de decisión.....	40
Tabla 2. Resumen de las técnicas multicriterio discretas. Fuente propia.....	40
Tabla 3. Matriz de decisión. ELECTRE.....	47
Tabla 4. Escala de calificaciones numéricas del Método AHP.....	51
Tabla 5. Tabla de asignación de subcriterios a los criterios seleccionados. Fuente propia.	64

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

1.1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de selección del tipo de presa influyen numerosos factores: topografía, condiciones geológicas y geotécnicas del emplazamiento, aspectos climáticos e hidrológicos, disponibilidad de materiales para la construcción, altura de presa, tamaño y ubicación del aliviadero, coste, tiempo de construcción, aspectos medioambientales y sociales propios del país en el que se realiza el proyecto y sismicidad de la zona (Emiroglu, M. E., Tuna, A., y Arslan, A., en 2.002).

En ocasiones, las distintas tipologías de presas son favorables para alguno de estos aspectos y desfavorables para otros, siendo necesario sopesar las ventajas e inconvenientes en cada uno de ellos para poder justificar de forma robusta la tipología seleccionada.

Al tratarse de un problema de decisión multi-criterio, las metodologías disponibles para abordar este tipo de problemas resultan de gran interés. Una de las metodologías más utilizadas en diversos campos para apoyo a la toma de decisiones multi-criterio es el Método Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy process (AHP).

La aplicación de estos métodos de decisión tiene un peso muy importante a la hora de decidir el tipo de presa que se va a construir debido a la prolongada vida útil que estas infraestructuras tienen, así como el alto coste económico que supone su construcción. En ocasiones, no es necesario realizar este análisis multi-criterio debido a la sencillez de la decisión, es decir, existen ocasiones en el que los condicionantes de la zona exigen solo un tipo de presa posible.

1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO

En este trabajo se examinan los principales factores que afectan a la decisión relativa para determinar la selección óptima del tipo de presa en un proyecto, y se abordará el planteamiento del problema de cómo asignar pesos o coeficientes de ponderación a los mismos utilizando la metodología AHP.

El objetivo del trabajo es examinar los principales factores que afectan a la decisión relativa a la selección del tipo de presa en un proyecto, y abordar el planteamiento del problema utilizando la metodología AHP.

CONCEPTOS GENERALES

Aunque existen numerosas tipologías de presas, en líneas generales podemos clasificarlas en dos grandes grupos: presas de fábrica (de hormigón) y presas de materiales sueltos, siendo estas últimas las más comunes por su versatilidad.

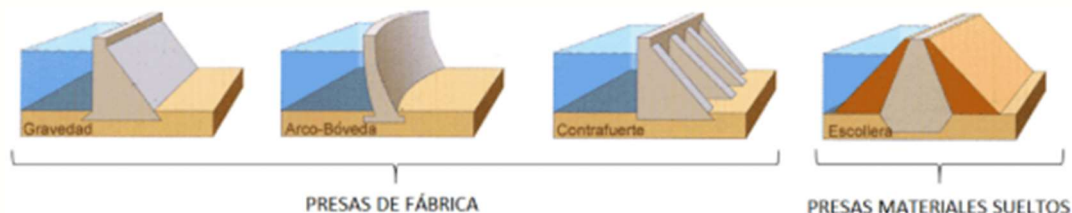


Figura 1 Clasificación general de las distintas tipologías de presas.

En el presente trabajo, tal y como se ha comentado en el apartado “1. Introducción y objetivo del proyecto”, mediante la definición de todos los factores que afectan a una presa se llevará a cabo una metodología basada en una decisión multi-criterio, pero para ello, se precisa

conocer las características de la presa en cuestión (coste, plazo, método de ejecución, materiales empleados, cimientos...).

No obstante, para el presente trabajo se han tenido en cuenta las distintas tipologías de presas:

- Presas de fábrica:
 - PG: Presa de gravedad.
 - RCC: Presa de hormigón compactado con rodillo.
 - BVD: Presa de bóveda.

- Presas de materiales sueltos:
 - CFRD: Presa de escollera con pantalla de hormigón.
 - PMS-H: Presa de materiales sueltos homogénea.

Atendiendo a las tipologías citadas, se define ahora cuáles son sus rasgos más significativos para tener en cuenta a la hora de aplicar los factores adecuados para su valoración final.

Existen muchas más tipologías de presa con múltiples variantes, pero a efectos del presente trabajo el problema se ha limitado a cinco de las tipologías que con más frecuencia suelen aparecer en los proyectos que se realizan en el mundo.

1.3. PRESA DE FÁBRICA: PRESA DE GRAVEDAD

Se tratan de presas relativamente esbeltas en donde el material predominante es el hormigón (aunque antes se construían mediante mampostería).

El mecanismo resistente de este tipo de presas es, principalmente, el rozamiento del cuerpo de presa con el terreno sobre el que apoya debido a su gran peso (resistencia al deslizamiento). Además, para evitar el vuelco, la resultante de los empujes del agua y el peso propio debe estar contenida en la base del cuerpo de presa.

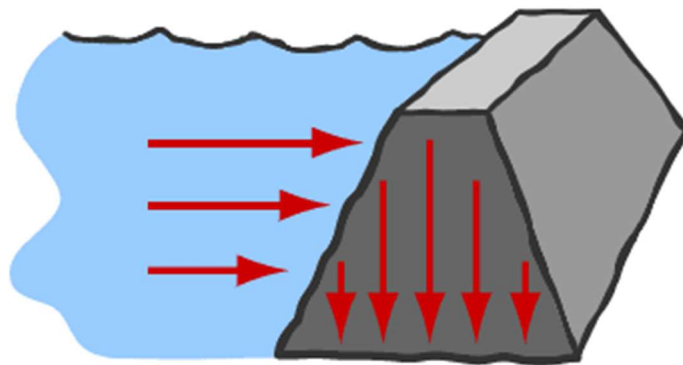


Figura 2. Tensiones que afectan a una presa de gravedad

Se construyen con hormigón en masa prácticamente en su totalidad, armándose únicamente en puntos concretos sometidos a concentraciones de tensiones como las galerías. El hormigón debe trabajar preferentemente a compresión, por lo que las tracciones se deben controlar cuidadosamente, siendo el pie de aguas arriba uno de los puntos más problemáticos.

Se pueden distinguir dos tipologías constructivas. Por un lado, están las presas de fábrica de hormigón vibrado, es decir, convencional. Por otro, están las de hormigón compactado con rodillo (HCR).

Inicialmente, el cuerpo de presa tenía un perfil rectangular con el aliviadero fuera del cuerpo de presa. Posteriormente, y apoyándose en la teoría de Navier (1.826), Sazilly en 1.850 llegó a la conclusión de que el perfil más eficiente era el triangular, ya que proporcionaba mejor relación económica y mayor resistencia (**CASTILLO, L. (2.007): Apuntes de obras y aprovechamientos hidráulicos. TOMOS I y II.** Universidad Politécnica de Cartagena) Posteriormente se comenzó a colocar el aliviadero sobre el cuerpo de presa, aunque el último gran salto constructivo, y gracias al cual se consiguen los mejores resultados, resultó de combinar la sección triangular con una planta curva, mejorando la resistencia del conjunto.

En cuanto a las dimensiones, la anchura de la base suele estar en torno al 80% de la altura de la presa.

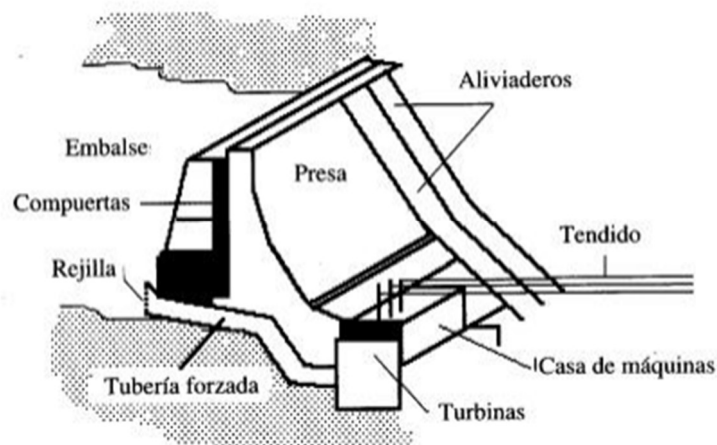


Figura 3. Perfil presa de gravedad

En cuanto al emplazamiento de esta tipología, se adecuan en valles estrechos o medios donde el terreno apto la cimentación esté a poca profundidad respecto a la superficie del terreno, desde que la excavación sea menor de 5 a 10 m. Se acepta desgaste limitado de la roca. Deben chequearse las discontinuidades de la roca con relación al deslizamiento debido a que el deslizamiento tiene gran pesa en esta tipología de presa ya que, un mal estudio de este aspecto puede acarrear desplazamiento en la estructura y, no obstante, terminar en el vuelco de esta. Esta tipología tiene bajos esfuerzos de contacto porque todo el esfuerzo lo adopta la propia estructura de hormigón armado, de ahí que se puedan sustentar por su propio peso.

Para esta tipología en concreto se deben tener en cuenta una serie de consideraciones, las cuales nos ayudarán a elegir correctamente los factores para poder evaluarla debidamente, tal como:

- **Consideraciones topográficas:** La presa debe tener la menor longitud posible, lo cual se logra ubicándola en cañones estrechos. En este caso la presa resultante suele ser de mayor altura para lograr el embalsamiento necesario que si se ubica en valles amplios. Construir las en cañones estrechos dificulta la desviación del cauce para la construcción de las obras resultando que las ataguías y conducciones son más costosas y difíciles de construir.
- **Consideraciones geológicas:** La ubicación de la presa se fija por la necesidad de aprovechar una buena cimentación o estribación. Así mismo, se requiere estabilidad de las laderas del embalse creado.
- **Consideraciones hidrológicas:** La disposición rectilínea de la presa se usa cuando con ella se logra suficiente longitud del vertedero pues da mejor

longitud y menores costos. Es conveniente usar la disposición rectilínea en el caso de presas bajas localizadas en ríos de aguas limpias que no se tema por sedimentos que produzcan islotes de forma que en épocas de estiaje no se logre la derivación del agua (**GUÍA TÉCNICA Nº2: criterios para Proyectos de Presas y sus obras anejas**. Comité Español de Grandes Presas).

- **Consideraciones hidráulicas:** El sitio escogido debe facilitar la desviación del cauce durante la construcción de las obras y la derivación del río durante la operación del proyecto. Si el cauce es navegable, la presa debe tener la longitud suficiente de forma que se pueda ubicar el vertedero y las esclusas.
- **Consideraciones estructurales:** La disposición curva de la presa aumenta la distribución de los esfuerzos hacia los estribos; pero resulta más difícil constructivamente y más costosa (**GUÍA TÉCNICA Nº2: criterios para Proyectos de Presas y sus obras anejas**. Comité Español de Grandes Presas).
- **Consideraciones generales:** Se busca ubicar la presa próxima al sitio de suministro.



Figura 4. Presa de Gravedad.

1.4. PRESAS DE FÁBRICA: PRESA DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO

El hormigón compactado con rodillo es una mezcla de hormigón seca y rígida con bajo contenido de pasta, que se coloca y se compacta usando un rodillo, que suele ser vibratorio de 10 toneladas.

En los 70' comienza a plantearse con fuerza la necesidad de desarrollar un nuevo tipo de presas que combinara la mayor fiabilidad de las presas de hormigón con la eficiencia de los métodos de construcción de las presas de materiales sueltos. Nacen así las presas de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR).

La geometría de las presas de HCR es similar a las de gravedad. Dado que las juntas horizontales en las presas de HCR es entre 6 y 7 veces mayor que en las de gravedad, es conveniente minimizar las tensiones de tracción (**CASTILLO, L. (2.007): Apuntes de Presas y Embalses. Presas de Gravedad de Hormigón Compactado con Rodillo (RCC)**. Universidad Politécnica de Cartagena).

El paramento de aguas arriba es vertical y, en zonas de alta sismicidad, suele ser inclinado. Sin embargo, el paramento de aguas abajo tiene pendiente variable entre 1:0,8 y 1:0,6 y, en zonas de alta sismicidad, el plano inclinado se prolonga hasta el coronamiento. El ancho de la cresta varía entre 4,5 y 9 m.

Las características son similares a la tipología comentado en el apartado anterior, con la salvedad de las distintas características:

- Vertederos
 - Mayor capacidad de disipación si es escalonado, si no, es la misma.
 - Menor costo del cuenco disipador.
 - Mayor velocidad de construcción.
 - Compatibilidad con el método de colocación en cintas de transporte.
 - Menor requerimiento de armadura y anclajes.
 - Construcción simultánea con el cuerpo de presa.
 - Reducción del costo de encofrados.

- Colocación de cintas de transporte:
 - Reducción del número de juntas frías.
 - Aumento en la velocidad de construcción.
 - Reducción del tratamiento de juntas.
 - Reducción del área a ser curada.
 - Anticipación del movimiento de encofrados.

En conclusión, este tipo de presa, con las mismas características que la presa de gravedad, tiene un menor coste y plazo de ejecución. Todo ello debido al proceso constructivo, así como al tratamiento del material para la construcción de esta.



Figura 5. Presa de hormigón compactado con Rodillo. El Val (España)

1.5. PRESAS DE FÁBRICA: PRESA DE BÓVEDA.

Estas presas son estructuras curvas y delgadas. El volumen de hormigón requeridos es mucho menor que para las presas de gravedad, pero la capacidad de la base en cimentaciones y estribos para sostener o resistirse a cargas debe ser de un alto grado (CASTILLO, L. (2.007): *Apuntes de obras y aprovechamientos hidráulicos. TOMOS I y II. Universidad Politécnica de Cartagena*).

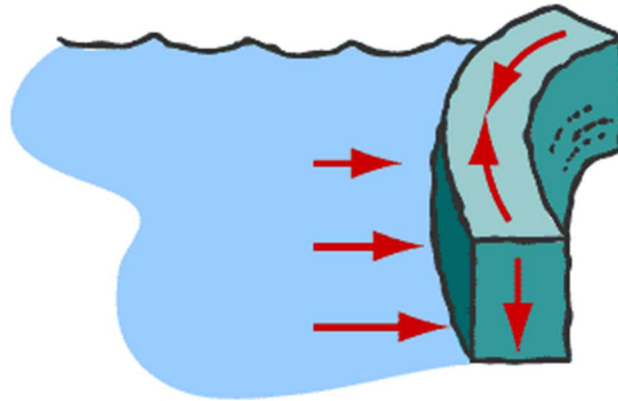


Figura 6. Tensiones producidas en una presa bóveda.

Esta tipología suele construirse en cerradas que se encuentran en macizos rocosos competentes, en cerradas donde la cuerda del arco horizontal principal es menor o igual a 3 veces la altura de coronación, si bien existen bóvedas con ratios superiores, llegando a 6 u 8 veces la altura de coronación.

Dado que es fundamental la transmisión de esfuerzos a todo el cimiento y especialmente a los estribos, es necesario saber la capacidad de estos frente a las cargas que presentan. Es por este motivo por lo que interesa, ante todo, conocer el comportamiento global del macizo rocoso, no el de la roca aisladamente. Es habitual encontrar rocas con resistencias a compresión superiores a los 300-500 kg/cm² con macizos susceptibles de fracturación para tensiones muy inferiores.

Aunque la disposición de este tipo de presa sea curva, debido a la menor cantidad de hormigón a emplear en su sección transversal, las hace menos costosas y con un menor plazo en su proceso de ejecución.

En otro aspecto, aunque no se hayan elegido para el desarrollo del trabajo, existen las presas arco-gravedad en las cuales, a diferencia de las presas de bóveda, el esfuerzo se reparte entre el cimiento y los estribos laterales. Su funcionamiento requiere la inyección de las juntas ora que la transmisión del esfuerzo del empuje hidrostático se transmita por efecto arco hacia los estribos y los cimientos de la presa (lo que se conoce como simple curvatura).

Los taludes de la presa son inferiores que los de una presa de gravedad convencional, rondando los valores cercanos a 0,50 (H/V), aunque se trata de una apreciación que variará mucho dependiendo de las características de la cimentación y del arco descrito.

Un requerimiento específico de este tipo de presas es la capacidad resistente de los estribos y el material de las laderas de las cerradas, por lo que es necesario un terreno de gran capacidad portante, así como en el cimiento interior de la presa.



Figura 7 Presa Arco-gravedad. Hoover (Río Colorado, frontera entre los estados de Arizona y Nevada).

1.6. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS: PRESA DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN

Esta tipología se corresponde con el grupo de “presas de materiales sueltos” con la salvedad de que poseen una pantalla impermeable que se apoya sobre el talud de aguas arriba del cuerpo de presa.

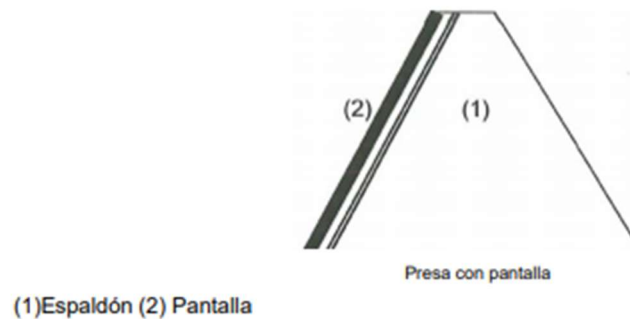


Figura 8. Perfil de presa de escollera con pantalla de hormigón.

Se clasifican en función del material de dicha pantalla: hormigón (presas grandes, medianas y pequeñas), pantalla asfáltica (presas medianas y pequeñas) y pantalla plástica (presas pequeñas).

Este tipo de presas se ubican en valles amplios y no son muy específicas para emplearse en un tipo de cimiento o en otro, de ahí que sean muy utilizadas en la actualidad. El ancho suele ser el triple de la altura de presa.

El coste de este tipo de presas suele ser mucho menor que el coste de las presas de gravedad. Aunque se use una pantalla de hormigón, el empleo de hormigón es mínimo en comparación con las presas de fábrica.

El proceso constructivo suele ser, por lo general, bastante simple, por lo que el plazo de construcción se reduce casi a la mitad de una presa de fábrica convencional (CASTILLO, L.

(2.007): *Apuntes de obras y aprovechamientos hidráulicos. TOMOS I y II.* Universidad Politécnica de Cartagena).



Figura 9. Presa de escollera con pantalla de hormigón

1.7. PRESAS DE MATERIALES SUELTOS: PRESAS HOMOGÉNEAS

Son presas en las que los materiales provistos por la naturaleza no sufren ningún tipo de proceso químico de transformación, siendo tratados y colocados mediante procedimientos de compactación propios de la mecánica de suelos.

En su composición intervienen piedras, gravas, arenas, limos y arcillas, siendo denominadas de escollera cuando más del 50% del material está constituido por piedra y presas de tierra cuando son materiales de granulometría más pequeñas.

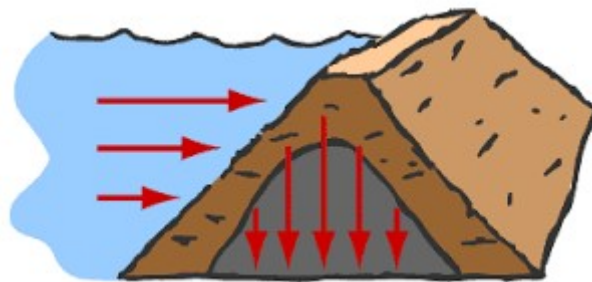


Figura 10. Tensiones soportadas por la presa de materiales sueltos homogénea.

En estas presas son los propios materiales del cuerpo lo que proporcionan la impermeabilidad suficiente para que no existan fugas ni para que el agua no circule a través del paramento.

La característica más importante en este tipo de presas es que se construye íntegramente con materiales procedentes de las proximidades del emplazamiento, de ahí que los plazos de suministros pueden llegar a ser inferiores a otras tipologías y que, por lo tanto, el coste se vea reducido.

Dependiendo de las condiciones, el coste en estas presas es 3 veces menor que el de la presa de gravedad y el plazo del proceso constructivo es casi la mitad a las de las presas de gravedad. Ocurre que esta ventaja puede ser compensada por el coste adicional que supone la construcción de un aliviadero independiente del cuerpo de presa, lo que no ocurre en las presas de fábrica, en las que el dispositivo principal de vertido se encuentra sobre la propia estructura.



Figura 11. Presa de materiales sueltos homogénea

2. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE PRESA

Una vez descritas las distintas tipologías seleccionadas para el desarrollo del presente trabajo, sus características y un breve proceso de ejecución, lo siguiente es conocer los distintos factores que se estudian en el estudio para la correcta elección de presa.

Para ello, se definen a continuación todos los factores necesarios para poder aplicarlos a las tipologías de presa anteriores, así como algunos ejemplos de las presas a las que más suelen afectar los factores.

Se trata de un punto clave puesto que, son estos factores o características los que van a definir la presa a elegir, sea cual sea el caso de estudio.

Aplicando estos factores a los Métodos de Decisión Multi-criterio, como se verá más adelante, cobran una gran importancia debido a que, si se conocen bien los datos reales de los distintos tipos de presa, se tendrá una ponderación muy cercana a la realidad del tipo de presa preferible a construir.

2.1. TOPOGRAFÍA

Las consideraciones topográficas incluyen la configuración superficial del emplazamiento de la presa y de la zona del embalse y la accesibilidad a los materiales de construcción. Es esta característica la que determina, en gran medida, una primera elección de selección de presa. Algunos ejemplos son:

- Si se tiene una curva del río en plano y cambios en la sección transversal del valle, se podría favorecer a una presa de núcleo inclinado aguas arriba en lugar de núcleo central, con el fin de reducir las cantidades de terraplén.

- Sin embargo, los cambios locales en la pendiente de los estribos pueden conducir a asentamiento diferenciales de agrietamiento, lo cual significaría que los drenajes de filtros fueran muy eficientes, por lo tanto, se podría plantear una presa CFRD.
- En el caso de un río estrecho que fluye entre altas paredes rocosas se está favoreciendo a la construcción de una presa de hormigón.
- Por el contrario, en terrenos de llanuras bajas y onduladas, se podría adoptar una presa de terraplén con un aliviadero separado ya que, estos tipos de presas se ha construido sobre muy diversas topografías. No obstante, pueden ser desaconsejables en valles profundos con paredes extremadamente verticales. Estas paredes verticales en el sitio de la presa pueden significar problemas de asentamiento para las presas de materiales sueltos y, es por ello por lo que sería mejor construir una presa de hormigón.
- Para poder optar por la opción de presa arco se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:
 - Relación anchura/altura, que debe ser relativamente pequeña (4 o menos).
 - Hay que tener en cuenta que una presa de estas características es más favorable para una topografía en forma de V que una topografía en forma de U.
 - Además, en un sitio simétrico o casi simétrico es muy favorable para la construcción de una presa de arco.
 - Sin embargo, si el emplazamiento es totalmente asimétrico, una buena opción de presa sería la CFRD.

A continuación, se dan una serie de características que se han de tener en cuenta para la elección de una presa teniendo en cuenta la topografía del emplazamiento:

- Forma de valle:
 - Estrecha en forma de V.
 - Ancho en forma de V.
 - Estrecha en forma de U.
 - Ancho en forma de U.
 - Amplio valle.
 - Valle bastante ancho.
 - Valle de sección irregular.
- Sencillez de construcción de accesos hasta el emplazamiento de la presa.
- Existencia de valles profundos con paredes escarpadas y la dificultad de transportar las tierras hasta el emplazamiento de la presa.
- Posibilidad de transportar el material de terraplén en todos los niveles.
- Cambios en la sección transversal del valle.
- Condición del río plano (curva o llano).
- Cambios locales en la pendiente de los taludes.
- Gradiente de estribos en el valle.
- Ancho del fondo de valle.



Figura 12 Distintos tipos de valle.



2.2. ESTRUCTURA GEOTÉCNICA DEL EMPLAZAMIENTO DE LA PRESA

Este factor se considera de especial importancia ya que las condiciones de los cimientos dependen del carácter geológico y del espesor de los estratos que van a soportar el peso de la presa, su inclinación, permeabilidad y relación con los estratos subyacentes, las fallas existentes y las fisuras.

Es por ello por lo que, el tipo de geología que encontremos en el emplazamiento de la presa es tan importante, debiendo de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tipo de cimentación:
 - Roca.
 - Aluvión.
 - Grava.
 - Limo y arena fina.
 - Arcilla.
 - No uniforme (litologías).
- Estado de la capacidad portante de la cimentación de la roca:
 - Muy buena (> 7 MPa).
 - Buena (4 a 7 MPa).
 - Media (2 a 4 MPa).
 - Baja (1 a 2 MPa).
 - Muy baja (<1 MPa).
- Estado de la capacidad portante de la cimentación del aluvión:
 - Buena (> 600 KPa).
 - Media (200 a 600 KPa).
 - Baja (< 200 KPa).
- Estado de la capacidad portante de la cimentación de la grava:
 - Buena (> 600 KPa).
 - Media (200 a 600 KPa).
 - Baja (< 200 KPa).
- Estado de la capacidad portante de la cimentación de limo o arena fina:
 - Buena (> 300 KPa).
 - Media (100 a 300 KPa).
 - Baja (< 100 KPa).
- Estado de la capacidad portante de la cimentación de la arcilla:
 - Muy buena (300 a 600 KPa).
 - Buena (150 a 300 KPa).
 - Media (75 a 150 KPa).
 - Baja (< 75 KPa).
- Resistencia al cizallamiento de los materiales de cimentación.
- La existencia de fallos de cuña o bloque.
- Condición de necesidad inyecciones en cimentación:
 - Muy elevada (> 400 kg/m).
 - Elevada (100 a 200 kg/m).
 - Moderadamente elevada (50 a 100 kg/m).
 - Moderadamente baja (25 a 50 kg/m).
 - Baja (12.5 a 25 kg/m).
 - Muy baja (0 a 12.5 kg/m).
- Módulo de elasticidad de la cimentación rocosa:
 - Buena (> 3.40 GPa).
 - Media (2 a 3.40 GPa).



- Baja (1 a 2 GPa).
- Muy baja (< 1 GPa).
- Existencia de roca intensamente erosionada en los niveles más altos de la presa.
- Estado de la permeabilidad de la cimentación.
- Estabilidad de los taludes.
- Seguridad de los estribos del valle.
- Presencia de inestabilidad en el estribo izquierdo o derecho debido a los bloques de cuña triangular que se buzcan bruscamente hacia el río.
- Existencia de patrones de unión en un talud (su inclinación, orientación y relleno de arcilla o limo, etc.).
- Existencia de roca muy fracturada en los estribos.
- Presencia de deformación diferencial de la cimentación a lo largo del eje de la presa.
- Profundidad del lecho rocoso bajo el canal del arroyo.
- Posibles zonas de deslizamiento o desprendimientos de roca en el emplazamiento de la presa.
- Compresibilidad de la cimentación.
- El gradiente hidráulico mostrará si existen filtraciones bajo la presa. Si existen filtraciones bajo la presa el riesgo de que se produzca subpresión es mayor que si no existen filtraciones.
- Asociación entre la altura de la presa y la profundidad del aluvión:
 - Profundidad del aluvión más que la altura de presa.
 - Profundidad del aluvión aproximadamente cerca de la altura de presa.
 - Profundidad del aluvión aproximadamente la mitad de la altura de presa.
 - Profundidad del aluvión muy inferior a la mitad de la altura de presa.
- Estado de la densidad relativa de los cimientos de arena y grava:
 - Poco denso (0 a 15).
 - Denso (15 a 35).
 - Medio denso (35 a 65).
 - Denso (65 a 85).
 - Muy denso (85 a 100).

2.3. DISPONIBILIDAD DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Este factor es muy importante dependiendo del tipo de presa que se está estudiando. Si se estudia una presa de gravedad, está claro que el hormigón es material predominante, así como el acero para las armaduras, por lo que hay que tener en cuenta la disponibilidad de este material y su cercanía a la presa ya que, si la distancia es muy grande, el coste se disparará pudiendo incluso, tener que tomar la decisión de la ejecución de otro tipo de presa.

Un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente bien podría ser el siguiente: atendiendo a todos los factores considerados para la elección del tipo de presa, se ha elegido que la tipología óptima ha sido la presa de gravedad. Una vez se sabe qué tipo de presa se tiene, lo siguiente es valorar todos los aspectos posibles para la correcta ejecución de esta y, un factor a tener en cuenta es la disponibilidad de materiales de construcción. Los materiales más predominantes de esta tipología elegida es hormigón y acero para las armaduras, pero, el proveedor más cercano de hormigón se encuentra a 76 km de distancia y el proveedor más cercano de acero se encuentra a una distancia de 58 km. Sin embargo, otra tipología que se podría construir en la misma cerrada sería una presa de materiales sueltos homogénea, en la que el material predominante, en este caso es la arena, en donde el proveedor más cercano se

encuentra a tan solo 12 km de distancia. No obstante, no solo se reduciría el plazo de ejecución de esta, sino que el coste final de la infraestructura sería considerablemente menor.

Por lo tanto, en el ejemplo anterior se tiene que la presa elegida para su construcción es la presa de materiales sueltos homogénea debido a la cercanía de este material a la obra.

No obstante, con este claro ejemplo se observa la importancia que tiene a la hora de su ejecución este factor. También hay que tener en cuenta los plazos de entrega del suministro a la obra, así como el material disponible que tiene el proveedor más cercano porque, puede pasar que, aunque el proveedor sólo esté a 12 km de distancia, no tenga material suficiente para abastecer toda la obra por lo que, en ese caso, se tendría que hacer un estudio de viabilidad atendiendo solamente a los materiales disponibles y cercanía de suministradores.

Este factor es muy importante debido a que la selección del tipo de presa, en su mayor medida, dependerá de la economía.

Algunos ejemplos de lo mencionado anteriormente podrían ser:

- El suministro de un talud de un solo material apunta a la utilización de una presa homogénea.
- Cantidades suficientes de materiales impermeables conducen al uso de presas zonificadas.
- Si el suministro local de áridos no es adecuado o la distancia a la que debe transportarse el cemento desde el origen es larga, no se debe seleccionar una presa de gravedad, sino que lo óptimo en cuanto a economía se refiere, sería una presa CFRD.

No obstante, las características que se tendrán en cuenta en lo relativo a disponibilidad de materiales de construcción serán los enumerados a continuación:

- Las distancias de transporte y los costes de transporte de los materiales adecuados hasta el emplazamiento de la presa.
- La disponibilidad de un relleno de tierra adecuado dentro de una distancia de transporte económica.
- Cantidad y calidad de los materiales disponibles.
- La uniformidad del relleno de tierra disponible.
- La existencia de material en capa fina normal y despojo muy grande de terreno adecuado o de espesor adecuado.
- Nivel de agua subterránea del área de préstamo.
- Usabilidad del material excavado en la presa.
- Las cantidades y propiedades de los materiales de la excavación necesaria para el aliviadero, la zanja de cimentación, las obras de desagüe y otras estructuras anexas.
- Suministro de materiales.
- Costo de la expropiación del material en el área de préstamo.
- Suelos para terraplenes:
 - Cemento Portland.
 - Ceniza volante.
 - Finos de tierra.
 - Arcilla calcinada.
 - Finos de piedra caliza.
 - Escorias molidas granuladas de alto horno.



2.4. TAMAÑO Y UBICACIÓN DEL ALIVIADERO.

El aliviadero es un elemento vital para la seguridad de una presa debido a los siguientes aspectos:

- Garantiza la seguridad de la infraestructura al no permitir la elevación del nivel, aguas arriba, por encima del nivel máximo.
- Garantiza un nivel con poca variación aguas arriba.
- Disipar la energía para que la devolución al cauce natural no produzca daños. Esto se hace mediante saltos hidráulicos, trampolines o cuencos de disipación.

Es por ello por lo que sus características (tamaño, tipo y ubicación) serán factores determinantes en la elección del tipo de presa. Repercute tanto que, por ejemplo, la construcción del aliviadero para una presa de gran tamaño se llevaría consigo una parte considerable del coste total del proyecto.

Por eso es necesario, en la medida de lo posible, construir dichos aliviaderos en una sola estructura junto con el cuerpo de presa, siendo entonces lo óptimo una presa de hormigón, ahorrando una gran cantidad de recursos. Por otro lado, si las condiciones topográficas o los requisitos de capacidad del aliviadero son tales que el aliviadero no se puede ubicar lejos de la presa se puede proporcionar un aliviadero sobre el propio cuerpo de presa.

Las consideraciones a tener en cuenta en cuanto al tamaño y ubicación del aliviadero serán:

- Magnitudes de las inundaciones a ser evitadas.
- La presencia o ausencia de sitios adecuados para el vertedero.
- La presencia de un aliviadero de gran tamaño requerirá un tiempo importante a tener en cuenta en el plazo de ejecución de la presa.
- La existencia de estribos inestables para la excavación.

2.5. COSTE

Después de la seguridad y el cumplimiento del propósito para el que se diseña el proyecto, el coste suele ser el factor más importante en la selección del tipo de presa. Aunque hay que tener en cuenta que la opción más barata no siempre es la óptima, ya que hay que barajar varios factores más, como veremos a lo largo de este trabajo (*SORIANO, P. (2.012): Economía en las grandes infraestructuras. Universidad Politécnica de Cartagena*)

2.6. MEDIO AMBIENTE Y OPINIÓN PÚBLICA

Las consideraciones medioambientales tienen una gran importancia en el diseño de las presas ya que, estos factores pueden tener una gran influencia en el tipo de presa que se construye. La principal influencia de las leyes y reglamentos ambientales en la selección de un tipo específico de presa es la necesidad de considerar la máxima protección del medio ambiente que puede afectar al tipo de presa, sus dimensiones, su ubicación, la ubicación del aliviadero y las instalaciones anexas.

Además, no hay que olvidar que durante la construcción de una presa se producen modificaciones, tales como:

- **Campamento de obras y viviendas para los obreros.** Generalmente las presas se construyen en lugares bastante apartados, de manera que el traslado diario de los obreros puede ser un problema que induce a la empresa constructora de la presa a construir una villa para alojarlos en las proximidades de la obra. Considerando que el número de obreros puede alcanzar varios cientos, el campamento provisional, con una vida útil de 5 a 6 años debe ser planificado



adecuadamente, considerando todos los servicios básicos. El impacto ambiental del campamento debe ser estudiado en detalle, a fin de analizar las medidas de mitigación de dichos impactos.

Con relación a las villas para los trabajadores, existen dos posiciones antagónicas, la primera considera la construcción de un pequeño pueblo, fuera del área de inundación del lago para ser utilizada en forma permanente, primero por los obreros y luego por la población local que debe ser rasanteada; la segunda corriente, más reciente que la anterior, considera la construcción de la villa de los trabajadores en una cota inferior a la cota del embalse, de manera que esta será totalmente destruida al llenarse el embalse.

Las dos concepciones tienen ventajas e inconvenientes. La decisión debe ser tomada consultando las autoridades locales y tomando en cuenta los planes de desarrollo locales y regionales.

- **Parque de estacionamiento y mantenimiento de la maquinaria pesada.** Esta área es crítica, pues en este lugar se pueden producir vertimientos de aceite lubricante que pueden contaminar el suelo si no se toman las debidas precauciones. De ninguna manera, deben dejarse depósitos de aceites servidos en áreas que han de ser inundada, pues estas llegarán a contaminar las aguas.
- **Canteras.** Las canteras de material térreo, piedra, o arena, eventualmente se encuentran alejadas del lugar de construcción. Sin embargo, debe darse prioridad a las canteras que se encuentran más cercanas.

2.7. LA CONDICIÓN ECONÓMICA DEL PAÍS

La cantidad de producción de cemento, puzolana y acero, paralelamente al desarrollo industrial de un país, puede ser efectiva en la selección del tipo de presa. Por ejemplo, si hay una falta de acero no se debería seleccionar la presa de gravedad, tal y como se menciona anteriormente. Algunos factores a tener en cuenta son:

- El suministro de materiales manufacturados como cemento, acero, asfalto en el país...
- La posibilidad de la aplicación de nuevas tecnologías por parte de los contratistas en el país.

2.8. CLIMA Y TIEMPO DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN

El diseño de una presa se ve claramente afectado por el clima del lugar. Es difícil construir terraplenes de tierras durante el tiempo húmedo o temperaturas bajo cero. En estos casos es ventajoso adoptar tipologías como las presas CFRD o ICRD. En zonas muy áridas puede haber escasez de agua para la construcción, por lo tanto, se favorece al CFRD más que a la presa de tierra.

En un clima con estaciones húmedas y secas bien definidas es factible construir una presa de tierra, aunque sólo se podría en las estaciones secas. Sin embargo, si se tiene un clima con más estaciones húmedas que secas sería factible construir una presa de materiales sueltos con escollera, ya que el agua no afecta al volumen de la roca, al contrario que pasa con la tierra.

No obstante, también es muy importante conocer la precipitación media anual:

- Excesivamente húmeda (> 1.000 mm).
- Húmeda (500 a 1.000 mm).
- Semiárida (200 a 500 mm).
- Árida (< 200 mm).

2.9. FALTA DE DISPONIBILIDAD DE PERSONAL AUXILIAR CAPACITADO

Existen muchos lugares donde no se encuentran disponibles ni contratistas ni mano de obra para la construcción de la presa que se había planteado inicialmente, por lo tanto, el tipo de presa idónea para estos casos puede ser una presa de terraplén o una presa de gravedad, las cuales no necesitan ni hormigones de muy alta calidad ni encofrados especiales.

Hay que tener en cuenta que este factor, a medida que pasan los años, es más importante debido a la falta de personal especializado en tareas como carpintería metálica, carpintería de madera, encofrados especiales, entre otros.

Es por ello por lo que este factor cobra una importancia crítica a la hora de la elección de una presa.

2.10. SISMICIDAD

Aunque ha habido fallos catastróficos de diversas presas a lo largo de la historia, muy pocos de éstos se han debido a la sismicidad. Por su relevancia, son destacables los daños causados por sismicidad en la presa de Koyna, cerca de Poona (India), en 1.967, y en la presa de Hsinfengkiang, cerca de Cantón (República Popular de China), en 1.962. Estas dos presas indicaron que las presas de gravedad no son inmunes a los daños causados por terremotos, como se suponía hasta entonces.



Figura 13. Presa de Koyna (india) a la izquierda y Presa de Koyna (india) después del terremoto a la derecha.

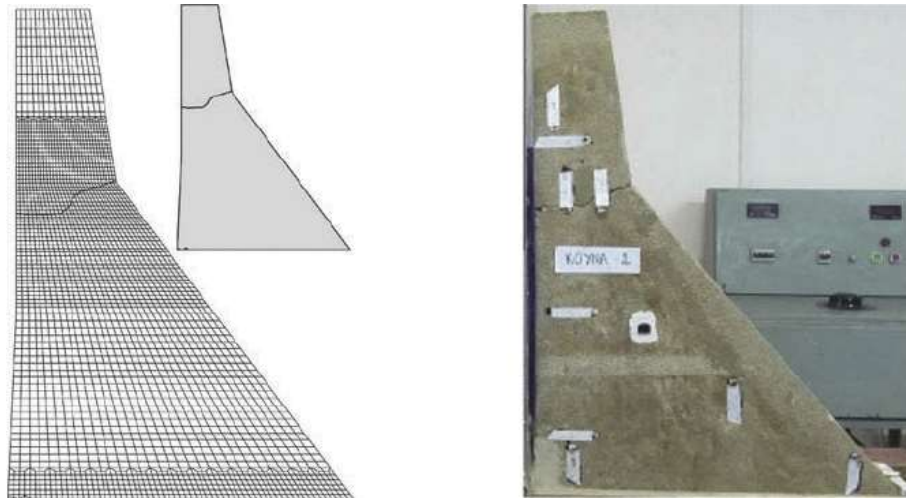


Figura 14. Perfil de la presa de Koyna. Zona de afectación después del sismo

En la presa de Koyna, lo que hizo el terremoto fue abrir una grieta sub-horizontal en la zona de conexión de la parte superior de la presa, más esbelta, con la anterior.

Debido a que son muchas las personas que viven aguas abajo de estas grandes infraestructuras se sugieren que se tenga un especial cuidado con la elección del tipo de presa para evitar problemas causados por sismos.

2.11. ALTURA DE PRESA

La altura de presa es uno de los factores más importantes a la hora de la elección del tipo de presa. Por ejemplo, el relleno de tierra con desagüe se ha utilizado en el pasado para presas grandes, pero debe limitarse a presas bajas (< 10 m) en lugares de baja peligrosidad.

A continuación, se señalan los tipos de presas con la altura idónea de cada una de ellas:

- Presa de tierra homogénea, menos de 5 m.
- Relleno de tierra con dren, menos de 10.
- Presa de tierra zonificada, menos de 20 m.
- Presa de tierras con dren horizontal, menos de 10 m.
- Presa de tierras con drenaje vertical y horizontal, menos de 50 m.
- Presa de escollera con núcleo central, entre 15 y 20 m.
- Presa de tierras con espaldones de arenas y gravas y núcleo central, menos de 140 m.
- Presa de escollera con núcleo inclinado, entre 15 y 20 m.
- Presa de escollera con pantalla de hormigón (CFRD), más de 20 m.
- Presa de tierras con diafragma de hormigón, menos de 30 m.
- Presa de hormigón compactado con rodillo RCC, muy alta o baja.
- Presa RCC, muy alta o baja.
- Presa simétrica de tipo "Hardfil" (material tipo suelo-cemento) (FSDH), muy alta o baja.

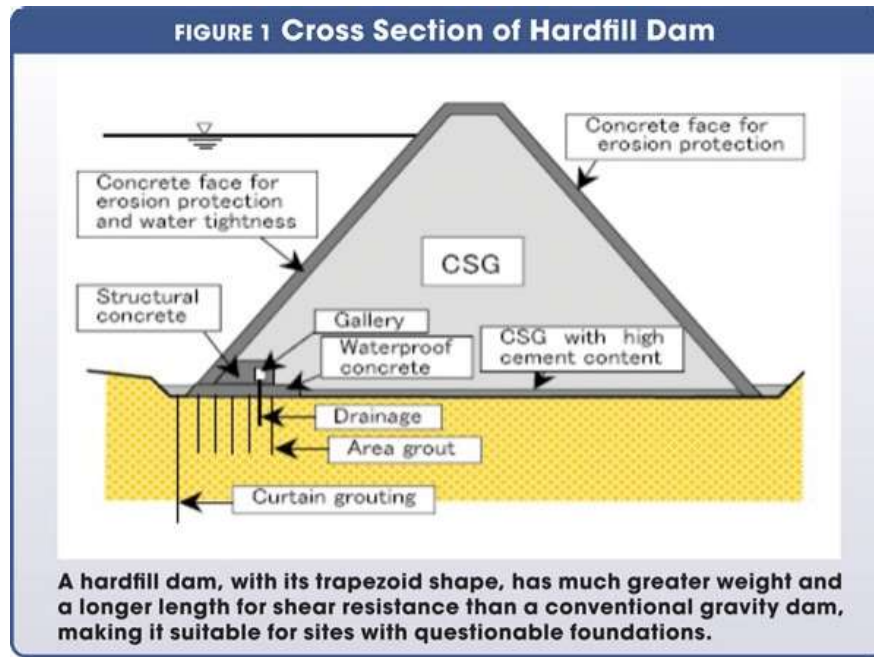


Figura 15. Sección de presa Hardfill

- Presa de gravedad de hormigón convencional, muy alta o baja.
- Presa de bóveda (arco de doble curvatura), alta o muy baja.
- Presa de arco delgado, muy alta o baja.
- Presa de arcos múltiple, muy alta o baja.
- Presa de contrafuertes, muy alta o baja.

2.12. FUNCIÓN DEL EMBALSE

La función del embalse determina en parte la pérdida tolerable de agua debido a las fugas a través y debajo de la presa. También determina el hidrograma de avenida que influye en la estabilidad de la presa. En algunos embalses el nivel del agua nunca se baja y la pendiente aguas arriba nunca está sujeta a condiciones de “descenso rápido”. En el otro extremo, los embalses de algunas instalaciones hidroeléctricas se mantienen llenos durante largos períodos de tiempo y luego se bajan en un tramo de unas pocas horas para obtener la potencia de “pico”.

La condición de fluctuación del embalse corresponde a:

- $> 1 - 2$ m/hora.
- $0,5 - 1$ m/hora.
- $0,125 - 0,5$ m/hora.
- $0,060 - 0,125$ m/hora.
- $0,015 - 0,060$ m/hora.
- $0,0125 - 0,015$ m/hora.
- $< 0,0125$ m/hora.



2.13. RAPIDEZ DE CONSTRUCCIÓN

El tratamiento de los cimientos y los detalles de zonificación también pueden estar influenciados por el tiempo disponible para la construcción. Una presa de CFRD puede construirse en menos tiempo si se sigue colocando relleno de escollera en la estación húmeda. El alto rendimiento de colocación del RCC tiene muchas ventajas; por ejemplo, puede permitir la construcción de una presa relativamente alta en una estación seca, y así reducir las necesidades de las obras de desvío.

CONDICIÓN DE CONSTRUCCIÓN POR ETAPAS

A menudo es más económico construir una presa en dos o más etapas. En los proyectos de suministro de agua, riego o energía hidroeléctrica, la demanda en los primeros años puede satisfacerse con una presa más baja y un menor almacenamiento.

2.14. CONOCIMIENTO Y DECISIÓN DE LOS INGENIEROS

La seguridad, la viabilidad de construcción, la adaptabilidad de las características del tipo, el costo y las condiciones existentes, como el clima, la geología, la disponibilidad de materiales y la topografía se evalúan a fondo para ayudar a elegir el tipo óptimo de presa. Sin embargo, excepto en los raros casos en los que las condiciones del lugar excluyen la consideración de más de un tipo de presa, la elección depende en cierta medida de las preferencias que reflejan el juicio u la experiencia del proyectista.

2.15. USO PREVISTO DEL AGUA EN EL EMBALSE Y RELACIÓN COSTE-BENEFICIO

La consideración de la finalidad de una presa a menudo sugiere el tipo más adecuado, pudiendo ser destinado a actividades acuáticas como pesca, piragüismo..., a la generación de energía eléctrica, entre otros.

Existen pocos emplazamientos donde no se pueda construir una presa segura y utilizable. Pero en muchos casos, las condiciones inherentes al sitio hacen que el costo del proyecto supere los beneficios esperados. Los resultados de la búsqueda de emplazamientos deseables para la construcción de presas a menudo determinan si un proyecto puede ser construido a un costo compatible con los beneficios que se derivan de él.

Este factor cobra una mayor importancia cuando la finalidad del embalse sea para uso recreativo, esto bien puede ser la práctica de piragüismo. En este caso, se tendrá que estudiar con mucha precisión los niveles de máxima avenida y qué período de retorno las definen.

2.16. CONTRATOS, NORMAS Y DECISIONES CONSERVADORAS PARA CADA PAÍS

Los diseños conservadores pueden ser aconsejables para presas en lugares del mundo donde no se dispone de contratistas y personal de supervisión con experiencia. Incluso en los Estados Unidos, las presas de tierra construidas por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos, justo después de la Segunda Guerra Mundial, cuando no se habían construido presas durante un largo período, tenían taludes algo más planas de lo normal porque se temía que el personal no tuviera habilidad necesaria para producir terraplenes de alta calidad.

2.17. SENCILLEZ DEL DESVÍO DEL RÍO

Este factor es uno de los factores más influyentes a la hora de la construcción de una presa ya que, un desvío del río sencillo abaratará los costes de la infraestructura, así como la sencillez del propio desvío, el cual supondrá un menor plazo de construcción. Por el contrario, se tiene un desvío complejo, el cual encarecerá los costes y aumentará el plazo de construcción.

Para un mayor entendimiento de este factor, debido a su importancia, se exponen a continuación distintos casos de estudio de presas construidas en España y la resolución del desvío.

En primer lugar, se tiene la Presa de Andévalo (Huelva, España). Esta presa se encuentra ubicada en un emplazamiento muy peculiar debido al hecho de que la misma presa cierra dos valles de ríos, Malagón y Cobica, justo en la zona de entrada de ambos ríos a la cola del embalse del Chanza.



Figura 16. Embalse de Chanza (Huelva, España)

La presa de Andévalo es una presa de escollera con núcleo impermeable de arcilla con una altura sobre el cimiento de 1.830 m. Debido a estas características, el desvío del río tuvo que ser diferente al que normalmente se plantea, ya que la presa se construyó en dos etapas principales, las cuales se muestran en la figura 17.

Se desviaron ambos ríos alternativamente por el vallo de cada uno de ellos mientras se construía la presa en el otro valle. Para permitir esto, fue necesario conectar los valles de los dos ríos aguas arriba de la presa por medio de un canal de interconexión, en un punto donde los dos ríos forman unos meandros opuestos que dejan sus cauces a tan solo 200 m.

Las obras del desvío del río para la Primera Etapa, desvío a través del valle de Cobica, incluían la excavación del canal que conectaba ambos cauces, canal de 50 m de anchura y 150 m de longitud, y también la ataguía y contraataguía de materiales sueltos zonificadas en el río Malagón, de 21 y 15m, respectivamente.

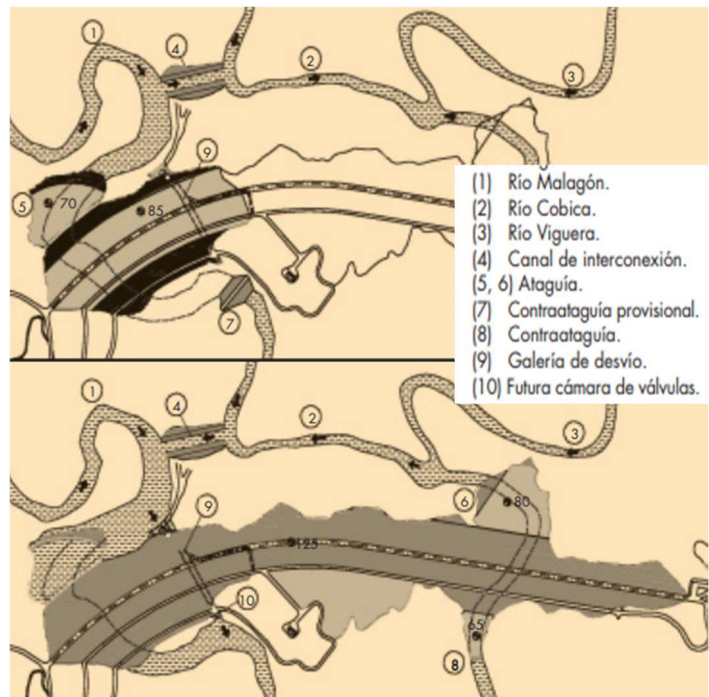


Figura 17. Etapas de construcción de la presa de Andévalo

Respecto a la Segunda Etapa, desvío a través del valle del Malagón, las principales obras de desvío incluían la construcción de un falso túnel de hormigón, con una sección transversal de 8 m de anchura y 6,21 m de altura y 230 m de longitud, ubicada en la ladera izquierda del valle del Malagón. Adicionalmente, se construyeron sendas ataguías de materiales sueltos zonificadas en el río Cobica, de 25 m de altura la ataguía y 10 m la contraataguía, con objeto de desviar el río Cobica al valle del Malagón, y ambos ríos a través de la galería de desvío.

Como ambos ríos estaban inundados por el embalse del Chanza en el momento de ser realizadas las ataguías, estas tuvieron que ser construidas vertiendo escollera progresando de una margen del río hacia la opuesta, y posteriormente fueron impermeabilizadas empleando diferentes técnicas apropiadas de colocación de arcilla. En el caso de las ataguías del Malagón se excavó una zanja en el relleno de escollera, utilizando una retroexcavadora, y dicha zanja se rellenó con arcilla. En cuanto a las ataguías del Cobica, en la zona correspondiente a cada espaldón de ambas se construyeron dos rellenos de escollera para, posteriormente, verte arcilla empujándola por delante de los paramentos exteriores y cayendo la arcilla dentro del agua. Contando con esta impermeabilización exterior, se bombeó el agua del recinto entre los rellenos de escollera, se excavó la cimentación del núcleo impermeable, y se comenzó el relleno de dicho núcleo colocando y compactando capas de arcillas en ausencia de agua.

Por otro lado, se tiene la presa de La Breña II (Córdoba, España). Esta presa de HCR tenía una dificultad extra al encontrarse a tan solo 100 m de la presa de La Breña I. Esta infraestructura (La Breña II) es una presa HCR, de gravedad de panta recta y 124 m de altura, sobre el río Guadiato, la mayor presa de HCR de Europa, actualmente.

Debido a lo anteriormente mencionado, el desvío del río tuvo que ser proyectado para cumplir dos objetivos fundamentales:

- Proteger las obras durante la construcción.
- Garantizar los requerimientos de agua ayuso.

Lo último viene fijado por un caudal de 15 m³/s que es turbinado continuamente en la minicentral hidroeléctrica ubicada aguas debajo de la presa, y que posteriormente es devuelta al cauce del río Guadiato.

Este caudal es también necesario para mantener un flujo de agua permanente en el tramo del río aguas abajo de la presa de La Breña I, hasta su confluencia con el río Guadalquivir, del cual el Guadiato es afluente.

Al combinar los objetivos antes citados con los condicionantes a la construcción motivados por la proximidad de las presas nueva y vieja, se decidió proyectar un doble desvío del río. Estos fueron llamados, respetivamente, desvío para caudales extraordinarios (desvío principal) y desvío para caudales ordinarios.

Las obras de desvío del río para el desvío principal consistieron en una galería de 6 m de ancho por 5 m de alto y 86,5 m de longitud, en un bloque de hormigón ubicado en la ladera derecha, alineada con el aliviadero de la presa Breña I. Este bloque de hormigón será parte del cuerpo de presa de La Breña II. Al final de la obra la galería será taponada en su extremo aguas arriba, y entonces será reconvertida en el principal acceso a la cámara de compuertas de la presa. Por el lado de aguas arriba la galería está conectada, por medio de las correspondientes obras de hormigón, con el aliviadero de la presa Breña I. La rápida de este aliviadero actuará como canal de alimentación de la galería de desvío, y la presa Breña I actuará de ataguía. En el lado de aguas abajo será excavado el canal de salida de 27 m de longitud, y se construirá una contrataguía de materiales sueltos zonificada.

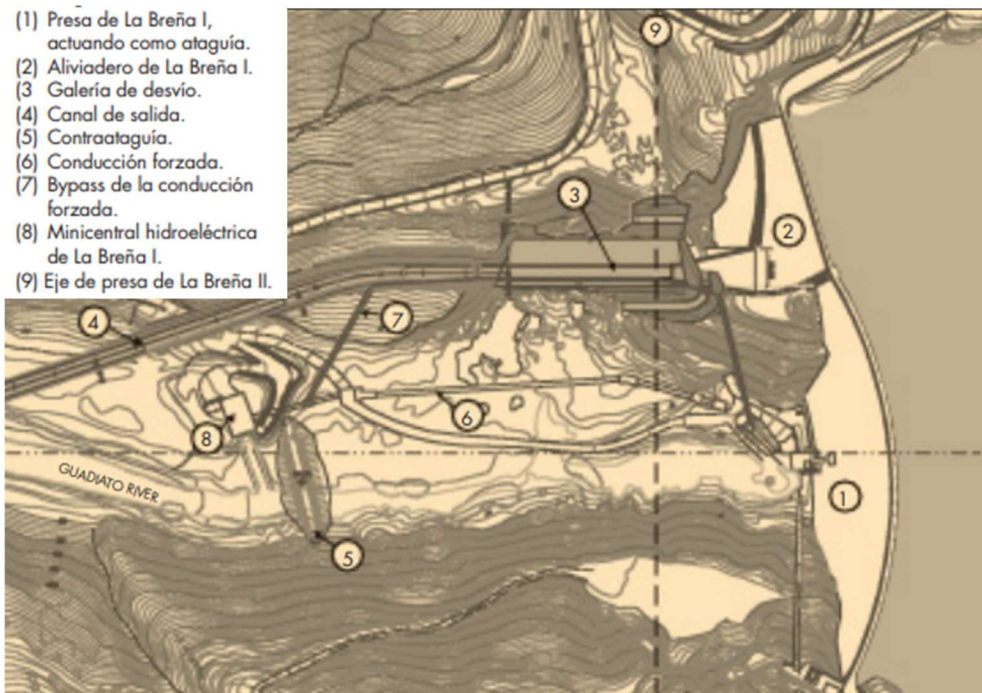


Figura 18. Presa Breña II

El desvío para caudales ordinarios consistirá en un bypass de la tubería forzada de 2 m de diámetro que conecta el pie de aguas debajo de la presa Breña I con la minicentral hidroeléctrica. Este bypass será emplazado en la parte baja del mismo bloque de hormigón a construir para el desvío principal. De este modo, la parte inferior de la cerrada quedará libre de obstáculos para proceder con la excavación del cimiento de la presa en esta zona. La longitud del bypass de la tubería fue de 270 m.

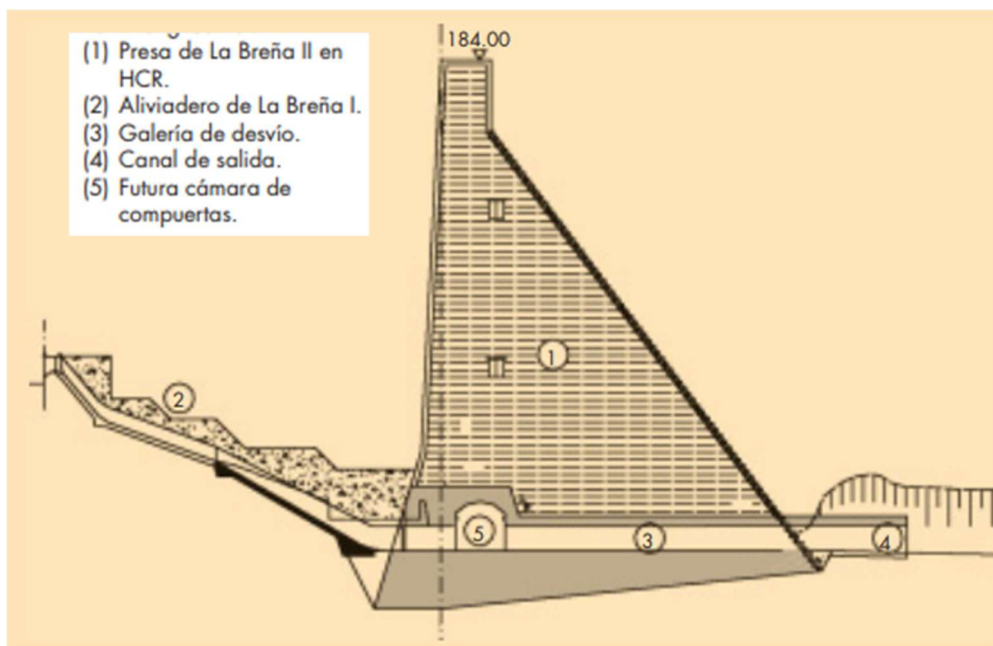


Figura 19. Perfil presa Breña II



No obstante, a la hora de plantear la solución más adecuada para el desvío del río con el fin de la construcción de la presa, los ingenieros deberán tener muy en cuenta los problemas específicos de cada caso en particular, tal y como muestran los casos de estudio mencionados

2.18. SEGURIDAD

La seguridad, por supuesto, es la primera consideración. La consideración de los distintos tipos de factores que se describen a menudo reducirá considerablemente el número de tipos posibles entre los cuales elegir.

Se puede definir la seguridad como el “margen que separaría las condiciones reales que existen en la presa construida de las que llevan a su destrucción o deterioro” (Soriano y Sánchez, 1.997).

Dada la complejidad que presenta el análisis de la seguridad de presa se debe recurrir a evaluarla por medio de índices parciales, que sirvan para la cuantificación aislada de una parcela de seguridad, inspirados en la experiencia y el entendimiento de accidentes históricos.

La evaluación de la seguridad hidrológico-hidráulica, parte de la revisión del Archivo Técnico de la presa, para determinar (Soriano y Escuder, 2.008):

- La clasificación de riesgo potencial de la presa.
- Los procedimientos utilizados para determinar las avenidas de diseño.
- Los procedimientos operativos en caso de avenida.
- La capacidad de evacuación de las estructuras hidráulicas, así como la accesibilidad a sus mecanismos de control cuando se presentan los episodios extremos.
- Las características de la cimentación del aliviadero y de la estabilidad de las laderas colindantes.
- La operatividad de los desagües de fondo.
- Los registros históricos de funcionamiento.

2.19. PROBABLE ACCIÓN DE LAS OLAS

Una presa de tierra debe ser protegida de los daños causados por la acción erosiva de las olas que golpean en la pendiente aguas arriba. La severidad de la acción de las olas y la cantidad de protección necesaria para el terraplén están relacionadas con la longitud de la superficie del embalse sobre la cual actúa la velocidad del viento del lugar.

2.20. PROBABLE ACCIÓN DEL HIELO.

La carga de hielo suele ser importante sólo para presas pequeñas. La carga de hielo puede ser importante en circunstancias en las que se forman capas de hielo de grosores apreciables y persisten durante periodos prolongados. En tales situaciones, la presión del hielo puede generar un empuje horizontal considerable cerca del nivel de la cresta. La presión ejercida sobre la presa es una compleja fusión de la capa de hielo y la temperatura, debido a que bajarían las temperaturas de tal forma que puede ser una agente limitante en el hormigón (en el caso de una presa de gravedad). Conforme pase el tiempo, esta capa de hielo se derretirá y esto puede originar un problema de filtraciones en el cuerpo de presa.

2.21. EXCAVACIÓN DE CIMIENTOS

Las consideraciones económicas dictan que el volumen de excavación debe ser el mínimo posible, con el fin de evitar sobrecostes. Además, para considerar este factor correctamente hay que tener en cuenta, a su vez, varios como la forma de la cerrada y si la excavación se produce en roca o en tierra. En el caso de que la excavación se produzca en roca aumentarán los costes debido a la maquinaria a utilizar y, en su caso, al empleo de explosivos.



2.22. ESTRUCTURAS DE TOMA DE AGUA.

En algunos casos, se es necesario la construcción de estructuras de toma de agua, bien podría ser la toma de desagüe, que atraviesen el cuerpo de presa con el fin de liberar tensiones aguas arriba. Es por este motivo por lo que hace a este factor tan importante, porque un exceso de tensiones en el cuerpo de presa podría significar el fallo de la estructura y, por lo tanto, provocar la destrucción de esta.

2.23. DESCARGA DEL RÍO

Los valles estrechos, los buenos cimientos y los grandes caudales de los ríos tienden a favorecer la selección de presa de hormigón, mientras que los valles anchos, los cimientos pobres y los pequeños caudales de los arroyos tienden a favorecer las presas de tierras.

El caudal máximo de diseño:

- Muy grande ($> 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Grande (7.500 a $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Medio (2.000 a $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Pequeño (500 a $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Muy pequeño ($< 500 \text{ m}^3/\text{s}$).

2.24. LOS EFECTOS DEL AGUA EN LAS PRESAS

El agua del embalse puede incluir los productos químicos disueltos (por ejemplo, ácidos) que pueden ser perjudiciales para el hormigón. Por lo que, en la mayoría de las presas se tienen medidas de control de calidad del agua del embalse por horas, con el fin de controlar el estado químico del agua que almacena. En este caso influye en la selección del tipo de presa.

2.25. LA DIFERENCIA DE NIVEL DE AGUA ENTRE AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO

La diferencia de agua entre aguas arriba y aguas abajo es importante para la presa de gravedad de hormigón. La mayoría de los materiales de cimentación son aceptables para la consideración de una presa de gravedad de menos de 15 m de altura y con una diferencia de menos de 6 m entre la cabecera y la cola.

2.26. EFECTOS DE LA FUERZA DE SUBPRESIÓN BAJO LA PRESA

La subpresión es un factor importante en la presa de gravedad. Las presas de contrafuertes tienen una ventaja sobre las presas de gravedad sólidas en los que respecta a las presiones de elevación. La subpresión en la base de la presa se alivia entre los contrafuertes y la pequeña subpresión restante en los contrafuertes no afecta materialmente la estabilidad de la estructura.

2.27. PELIGRO DE GUERRA Y SABOTAJE

En los sitios de presas donde hay peligro de guerra y sabotaje se eligen los tipos de presas más resistentes. Por ejemplo, las presas de contrafuertes están más expuestas a daños o destrucción por sabotaje a ataque militar que las presas masivas. Debido a la delgadez de sus miembros, son sensibles incluso aun deterioro moderado de hormigón, por lo tanto, deben ser construidos con cuidado y se deben tener en cuenta cuidadosamente las condiciones de exposición inusuales.



2.28. FALTA DE AGUA PARA LA CONSTRUCCIÓN

En climas secos donde la falta de agua puede impedir el uso de material del núcleo de tierra se puede utilizar una presa de escollera con pantalla de hormigón.

2.29. ESTÉTICA

La estética no suele influir en la selección del tipo de presa. Después de hacer elección, se hace todo lo posible para conseguir una estética agradable.

2.30. TIPOS DE CIMIENTOS

A continuación, se exponen los tipos de cimientos donde se suelen construir los distintos tipos de presas:

- **Cimiento roca:** un cimiento de roca fuerte y de baja permeabilidad es adecuado para cualquier tipo de construcción de presas, pero puede favorecer la construcción de una presa CFRD o RCC. La economía de los materiales o el coste total debería ser el factor determinante. La remoción de la roca desintegrada junto con el sellado de juntas y fracturas por medio de lechada es frecuentemente necesaria. Los cimientos de piedra caliza kárstica son un caso especial, en el que puede ser necesario realizar grandes trabajos de sellado y de otro tipo para limitar las fugas a un nivel aceptable. Tales situaciones favorecen la adopción de un diseño que permite que la inyección continúe durante la construcción del terraplén o después de su finalización. Esto puede favorecer al CFRD o al ICRD. Las rocas más débiles, como las pizarras arcillosas, algunas areniscas, el basalto erosionado, etc., pueden presentar problemas para el diseño y la construcción de una presa y pueden influir en gran medida en el tipo de presa seleccionada. En algunas rocas sedimentarias, particularmente las arcillosas y lodosas débiles y entrecruzadas, y las areniscas fuertes, que han estado sujetas a pliegues y/o fallas, pueden existir cizallas planas en el lecho que resulta en ángulos de fricción afectiva bajos. En estas circunstancias, pueden requerirse pendientes planas en el terraplén, favoreciendo el relleno con drenaje vertical y horizontal.
- **Cimiento aluvión:** para un valle ancho y una sobrecarga elevada, una presa de tierras es generalmente la mejor solución. La base de la presa de terraplén es tan ancha que la capacidad de carga no suele ser un problema, excepto en el caso de las arcillas blandas. Los cimientos aluviales significan que habrá problemas de filtración y su permeabilidad y profundidad pueden significar cambios en el tipo del terraplén utilizado.

Los cimientos no rocosos como limo, arena, grava y arcilla pueden ser aceptables para las presas RCC, CCD y FSHD a bajas alturas de presa.

La geología de los cimientos en el emplazamiento de una presa a menudo determina el tipo de presa adecuado para ese emplazamiento. A diferencia de las presas de arco-gravedad, que requieren una base sólida de roca, las presas de tierras se adaptan fácilmente a los cimientos de tierra. Por lo tanto, se puede decir que la presa de tierras se puede construir sobre los cimientos de aluvión. Es posible construir sobre los cimientos de aluvión una presa de tierra y grava de arena, con núcleo central de 140 m de altura. Hay necesidad de cimientos de roca para las presas de escollera. Si los cimientos son de aluvión, debido a los asentamientos excesivos, no sugiere el uso de grandes rocas en escollera. En este caso, el material de arena y grava se utiliza como material de recubrimiento.



La presa de Santa Juana puede servir de ejemplo para la conclusión anterior. La represa de Santa Juana era una pared de hormigón de relleno de roca en el río Huasco, en el corte de Chile, se fundó en 30 m de cimientos de aluvión de grava limpia, la cual tienen una altura de 103 m, con una longitud de coronación de 400 m.

- **Cimiento arcilla:** los depósitos gruesos de suelo blando y compresible generalmente se han evitado en el pasado, pero a medida que ha pasado tiempo, los sitios con cimientos blandos deben ser usados con mayor frecuencia. Sin embargo, no hay métodos fáciles o económicos para tratar con cimientos de arcilla blanda. Los cimientos de los suelos de grano fino suelen ser lo suficientemente impermeables como para evitar la necesidad de proporcionar características de diseño para las infiltraciones inferiores y las tuberías. Sin embargo, las mantas de drenaje de filtro inclinadas y horizontales proporcionan una buena protección contra condiciones geológicas desconocidas, grietas, suelos dispersos y defectos de diseño y construcción. El principal problema con estos cimientos de limos y arcillas saturadas, los diseños deben tener en cuenta el efecto de la saturación de los cimientos de la presa y de las obras accesorias del embalse. Los cimientos del suelo deben tener propiedades de resistencia iguales o mayores que las de terraplén. Toda el área para ocupar por la presa debe ser despojada a una profundidad suficiente para remover todos los materiales inadecuados, incluyendo rocas superficiales, roca suelta, escombros, tierra vegetal y vegetación, que puedan interferir con la unión del terraplén con los cimientos. Por lo tanto, se debe lograr una base rígida. Se debe lograr un buen drenaje para proteger el suelo del terraplén de la saturación y facilitar la disipación de las presas de agua porosa desde debajo del terraplén, permitiendo así la consolidación de los suelos blandos de cimentación. A medida que se produce la consolidación, la resistencia al cizallamiento de la cimentación aumenta, lo que resulta en un aumento del factor de seguridad contra el fallo de la capacidad portante.

Los cimientos de arcilla se pueden utilizar para el soporte de presas de tierras, pero requieren un tratamiento especial. Si el material de cimentación es más débil que el relleno de tierra, la superficie de deslizamiento crítica generalmente pasaría a través de la fundación. Por lo tanto, para mantener el equilibrio, los diseñadores extienden la superficie de deslizamiento utilizando pendientes más planas o bermas. Dado que puede haber un asentamiento considerable de la presa si la arcilla no está consolidada y el contenido de humedad es alto, los cimientos de arcilla son aceptables para la consideración de una presa de gravedad de menos de 15 m de altura y con una diferencia entre la cabecera y la cola de menos de 6 m. los cimientos de las presas de escollera deben ser capaces de resistir el asentamiento y la deformación.

Los drenajes de arena son útiles para cimentaciones de arcilla. Además de esto, se podría adoptar la construcción por etapas del terraplén con monitoreo de la presión de los poros.

- **Cimentación de limo o arena fina:** las presas de arco son adecuadas para gargantas estrechas, sujetas a toca sonora uniforme de alta resistencia y limitada deformabilidad en cimientos y estribos. Las presas de gravedad de hormigón son adecuadas para valles anchos, siempre que la profundidad de excavación sea inferior a 5-10 m. Las presas de contrafuertes son adecuadas como presas de gravedad, pero las mayores tensiones de contacto requieren roca sólida. Las presas de relleno de roca se construyen sobre los cimientos de roca. Por lo tanto, los tipos de presa mencionados anteriormente no son



adecuados para cimientos de limo o arena fina. Sin embargo, este tipo de cimentación es aceptable para la consideración de una presa de gravedad de menos de 15 m de altura con una diferencia entre la cabecera y la cola de agua de menos de 6 m e introduciendo el tratamiento de cimentación necesario. Los cimientos de limo o arena fina son adecuados para la construcción de presas de terraplén, pero el tratamiento de los cimientos es necesario.

- **Cimiento no uniforme:** ocasionalmente, pueden ocurrir situaciones en las que no se pueden encontrar cimientos razonablemente uniformes de cualquiera de las descripciones anteriores y en las que se debe usar un cimiento no uniforme de roca y material blando si se va a construir la presa. Estas condiciones insatisfactorias a menudo pueden ser superadas por características de diseño especiales. Cada sitio, sin embargo, presenta un problema para el tratamiento apropiado por parte de ingenieros experimentados.

Sólo se puede construir una presa o una presa compuesta sobre cimientos no uniformes. Las presas compuestas aprovechan las ventajas de la presa de terraplén y de la presa de hormigón. Generalmente consisten en secciones de hormigón por gravedad (convencional o RCC) o de contrafuertes en combinación con secciones de terraplén o de roca. La parte de la presa de concreto incorpora la capacidad de pasar los caudales de inundación sobre o a través de la sección durante la construcción y actuar como el aliviadero después de la construcción, y las secciones de tierra o de relleno de rocas aprovechan el costo de la construcción del flujo y los materiales locales. Excepto por las consideraciones hidráulicas mencionadas anteriormente, la topografía es la razón principal para la selección de una presa compuesta. La topografía de las presas combinadas se asocia generalmente con las localizaciones de llanuras y las montañas se encuentran, pero rara vez con el terreno montañoso en sí mismo. Los valles anchos a menudo proporcionan sitios favorables para el uso de pesas de combinación. Las condiciones de cimentación son el segundo factor más importante en la selección de una presa de tipo combinado. En los casos en que la sección del río de un valle ancho proporciona una base de roca competente cerca de la superficie y la sobrecarga aumenta hacia uno o ambos estribos, la presa compuesta puede ser económica. Si se está considerando una estructura de terraplén de hormigón combinada, la parte de hormigón debe tener una cimentación de calidad aceptable.

3. SELECCIÓN DEL TIPO DE PRESA COMO UN PROBLEMA MULTICRITERIO

Ya se conocen las distintas tipologías de presa que se van a desarrollar en este trabajo, así como sus características más significantes, las cuales son:

- Presa de Gravedad (PG).
- Presa de Hormigón Compactado con Rodillo (RCC).
- Presa de Bóveda (BVD).
- Presa de escollera con pantalla de hormigón (CFRD).
- Presa de Materiales Suelos Homogénea (PMS-H).

Además, se han desarrollado todos los factores que se deberían de tener en cuenta a la hora de la elección de una presa como es la topografía, la seguridad, el impacto ambiental, el plazo de ejecución, los costes, la disponibilidad de los materiales para la construcción, entre otros.

No obstante, se asume que la elección del tipo de presa se encuentra directamente relacionada con los factores definidos anteriormente, a veces incluso, contrapuestos entre sí, por lo que se asume que la elección del tipo de presa es un problema Multicriterio.

Según lo comentado en el párrafo anterior, se asume que la dificultad problema de la elección del tipo de presa radica en cómo combinar todos los criterios (factores) mencionados entre sí, y en cómo asignarles peso.

Por lo tanto, lo que se transmite en este trabajo es el proceso para combinar los criterios adecuados a cada tipo de presa, así como asignar el peso a cada uno de ellos con el fin de obtener qué criterios tienen mayor peso a la hora de abordar un problema de este tipo, como es la elección del tipo de presa adecuado.

Es por este motivo, por lo que se hace imprescindible la utilización de los Métodos de Decisión Multicriterio, con el fin de seleccionar el diseño óptimo de la presa atendiendo a las características que nos presenta la zona de actuación en sí, tales como topografía, cimentaciones del terreno, forma de la cerrada, clima del lugar, entre otros.

4. TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS

Los estudios científicos sobre decisión han ido ocupando a un sector cada vez más amplio de investigadores que de manera rigurosa han analizado el tema, sobre todo en las últimas décadas. En particular, el análisis de la decisión con criterios múltiples se ha extendido sorprendentemente por todo el mundo y en todos los campos. Existen numerosas sociedades internacionales y grupos nacionales dedicados a estas investigaciones, cuyo trabajo ha dado lugar a la aparición de numerosas metodologías que llevan añadido en su título **“Toma de Decisiones Multicriterio”**, y en los últimos años la nueva tendencia es incorporar a la denominación la palabra **“ayuda”** con lo que el resultado se conoce como **“Ayuda a la Decisión Multicriterio”**. De esta manera debería entenderse mejor la diferencia entre analista y decisor, y la idea de que debe ser el analista el ayudante del decisor en el camino que le conduce para tomar su mejor elección, y no crees que la simple metodología de toma de decisiones multicriterio, recogida en programas informáticos, es decir, softwares de decisión, pueda servirle como una herramienta que sustituye al analista, para decidir por él mismo la elección que debe tomar.

La cantidad de aplicaciones posibles de esta teoría, en todos los campos del conocimiento, ha atraído a investigadores, científicos y muchos otros que se limitan a poner en práctica aquellas innovaciones técnicas y/o científicas que han sido ya estudiadas.

Existen distintos métodos de decisión multicriterio, los cuales hacemos referencia a continuación:

4.1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

En una sociedad como la actual, el diseño y proyecto de las infraestructuras debe realizarse en términos de sostenibilidad, entendida ésta, no solo como la optimización de recursos, sino también considerando como solución sostenible aquella que produce menores costes sociales, menores molestias a los usuarios de las infraestructuras, permite la dualidad de los usos, etc. Pero en Ingeniería para resolver un problema en ocasiones son varias las soluciones posibles que dan cumplimiento a las especificaciones estructurales, funcionales o de sostenibilidad, quedando en manos del proyectista la decisión de elegir aquella solución que, a su juicio, cumple mejor las especificaciones o factores que intervienen en el proceso de diseño.

Por lo anterior, los proyectistas deben seleccionar aquellas soluciones constructivas que mejor se adapten a los requerimientos de proyecto, de forma que la solución elegida sea la óptima entre todas las posibles, Este objetivo solo se consigue si se consideran todas las



soluciones posibles y se evalúan todos los criterios que puedan afectar a la selección, ponderando de forma adecuada la importancia relativa de los mismos en cada proyecto.

Llegados a este punto del planteamiento del problema, hay que recordar una frase muy comentada en Ingeniería y obviada en muchas ocasiones, y es que cada proyecto es diferente. Por lo cual, los requerimientos de proyecto serán diferentes, pero también los mismos requerimientos, criterios o factores tendrán una importancia relativa distinta en cada proyecto.

Esto implica que es necesario contar con una metodología que ayude en el proceso de decisión, pero también que permita sistematizar todo el proceso, desde la determinación de alternativas posibles y la ponderación de criterios hasta la jerarquización y selección de las alternativas más adecuadas.

De esta forma, los proyectos de infraestructuras incluyen, como así determinan las *Recomendaciones del Ministerio de Fomento del Gobierno de España*, un estudio informativo en el cual se definen, valoran y comparan las alternativas estudiadas, seleccionando la más adecuada en cada caso.

El proceso de decisión es el estudio de la identificación y elección de alternativas basadas en los valores y preferencias de la persona o grupo de personas que toma la decisión. Los métodos de decisión son una herramienta que reduce la subjetividad en la toma de decisiones mediante la creación de una serie de filtros de selección y ayuda a la elección entre alternativas complejas. Pueden servir para un propósito diferente en cada etapa, en primer lugar, puede ayudar a analizar el problema, tarea u objetivo al descomponerlo en un número finito de requisitos, y una vez establecido los requisitos ayuda a su ordenación por la importancia relativa o peso de cada criterio para cada alternativa (BRUFMAN, A. F. (2.015): Definición de una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Universidad Nacional del Sur. Argentina).

Son numerosos los ejemplos que existen en la bibliografía de métodos de decisión multicriterio, varios de los cuales son analizados en este trabajo, además del utilizado en la aplicación al caso de estudio. Pero antes de ello, hay que indicar que todos ellos parten de una matriz de decisión y que no se puede olvidar que, en todos ellos, en mayor o menor medida, interviene la subjetividad del decisor.

4.2. TÉCNICAS MULTICRITERIO DISCRETAS

Refiriéndose a la regla del valor esperado dice Bernoulli:

“En esta regla no se toma en consideración ninguna característica de las personas, sólo las características del juego. Realmente, se trataría de establecer reglas mediante las que uno pudiera estimar sus perspectivas al tomar riesgos teniendo en cuenta sus circunstancias financieras”.

La aparición hacia 1.943 de los trabajos de V. Neumann – Morgenstern, los cuales representan el punto de partida del tratamiento científico de los problemas de decisión individual y también de las de las decisiones de concurrencia. Las investigaciones de Arrow son paralelamente, a partir de 1.951, el origen del estudio de los problemas de las decisiones colectivas.

Por lo cual, ya Bernoulli en 1.783 indicó que el proceso de decisión depende de los valores, circunstancias y preferencias del decisor. Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión.

Milton Friedman, en 1.962, en su texto *Teoría de los precios* explica que existen dos tipos de problemas, los tecnológicos, caracterizados por contener únicamente un criterio, y los económicos, caracterizados por la existencia de múltiples criterios. Zeleny, en 1.982, añade que

los problemas tecnológicos implican únicamente dificultades de medición y de búsqueda. Por el contrario, los problemas económicos o reales requieren una toma de decisión debido a que se utilizan varios criterios.

Es muy importante hacer una distinción entre casos, si tenemos un simple o múltiple criterio. Dentro de los problemas multicriterio podemos distinguir dos grupos bien diferenciados. Por un lado, aquellos problemas de decisión en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del centro decisor es infinito, tanto en el caso monocriterio como en el multicriterio, estos suelen denominarse problemas continuos dado el carácter matemáticamente continuo del conjunto de soluciones factibles. Por otra parte, se encuentran los problemas de decisión de tipo discreto en los que el conjunto de alternativas a considerar por parte del decisor es finito y normalmente no muy elevado.

Si tenemos un número finito de criterios, pero tenemos un número ilimitado de posibles alternativas (las cuales cumplen los requerimientos) nos encontraríamos en el campo de optimización de múltiple criterio

En 1.972 se celebró la primera Conferencia Mundial sobre la Toma de Decisiones Multicriterio que ha derivado en lo que se conoce como Sociedad Internacional de Toma de Decisiones. “Este acontecimiento supuso el origen de una institución encargada del estudio de este tipo de técnicas de una forma organizada y normalizada” [Romero, 1.993].

Dentro de los Métodos de Decisión Multicriterio (MCDM) se pueden distinguir dos grupos o familias principales, por una parte, los métodos basados en la llamada Teoría de la Utilidad Multi-atributo (MAUT – Multi-attribute Utility Theory), propios de la Escuela Americana y por otro los métodos llamados de Superación o Sobreclasificación u Outranking, propios de la Escuela Europea, conocida hasta hace poco como Escuela Franco-belga

La familia de los métodos de MAUT consiste en agregar los diferentes criterios a una función, la cual tiene que ser maximizada. El concepto de superación o sobre calificación fue propuesto por Roy, en 1.968. La idea básica es como sigue: la alternativa A_i supera a la alternativa A_j si para la mayor parte de los criterios A_i es al menos igual de buena que A_j (condición de concordancia), mientras que no hay ningún criterio para el cual sea notoriamente inferior (condición de discordancia). Después de determinar para cada par de alternativas si una supera a otra, esta pareja debe ser combinada en un ranking parcial o completo. Contrariamente a los métodos MAUT, donde la alternativa con el mejor valor de la función agregada puede ser obtenida y considerada como la mejor alternativa, en un ranking parcial de un método de superación la mejor alternativa no se puede estimar como mejor alternativa directamente.

No obstante, para explicar estas técnicas, primero habrá que introducir una serie de conceptos que permitirán una mayor percepción de estos. En primer lugar, se obtienen los criterios de decisión, los cuales se basan en condiciones o parámetros que permiten discriminar alternativas y establecer preferencias del decisor, por lo que son elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. En segundo lugar, se definen los pesos o ponderaciones, que son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado con los criterios, se asigna un vector de pesos $[w] = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, siendo n el número de criterios. El peso w_1 refleja la importancia relativa del criterio C_1 en la decisión, y es asumido que es positivo.

Para los pesos, existen en la bibliografía diferentes formas de asignación. Las más habituales son:

- Método de asignación directa: aquel en el que el decisor asigna directamente valores a los pesos.

- Método de autovector: en este método los pesos asociados a cada criterio son las componentes del autovector asociado al autovalor dominante de una matriz de comparaciones pareadas entre los criterios. Este método de asignación de pesos es el utilizado en la metodología desarrollada en este trabajo a través del método AHP, el cual se explicará más adelante.

A continuación, se definen las alternativas, ya que son los diferentes enfoques para la resolución del problema en cuestión. La descripción de cada alternativa debe mostrar de manera clara como se resuelve el problema definido y en qué difiere de otras alternativas.

Por último, se tiene la matriz de valoración o decisión, para la que a cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, le corresponde un valor numérico o símbolo a_{ij} , que expresa una evaluación o juicio de valor de la alterativa A_j respecto a los n criterios de la matriz, estos expresan las cualidades de la alternativa A_j respecto a los n criterios considerados. Cada columna de la matriz recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio C_j .

Tabla 1: Matriz de decisión. Fuente: propia.

		Criterios y pesos asociados					
		C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
		w_1	w_2	...	w_j	...	w_n
Alternativas	A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1j}	...	a_{1n}
	A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2j}	...	a_{2n}
	Valoraciones
	A_i	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{ij}	...	a_{in}

	A_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nj}	...	a_{nn}

Tabla 1. Matriz de decisión

A continuación, se muestra una tabla resumen de lo explicado hasta el momento:

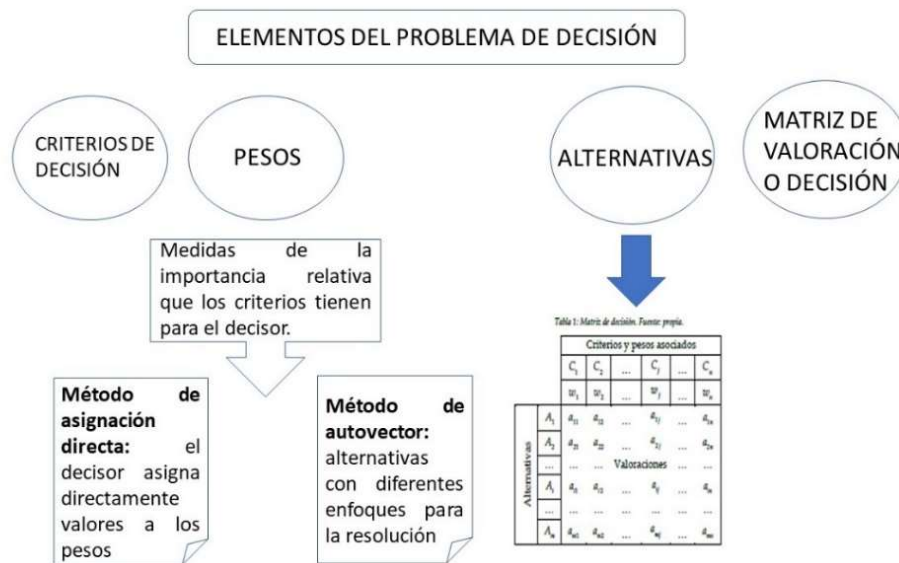


Tabla 2. Resumen de las técnicas multicriterio discretas. Fuente: propia.

Una vez se conoce todo lo comentado hasta el momento, vamos a analizar tres métodos distintos, contando con el que usaremos en nuestro trabajo, con el fin de poder compararlos y verificando la idoneidad del método utilizado para este trabajo.

- Teoría de la utilidad multiatributo (MAUT).
- Métodos de sobreclasificación (ELECTRE).
- Proceso Analítico Jerárquico (AHP).



4.2.1. TEORÍA DE LA UTILIDAD MULTIATRIBUTO (MAUT)

Para esta metodología se pueden utilizar dos estrategias, la primera buscar unificar todos los atributos a la misma escala para luego transformar la escala a una función de utilidad, sin embargo, muchas veces no se puede realizar este procedimiento, ya que en un determinado problema pueden existir atributos que no pueden ser medibles en términos cuantitativos o en términos cualitativos exclusivamente. Por este motivo, se utiliza la segunda estrategia, la cual a partir de funciones de utilidad unidimensionales se construye la función de utilidad Multiatributo, la cual es llamada como función aditiva. El uso de las estrategias mencionadas depende de la naturaleza del problema de decisión que se quiere solucionar de acuerdo con los atributos utilizados en las etapas iniciales, por consiguiente, a continuación, se estudiarán más a fondo las partes que componen la metodología MAUT para luego presentar sus ventajas y limitaciones.

1. Objetivos y atributos

Al momento de establecer los objetivos del problema de decisión que se quiere resolver es necesario identificar con qué tipo de problema nos estamos enfrentando, puesto que normalmente los problemas reales tienen en cuenta más de un objetivo, que incluso pueden ir en conflicto. Sin embargo, también existen problemas donde solo se busca el cumplimiento de un objetivo, por tanto, es fácil la identificación de este, debido a que se ignoran variables que pueden afectar el resultado final.

Para identificar los objetivos que se deben tratar, Clemen (1.996) presenta una guía donde se establecen una serie de elementos que conformarán los objetivos finales. Estos elementos comprenden los deseos, alternativas, problemas con resultados adversos, consecuencias; metas, restricciones y levantamientos; perspectivas y objetivos estratégicos que finalmente, permiten definir los objetivos genéricos de la organización de tipo ambiental, social, económico, de seguridad, etc., y que van de la mano con agentes involucrados en las organizaciones, como los clientes, empleados, accionistas, etc. Cada uno de estos objetivos deben ser medidos a través de una escala de atributos. Por consiguiente, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones (Clemen, 1.996):

- Los objetivos deben estar encabezados por los objetivos fundamentales que tendrán en cuenta todos los aspectos del problema.
- Solo se deben considerar los objetivos que diferencien las alternativas, es decir, aquellos que van a aportar al modelo y donde las alternativas sean semejantes ante un mismo atributo.
- Los objetivos para considerar no deben ser relevantes e independientes entre sí, es decir, para tratar un objetivo no se debe examinar ningún otro.
- Las escalas de medición o de atributos, deben permitir medir de manera sencilla el desempeño de las alternativas.

2. Función de utilidad aditiva

La función de utilidad aditiva permite considerar problemas con múltiples objetivos, donde es necesario establecer la importancia relativa de cada uno de los objetivos y la clasificación del desempeño de cada una de las alternativas teniendo en cuenta todos los objetivos. Esta función es el promedio ponderado de las funciones de utilidad unidimensionales que se tienen para cada atributo $u_1(x_1)$, ..., $u_n(x_n)$, es decir, para una alternativa que tiene resultados x_1 , ..., x_n en los atributos, la utilidad sería (Zopounidis & Doumpos, 2.002):

$$U(x_1, \dots, x_n) = w_1 u_1(x_1) + \dots + w_n u_n(x_n)$$



Donde los w_1, \dots, w_n son los pesos de cada una de las funciones de utilidad unidimensionales, los cuales deben ser positivos y sumar uno.

3. Metodología de análisis

Una de las metodologías utilizadas para evaluar la calificación numérica de las alternativas de acuerdo a los objetivos establecidos desde un inicio es Smart (Simple Multitriattribute Rating Echenique) la cual propone los siguientes pasos (Kimbrough, 2.001) para el análisis y solución de un problema de decisión a partir de la aplicación de una función de utilidad aditiva:

- Determinar componentes más relevantes del problema.
- Identificar y estructurar objetivos.
- Determinar las alternativas de solución.
- Establecer los atributos para la evaluación de las alternativas.
- Ordenar atributos con respecto a su importancia.
- Obtener pesos normalizados de cada uno de los atributos.
- Obtener la función de utilidad unidimensional de cada uno de los atributos.
- Evaluar el desempeño de cada una de las alternativas con respecto a cada atributo.
- Calcular el valor de la función de utilidad aditiva para cada una de las alternativas.
- Determinar la mejor alternativa, aquella que presenta el mayor valor de la función de utilidad aditiva con respecto a las demás.

4. Obtención de las funciones de utilidad individual o unidimensional.

Según Castillo (2.006), existen dos técnicas para calcular las funciones de utilidad individual en los problemas de decisión: los puntajes proporcionales y razones, las cuales son explicadas a continuación.

4.1. Puntajes proporcionales

Esta metodología asigna un valor de cero a la alternativa que tiene peor desempeño en un atributo y un valor de uno a la alternativa que tiene mejor desempeño en el atributo. Para las demás alternativas, que dentro de la escala de atributo anteriormente definida para un atributo i , obtuvieron una calificación de x , la utilidad se obtiene según la expresión:

$$u_i(x) = \frac{x - \text{peor valor}}{\text{mejor valor} - \text{peor valor}}$$

4.2. Razones

Esta metodología es utilizada más que todo para atributos que no son de tipo cuantitativo y utiliza como su mismo nombre indica razones de acuerdo con la mejor calificación y a la peor calificación dentro de un sistema de ecuación de dos incógnitas:

$$0 = a + b \times (\text{peor valor})$$

$$1 = a + b \times (\text{mejor valor})$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones para encontrar los valores de a y b , los cuales permitirán la utilidad de cada alternativa en determinado atributo según la expresión que sigue:

$$u_{\text{alternativa}}(\text{atributo}) = a + b(x)$$



Donde x es la calificación que obtuvo la alternativa de acuerdo con su desempeño con respecto a un determinado atributo.

5. Obtención de los pesos de la Función de Utilidad Aditiva

Citando nuevamente a Castillo (2.006), existen dos técnicas para obtener la ponderación de las funciones de utilidad individuales: pricing out y swing weighting; que indican la importancia relativa de los diferentes atributos a la función de utilidad aditiva.

5.1. Pricing out

Esta metodología utiliza el término de tasa marginal de sustitución (cantidad de un bien x que un consumidor debe recibir en compensación a la reducción en su consumo de una unidad marginal del bien) para determinar los pesos de las funciones de utilidad individuales (Zopounidis & Doumpos, 2.002). Lo que se hace es crear una alternativa hipotética de una alternativa ya existente, donde se emplee la definición de la tasa marginal de sustitución y se calcula la utilidad de esta alternativa en cada uno de los atributos. De esta manera se debe cumplir la expresión que sigue:

$$k_1(u_1(x_1)) + \dots + k_n(u_n(x_n)) = k_1(u_1(ahip)) + \dots + k_n(u_n(ahip))$$

Donde $ahip$ es la alternativa hipotética.

Con la ecuación anterior y teniendo en cuenta que los pesos deben sumar 1, se calculan los pesos k_1, \dots, k_n .

Este método es consistente, ya que la noción de la metodología de puntajes proporcionales debido a la función de utilidad aditiva implica una tasa de sustitución marginal constante (Zopounidis & Doumpos, 2.002).

5.2. Swing Weighting

La segunda metodología que puede ser implementada es la Swing Weighting (Castillo, 2.006), que es utilizada tanto en atributos de tipo cualitativo como de tipo cuantitativo. El proceso que debe seguirse es que primero se debe crear una alternativa hipotética de referencia que represente el peor valor o calificación en todos los atributos. Teniendo en cuenta esa alternativa, se plantean alternativas en las cuales uno de los atributos pasa del peor al mejor valor o calificación y los demás atributos se mantienen con el peor valor, de tal manera, que al comparar estas alternativas se están comparando los diferentes atributos entre sí. El paso siguiente consiste en ordenar las alternativas de acuerdo con las preferencias de los agentes involucrados para finalmente estandarizar las calificaciones y obtener el peso de cada uno de los atributos (Zopounidis & Doumpos, 2.002), es decir, se establece la alternativa hipotéticamente más mala al lado de las alternativas que tienen un atributo con mejor calificación, dejando las demás constantes. De acuerdo con los valores obtenidos se realiza el ranking de las alternativas y se les da una calificación para, finalmente, normalizarla y obtener el peso de cada atributo.

6. Observaciones finales y manejo de la Incertidumbre

La metodología descrita de la Función de Utilidad Aditiva (FUA) tiene grandes ventajas gracias a la facilidad de construcción del modelo e interpretación (Castillo, 2.006), sin embargo, existe una limitación importante y es que implícitamente se están considerando los criterios como independientes entre sí, es decir, la función de utilidad individual de cada uno de los atributos se construye sin tener en cuenta los demás atributos. Este sistema es llamado como "independencia de las diferencias" (Difference Independence) y se refiere a que la intensidad de la preferencia entre dos objetivos "x e y" que tienen idénticos niveles fijados para ciertos atributos no cambia cuando dichos atributos son fijados en algún otro nivel (Castillo, 2.006).



Por otro lado, las metodologías de obtención de funciones de utilidad individuales no tienen en cuenta el riesgo, ya que siempre son lineales. Por lo cual, dependiendo de la naturaleza del problema de decisión que se quiere solucionar se debe encontrar un balance entre el nivel de rigor y la viabilidad práctica de las metodologías escogidas para su aplicación, ya que cuanto más formal y rigurosa sea la construcción del modelo, mayor será la información que se demanda y esfuerzo por estructurar los juicios de los decisores.

De igual manera, las metodologías expuestas en esta parte surgen del supuesto de que **“el valor o calificación del desempeño de las alternativas en cada uno de los atributos es una variable que se tiene con certeza”**, es decir, no es una variable aleatoria con una determinada distribución de probabilidad. En caso de ser así se debe emplear el criterio general de valor esperado de la utilidad.

7. Ventajas de este método.

De acuerdo con lo expuesto acerca del método MAUT, una de las ventajas de este método es que tiene en cuenta el comportamiento de varias alternativas a partir de diferentes atributos, sin embargo, esta metodología omite algunas interacciones que pueden existir entre los diferentes atributos, lo que permite que su aplicación sea rápida y en consecuencia su implementación e interpretación sea sencilla (Castillo, 2.006).

A continuación, se presentan algunas aplicaciones que tiene esta metodología en problemas reales, para tener un orden de magnitud de dónde se puede aplicar MAUT:

- Decisión sobre la aprobación de un presupuesto adicional para la construcción de una nueva planta generadora de energía eléctrica.
- Distribución de recursos para un programa educacional.
- Diseño de estrategias de negocios para una empresa, teniendo en cuenta las características de la sociedad, así como los objetivos de la compañía.
- Selección del sistema informático para la compañía.
- Selección de un trabajo o profesión teniendo en cuenta los factores externos e internos (selección personal).

4.2.2. MÉTODO DE SOBRECASIFICACIÓN (ELECTRE)

Los métodos que incorporan en sus análisis las denominadas **“Relaciones de Superación”** tuvieron su origen en Francia y Bélgica; nacieron de la mano de Bernard Roy y su equipo de colaboradores en 1.966. La idea es comparar las alternativas por pares sobre la base de dos medidas: la concordancia y la discordancia. La concordancia se refiere a aquellos pares de alternativas que superan a otro; la discordancia es caso inverso, es decir un par de alternativas superado por otro. Los principales representantes de estas ideas son los métodos ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité), aunque posteriormente hacen su aparición los métodos PROMETHEE (preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations), con facilidad de aplicación y comprensión por parte del decisor, de la mano de los investigadores Jean P. Brans y Philip Vincke, en 1.985.

Para explicar la metodología de este método nos centramos en la versión ELECTRE I que, aunque no es la más reciente, es la única que considera los “criterios verdaderos”, que resultan los más apropiados para su aplicación a problemas diversos.

→ ANÁLISIS DE CONCORDANCIA

El análisis de concordancia hace uso de diversas y sencillas funciones para indicar el grado de dominancia de una alternativa o grupo de alternativas, y posibilita la existencia de incompatibilidades. Dado su carácter no compensatorio, no se admiten los intercambios o compensaciones de un criterio respecto de otro para cada elección individual. Este rasgo permite diferenciarlo de los modelos de la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT), que son



de carácter compensatorio y aditivo, tal y como hemos explicado en el punto anterior. El análisis de concordancia está recogido como un modelo de decisión multicriterio de naturaleza no-compensatoria.

La comparación entre las alternativas se efectúa por pares y con respecto a cada uno de los criterios de decisión seleccionados, y establece el grado de dominancia que una alternativa tiene sobre la otra, es decir, determina su “grado de superación”. Este grado de superación o dominancia lo establecen las relaciones matemáticas que se formulan, determinando hasta qué punto una alternativa destaca sobre las restantes. Además, los pesos que el decisor asigna a cada criterio y que reflejan sus preferencias, confirman o contradicen la relación de dominancia entre las alternativas de decisión.

El método analiza tanto el grado de concordancia, como el de discordancia, es decir:

1. El grado en el que las ponderaciones que reflejan las preferencias están de acuerdo con la relación binaria de dominación y,
2. El grado en el cual las evaluaciones ponderadas difieren entre sí.

Estas etapas se fundamentan en los denominados conjuntos de concordancia y discordancia. Una de las ventajas de este tipo de análisis es que utiliza la información disponible en forma muy intensiva, exigiendo muy poco al decisor. El proceso finaliza con la selección de una alternativa o grupo de alternativas preferidas, consideras como “la mejor solución de compromiso”.

→ CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS MÉTODOS ELECTRE.

Todos los métodos ELECTRE construyen una relación llamada de “superación” que representa las preferencias del decisor sobre el conjunto de alternativas, dada la información disponible. E un modelo de decisión multicriterio que utiliza diversas funciones matemáticas para indicar el grado de dominancia de una alternativa respecto de otra. Al formar parte de la familia de los métodos de relaciones de superación facilita las comparaciones binarias entre alternativas asignando ponderaciones iniciales a los criterios de decisión, lo cual permite un posterior análisis de sensibilidad cuando se varían las citadas ponderaciones para aproximarlas al valor exacto que a veces es desconocido. Odo esto puede completarse con un análisis de robustez, lo cual otorgará mayor fiabilidad al modelo. Las comparaciones se efectúan por pares de alternativas y bajo cada uno de los criterios de decisión, y a partir de ellas se obtiene el grado de “dominancia” o “superación” de una alternativa respecto de otra. El resultado es el ordenamiento del conjunto de alternativas.

Los métodos ELECTRE han sido ampliamente utilizados en problemas de planificación y administración gubernamental.

Actualmente existen seis versiones de este método, ELECTRE i, II, III, IV, Tri e Is. Tal como se ha comentado anteriormente, la metodología involucra un análisis sistemático de las relaciones entre todos los pares de alternativas, sobre la base de las evaluaciones que poseen las alternativas respecto de cada uno de los criterios. La metodología contempla la construcción de una relación de superación, la generación de índices de concordancia y discordancia (incluyendo la noción de importancia relativa para cada criterio) y un análisis de los resultados obtenidos de la evaluación completa de todas las relaciones de superaciones obtenidas.

En cada versión del método, las alternativas de decisión son evaluadas en términos de los criterios múltiples; siendo cada criterio una medida de las preferencias del decisor de acuerdo con algún punto de vista. La versión del modelo ELECTRE que se debe emplear depende esencialmente de los tipos de criterios involucrados. La definición de estos criterios es pues de vital importancia y relevancia para la adecuada comprensión del método.



→ TIPOS DE CRITERIOS UTILIZADOS EN LOS MÉTODOS ELECTRE.

Las estructuras de preferencia utilizadas por los métodos de relaciones de superación recogen distintos tipos de criterios, dependiendo de la complejidad de su formulación y de la naturaleza del problema de decisión.

Así se pueden distinguir:

- El criterio verdadero o real.
- El semi-criterio.
- El criterio de intervalo.
- El pseudo criterio.

La versión del ELECTRE I utiliza “criterios verdaderos”, por lo que se especificará este tipo de criterios con más precisión para comprender mejor el funcionamiento de la metodología en este caso particular, y reconocer así la importancia que conlleva, en el tipo de problemas que nos ocupa.

Las últimas versiones del ELECTRE trabajan con pseudo-criterios incorporando así complejidad a las estructuras de preferencia, ya que se pretende mejorar la estructura de preorden, que como se sabe es la más sencilla. De esta forma se perfila con mayor profundidad el tratamiento de la incertidumbre al incorporar nuevos umbrales (preferencia, indiferencia veto).

El criterio real o verdadero es la forma más sencilla de formular un criterio y se utiliza en aquellas estructuras de preferencia denominadas “tradicionales”. En ellas no deben determinarse umbrales y las diferencias entre las evaluaciones de los criterios se utilizan para decidir cuál es la alternativa preferida. La estructura de preferencia del ordenamiento resultante es un preorden completo.

Cualquier estructura de preferencia o superación puede caracterizarse completamente mediante una relación de superación (S), que define las condiciones necesarias para que una alternativa “a” supere a otra “b”. Así, la alternativa “a” supera (S) a la alternativa “b” si el decisor la prefiera “a”, “b”, o es indiferente (I) entre ambas. Formalmente se puede escribir de la forma:

$$aSb \leftrightarrow aPb \text{ o } aIb$$

En una estructura de preferencia tradicional, la preferencia P del decisor satisface el modelo siguiente:

$$aPb \leftrightarrow g(a) > g(b)$$

$$aIb \leftrightarrow g(a) = g(b)$$

$$a, b \in A$$

Siendo a y b dos alternativas del conjunto A y g la función de valor de uno de los criterios.

S se define como la unión de p e I, es decir:

$$S = P \cup I$$

$$aSb \leftrightarrow g(a) \geq g(b)$$

La relación de indiferencia I, resulta tener la importante propiedad transitiva, es decir, que si aIb y bIc, entonces aIc. Esta estructura de preferencia se denomina preorden completo y cumple las propiedades reflexiva, transitiva y completitud. Todas las alternativas tienen que ser ordenadas de la mejor a la peor, admitiendo empates o incomparabilidades entre alternativas

del mismo rango. Si no existiesen empates, la relación podrá transformarse en un orden completo, satisfaciendo las propiedades reflexiva, antisimétrica, transitiva y la completitud.

➔ EL ALGORITMO ELECTRE I

Como hemos explicado el método anterior detallaremos los pasos para aplicar el método ELECTRE I.

1. **Construcción de la matriz de decisión**

El método ELECTRE evalúa la siguiente matriz de decisión que se refiere a m alternativas $A_i, i = 1, 2, \dots, m$ las cuales son evaluadas según n criterios $C_j, j = 1, 2, \dots, n$, asociando un peso w_j a cada uno de ellos.

	w_1	w_2	...	w_j	...	w_n
	C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
A_1	r_{11}	r_{12}		r_{1j}		r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}		r_{2j}		r_{2n}
⋮						
A_i						
⋮						
A_m	r_{m1}	r_{m2}		r_{mj}		r_{mn}

Tabla 3. Matriz de decisión. ELECTRE

Donde r_{ij} denota la valoración de la i-ésima alternativa en términos del j-ésimo criterio.

A la hora de seleccionar un vector de pesos que pondere cada una de las alternativas en función de la opinión de los decisores, tendremos varios posibles métodos.

2. **Construcción de la matriz de concordancia**

Con la matriz de decisión (A_i, C_j) y el vector de pesos W se calcula la matriz de índices de concordancia. Cada índice de esta matriz $c(i, k)$ entre las alternativas A_i y A_k se obtiene sumando los pesos asociados a cada criterio en los que la alternativa i es mejor que la alternativa k (en caso de que el criterio fuera a minimizar sería lo contrario). En caso de empate se le asignará la mitad de peso a cada alternativa.

$$C(a, b) = \sum_{j|r_j(a) > r_j(b)} w_j + 0,5 \sum_{j|r_j(a) = r_j(b)} w_j$$

3. **Normalización de la matriz de decisión**

Normalizamos la matriz de decisión mediante:

$$v_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2}}, \forall j = 1, 2, \dots, n$$

4. **Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada**

Cada valor normalizado ponderado \tilde{v}_{ij} de la matriz en cuestión \tilde{V} se calcula como el producto entre cada w_j por cada $v_{ij}, j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$. Donde w_j es el peso del j-ésimo criterio, tal que $\sum w_j$ puede ser igual a 1, si hablamos del caso general que verifica la igualdad.



5. Construcción de la matriz de discordancia

Con la matriz de decisión (A_i, C_j) y el vector de pesos W se calcula la matriz de índices de discordancia. Cada índice de esta matriz $d(i, k)$ entre las alternativas A_i y A_k se obtiene de la diferencia mayor entre los criterios para los que la alternativa i es dominada por la alternativa k , dividiendo esa cantidad por la mayor diferencia en valor absoluto entre los índices de la matriz de la decisión normalizada y ponderada de i y k .

$$D(i, k) = \frac{\max_{(i,k) | \bar{v}_j(i) < \bar{v}_j(k)} \bar{v}_j(k) - \bar{v}_j(i)}{\max_{(i,k)} |\bar{v}_j(k) - \bar{v}_j(i)|}$$

6. Definición de umbrales

Se establecen los umbrales mínimo y máximo para los índices de concordancia y discordancia. Si se supone que c^* es el valor límite especificado para el índice de concordancia (umbral de concordancia como máximo igual a 1), y d^* es el valor límite especificado para el índice de discordancia (umbral de discordancia mínimo igual a 0), entonces la relación de superación S puede definirse de la forma:

$$aSb \leftrightarrow C(a, b) \geq c^* \text{ y } D(a, b) \leq d^*$$

Definiremos c^* y d^* como la media aritmética de los índices de concordancia y discordancia respectivamente.

7. Cálculo de la matriz de dominancia concordante

Se calcula de manera que cuando un elemento de la matriz de índices de concordancia es mayor que el valor umbral c^* en la matriz de dominancia concordante se escribe 1, de lo contrario se escribe 0.

8. Cálculo de la matriz de dominancia discordante

Se define de manera igual a la de dominancia concordante. Cuando un elemento de la matriz de índices de discordancia es menor que el valor umbral d^* en la matriz de dominancia discordante se escribe 1, de lo contrario se escribe 0.

9. Cálculo de la matriz de dominancia agregada.

Se obtiene al multiplicar los elementos homólogos de las matrices de dominancia concordante y discordante.

La interpretación de esta matriz es clara e intuitiva. Así, si el elemento (i, k) tomar valor un 1, esto significa que la alternativa i -ésima es mejor que la alternativa k -ésima para un número importante de criterios (concordancia) y no es claramente peor para ningún criterio (discordancia). Consecuentemente la alternativa i -ésima sobreclasifica a la k -ésima. Por el contrario, si el elemento (i, k) toma valor 0, significa que la alternativa i -ésima no es mejor que la alternativa k -ésima para un número importante de criterios y/o es claramente peor para algún criterio.

10. Obtención del grafo

Se tienen tantos nodos como alternativas tengamos. Únicamente habrá un arco entre la alternativa i -ésima y la k -ésima si existe un 1 en la matriz de dominancia agregada en el elemento (i, k) . Dicho nodo sale de i y entra en k .

El grafo obtenido es una representación gráfica de la ordenación parcial de preferencias de las alternativas del problema.

El núcleo del grafo de ELECTRE I estará formado por los nodos no dominados, es decir, aquellos que no tienen arcos de llegada. Las alternativas pertenecientes al núcleo serán preferibles al resto.

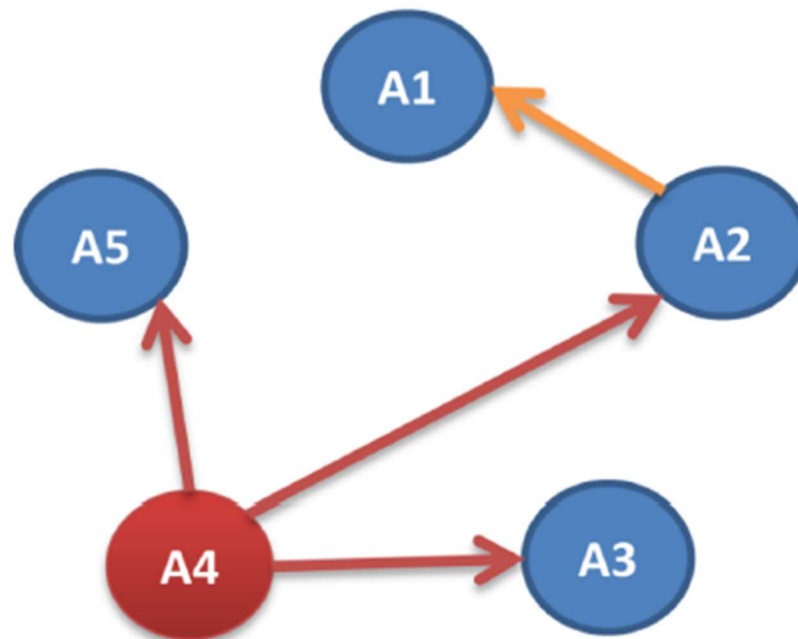


Figura 20. Grafo ELECTRE

En la figura se observa que el único nodo perteneciente al núcleo es A4, por lo que la alternativa 4 sobreclasifica al resto.

4.2.3. MÉTODO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

Vamos ahora, a desarrollar de una manera muy detallada y definida, la metodología que emplearemos, más adelante, en nuestro caso de estudio.

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. **El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.**

En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. **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.**

El AHP “se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión.

El AHP se fundamenta en:

- La estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante la identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.



- Comparaciones binarias entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de “pesos”.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de Sensibilidad.

El AHP es una herramienta metodológica que ha sido aplicada en varios países para incorporar las preferencias de actores involucrados en un conflicto y/o proceso participativo de toma de decisión.

Algunas de las ventajas de este método frente a los métodos anteriormente explicados son:

- Presentar un sustento matemático.
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes.
- Permitir medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común (esta es la ventaja más representativa).
- Incluir la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso.
- Permitir verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es del caso.
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Es de fácil uso y permitir que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

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”.

“El AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones. Cuando el grupo consiste en muchos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico”.

Ambos párrafos están extraídos de la ponencia dada por Thomas L. Saaty *“How to Make a Decision, European Journal of operational Research (1.990)”*.

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. Se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el decisor. Investigaciones anteriores han determinado que ésta es una escala razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas.



Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla 4. Escala de calificaciones numéricas del Método AHP

4. Matriz de comparaciones pareadas

Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

Sea A una matriz $n \times n$ donde $n \in \mathbb{Z}^+$. Sea a_{ij} el elemento (i, j) de A , para $i = 1, 2, \dots, n$; y $j = 1, 2, \dots, n$. 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 el renglón 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.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Además, se cumple que: $a_{ij}, a_{ji} = 1$; es decir:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

No obstante, el AHP sustenta lo anteriormente descrito con los siguientes axiomas:

- Axioma No. 1: Referido a la condición de juicios recíprocos: Si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$.
- Axioma No. 2: Referido a la condición de homogeneidad de los elementos: Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, o jerarquía.
- Axioma No. 3: Referido a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente: Existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos.



- Axioma No. 4: Referido a la condición de expectativas de orden de rango: Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

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 considera las prioridades de cada criterio en términos de la meta global:

$$\begin{array}{c}
 \text{Meta} \\
 \text{Global} \\
 \begin{array}{l}
 \text{Criterio 1} \\
 \text{Criterio 2} \\
 \dots \\
 \text{Criterio m}
 \end{array}
 \end{array}
 \left(\begin{array}{c}
 P'_1 \\
 P'_2 \\
 \dots \\
 P'_m
 \end{array} \right)$$

Donde m es el número de criterios y P'_i es la prioridad del criterio i con respecto a la meta global, para $i = 1, 2, \dots, m$.

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:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{Alternativa 1} \\
 \text{Alternativa 2} \\
 \dots \\
 \text{Alternativa n}
 \end{array}
 \left(\begin{array}{cccc}
 \text{Criterio 1} & \text{Criterio 2} & \dots & \text{Criterio m} \\
 P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\
 P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm}
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , para $i = 1, 2, \dots, n$; y $j = 1, 2, \dots, m$.

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 Pg_i es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i ($i = 1, 2, \dots, n$).

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. Se debe tener en cuenta que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr y que es de esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas, después de todo son juicios rendidos por seres humanos.

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 $n \times n$ es consistente si: $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$, para $i, j, k = 1, 2, \dots, n$.

Esta propiedad requiere que todas las columnas (y renglones) de A sean linealmente dependientes. En particular, las columnas de cualquier matriz de comparación 2×2 son dependientes y, por tanto, una matriz 2×2 siempre es consistente.

Para determinar si un nivel de consistencia es o no "razonable", necesitamos desarrollar una medida cuantificable para la matriz de comparación A $n \times n$ (donde n es el número de alternativas a comparar). Se sabe que si la matriz A es perfectamente consistente produce una matriz N $n \times n$ normalizada (se dice que una matriz es normal o está normalizada si conmuta con su transpuesta. Las matrices simétricas, antisimétricas u ortogonales son necesariamente normales. Sea m una matriz, se dice que es normal si $MM = M^T M$), de elementos w_{ij} (para $i, j = 1, 2, \dots, n$), tal que todas las columnas son idénticas, es decir, $w_{12} = w_{13} = \dots = w_{1n} = w_1$; $w_{21} = w_{23} = \dots = w_{2n} = w_2$; $w_{n1} = w_{n2} = \dots = w_{nn} = w_n$.

$$N = \begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \end{pmatrix}$$

Se concluye entonces que la matriz de comparación correspondiente A , se puede determinar a partir de N , dividiendo los elementos de la columna i entre w_j (que es el proceso inverso de determinación N a partir de A). Entonces tenemos que:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

De la definición dada de A, tenemos:

$$\begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

De forma más compacta, decimos que A es consistente si y sólo si,

$$AW = nW$$

Donde W es un vector columna de pesos relativos w_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$) se aproxima con el promedio de los n elementos del renglón en la matriz normalizada N. haciendo W el estimado calculado, se puede mostrar que:

$$AW = n_{\text{máx}}W$$

Donde $n_{\text{máx}} \geq n$. En este caso, entre más cercana sea $n_{\text{máx}}$ a n, más consistente será la matriz de comparación A. Como resultado, 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:

$$IC = \frac{n_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

El valor de $n_{\text{máx}}$ se calcula de $AW = n_{\text{máx}}W$ observando que la i-ésima ecuación es:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = n_{\text{máx}} w_i, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1,$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \right) = n_{\text{máx}} \sum_{i=1}^n w_i$$

Esto significa que el valor de $n_{\text{máx}}$ se determina al calcular primero el vector columna A y después sumando sus elementos.

IA es el índice de consistencia aleatoria de A, es decir, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada en forma aleatoria. Se puede mostrar que el IA depende del número de elementos que se comparan, y asume los siguientes valores:



Nº de Elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indice Aleatorio de Consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Algunos autores sugieren la siguiente estimación para el IA:

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

Se calcula la razón de consistencia (RC) (o CR, de Consistency Ratio). Esta razón o cociente 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.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

$RC \leq 0,10$: Consistencia Razonable

$RC \geq 0,10$: Inconsistencia

8. Preparación y organización para aplicar el AHP

Es preciso llevar a cabo una serie y cuidadosa planeación por parte del grupo de trabajo encargado de la aplicación de este. Aunque el problema a abordar sea diferente en cada caso particular, los aspectos que se presentan a continuación deben tenerse en cuenta de manera general, por aquellos interesados en utilizar el AHP.

8.1. Definición de los participantes

Se debe definir el equipo de trabajo, normalmente se conforma por las personas directamente involucradas en coordinar la aplicación del AHP. Este equipo de trabajo es el responsable de identificar cuidadosamente los actores que deben participar en el proceso de toma de decisión. Deben quedar resueltas preguntas como: quiénes, cuántos, nivel de educación requerido, a quién representan, por qué deben formar parte del proceso, ya sea por su conocimiento de la situación problema o, porque representan a un grupo de interés, entre otros.

8.2. Información requerida

Este es un elemento básico para la toma de decisión. Es necesario identificar la cantidad y calidad de información requerida para el proceso. Esta información puede ser índole científica, técnica y la dada por la experiencia y conocimiento de los participantes. Puede darse el caso que en el proceso de aplicación del AHP surja la necesidad o interés por parte de los participantes de disponer información nueva o complementaria de la que se dispone en la sesión. En ese caso se debe analizar la pertinencia de esta, el tiempo y el proceso requerido para disponer de esa información y poder continuar el proceso de toma de decisión.

8.3. Tiempo y otros recursos asociados con el proceso.

Es necesario establecer el tiempo con el cual se dispone para llevar a cabo el proceso de decisión. Esto afectará la elaboración y desarrollo del Plan de Trabajo: fechas, agenda, logística, materiales a utilizarse, número de participantes convocados, etc.

No se recomienda aplicar el AHP si se cuenta con escaso tiempo para tomar decisiones frente a problemas complejos, puesto que tratar de acelerar algunas etapas de este, puede afectar negativamente la validez de los resultados.

Adicionalmente se requiere nombrar al facilitador para la aplicación del AHP. Éste debe tener la habilidad de guiar el proceso, animar y orientar a los participantes y hacer un buen uso del tiempo disponible, sin llegar a dominar o manipular la sesión.

El facilitador debe buscar que los participantes tengan una comprensión del método y su filosofía y así mismo lograr homogeneidad en el lenguaje para la definición del objetivo y la construcción y evaluación del modelo. Por ejemplo, en lo concemiente a los términos a utilizar para que todos los participantes entiendan lo mismo y diferencien los conceptos: objetivo, criterio, subcriterio, y en el significado de los valores de la escala a utilizar para evaluar el modelo. Seguramente, el facilitador deberá enfrentarse a “situaciones sorpresa”, como confrontación entre algunos miembros, falta de voluntad de algunos participantes para expresar su opinión o sus verdades preferencias, entre otros.

El grupo coordinador encargado de aplicar el AHP debe analizar y seleccionar previamente cuáles son las técnicas más adecuadas a desarrollar con los participantes para facilitar y fortalecer el desarrollo de la sesión. En algunos casos, se pueden utilizar técnicas más familiares para el auditorio para la construcción del Modelo Jerárquico, por ejemplo, en la pared con cartulinas, en el pizarrón y no directamente con la utilización del programa. En otros casos se podrá construir el modelo simultáneamente, en el ordenador y en la pared o en el pizarrón.

Cuando se aplique el AHP mediante la formación de grupos se debe ser cuidadoso en la organización de estos. Si hay dentro de un subgrupo muchos participantes con posiciones contrastas, pueden generarse conflictos durante toda la sesión.

Debe tenerse en cuenta el tiempo requerido y disponible para aplicar eficientemente el AHP. En algunos casos, los participantes pueden mostrarse cansados al final del día y o dar mayor atención a la evaluación del modelo, lo cual puede afectar la validez de los resultados.

La adquisición del programa requerirá un costo para la entidad encargada. Dependiendo del caso particular, puede requerirse presupuesto para capacitación en el uso del programa y asesoramiento por parte de un experto en el tema. Otros gastos corresponderán al traslado de los técnicos y participantes al lugar del evento, entre otros.

9. Esquema metodológico del AHP

9.1. Estructuración del modelo jerárquico

Una de las partes más relevantes del AHP consiste en la estructuración de la jerarquía del problema, etapa en la cual el grupo decisor involucrado debe lograr desglosar el problema en sus componentes relevantes.

La jerarquía básica está conformada por meta u objetivo general, criterios y alternativas.

Los pasos para seguir para la estructuración del modelo jerárquico son:

- a. **Identificación del problema.** Es la situación que se desea resolver mediante la selección de una de las alternativas de las que se dispone o la priorización (ranking) de ellas. D

Dichas alternativas serán comparadas unas con otras mediante la evaluación de criterios establecidos que permitan conocer los pros y los contras incorporados en cada una de ellas.

Normalmente se requiere invertir horas la identificar el problema real y principal, lo cual puede darse después de una serie de discusiones en las que se han listado muchos problemas y es necesario priorizarlos y decidir cuál se seleccionará para su análisis.

- b. Definición del objetivo.** Un objetivo es una dirección identificada para mejorar la situación existente. El objetivo está en un nivel independiente y los otros elementos de la jerarquía que serán los subobjetivos o criterios, subcriterios y alternativas apuntan en conjunto a la consecución de este.

Hay objetivos de largo, mediano y corto plazo y esta diferenciación influirá directamente en la construcción del modelo jerárquico.

El objetivo u objetivos serán establecidos por el grupo decisor involucrado. Vale la pena tener en cuenta que la definición de objetivos puede ser una tarea difícil porque algunas veces serán contrapuestos entre las personas. No obstante, los objetivos determinados finalmente deben representar las necesidades e intereses generales.

- c. Identificación de criterios.** Son las dimensiones relevantes que afectan significativamente a los objetivos y deben expresar las preferencias de los impactos en la toma de decisión.

Se deben incluir aspectos vitales cuantitativos y cualitativos a tener en cuenta en la toma de decisión, normalmente hay aspectos cualitativos que pueden incidir fuertemente en la decisión, pero que no son incorporados debido a su complejidad para definirles algún esquema de medición que revele su grado de aporte en el proceso de toma de decisión.

- d. Identificación de alternativas.** Corresponden a propuestas factibles mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo general. Cada una de las alternativas presenta características con pros y contras.

10. **Árbol de jerarquías**

Consiste en elaborar una representación gráfica del problema en términos de la meta global, los criterios y las alternativas de decisión. Esta gráfica recibe el nombre de Árbol de Jerarquías e ilustra la jerarquía para el problema.

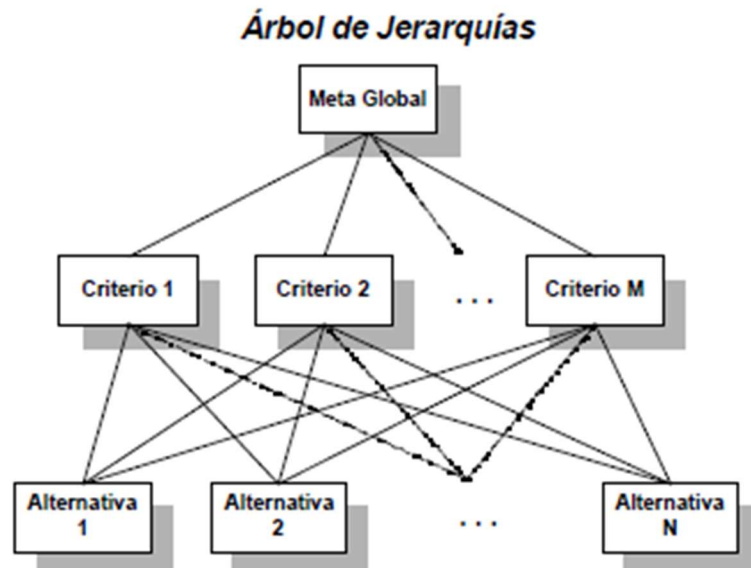


Figura 21. Árbol de Jerarquías del método AHP

El método AHP consiste en hacer que el decisor especifique sus opiniones con respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios de su contribución al logro de la meta global.



Cuando se construye la Jerarquía, se puede hacer de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba. La construcción de arriba hacia abajo se inicia con la identificación de los criterios más globales, es decir desde lo más general hasta lo más particular. De esta manera, todos los aspectos generales recopilados en la definición del problema están presentes en ese primer nivel a manera de criterios.

Cada criterio identificado debe ir acompañado de una descripción de lo que significa. Si se requiere, de los criterios pueden desprenderse subcriterios. Estos últimos deben guardar una relación jerárquica con el criterio del que se desprenden.

En la construcción de abajo hacia arriba el proceso se desarrolla a la inversa. Primero se generan todas las características que permiten diferenciar entre las alternativas y posteriormente se construye el modelo jerárquico agrupando aquellas características que mantienen un factor común a manera de criterios o subcriterios, según sea el caso, hasta llegar al objetivo general.

El sentido en que se comienza a construir va a depender de los datos disponibles e inclusive del grupo decisor. Si en la elaboración están definidas las alternativas y se conocen sus pros y contras, se puede iniciar el modelo de abajo hacia arriba. En caso contrario, se recomienda iniciar desde arriba hacia abajo, puesto que es un enfoque para situaciones de planeación estratégica en donde los objetivos están más claros que las alternativas.

11. Evaluación del modelo

En la evaluación se examinan los elementos del problema aisladamente por medio de comparaciones de pares. Las evaluaciones o juicios son emitidos por cada analista o grupo de interés.

De esta forma, el éxito en esta etapa dependerá de la inclusión de los grupos de interés o decisores que se verán representados en el modelo construido y podrán evaluar el modelo consensuado de acuerdo con sus intereses y necesidades propios.

Los pasos para seguir para la evaluación de los componentes del modelo jerárquico son:

- Establecimiento de las Prioridades.
- Emisión de Juicios y Evaluaciones.

11.1. Establecimiento de las Prioridades.

El AHP utiliza comparaciones pareadas para establecer medidas de prioridad tanto para los criterios como las alternativas de decisión.

11.2. Emisión de los Juicios y Evaluaciones.

Los juicios son la base del proceso llevado a cabo por AHP. Los juicios pueden estar guiados por información científica, técnica y la dada por la experiencia y conocimientos del grupo decisor útiles para evaluar los diferentes componentes del Modelo. Es esta situación lo que hace que al AHP diferente a otros métodos, puesto que dentro de la evaluación del modelo se toman en cuenta los juicios, que en este caso son las opiniones de cada uno de los individuos y/o grupos de interés involucrados en la toma de decisión.

Esta evaluación se realiza por medio de comparaciones binarias (de a pares) frente a un tercer elemento: permite conocer y medir las preferencias de los individuos o grupos de interés (actores) respecto a los diferentes componentes del modelo (criterios, subcriterios, alternativas).

Cada persona expresa su preferencia haciendo la pregunta apropiada mediante los términos importancia, preferencia o probabilidad, asignando un valor numérico, el cual se mide

la intensidad de su preferencia. El AHP dispone de una escala creada por el propio Thomas L. Saaty que mide los juicios emitidos por el grupo decisor (ver Tabla 4).

Este paso de la emisión de juicios consiste en que: para cada elemento “e” de un nivel de la jerarquía, se comparan de a pares de elementos del nivel inmediatamente inferior, con respecto de su influencia en “e”.

Luego se debe encontrar el vector propio asociado al mayor valor propio de la matriz de comparación a pares.

12. Resultado final

Una vez realizada la totalidad de comparaciones se obtiene el resultado final consensuado: ordenamiento de las alternativas. Este resultado está basado entonces, en las prioridades, en la emisión de juicios y evaluación hecha a través de las comparaciones de los componentes del modelo jerárquico, llevada a cabo por los actores.

12.1. Síntesis

El AHP logra combinar todos los juicios u opiniones en un todo, En el cual las alternativas quedan organizadas desde la mejor hasta la peor.

El AHP permite entonces, deducir los pesos que reflejan las percepciones y valores propuestos con mucha precisión, Las prioridades deducidas para cada faceta del complejo problema que está en estudio serán sintetizadas para obtener prioridades generales y una ordenación de las alternativas.

12.2. Análisis de sensibilidad

Este análisis permite visualizar y analizar la sensibilidad del resultado (ordenación de las alternativas) respecto de posibles cambios en la importancia de los criterios (supuestos). El análisis de sensibilidad debe responder a la pregunta: ¿Qué pasa si...?; Facilitando el análisis en aquellos procesos de toma de decisión en los que se requiere volver a aplicar el AHP en un corto o mediano plazo porque son procesos dinámicos que requieren ser revisados y ajustados en el tiempo porque su entorno está en continuo cambio.

4.2.3.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP EN DISTINTOS CAMPOS

Para demostrar la idoneidad del Método AHP para la elección idónea de una presa, vamos primero a mostrar varios ejemplos de distintos campos en donde se ha utilizado este tipo de Método con resultados muy satisfactorios.

1. La licitación pública

Según Cereigido (2.012) la licitación pública es una de las principales vías que utilizan gran cantidad de empresas a la hora de conseguir contratos. En muchas ocasiones, la competencia es elevada tanto en número de licitadores como en márgenes de beneficio y la decisión de elegir a uno u otro se vuelve más compleja. El hecho de seleccionar una oferta más ventajosa que otra, permite ahorrar recursos al Estado para destinarlos a otros proyectos.

En este contexto, según Casañ (2.013) habitualmente, el método más utilizado a la hora de comparar ofertas competitivas y seleccionar la más adecuada, tanto en licitaciones de la administración pública como el sector privado, consiste en establecer una serie de criterios, así como su peso relativo.

El artículo 150 del texto refundido de la Ley de Contratos del Sector Público explica que se deben utilizar criterios directamente vinculados al objeto del contrato, como por ejemplo, la calidad, el precio, la fórmula utilizable para revisar las retribuciones ligadas a la utilización de la obra o la prestación del servicio, el plazo de ejecución o entrega de la prestación, el coste de utilización, las características medioambientales o vinculadas con la satisfacción de exigencias



sociales que respondan a necesidades definidas en las especificaciones del contrato, la rentabilidad, el valor técnico, las características estéticas o funcionales, la disponibilidad y coste de los repuestos, el mantenimiento, la asistencia técnica, el servicio postventa u otros semejantes.

Asimismo, añade que es necesario el uso de más de un criterio en la adjudicación de determinados contratos, como por ejemplo, aquéllos cuyos proyectos o presupuestos no hayan podido ser establecidos previamente y deban ser presentados por los licitadores, aquéllos para cuya ejecución facilite el órgano, organismo o entidad contrate materiales o medios auxiliares cuya buena utilización exija garantías especiales por parte de los contratistas o aquéllos que requieran el empleo de tecnología especialmente avanzada o cuya ejecución sea particularmente compleja.

Los criterios que se utilicen en la adjudicación de una oferta se determinarán por el órgano de contratación y se detallarán en el anuncio, en los pliegos de cláusulas administrativas particulares o en el documento descriptivo. Uno de tantos ejemplos, puede ser el Pliego de Cláusulas administrativas particulares que emitió el Ayuntamiento de Logroño para la impresión y distribución de los carteles y programas de las fiestas de San Bernabé y San Mateo 2.017. En ella, se utilizaron diferentes criterios para la valoración de las ofertas. Por una parte, se utilizan criterios objetivos que permiten una puntuación máxima de 75 puntos: hacer más ejemplares de los exigidos y reducir los plazos de entrega y el porcentaje de publicidad. Por otra, se utilizaron criterios subjetivos que permiten obtener hasta 25 puntos: uso de papel 100% reciclado, blanqueado mediante procesos libres de cloro con un nivel de blancura entre el 70 y el 90%, uso de tintas ecológicas libres de disolventes y la implementación de las nuevas tecnologías en la distribución de programas.

En referencia a la ponderación relativa atribuida a los diferentes criterios, Casañ (2.013) explica que suele establecerse a través de una puntuación determinada por la importancia que se quiere atribuir a cada uno de ellos y añade que esto presenta un inconveniente, no existe ningún método que garantice la objetividad del peso asignado. Otro inconveniente se localiza a la hora de comparar las distintas alternativas u ofertas presentadas. Debido a que existen criterios que se evalúan mediante fórmulas matemáticas como el precio ofertado, la baja ofertada, el plazo de ejecución o el plazo de redacción del proyecto y otros de forma subjetiva como la calidad o el diseño, el proceso de comparación de las alternativas se vuelve más complejo.

No obstante, es relevante la aplicación del método AHP en esta situación ya que permite solucionar los inconvenientes mencionados anteriormente.

2. Determinación del impacto ambiental y valoración de activos medioambientales

En referencia al problema de determinación del impacto ambiental, según García (2.004) sus orígenes se remontan a la década de 1.970, cuando al realizarse numerosas conferencias y reuniones en las que discutieron una amplia cantidad de aspectos y llegó a la conclusión de que era necesario incorporar la variable ambiental como uno de los principales factores que permiten el progreso económico y social. En ese momento, se plantearon conceptos como el desarrollo sostenible o la asignación eficiente de estos recursos.

Se podría definir el impacto ambiental como la alteración que la ejecución de un plan, programa, proyecto o actividad introduce en el medio, con referencia a las condiciones iniciales del sistema en el que se implanta esa acción [García (2.004)]. En la mayoría de los países, cuando se pretender realizar una actividad que suponga en mayor o menor medida un impacto en el medioambiente, el titular del proyecto debe presentar ante la autoridad competente un documento técnico denominado estudio del impacto medioambiental con el fin de obtener la declaración de impacto medioambiental. Este documento debe contener información acerca de

la descripción del proyecto y sus acciones, las alternativas técnicamente viables, la justificación de la solución adoptada y la identificación y valoración de los impactos entre otros aspectos.

En el área de la determinación de las alternativas y la identificación y valoración de los impactos ambientales donde los métodos multicriterio sirven de utilidad, según García, como herramienta para avanzar en la solución de un problema en el que intervienen diferentes puntos de vista contradictorios entre sí, de tal forma que permiten obtener las mejores soluciones no para cada uno, pero sí para el conjunto de estos.

En otras palabras, permiten generar las mejores soluciones para el conjunto de agentes de la sociedad que participan en la decisión, teniendo en cuenta sus diferentes perspectivas.

Siguiendo a García (2.004), estas técnicas se empezaron a aplicar a este ámbito a partir de la I Conferencia de Toma de Decisiones Multicriterio celebrada en Estados Unidos en 1.972. Gregory y Slovic, en 1.977 y Romero un año antes consideraron la posibilidad de incluir en el análisis de los problemas ambientales estas herramientas. Desde entonces se han realizado multitud de estudios reales con el fin de ayudar a la toma de decisiones en este contexto, como por ejemplo los de Aznar y Caballer (2.005) en los que se emplea el método AHP.

Según Falconí y Birbano (2.004) no es posible establecer a priori qué método resulta mejor para un problema empírico dado, sino que las condiciones en las que estos métodos se aplican mejor dependen del contexto. Por lo tanto, el problema radica en elegir el método correcto para el problema en cuestión. Esto hace que el enfoque sea más flexible pero también más complejo. Es decir, la decisión de elección de un método multicriterio u otro se podría considerar multicriterio en sí misma.

Asimismo, el método AHP es la técnica más utilizada ya que, según Parra, Calatrava y de Haro (2.005) permite hacer más transparente el proceso de toma de decisiones al ser necesario explicitar las preferencias de los diferentes agentes implicados en la toma de decisiones. Estos autores explican, respaldándose en trabajos anteriores [Moreno (1.998 – 2.002), Aguarón et al. (1.998), Moreno et al. (1.999) y Forman y Selly (2.001)] que una de sus principales fortalezas es la cuantificación de información cualitativa y el continuo aprendizaje de los agentes que toman las decisiones, pudiendo retroalimentar el proceso.

Este método ha sido utilizado en la planificación el desarrollo en diversos países de Sudamérica. Según Parra, Calatrava u de Haro (2.005), uno de sus principales usos se dio en Chile en 1.993 para la toma de decisiones ambientales. En concreto, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA, en 1.997 elaboró un estudio mediante esta metodología con el fin de evaluar usos alternativos del suelo. También dan referencia de otros trabajos que tratan temas similares, como el de Alphonse, en 1.997, que sugiere modelos AHP para evaluar distintas decisiones en agricultura en países en vías de desarrollo. Y añaden que, según el trabajo de Cervantes realizado en 2.002, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, en colaboración con los gobiernos respectivos, y otras instituciones, están empleando la metodología AHP para la valoración de posibles usos del suelo.

Este último autor explica que el AHP también ha sido empleado empíricamente en la valoración y evaluación ambiental. Parra, Calatrava y de Haro (2.005) proponen varios trabajos que destacan en este ámbito, como el desarrollado por Daniel J. Dzureck en 2.011 sobre la planificación del uso del Mar del Este en Japón, el de Giangrande, desarrollado en 2.008 y 2.009 que integra la metodología AHP en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, y del Deschaine publicado en 2.008 que utiliza esta herramienta para la evaluación de políticas ambientales en Estados Unidos.



3. Otras aplicaciones

Según el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) (2.00), el diseño de productos orientados al usuario es una tarea que requiere cada vez más un enfoque sistemático que combine el potencial creativo de los técnicos y diseñadores con el rigor de las técnicas más avanzadas de decisión. Además, la selección del mueble del IBV (2.001) explica que el método AHP permite facilitar la toma de decisiones en el diseño del producto. Entre las diferentes publicaciones realizadas en este ámbito, se pueden mencionar la de González et al. (2.009) en la que se presentan los resultados de la aplicación de la técnica de análisis multicriterio AHP para decidir qué clase de productos técnicos de apoyo deben ser diseñados para favorecer la inclusión social de personas en situación de discapacidad o el de González et al. (2.009) en el que se realizó un experimento de laboratorio para generar ideas a partir de la propuesta de un problema de diseño de un producto. Y con los resultados de este, se utilizó el método AHP, con el fin de medir la Variedad (en relación con el Proceso Creativo) y la Calidad y Novedad (en relación (en relación con el Producto Creativo).

No obstante, queda reflejado en los ejemplos desarrollados que el Método AHP es una herramienta muy potente utilizada en multitud de campos en los que se requiere una decisión acertada a raíz de un problema complejo.

Es por este motivo por lo que este trabajo se centra en la aplicación del método AHP para la elección idónea de una presa.

Finalmente, atendiendo a las características, así como al procedimiento a seguir en cada uno de los métodos analizados, el MAUT no parece adecuado para su aplicación al problema de la selección del tipo de presa por la gran dificultad que supone formular las funciones de utilidad. Sin embargo, tanto ELECTRE como AHP son más adecuados, aunque ambos requieren determinar los coeficientes de ponderación.

Dentro del método AHP, como se ha visto, se propone una metodología para la obtención de pesos, la cual es la que se propone realizar en este trabajo ya que, con los pesos obtenidos se podría resolver el problema de la selección del tipo de presa. Esta metodología, según lo mencionado, parece compatible con el método ELECTRE.

A continuación, aplicando la metodología AHP, se obtendrán los pesos para obtener los coeficientes de ponderación de los diferentes criterios considerados.

5. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA MEDIANTE AHP

Una vez tenemos claro todo lo explicado hasta el momento, es hora de centrarnos en el problema que nos atañe. Recordemos que el objetivo principal de este trabajo es el análisis de los factores principales a tener en cuenta y en determinar los correspondientes coeficientes de ponderación para cada uno de ellos.

Aunque existen numerosas herramientas que implementan los fundamentos matemáticos y técnicos para la toma de decisiones, en este trabajo se ha realizado todo el proceso de decisión mediante el programa Excel.

Y, ¿por qué usar Excel y no un software especializado para este tipo de trabajos? La respuesta es sencilla.

Con un software especializado la función del decisor (nosotros en este caso) sólo se tiene que preocupar de introducir los datos que el software necesita. Éste realiza toda la metodología y te responde con una serie de valores que tendríamos que interpretar.

Por tanto, se ha elegido el programa Excel para realizar todo el proceso del método AHP paso por paso, y así, mostrar cómo se ha trabajado y cómo trabaja en sí dicho método.

5.1. INTRODUCCIÓN DEL PROBLEMA

De esta forma, los criterios que, a nuestra elección, son los más representativos a la hora de ejecutar una infraestructura de este tipo, son los que siguen:

- Coste.
- Plazo.
- Seguridad.
- Funcionalidad.
- Impacto ambiental.



CRITERIOS

Ahora ya tenemos el primer paso de nuestro problema resuelto. Aunque todavía no se sabe qué tipo de presa es la más idónea de las cinco tipologías distintas que tenemos, ya tenemos las alternativas y los criterios bien definidos.

Los criterios en los que nos hemos basado son los explicados en el **“Capítulo 3. Factores que influyen en la selección idónea de una presa”**. Éstos, son criterios y, a su vez, subcriterios.

No obstante, en una primera aproximación, conocida como **“Fase Preliminar”** se seleccionan los subcriterios más representativos para los criterios seleccionados. Los subcriterios a seleccionar son los siguientes:

- Topografía.
- Estructura geotécnica y geología del emplazamiento de la presa.
- Disponibilidad de material de construcción.
- Tamaño y ubicación del aliviadero.
- Coste.
- Medio ambiente y opinión pública.
- La condición económica del país.
- Clima y tiempo disponible para la construcción.
- Falta de disponibilidad de personal auxiliar con habilidades especiales.
- Sismicidad.
- Altura de presa.
- Función del depósito.
- Rapidez de construcción.
- Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio.
- Condición de construcción por etapas.
- Conocimiento y coraje de los ingenieros.
- Contratos, normas y decisiones conservadoras para cada país.
- Sencillez del desvío del río.
- Seguridad.
- Probable acción de las olas.
- Probable acción del hielo.
- Excavación de cimientos.
- Si el agua se introduce en las estructuras que se van a atravesar a través de la presa.
- Descarga del río.
- Los efectos del agua agresiva en las presas.
- La diferencia de agua entre la cabecera y la cola.
- Efectos de la fuerza de levantamiento bajo la presa.
- Peligro de guerra y sabotaje.
- Falta de agua para la construcción.
- Apariencia.



SUBCRITERIOS



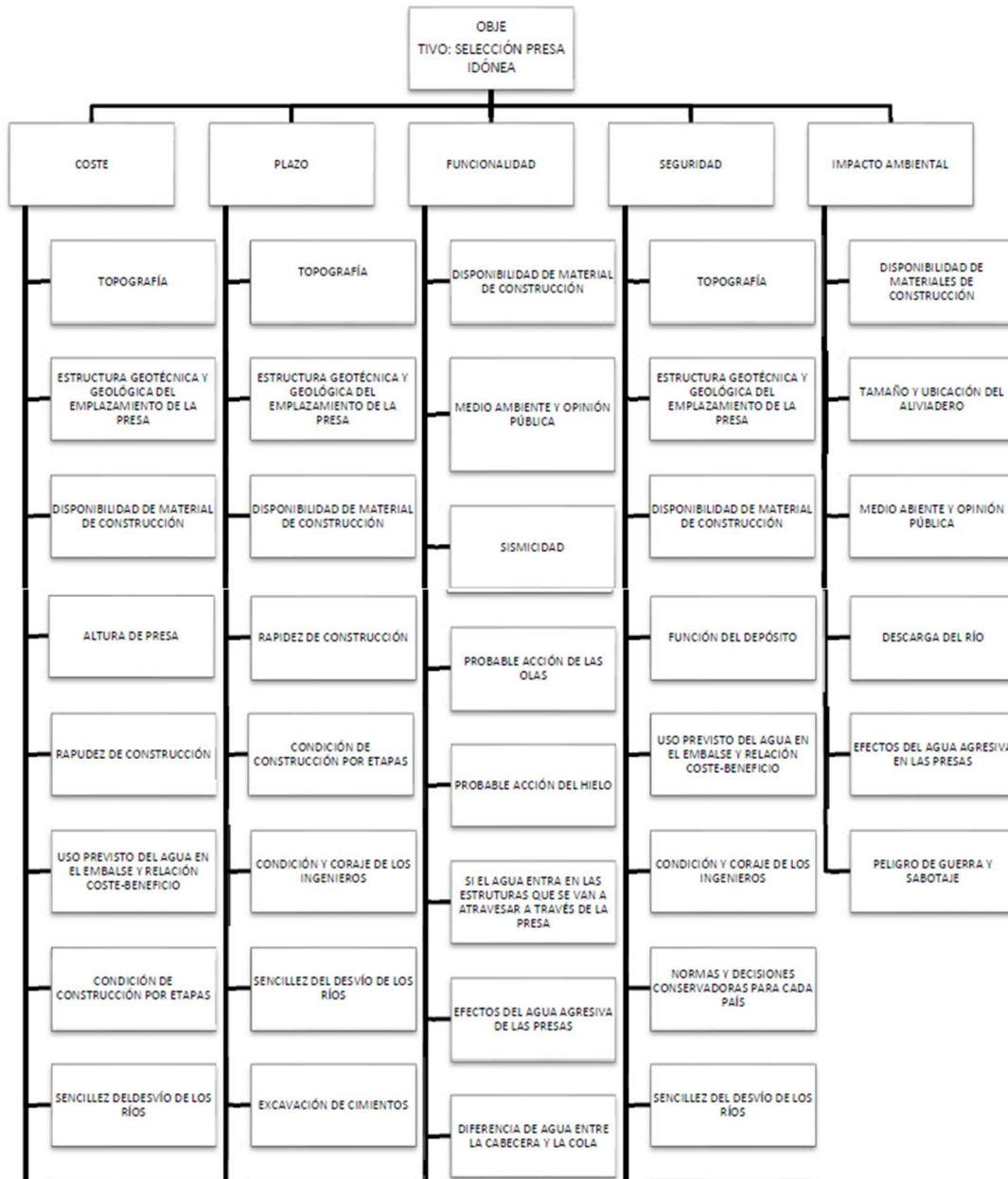
- Tipos de cimientos.

En esta Fase Preliminar, como ya se ha comentado, se seleccionan los subcriterios adecuados a los criterios seleccionados. Para realizar esta selección, se ha utilizado los conocimientos del decisor aplicados a este problema. Para ello, se ha realizado una tabla de factores, la cual se muestra a continuación:

CARACTERÍSTICA/FACTORES	COSTE		PLAZO	FUNCIONALIDAD	SEGURIDAD	IA
	Coste de construcción	Coste de operación y mantenimiento	Plazo de construcción y puesta en servicio	Funcionalidad	Condiciones de seguridad	Impacto Ambiental
Topografía						
Estructura geotécnica y geológica del emplazamiento de la presa						
Disponibilidad de material de construcción						
Tamaño y ubicación del aliviadero						
Coste						
Medio ambiente y opinión pública						
Possibilidad de inundación durante la construcción						
Condición económica del país						
Clima y tiempo disponible para la construcción						
Falta de disponibilidad de personal auxiliar con habilidades particulares						
Sismicidad						
Altura de la presa						
Función del depósito						
Rápido de construcción						
Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio						
Condición de construcción por etapas						
Condición y coraje de los ingenieros						
Normas y decisiones conservadoras para cada país						
Sediles del diablo de los ríos						
Seguridad						
Probable acción de las olas						
Probable acción del hielo						
Excavación de cimientos						
Si el agua entra en las estructuras que se ven a atravesar a través de la presa						
Descarga del río						
Efectos del agua agresiva en las presas						
Diferencia de agua entre la cabecera y la cola						
Efectos de la fuerza de levantamiento bajo la presa						
Peligro de guerra y sabotaje						
Falta de agua para la construcción						
Apariencia						
Construcción sobre diferentes cimientos						

Tabla 5. Tabla de asignación de subcriterios a los criterios seleccionados. Fuente propia.

Una vez realizamos la tabla 5, tenemos claro qué subcriterios corresponden a los criterios que se han elegido en el paso anterior. Por lo tanto, se nos queda un árbol de jerarquías de la siguiente forma:



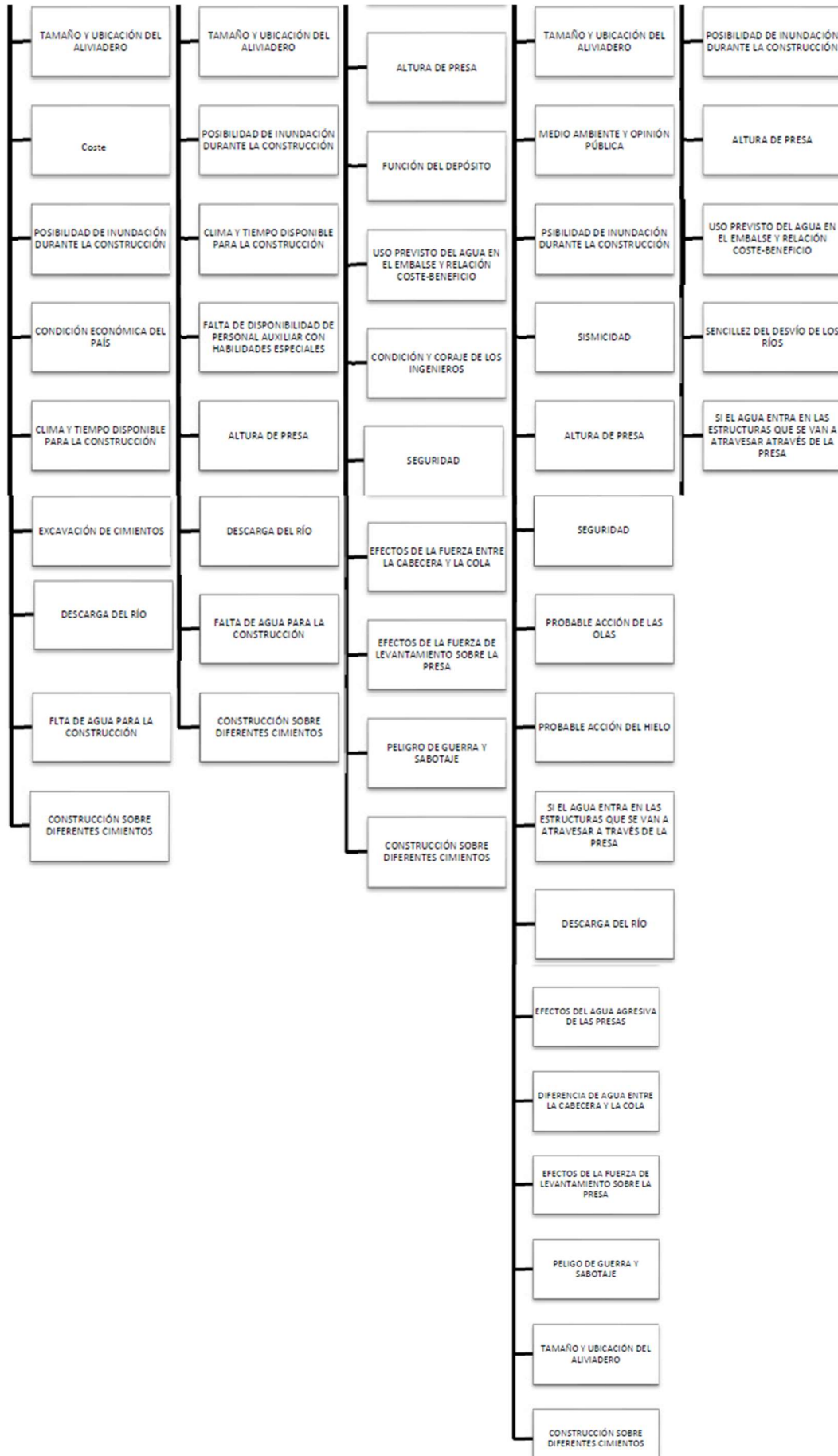


Figura 22. Árbol de Jerarquías del Método AHP. Edad Temprana. Fuente Propia

Como se puede observar en el Árbol de Jerarquías, nos salen una infinidad de subcriterios aplicados a los criterios, anteriormente seleccionados.

A continuación, se procede a la selección, mediante datos cualitativos del propio decisor, de los subcriterios más relevantes a los criterios que preceden. Esto es lo que se conoce como “Fase de Selección”, es decir, la fase de selección se podría definir como el árbol de jerarquías final sobre el que se realizarán los cálculos procedentes del Método AHP.

No obstante, en la etapa posterior se tiene el siguiente árbol de jerarquías:

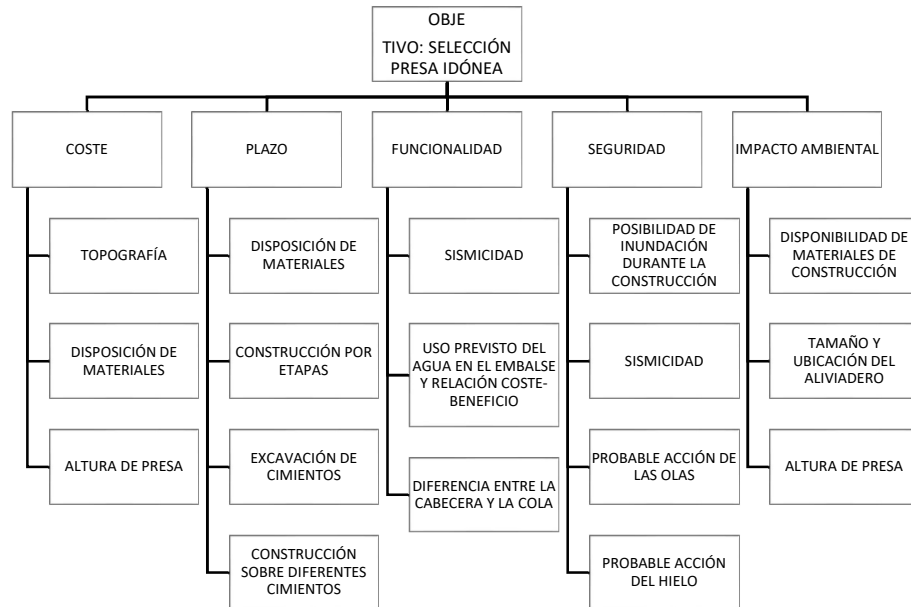


Figura 23. Árbol de Jerarquías del Método AHP. Etapa posterior. Fuente Propia

Tal y como muestran las imágenes 16 y 17, existe una gran diferencia de los subcriterios elegidos en un primer tanteo, a los elegidos para desarrollar el método y llegar a la solución que buscamos. Es, entonces, el árbol de jerarquías de la imagen 17 el que se va a utilizar para el desarrollo del AHP.

5.2. PROCEDIMIENTO DEL PROBLEMA

Una vez hemos conseguido obtener el árbol de jerarquías de la etapa posterior, comenzamos comparando dos a dos el nivel superior, es decir, los criterios. Para esta comparación, atribuimos un valor del 1 al 9, según la escala mencionada con anterioridad, según el grado de importancia del criterio 1 sobre el criterio 2. Si se diese el caso de que el criterio 2 tenga más importancia que el criterio 1, será 1/valor de importancia. Con respecto a lo que hemos comentado, se nos queda una comparación del nivel superior de la siguiente forma:

			C _{ij}
Coste	vs.	Plazo	2,00
Coste	vs.	Funcionalidad	1,00
Coste	vs.	Seguridad	0,50
Coste	vs.	Impacto Ambiental	2,00
Plazo	vs.	Funcionalidad	0,50
Plazo	vs.	Seguridad	0,33
Plazo	vs.	Impacto Ambiental	1,00
Funcionalidad	vs.	Seguridad	0,50
Funcionalidad	vs.	Impacto Ambiental	2,00
Seguridad	vs.	Impacto Ambiental	3,00

Imagen 7. Comparaciones pareadas del nivel superior

Por lo tanto, la matriz de comparaciones pareadas que nos queda es:

	Coste	Plazo	Funcionalidad	Seguridad	Impacto Ambiental
Coste	1,000	2,000	1,000	0,500	2,000
Plazo	0,500	1,000	0,500	0,333	1,000
Funcionalidad	1,000	2,000	1,000	0,500	2,000
Seguridad	2,000	3,000	2,000	1,000	3,000
Impacto Ambiental	0,500	1,000	0,500	0,333	1,000

Figura 24. Matriz de comparaciones pareadas del nivel superior

Esta es la matriz con la que se opera para poder obtener los pesos relativos referentes al nivel superior.

La matriz de comparaciones pareadas se multiplica por ella misma (primera iteración del procedimiento), obteniendo unos valores, de los cuales, cada fila se suma y se obtiene un total. Cada valor parcial de esta suma se divide entre el total y se obtienen los pesos relativos, es decir:

$M^2=M \times M$					Suma	Eigenv (#1)
5,000	9,500	5,000	2,833	9,500	31,833	0,206
2,667	5,000	2,667	1,500	5,000	16,833	0,109
5,000	9,500	5,000	2,833	9,500	31,833	0,206
9,000	17,000	9,000	5,000	17,000	57,000	0,369
2,667	5,000	2,667	1,500	5,000	16,833	0,109
Total					154,333	1

Figura 25. Primera iteración para la obtención de los pesos relativos del nivel superior.

$M^4=M^2 \times M^2$					Suma	Eigenv (#1)	Diferencia
126,166667	238,1667	126,166667	71	238,166667	799,667	0,206	0,000
66,83333333	126,1667	66,83333333	37,61111111	126,166667	423,611	0,109	0,000
126,1666667	238,1667	126,166667	71	238,166667	799,667	0,206	0,000
225,6666667	426	225,666667	127	426	1430,333	0,369	0,000
66,83333333	126,1667	66,83333333	37,61111111	126,166667	423,611	0,109	0,000
Total					3876,889	1	

Figura 26.. Última iteración para la obtención de los pesos relativos del nivel superior

Se harán tantas iteraciones como requiera la matriz hasta que la diferencia de $Eigenv(\#n) - Eigenv(\#n-1) = 0$, tal y como se muestra a continuación:

Entonces, tenemos que, al ser la diferencia 0, los pesos relativos para el nivel superior son los que siguen:

Criterio	Pesos
Coste	0,21
Plazo	0,11
Funcionalidad	0,21
Seguridad	0,37
Impacto Ambiental	0,11
Sum =	1,000

Figura 27. Pesos relativos del nivel superior

Recordamos que la suma de los pesos debe ser igual a 1. Si no se diese el caso de que la suma de los pesos relativos sea igual a 1, se tendrían que revisar los cálculos.

El árbol de jerarquías queda de la siguiente forma:

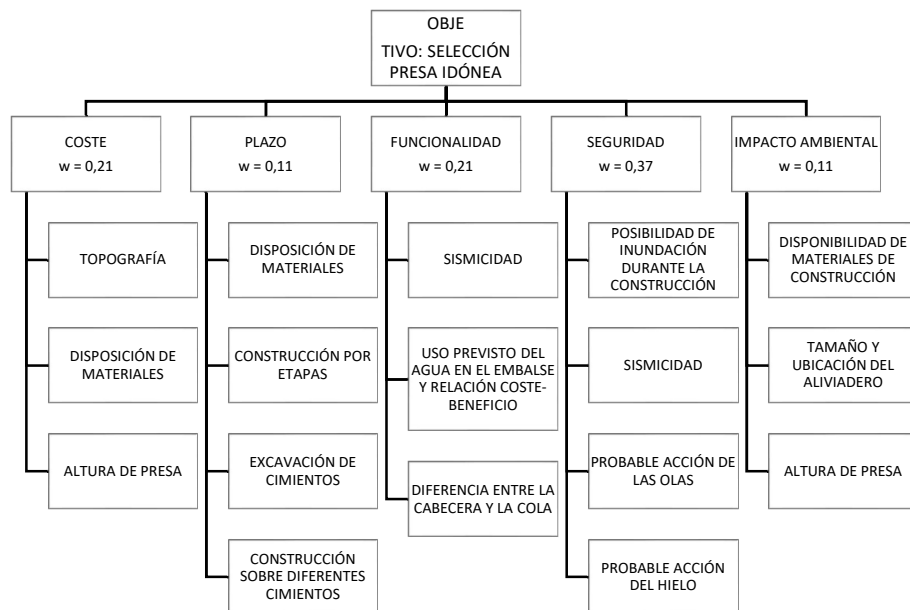


Figura 28. Árbol de jerarquías con ponderación del nivel superior.

El procedimiento para la obtención de los pesos relativos de los subcriterios es exactamente igual que el realizado para la obtención de los pesos relativos del nivel superior (criterios), por lo cual, vamos a mostrar para cada subcriterio las comparaciones pareadas, la matriz de comparaciones pareadas y la última iteración, con la que se observan los pesos relativos.

Con referencia al criterio COSTE, se han tenido las siguientes comparaciones pareadas:

		C_{ij}
Topografía	vs. Disposición de materiales	5,00
Topografía	vs. Altura de la presa	3,00
Disposición de materiales	vs. Altura de la presa	3,00

Figura 29. Comparaciones pareadas del criterio COSTE



Por lo tanto, la matriz de comparaciones pareadas que se obtiene es la que sigue:

	Topografía	Disposición de materiales	Altura de la presa
Topografía	1,000	5,000	3,000
Disposición de materiales	0,200	1,000	3,000
Altura de la presa	0,333	0,333	1,000

Figura 30. Matriz de comparaciones pareadas del criterio COSTE

Y los pesos relativos, entonces:

$M^{16}=M^8 \times M^8$			Suma	Eigenv (#4)	Diferencia
64283633,0	187966485,8	329770400,1	582020519,0	0,651	0,000
21984693,3	64283633,0	112779891,5	199048217,9	0,223	0,000
12531099,1	36641155,6	64283633,0	113455887,6	0,127	0,000
Total			894524624,5	1,000	

Figura 31. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio COSTE

Criterio	Peso
Topografía	0,651
Disposición de materiales	0,223
Altura de la presa	0,127
Suma=	1,000

Figura 32. Pesos relativos del criterio COSTE

En cuanto al criterio PLAZO, obtenemos las siguientes comparaciones pareadas:

		Cij	
Disposición de materiales	vs.	Construcción por etapas	3,00
Disposición de materiales	vs.	Excavación de cimientos	0,14
Disposición de materiales	vs.	Construcción sobre diferentes cimientos	0,20
Construcción por etapas	vs.	Excavación de cimientos	0,33
Construcción por etapas	vs.	Construcción sobre diferentes cimientos	0,20
Excavación de cimientos	vs.	Construcción sobre diferentes cimientos	2,00

Figura 33. Comparaciones pareadas del criterio PLAZO

No obstante, la matriz de comparaciones pareadas es la que se muestra:

	Disposición de materiales	Construcción por etapas	Excavación de cimientos	Construcción sobre diferentes cimientos
Disposición de materiales	1,000	3,000	0,143	0,200
Construcción por etapas	0,333	1,000	0,333	0,200
Excavación de cimientos	7,000	3,000	1,000	2,000
Construcción sobre diferentes cimientos	5,000	5,000	0,500	1,000

Figura 34. Matriz de comparaciones pareadas del criterio PLAZO

Por lo tanto, los pesos relativos que se obtienen son los que siguen:

$M^{16}=M^8 \times M^8$					Suma	Eigenv (#1)	Diferencia
5650902088,657	8305674621,646	1267587161,271	1551561181,035	16775725052,609	0,107	0,000	
4062777689,672	5971455293,484	911345649,873	1115511854,596	12061090487,625	0,077	0,000	
25476615769,980	37445432376,917	5714809847,847	6995082859,884	75631940854,628	0,480	0,000	
17858123168,519	26247801460,464	4005860841,150	4903282747,020	53015068217,153	0,337	0,000	
Total				157483824612,015	1,000		

Figura 35. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio PLAZO

Criterio	Peso
Disposición de materiales	0,107
Construcción por etapas	0,077
Excavación de cimientos	0,480
Construcción sobre diferentes cimientos	0,337
Suma=	1,000

Figura 36. Pesos relativos del criterio PLAZO

Cuando hablamos de funcionalidad, tenemos que:

		Cij
Sismicidad	vs. Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio	5,00
Sismicidad	vs. Diferencia de agua entre la cabecera y la cola	3,00
Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio	vs. Diferencia de agua entre la cabecera y la cola	1,00

Figura 37. Comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD

Con las comparaciones pareadas que se obtienen, la matriz de comparaciones pareadas sería:

	Sismicidad	Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio	Diferencia de agua entre la cabecera y la cola
Sismicidad	1,000	5,000	3,000
Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio	0,200	1,000	1,000
Diferencia de agua entre la cabecera y la cola	0,333	1,000	1,000

Figura 38. Matriz de comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD

Por lo tanto, los pesos relativos que se obtienen son los que siguen:

$M^8 = M^4 \times M^4$					
			Suma	Eigenv (#1)	Diferencia
2362,360	9962,458	8402,662	20727,480	0,659	0,000
560,177	2362,360	1992,492	4915,029	0,156	0,000
664,164	2800,887	2362,360	5827,411	0,185	0,000
		Total	31469,920	1,000	

Figura 39. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio FUNCIONALIDAD

Criterio

Peso

Sismicidad	0,659
Uso previsto del agua en el embalse y relación coste-beneficio	0,156
Diferencia de agua entre la cabecera y la cola	0,185

Suma= 1,000

Figura 40. Pesos relativos del criterio FUNCIONALIDAD

Vamos ahora con el criterio con mayor peso relativo, la SEGURIDAD.

		C _{ij}
Posibilidad de inundación durante la construcción	vs. Sismicidad	3,00
Posibilidad de inundación durante la construcción	vs. Probable acción de las olas	7,00
Posibilidad de inundación durante la construcción	vs. Probable acción del hielo	7,00
Sismicidad	vs. Probable acción de las olas	5,00
Sismicidad	vs. Probable acción del hielo	5,00
Probable acción de las olas	vs. Probable acción del hielo	3,00

Figura 41. Comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD

Con lo cual, la matriz de comparaciones pareadas que se genera es:

	Posibilidad de inundación durante la construcción	Sismicidad	Probable acción de las olas	Probable acción del hielo
Posibilidad de inundación durante la construcción	1,000	3,000	7,000	7,000
Sismicidad	0,333	1,000	5,000	5,000
Probable acción de las olas	0,143	0,200	1,000	3,000
Probable acción del hielo	0,143	0,200	0,333	1,000

Figura 42. Matriz de comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD

Por lo tanto, los pesos relativos correspondientes serán:

$M^8 = M^4 \times M^4$					Eigenv (#1)	Diferencia
Suma						
25093,52893	51068,04	162931,6	284931,8	524025,026	0,574	0,000
12330,03807	25093,53	80060,81	140004,5	257488,863	0,282	0,000
4000,128235	8140,91	25974,42	45422,19	83537,649	0,092	0,000
2287,451654	4655,189	14852,69	25974,42	47769,748	0,052	0,000
Total				912821,285	1,000	

Figura 43 . Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio SEGURIDAD

Criterio	Peso
Posibilidad de inundación durante la construcción	0,574
Sismicidad	0,282
Probable acción de las olas	0,092
Probable acción del hielo	0,052
Suma=	1,000

Figura 44 . Pesos relativos del criterio SEGURIDAD

El último criterio, y no por ello menos importante, es el IMPACTO AMBIENTAL:

Disponibilidad de materiales de construcción	vs.	Tamaño y ubicación del aliviadero	0,14
Disponibilidad de materiales de construcción	vs.	Altura de presa	0,20
Tamaño y ubicación del aliviadero	vs.	Altura de presa	2,00

Figura 45. Comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL

Entonces, la matriz de comparaciones pareadas será:

	Disponibilidad de materiales de construcción	Tamaño y ubicación del aliviadero	Altura de presa
Disponibilidad de materiales de construcción	1,000	0,143	0,200
Tamaño y ubicación del aliviadero	7,000	1,000	2,000
Altura de presa	5,000	0,500	1,000

Figura 46. Matriz de comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL

Por lo tanto, los pesos relativos que se obtienen son los siguientes:

M ⁸ =M ⁴ xM ⁴			Suma	Eigenv (#1)	Diferencia
2270,909	288,0499	511,5214	3070,481	0,075	0,000
17903,25	2270,909	4032,699	24206,857	0,592	0,000
10081,75	1278,803	2270,909	13631,460	0,333	0,000
Total			40908,798	1,000	

Figura 47. Última iteración de la matriz de comparaciones pareadas del criterio IMPACTO AMBIENTAL

Criterio	Peso
Disponibilidad de materiales de construcción	0,075
Tamaño y ubicación del aliviadero	0,592
Altura de presa	0,333
Suma=	1,000

Figura 48. Pesos relativos del criterio IMPACTO AMBIENTAL

Una vez hemos obtenido los pesos relativos de todos los criterios, así como de los subcriterios, se nos queda un árbol de jerarquía tal que:

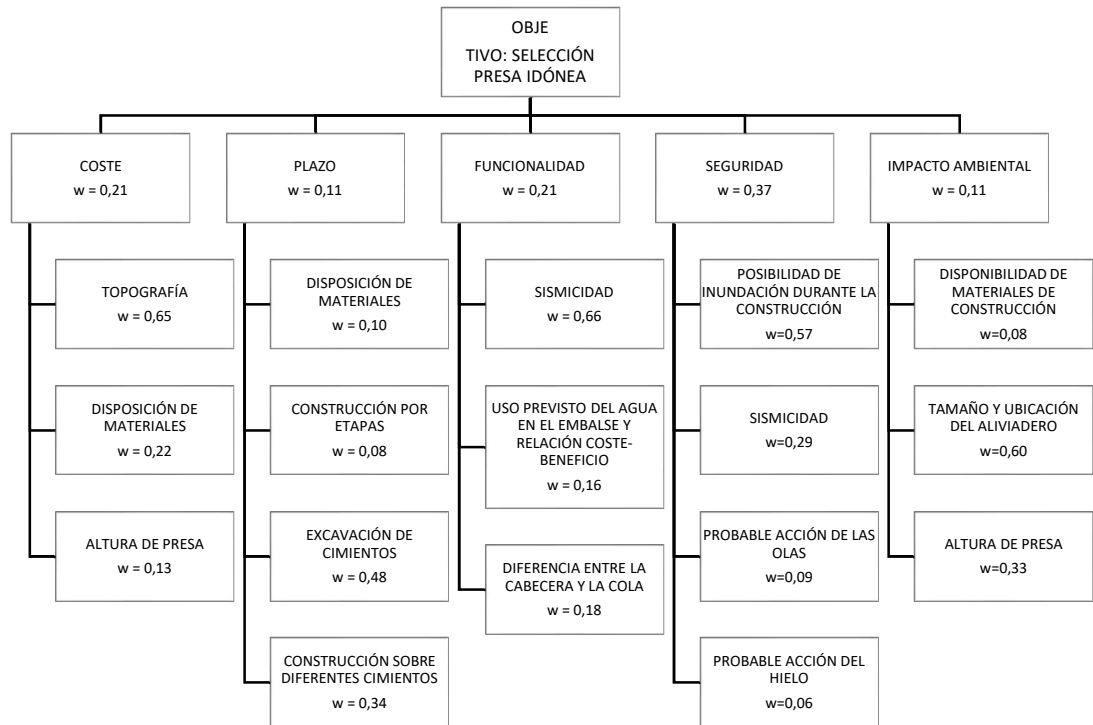


Figura 49. Árbol de Jerarquía con ponderación

Por lo tanto, atendiendo a los cálculos y al procedimiento que se ha explicado, se han obtenido los pesos de ponderación de los factores que se tenían en la Fase de Selección. Estos pesos, aunque resulten fácil de obtener si se tiene un buen criterio y conocimiento de cada uno de ellos, no hay que subestimarlos debido a que, de estos resultados obtenidos depende todo el proceso que habría que seguir mediante la metodología del AHP.

En primer lugar, de las distintas tipologías de presas que existen, este trabajo se centra en cinco tipologías que ya se han explicado y que se muestran a continuación:

- Presa de Gravedad (PG).
- Presa de Hormigón Compactado con Rodillo (RCC).
- Presa de Bóveda (BVD).
- Presa de Escollera con Pantalla de Hormigón (CFRD).
- Presa de Materiales Suelos Homogénea (PMS-H).



Tal y como se puede observar en nuestra elección, las tres primeras tipologías seleccionadas corresponden a presas de Hormigón y, las dos tipologías que le siguen, a presas de materiales sueltos.

Una vez tenemos qué tipologías de presas vamos a evaluar, nos haría falta conocer cuáles son sus principales características: forma del valle en la que son aptas su construcción, materiales que se emplean para su construcción, coste aproximado de cada una de ellas, plazo aproximado para su construcción..., tal y como se ha explicado en el **“Capítulo 2. Conceptos generales”**.

Atendiendo a las características que definen las tipologías seleccionadas, se procede a la selección de los criterios más representativos, conocidos como “el primer nivel o nivel superior”. De este nivel superior dependerán los subcriterios correspondientes para la correcta selección de nuestra presa, lo cual es lo que hemos calculado anteriormente.



Una vez se hayan obtenido los coeficientes de ponderación, se realiza la comparación dos a dos de cada alternativa, dándole importancia según el criterio y subcriterio que se analice, teniendo claro que este procedimiento se realiza del nivel superior al nivel inferior. Por ejemplo, el primer criterio que se encuentra es el coste y, a su vez, el primer subcriterio que se encuentra relacionado con este es la topografía.

Una vez se tienen los pesos de los subcriterios dependiendo de cada alternativa, se procede a montar la matriz de prioridades, la cual está compuesta por las alternativas y los subcriterios. De esta matriz se obtienen los pesos globales de las alternativas con relación de los criterios.

Esta matriz se multiplica con los pesos relativos de los criterios que se estén evaluando. En el caso del coste, sería la topografía, la disposición de materiales y la altura de presa. El resultado de esta operación son los pesos globales de las alternativas con respecto al criterio.

Por último, una vez se tienen los pesos globales, se introducen estos en la matriz formada por las alternativas y los criterios (coste, plazo, funcionalidad, seguridad e impacto ambiental). Esta matriz se multiplica por el peso relativo del nivel superior (criterios) y el resultado final es la solución que se quiere, en este caso, la solución daría la selección del tipo de presa.

En muchas ocasiones, se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de observar qué es lo que ocurre si se alteran los pesos de ponderación, es decir, en nuestro caso se tiene que el factor más limitante a la hora de la selección del tipo de presa es la seguridad.

Por lo tanto, a la hora de realizar un análisis de sensibilidad se debería preguntar, ¿qué pasaría si el factor más limitante fuera el plazo? Y así tantas veces se quieran alterar los resultados. Hay que tener en cuenta que, cuantos más análisis de sensibilidad se evalúen, más resultados se obtendrán y, con ello, mayor conocimiento de cómo afectan los factores a la selección del tipo de presa.

6. CONCLUSIONES

Con este trabajo se pone de manifiesto que los Métodos de Decisión Multicriterio son fundamentales a la hora de la resolución de problemas muy complejos en los que se tienen más opiniones de expertos (datos cualitativos) que datos cuantitativos.

En nuestro caso, se hace imprescindible la utilización de estos métodos debido a la complejidad e importancia que supone nuestro problema. La selección del tipo de presa idóneo es uno de los temas que más quebraderos de cabeza ha llevado a lo largo de la historia ya que, una mala elección supondría un desastre catastrófico tanto a nivel humano como a nivel estructural y ambiental (vidas humanas, inundaciones de terrenos servibles para agricultura, urbanización..., daños en patrimonios históricos, entre otros).

Aunque son muchas las tipologías de presa que existen, este trabajo se ha centrado en las que, hoy, son las que más se emplean en la actualidad. Si recordamos lo mencionado a lo largo de este trabajo, se han elegido cinco tipologías, tres de las cuales pertenecen al grupo de Presas de Fábrica y dos que, por el contrario, pertenecen al grupo de Presas de Materiales Suelos. Esto es porque, en la actualidad, aunque hubo un momento en el que la tipología más usada eran las referentes a las Presas de Materiales Suelos, se ha vuelto a confiar en las Presas de Fábrica. La explicación a este cambio de ideología radica en la facilidad de obtención de los materiales a emplear, así como en el proceso constructivo.

Sea cual sea las tipologías que se quieran comparar, siempre se tienen que resaltar unos criterios que las definan. En nuestro caso se han elegido los criterios para los que, a nuestro criterio, son los más importantes a la hora de evaluar una infraestructura de esta magnitud.



Coste: el dinero es y será el factor más limitante sea cual sea lo que se está evaluando, pero, en nuestro caso concreto, el coste en una presa es uno de los factores más limitantes debido a la gran magnitud económica a la que estas infraestructuras están sometidas.

Plazo: no hay que olvidar es que este factor es el único factor de los elegidos en este trabajo que se está directamente relacionado con el coste, de ahí su importancia. A mayor plazo de ejecución, mayor coste económico y, por lo tanto, debido a este, las tipologías de presas a utilizar se reducen ya que, existen tipologías en el que el plazo es mayor, sea cuales sean sus características.

Funcionalidad: uno de los factores a tener en cuenta y que, aunque a simple vista se piense que no tiene utilidad, tiene un factor limitante de elevada importancia debido a que, dependiendo la utilidad que se le quiera dar a la presa, se tendrán en cuenta unas tipologías u otras.

Seguridad: como se ha demostrado en este trabajo, la seguridad es el factor más importante a la hora de elegir una tipología de presa u otra. La seguridad juega un papel fundamental en este tipo de problemas ya que, un fallo en este factor podría suponer una catástrofe con millones de pérdidas, ya sean económicas, estructurales, ambientales...

Impacto ambiental: este es el factor que, aunque no limita las tipologías de presa a ser utilizada, hay que tenerlo en cuenta para no afectar al medio ambiental, tal y como lo conocemos. Para ello, se tiene en cuenta la fauna del emplazamiento donde se quiere construir la presa, así como la flora, con el fin de no afectar al ecosistema que ese emplazamiento tiene de forma natural.

Es por todo esto por lo que se hace indispensable a utilización de los Métodos de Decisión Multi-criterio para la correcta resolución del problema. En este trabajo se han explicado tres de los métodos más utilizados en la actualidad, ya que existen muchos otros. En primer lugar, se ha explicado el método MAUT, el cual, no es recomendable para la resolución de nuestro problema debido a la dificultad que supone formular las funciones de utilidad. Sin embargo, tanto el método ELECTRE como el AHP, son más adecuados para este tipo de problemas debido a la metodología que se explica en el capítulo correspondiente. Estos dos métodos, facilitan la obtención de los pesos de ponderación atendiendo a valores cualitativos y transformándolos en valores cuantitativos mediante una tabla de conversión. Finalmente, se ha elegido el Método AHP debido a los grandes resultados que se han obtenido mediante su utilización en problemas, dando igual el campo para el que haya sido utilizado.

Debido a la gran cantidad de factores que se tenían, se han utilizado dos fases para elección de los más importantes y con el objetivo de asignar a cada criterio el subcriterio adecuado. Una primera fase (Fase Preliminar) consiste en los subcriterios que formarán los criterios elegidos con anterioridad. Por otro lado, se tiene la Fase de Selección, la cual consiste en, mediante juicios de valor del experto, nosotros en este caso, de asignar los subcriterios más influyentes a los criterios.

En cuanto a los resultados obtenidos, después de realizar el estudio, se ha llegado a la conclusión de que, entre los criterios elegidos (coste, plazo, funcionalidad, seguridad e impacto ambiental), el criterio más limitante e importante a la hora de la selección del tipo de presa idóneo es la seguridad, lo cual tiene su lógica. 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. Además, se pone de manifiesto que el Método AHP es apto para la resolución de estos problemas tan complejos y con infinidad de criterios debido a su facilidad en la metodología y la facilidad para obtener los pesos de ponderación.



Lo que se ha pretendido con este trabajo es obtener los coeficientes o pesos de ponderación mediante la herramienta AHP. Aunque quede fuera del alcance de nuestro trabajo, el Método AHP se ha preparado para ser utilizado en un caso real mediante la herramienta auxiliar Excel.

En definitiva, hay que decir que este trabajo ha sido redactado y estructurado con el fin de dar a conocer distintas tipologías de presas utilizadas en la actualidad, dar a conocer la importancia que tienen los Métodos de Decisión Multi-criterio, así como dar respuesta a un problema tan complejo y con tantos factores que se tenían mediante el Método AHP, el más utilizados en la actualidad. En la elaboración del presente trabajo he aprendido mucho acerca de estos métodos, así como la importancia que tiene la utilización de estos para resolver problemas para los que, hasta hace años, no se tenía solución.

7. BIBLIOGRAFÍA

Emiroglu, M (2007). Influences on Selection og the type of Dam. Turkiye. Firat University, Faculty of Engineering, Civil Eng. Dept. Elazig.

Hass, R, y Meixner, O (2010). An illustrated guide to the Analytic Hierarchy Process. Vienna. Institute of Marketing & Innovation. University of Natural Resources and Applied Life Sciences.

Castillo, L. (2007). Apuntes de obras y aprovechamientos hidráulicos. TOMOS I y II. Cartagena. Universidad politécnica de Cartagena.

Guía Técnica nº2. Criterios para Proyectos de Presas y sus obras anejas. Comité Español de Grandes Presas.

Al Harbi, KM (2001). Application of AHP in Project management. International Journal of Project management.

Altarejos, L (2015). Apuntes de recursos hídricos. Análisis multiobjetivo y toma de decisiones en sistemas de recursos hídricos. Proceso Analítico Jerárquico. Ejemplo. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Altarejos, L (2015). Apuntes de Planificación y Gestión Avanzada de Sistemas de Recursos Hídricos. Análisis multiobjetivo y toma de decisiones en sistemas de recursos hídricos. Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Dai, X (2016). Dam site selection using an integrated method of AHP an GIS for decisión making support in Bortala, Northwest China. Sweden. Department of Physical Geography and Ecosystem Sciencie. Lund University.

Florez, V (2018). Presas Arco. Tipologías y Sistema Estructural. <https://www.eadic.com/presas-arco-tipologias-y-esquema-resistente/>.

Pérez, J, y Merino, M (2011). Definición de embalse. <https://definicion.de/embalse/>.

López, F., Cabeza, E. y Sanz, M. (2000). Desarrollo sostenible. Presa de Andévalo. Madrid.

López, F., Granados, A., Sanz, M. y Abadía, F. (2004). Andévalo enhances water resources management in Chanza river basin. Hydropower and Dams. London. Issue Three.

L. Saaty, T. (1980). The Analytical Hierarchical Porcess. J. Wiley. New York.

Taoufikallah, A. (2015). El Método AHP. Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Universidad de Sevilla.



Castillo, L. (2007). Apuntes de presas y embalses. Presas de Gravedad de Hormigón Compactado con Rodillo (RCC). Análisis Tensional de Presas de Gravedad. Presa de Contrafuertes. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Castillo, L. (2007). Apuntes de presas y embalses. Cuestiones generales. La cerrada y el Embalse. Estudios Previos. Sedimentación de Embalses. Presas de Gravedad Convencional. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Castillo, L. (2007). Apuntes de presas y embalses. Presas Arco y Bóveda. Hormigones para Presas. Producción y Colocación del Hormigón. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Vallarino, F, y Garrote, L. (1997). Tratado Básico de Presas. Tomos I y II. Colección Señor 11. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Altarejos, L. (2018). Apuntes de Planificación y Gestión Avanzada de Sistemas de Recursos Hídricos. Tema 13: Efectos del cambio climático sobre eventos extremos: crecidas y sequías. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Altarejos, L. (2018). Apuntes de Planificación y Gestión Avanzada de Sistemas de Recursos Hídricos. Tema 10: Análisis multiobjetivo y toma de decisiones. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Altarejos, L. (2018). Apuntes de Planificación y Gestión Avanzada de Sistemas de Recursos Hídricos. Tema 9: Modelos económicos de sistemas de recursos hídricos. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

García-Cascales, M. (2010). Tesis Doctoral: Métodos para la comparación de alternativas mediante un sistema de ayuda a la decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena.

Muñoz, B, y Romana, M. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte.

Aznar, J., y Guijarro, F. (2011). Nuevos Métodos de valoración. 2ª Edición. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia.

Saaty, T. (2001). Decision making with Independence and feedback: The Analytic Network Porcess. Pittsburg. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue.

Carrión, L. (2013). Trabajo Fin de Máster. Aplicación del método de las jerarquías analíticas para la toma de decisiones participativa en la gestión de fugas en redes de abastecimiento de agua. Valencia. Universitat Politècnica de València.

Ruiz, J. (2015). Trabajo Fin de Estudios. Métodos de decisión multicriterio ELECTRE y TOPSIS aplicados a la elección de un dispositivo móvil. Sevilla. Universidad de Sevilla.

Ospina, J. (2012). Aplicación del modelo multicriterio metodologías HAY y GP para la valoración económica de los activos ambientales. Manizales, Colombia. Universidad Nacional.

Brufman, A. F. (2.015): Definición de una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Universidad Nacional del Sur. Argentina