



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Informática

“DISEÑO Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA PROBLEMAS MULTIOBJETIVO/MULTICRITERIO”

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Informática

Profesor Patrocinante:
Sra. Gladys Mansilla Gómez
Ingeniero Matemático
Analista de Sistemas
Magíster en Estadística
D.E.A. Teoría de la Señal y Comunicaciones

Profesor Co-Patrocinante:
Sr. Martín Gonzalo Solar Monsalves
Ingeniero Civil Industrial
Magíster en Administración de Empresas

Profesor Informante:
Sr. Jorge Maturana Ortíz
Ingeniero Civil Informático
Magíster en Ingeniería Informática
Doctor en Informática

FRANCISCO JAVIER FIGUEROA RODRÍGUEZ
VALDIVIA - CHILE
2013

Valdivia, 4 de Enero 2013

De: Gladys Mansilla Gomez
Patrocinante

A: Juan Pablo Salazar Fernández
Director
Escuela de Ingeniería Civil en Informática

Ref: Calificación proyecto de título

De mi consideración:

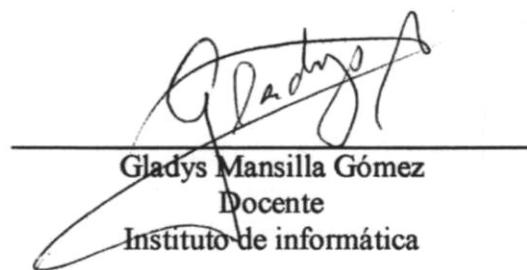
Habiendo revisado el trabajo de titulación "DISEÑO Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA PROBLEMAS MULTIOBJETIVO/MULTICRITERIO", presentado por el alumno sr. FRANCISCO JAVIER FIGUEROA RODRIGUEZ, mi evaluación del mismo es la siguiente:

Nota: 7.0 (siete coma cero)

Fundamento de la nota:

Aspecto	Evaluación
Cumplimiento de objetivos	7
Satisfacción de alguna necesidad	7
Aplicación del método científico	7
Interpretación de los datos y obtención de conclusiones	7
Originalidad	7
Aplicación de criterios de análisis y diseño	7
Perspectivas del trabajo	7
Coherencia y rigurosidad lógica	7
Precisión del lenguaje técnico	7

Sin otro particular, saluda atentamente a usted,



Gladys Mansilla Gómez
Docente
Instituto de informática

Valdivia, 08 de marzo de 2013

D e : Martín Gonzalo Solar Monsalves
Profesor Co-Patrocinante
A : Director Escuela Ingeniería Civil en Informática
Ref. : Informe Calificación Trabajo de Titulación

Nombre Trabajo de Titulación:

"DISEÑO Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA PROBLEMAS MULTIOBJETIVO/MULTICRITERIO."

Nombre Alumno:

Francisco Javier Figueroa Rodríguez.

Evaluación:

Cumplimiento del objetivo propuesto	7.00
Satisfacción de alguna necesidad	7.00
Aplicación del metodologías pertinentes	7.00
Interpretación de los datos y obtención de conclusiones	7.00
Originalidad	7.00
Aplicación de criterios de análisis y diseño	7.00
Perspectivas del trabajo	7.00
Coherencia y rigurosidad lógica	7.00
Precisión del lenguaje técnico en la exposición, composición, redacción e ilustración	7.00
Nota Final	7.00

Sin otro particular, atte.



Martín Solar Monsalves

Valdivia, Marzo 8, 2013

De: Jorge Maturana Ortiz
Profesor Informante
A: Juan Pablo Salazar Fernández
Director
Escuela de Ingeniería Civil en Informática
Ref: Calificación proyecto de título

De mi consideración,

Habiendo revisado el trabajo de titulación "*Diseño y desarrollo de herramientas de ayuda a la decisión para problemas multiobjetivos/multicriterio*", presentado por el alumno Sr. Francisco Javier Figueroa Rodríguez, mi evaluación del mismo es la siguiente.

Nota: **6,50** (seis coma cincuenta).

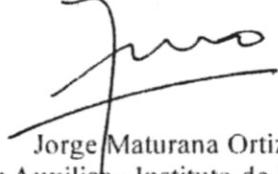
Fundamento de la nota

Esta tesis documenta el desarrollo de un sistema de información que utiliza distintos métodos para apoyar la toma de decisiones. El sistema es luego utilizado en el ordenamiento de estaciones de monitoreo en el río Cruces.

El estudio de la problemática ambiental está bien realizado, los métodos son explicados de manera suficientemente clara y el proceso de desarrollo de software es en líneas generales correcto. Sin embargo, estimo que el texto podría haber sido mejor logrado, a la luz de algunos problemas de legibilidad y errores tipográficos. En particular, no aparecen claramente los objetivos de la decisión en los ejemplo citados, y algunas figuras aparecen ilegibles. Es difícil entender el objetivo del estudio ambiental, el hecho de indicar que las estaciones de monitoreo son contaminantes hace difícil seguir la argumentación de la tesis. Asimismo, las conclusiones extraídas de este proceso podrían haber sido mejor fundamentadas.

Aspecto	Evaluación
Cumplimiento de objetivos	6,5
Satisfacción de alguna necesidad	7,0
Aplicación del método científico	6,8
Interpretación de los datos y obtención de conclusiones	5,8
Originalidad	6,5
Aplicación de criterios de análisis y diseño	6,3
Perspectivas del trabajo	6,8
Coherencia y rigurosidad lógica	6,0
Precisión del lenguaje técnico	6,8

Sin otro particular, reciba mis más cordiales saludos.



Jorge Maturana Ortiz
Profesor Auxiliar - Instituto de Informática
Universidad Austral de Chile

A GRADECIMIENTOS

Gracias totales

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
SÍNTESIS.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.	2
1.2 Objetivos Generales y Específicos.	3
1.2.1 Objetivo General.	3
1.2.2 Objetivos Específicos.	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Teoría de la decisión.	5
2.1.1 Definición de Decisión.	5
2.2 Conceptos Básicos.....	5
2.2.1 Centro decisor.	6
2.2.2 Atributos.....	6
2.2.3 Objetivos.	6
2.2.4 Alternativas.	6
2.2.5 Nivel de aspiración.	6
2.2.6 Meta.....	7
2.2.7 Desviación de Meta.	7
2.2.8 Criterios.....	7
2.2.9 Ponderadores.	7
2.2.10 Matriz Decisional.	7
2.3 Normalización de los atributos.....	8
2.4 Métodos de Apoyo a la Toma de Decisión.....	9
2.4.1 <i>ELECTRE</i>	9
2.4.2 <i>AHP</i>	10
2.4.3 Programación por Metas.	10
2.4.4 <i>PROMETHEE</i>	10
2.4.5 <i>PAPRIKA</i>	11
2.4.6 <i>UTA</i>	11
2.4.7 <i>MACBETH</i>	11
2.4.8 <i>TOPSIS</i>	11
2.5 Proceso para la toma de la decisión.....	12
2.5.1 Identificación del problema.	12
2.5.2 Recolección de información.	13
2.5.3 Diseño.	13
2.5.4 Planteamiento formal y solución.	13
2.5.5 Revisión.....	13
2.6 Aplicaciones Métodos Multicriterios.	14
2.6.1 Caso de Localización Empresarial.	14
2.6.2 Caso de selección de tecnología agrícola.	15
2.6.3 Caso de Cajas de Ahorros Andaluzas.....	16
2.6.4 Caso de la Sostenibilidad en la Industria de la Madera en Europa.	17
2.6.5 Caso de Priorización de Pacientes en los Servicios de Salud.	18
2.6.6 Caso de Gestión del Minifundio a través de las Cooperativas en la Comunidad Valenciana....	18
2.6.7 Caso del Bienestar Social Rural en la Amazonía.	19
2.6.8 Caso de Evaluación de Robots Industriales.....	20
3. MÉTODOS MULTIOBJETIVOS/MULTICRITERIOS.....	21
3.1 Método multicriterio <i>ELECTRE I</i>	21
3.2 Método multicriterio <i>ELECTRE II</i>	24
3.3 Método Multiobjetivo Programación por Metas.	27
3.4 Complejidad de los Métodos Multicriterios.	29
3.4.1 Análisis Complejidad Método <i>ELECTRE I</i>	29
3.4.1.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.	29
3.4.1.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.	30
3.4.1.3 Cantidad de alternativas constantes con valor 1000 y criterio variable.....	31
3.4.2 Análisis Complejidad Método <i>ELECTRE II</i>	32
3.4.2.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.	32
3.4.2.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.	34

3.4.2.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.	35
3.4.3 Análisis Complejidad Método Programación por Metas.....	36
3.4.3.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.	36
3.4.3.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.	37
3.4.3.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.	38
3.4.4 Análisis de comparación en Complejidad Método <i>ELECTRE I, ELECTRE II y Prog. Metas.</i> ..	39
3.4.4.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.	39
3.4.4.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.	40
3.4.4.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.	41
4. ÁREA DE APLICACIÓN DE ESTUDIO	43
4.1 Descripción General.....	43
4.1.1 Antecedentes Generales.	43
4.2 Índice de calidad y contaminación del agua.....	44
4.2.1 Clasificación de Índice de Calidad del Agua.....	44
4.2.1.1 Índice Fisicoquímicos.....	44
4.2.1.2 Índice Biológicos.....	45
4.2.2 Índice de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (NSF WQI).....	47
4.3 Datos de las cuatro estaciones de monitoreo.....	51
4.4 Resultados de jerarquización.....	52
5. ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍAS	57
5.1 Arquitectura.....	57
5.2 Tecnologías para el Desarrollo del Sistema de Ayuda a la Decisión.	58
5.2.1 Java.....	58
5.2.1.1 Lenguaje de Programación Java.....	58
5.2.1.2 Funcionamiento Interno de Java.....	59
5.2.2 Entorno de Desarrollo Integrado.	59
6. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA.....	60
6.1 Planificación.....	60
6.1.1 Metodología.	60
6.1.2 Especificación de requerimientos.....	61
6.1.2.1 Declaración general.....	61
6.1.2.2 Clientes.....	61
6.1.2.3 Objetivos.	61
6.1.2.4 Requisitos Funcionales.....	61
6.1.2.5 Requisitos No Funcionales.	62
6.1.3 Plan de Trabajo.....	62
6.1.4 Estrategia de Implementación.	63
6.1.5 Estrategia de Pruebas.....	64
6.2 Análisis.....	64
6.2.1 Casos de Uso.	64
6.2.1.1 Descripción de los Actores del Sistema.	66
6.2.1.2 Descripción de los Casos de Uso del Sistema.	66
6.2.2 Modelo Conceptual.	69
6.3 Diseño.	69
6.3.1 Caso de Uso Real más Significativo.	70
6.3.2 Diagrama de Clases.	74
6.3.3 Bibliotecas utilizadas.....	75
6.3.3.1 <i>JUNG (Jung Universal Network/ Graph Framework).</i>	75
6.3.3.2 <i>iText</i>	78
6.3.3.3 Look & Feel aplicación	80
6.4 Construcción.	81
6.4.1 Dificultades en la implementación.	81
6.4.2 Consideraciones Técnicas.	83
6.5 Verificación del Software.....	83
6.5.1 Verificación del Cumplimiento de Requisitos Iniciales.	83
7. PRUEBAS Y VALIDACIÓN	85
7.1 Pruebas del Software.....	85
7.2 Pruebas de Aceptación del Sistema.	87
7.3 Pruebas de Usabilidad.	89
8. CONCLUSIONES.	92
9. REFERENCIAS.....	94
10. ANEXOS.	102
Anexo A: Diagrama de Clases en Formato Detallado.....	102
Anexo B: Encuesta de Aceptación del Sistema por parte del Usuario	106

Anexo C: Encuesta de Usabilidad	109
Anexo D: Cálculo Amplitud de la Escala de los Criterios.	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1: Alternativas valor 4 y criterio variable con método <i>ELECTRE I</i>	29
Tabla 2: Alternativas valor 100 y criterio variable con método <i>ELECTRE I</i>	30
Tabla 3: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método <i>ELECTRE I</i>	31
Tabla 4: Alternativas valor 4 y criterio variable con método <i>ELECTRE II</i>	33
Tabla 5: Alternativas valor 100 y criterio variable con método <i>ELECTRE II</i>	34
Tabla 6: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método <i>ELECTRE II</i>	35
Tabla 7: Alternativas valor 4 y criterio variable con método Programación por Metas.....	36
Tabla 8: Alternativas valor 100 y criterio variable con método Programación por Metas.....	37
Tabla 9: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método Programación por Metas	38
Tabla 10: Cantidad alternativas 4 y criterios variables para los tres métodos multicriterios.....	40
Tabla 11: Cantidad alternativas 100 y criterios variables para los tres métodos multicriterios.....	41
Tabla 12: Cantidad alternativas 1000 y criterios variables para los tres métodos multicriterios.....	42
Tabla 13: Estaciones de muestreo Celulosa Valdivia.....	43
Tabla 14: Parámetros Fisicoquímicos de la calidad del agua	45
Tabla 15: Ponderaciones de los parámetros de la <i>NSF-WQI</i>	48
Tabla 16: Reponderación de los parámetros de la <i>NSF-WQI</i>	49
Tabla 17: Metas, objetivos, amplitud y descripción de cada parámetro físico químico	50
Tabla 18: Valores parámetros fisicoquímicos correspondiente a cada estación de monitoreo.....	52
Tabla 19: Clasificación final de las estaciones de monitoreo del Río Cruces – Valdivia.....	56
Tabla 20: Requisitos Funcionales.....	61
Tabla 21: Requisitos No Funcionales.....	62
Tabla 22: Caso de Uso Ingresar Datos para Análisis.	66
Tabla 23: Caso de Uso Ingresar Parámetros de los Métodos.	66
Tabla 24: Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio.	66
Tabla 25: Caso de Uso Realizar Reporte.....	67
Tabla 26: Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio formato extendido	67
Tabla 27: Contrato realizarAnalisisJerarquizacion().....	68
Tabla 28: Caso de Uso Real Salida.	70
Tabla 29: Caso de uso Real Análisis de Sensibilidad.....	71
Tabla 30: Caso de uso Gráficos de la solución <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i>	72
Tabla 31: Matriz de trazabilidad del producto en desarrollo.....	84
Tabla 32: Cálculo Detallado de la Amplitud de la Escala de cada Criterio utilizado.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1: Matriz decisional.	8
Figura 2: El paradigma de la decisión.	12
Figura 3: Algoritmo método <i>ELECTRE I</i>	23
Figura 4: Algoritmo método <i>ELECTRE II</i>	26
Figura 5: t de ejecución. V/s Función de aprox. con 4 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE I</i>	30
Figura 6: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE I</i>	31
Figura 7: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE I</i>	32
Figura 8: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 4 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE II</i>	33
Figura 9: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE II</i>	34
Figura 10: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable <i>ELECTRE II</i> 35	35
Figura 11: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 4 alternativas y criterio variable Prog. Metas.....	37
Figura 12: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable Prog. Metas....	38
Figura 13: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable Prog. Metas..	39
Figura 14: Comparación 3 métodos multicriterios con 4 alternativas y criterio variable.....	40
Figura 15: Comparación 3 métodos multicriterios con 100 alternativas y criterio variable	41
Figura 16: Comparación 3 métodos multicriterios con 1000 alternativas y criterio variable.....	42
Figura 17: Índices Bióticos más extendidos en Europa.....	46
Figura 18: Parámetros fisicoquímicos o criterios ingresados en el sistema.	52
Figura 19: Estaciones de monitoreo o alternativas ingresadas en el sistema.....	53
Figura 20: Datos fisicoquímicos ingresados correspondientes a cada estación de monitoreo.....	53
Figura 21: Parámetros ingresados correspondientes a los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.	54
Figura 22: Solución gráfica de los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>II</i>	54
Figura 23: Salida con la clasificación de los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.....	55
Figura 24: Análisis de sensibilidad de <i>ELECTRE I</i> y <i>II</i>	55
Figura 25: Arquitectura del sistema.	57
Figura 26: Proceso de compilación desde código fuente java a formato binario.	59
Figura 27: Carta Gantt que exhibe las etapas del desarrollo del proyecto.....	63
Figura 28: Diagrama de procesos del sistema.	65
Figura 29: Diagrama General de Caso de Uso del sistema.	65
Figura 30: Diagrama de Secuencia Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio.....	68
Figura 31: Modelo Conceptual del Sistema.	69
Figura 32: Diagrama de Secuencia del Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio.....	73
Figura 33: Diagrama de Clases.	75
Figura 34: Grafo generado utilizando la biblioteca <i>JUNG</i>	78
Figura 35: Documento formato pdf creado utilizando la biblioteca iText.	80
Figura 36: <i>Look & Feel</i> propio del sistema operativo <i>Windows 7</i>	81
Figura 37: Solución gráfica del prototipo comparado con la literatura académica y el software <i>JElectre</i> ..	85
Figura 38: Solución gráfica del prototipo desarrollado comparado con la literatura académica.....	86
Figura 39: Solución del prototipo desarrollado con la literatura académica.	86
Figura 40: Diagrama de Clases correspondiente al paquete pdf.....	102
Figura 41: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Imagenes.....	102
Figura 42: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Graficar.....	103
Figura 43: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Metodos.	104
Figura 44: Diagrama de Clases correspondiente al paquete GUI.....	105

SÍNTESIS

Hoy en día nos encontramos con la necesidad de elegir entre múltiples opciones, muchas veces la elección no resulta fácil, por lo que las herramientas de ayuda a la decisión posibilitan la determinación de la opción más adecuada a las preferencias del decisor.

En este proyecto se diseña y desarrolla una herramienta de ayuda a la decisión multicriterio/multiobjetivo aplicado en resolver una problemática ambiental real y actual del río Cruces, en la ciudad de Valdivia, Chile.

Al finalizar el proyecto, se cuenta con el prototipo de una herramienta de software que apoye la decisión, la cual permitirá determinar, clasificar, escoger y ordenar de la menos a la más contaminante, las cuatro estaciones de monitoreo de la empresa Celulosa Arauco Planta Valdivia; el cual es uno de los actores o agentes contaminantes que afectan la fauna del santuario de la naturaleza Carlos Anwandter.

Actualmente, existen una mediana cantidad de herramientas de apoyo a la toma de decisiones, y la gran parte de éstas abarcan solamente un tipo de método de solución. La herramienta a desarrollar implementará tres métodos matemáticos multiobjetivo/multicriterio, *ELECTRE I, II* y Programación por Metas. *ELECTRE I* y *II* evalúan diferentes alternativas u objetivos bajo un conjunto de criterios, mientras que Programación por Metas trata de disminuir las desviaciones entre las metas. Estos métodos funcionarán de manera colaborativa del problema a abordar, permitiendo tener una visión más amplia y detallada de la solución.

Además, esta instancia de investigación permitirá relacionarse con investigadores o personas a las que le son de interés el estudio del tema a tratar, dándose la oportunidad de compartir información de los resultados del estudio del problema mencionado anteriormente.

Finalmente, sería posible pensar en un futuro en el diseño de una herramienta más robusta y profesional, la cual tenga implementada una gran gama de métodos multicriterios/multiobjetivos, proporcionando al centro decisor un panorama global de los resultados de la jerarquización.

ABSTRACT

Nowadays we find with the need to choose between multiple options, it often the choice is not easy, so than decision support system enable for determine the options most suitable to the preferences of the decision maker.

This project is design and develop a decision support system multiple criteria / multiple objective applied to solve a real and present environmental problems at Río Cruces, Valdivia city, Chile.

At project completion, there have the prototype of a software tool to support the decision, it will enable identify, sort, choice and order of least to most polluting, the four monitoring stations of the company Celulosa Arauco Plant Valdivia, which is one of actors or pollutants agents that affect wildlife from nature sanctuary Carlos Anwandter.

Currently, there are median number decision support systems for decision making, and most of these cover one type of solution method. The tool to develop will implement three multi criteria / multi objective mathematic method, ELECTRE I, II and Goal Programming. ELECTRE I and II evaluate different alternatives and objectives under a set of criteria, and Goal Programming treat reducing deviations between goals. These methods will work collaboratively in the problem to solve, for allowing a more comprehensive and detailed solution.

Furthermore, this instance of research will allow relate with researchers or peoples that are of interest to study those topic, giving the opportunity to share information on the results of the aforementioned problem.

Finally it would be possible to think of a future in designing a robust and professional tool, which has implemented a wide range of multi criteria / multi objective method, giving decision maker an overview of the results of the ranking.

1. INTRODUCCIÓN

La decisión ha inspirado la reflexión de muchos pensadores desde la antigüedad. Los grandes filósofos como Aristóteles, Platón y Tomás de Aquino discutieron la capacidad para decidir de los seres humanos, y de alguna manera es esta una posibilidad que distingue los seres humanos de los animales [Fig05]. En sí, la decisión es afectada por ciertos criterios a considerar en cada alternativa o elección presente. Como por ejemplo, cuando una persona toma desayuno, ésta tiene la opción de preferir tomar un desayuno balanceado frente a otro con más calorías, los criterios¹ a considerar en esta situación podrían ser la cantidad de proteínas, minerales, vitaminas y carbohidratos que aportan al organismo; luego cuando se dirige a seleccionar el medio de transporte tiene la preferencia de subir a la locomoción pública en vez de la privada, teniendo en cuenta el precio, tiempo, comodidad y contaminación; y finalmente al llegar al trabajo debe seleccionar cuál de todas las tareas es la más primordial para realizar durante el día, analizando factores como el tiempo que se va a demorar, su dificultad y experiencia en hacerla.

Para esto, el enfoque del análisis multicriterio en la ingeniería de sistemas permite estudiar, comprender y afrontar problemas de diversa naturaleza, cuyo denominador en común es escoger entre diferentes alternativas que se determinarán mediante diversos criterios [Rom96]. Este proceso es llevado a cabo mediante la elección de un centro o experto decisor de lo mejor entre lo posible [Rom96, 14]. De acuerdo a los textos de la investigación operativa los pasos para realizar el proceso de decisión están divididos en dos etapas: en la primera consiste en determinar el objetivo (maximizar o minimizar) y restricciones del problema abordar, y el segundo el experto decisor determina una función de criterio que representa sus preferencias reales. Posteriormente esto se aplica técnicas matemáticas para llegar a la mejor solución dentro del conjunto de soluciones posibles [Fig05], [Rom96].

Para solucionar situaciones como la anterior, y otros muchos problemas de decisiones; los cuales quizás podrían resultar no triviales a la hora de escoger la mejor alternativa de un conjunto de elecciones, el profesor Bernard Roy en la década del 60 creó un método llamado *ELECTRA I* o *ELECTRE I ELimination Et Choix Traduisant la RÉalité* de ayuda a la toma de decisiones con múltiples criterios. Éste método fue evolucionando a

¹ [Rom96, 19] Criterio o Atributo se refiere a los valores con los que el centro decisor se enfrenta a un determinado problema decisional.

través de los años gracias a la cooperación de otros colegas de Roy, dando origen a la familia de métodos *ELECTRE* [Lam].

Más tarde surgieron los siguientes métodos: *MAUT Multi Attribution Utility Theory*, *SMART Simple Multi Attribute Rating Technique*, *TOPSIS Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, *MACBETH Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*, *AHP Analytic Hierarchy Process*, *PROMETHEE Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluations*, *UTA UTilités Additives*, *TOMASO Technique for Ordinal Multiattribute Sorting and Ordering y Goal Programming o Programación por Metas entre otros* [Fig05].

Algunos conceptos básicos e importantes en todos estos métodos son: alternativa, multiobjetivo, multicriterio y decisor. Una alternativa es el conjunto de posibilidades que se tienen en cuenta para alcanzar un objetivo, un multiobjetivo son aquellas aspiraciones que se desean alcanzar, un multicriterio es el conjunto de parámetros que vamos a considerar en cada alternativa, y el decisor es el agente racional, consistente y coherente; el cual es el encargado de ver qué criterios y objetivos son los más importantes en la toma de su decisión. Por ejemplo, en la compra de un automóvil, los diversos modelos y marcas serían las alternativas, el precio sería un criterio y minimizarlo sería el objetivo.

El desarrollo de este proyecto será aplicado en determinar y jerarquizar las cuatro estaciones de monitoreo de la empresa Celulosa Arauco Planta Valdivia, el cual es una de las principales actores o agentes contaminantes del cauce del río Cruces.

1.1 Motivación.

Hoy existe un gran debate por la muerte, disminución y migración de los cines de cuello negro y otras especies a finales del año 2004 en la ribera del río Cruces. Debido a ésta razón, es por la que se quiere colaborar en determinar y a la vez clarificar la responsabilidad de los diversos agentes contaminadores de éste cauce, considerándose Celulosa Arauco o también llamada CELCO² como uno de los responsables.

Cabe destacar que también hay otros actores, los cuales son responsables en contaminar, aportar y afectar éste ecosistema, tales como: Concesión Las Mulatas, Levaduras

² <http://www.arauco.cl/default.asp>

Collico, Frival, Portuaria Las Mulatas, CMPC³, Aserradero Aragón, Masisa Planta Collico, Planta Miraflores Asenav S.A, Sociedad Industrial y Comercial Valcuer Ltda., Sociedad Agrícola Industrial y Comercial Hoffman e Infodema entre otros [Sin].

Actualmente existen datos empíricos tomados recientemente del río Cruces, con los cuales se desea determinar mediante los métodos matemáticos multicriterios/mutiobjetivos, en clasificar las cuatro estaciones de monitoreo respecto a la descarga de residuos contaminantes a éste afluente.

Además no se dispone de un software para la ayuda a la decisión multicriterio, y el existente en el mercado o es incompleto, o tiene poca usabilidad, su valor es alto o está orientado a otro tipo de problemas, por lo que programar una herramienta local que incorpore algunos métodos se considera de mucha utilidad.

1.2 Objetivos Generales y Específicos.

A continuación se presentarán los objetivos generales y específicos.

1.2.1 Objetivo General.

Diseñar y desarrollar una herramienta para la ayuda a la toma de decisión aplicada a problemas ambientales Multiobjetivo/Multicriterio.

³ <http://www.cmpc.cl/>

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Listar y describir los métodos multicriterios/multiobjetivos actuales.
- Comparar y determinar que algoritmos matemáticos multicriterios pueden trabajar de manera conjunta y colaborativa, para así abarcar una solución amplia, acorde a los requerimientos del decisor o decisores.
- Diseñar e implementar una herramienta de ayuda en la toma de decisiones, la cual es proporcionada por un grupo de métodos matemáticos multicriterios.
- Validar el sistema mediante encuestas a investigadores y/o a personas interesadas en aplicaciones que apoyen a la toma de una decisión.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exhibirá inicialmente las teorías, estudios y definiciones de la decisión que constituyen los fundamentos de los sistemas de ayuda a la decisión (*DSS*⁴), para ir avanzando posteriormente en la decisión multicriterio, el proceso de toma de decisión, y finalmente terminar en las aplicaciones en las diversas áreas y campos.

2.1 Teoría de la decisión.

En la vida existen una multitud de situaciones cotidianas en las que nos enfrentamos a tomar una decisión entre diversas alternativas. Este proceso de decisión en sí, puede interpretarse como la elección de lo “mejor” entre lo “ posible”, dependiendo del tipo de situación de decisión se determinará qué es lo mejor y qué es lo posible [Beg07, 3], [Rom96, 14]. De acuerdo a la optimización clásica, el concepto de mejor corresponde al objetivo, el cual es único, excepto en la optimización multiobjetivo, y el concepto de posible, a su vez corresponde a las soluciones factibles, acotadas por las restricciones [Beg07, 3].

2.1.1 Definición de Decisión.

De acuerdo al concepto etimológico, la decisión viene del latín (*decisio, -ōnis*), el cual es una determinación y resolución que se toma o se da en una cosa dudosa [Rae]. Según Pavesi decisión es “*el proceso deliberado y deliberativo que lleva a la selección de un curso de acción determinado entre un conjunto de acciones alternativas*” [Pav, 1]. En sí, esta decisión se encuentra estrechamente relacionada con la comparación de diferentes puntos de vista, algunos a favor y otros en contra de una determinada decisión, lo que significa que la decisión está esencialmente relacionada con una pluralidad de puntos de vista, que pueden ser definidos como criterios [Fig05].

2.2 Conceptos Básicos.

Al abordar cualquier problema de toma de decisión, es necesario usar o utilizar un lenguaje mucho más técnico y sofisticado para describir ciertas acciones o hechos a

⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Decision_support_system

determinar. Debido a esto, se presentará a continuación una serie de conceptos y definiciones fuertemente relacionados entre sí, en este proceso de ayuda a la toma de decisiones.

2.2.1 Centro decisor.

Es el agente o un grupo de individuos responsables de la decisión, con características tales como racional, consistente y coherente [Jara].

2.2.2 Atributos.

Los atributos corresponden a los valores con los que el centro decisor se enfrenta a un cierto problema decisional [Rom96]. Por ejemplo, el atributo velocidad con un valor de 80 km/h.

2.2.3 Objetivos.

Estos son aquellas aspiraciones que se desea alcanzar el centro decisor; siendo Maximizar (más del mejor atributo) o Minimizar (menos del atributo mejor), algún criterio [Upm], [Mej], [Rom96]. Ejemplo, Maximizar la velocidad de un tren.

2.2.4 Alternativas.

Es el conjunto de posibilidades exhaustivas y excluyentes que se tiene en cuenta para alcanzar un objetivo, las cuales están en competencia para ser evaluadas en forma homogénea y justa [Upm], [Jara]. Por ejemplo una cierta cantidad de trenes para utilizar en un viaje.

2.2.5 Nivel de aspiración.

Este corresponde a un nivel aceptable de logro deseado para un determinado atributo asignado por un centro decisor [Rom96].

2.2.6 Meta.

Es la combinación entre un atributo con un nivel de aspiración [Rom96], volviendo al ejemplo anterior la meta de velocidad es de 600 km/h.

2.2.7 Desviación de Meta.

Es la diferencia entre lo que se logra y lo que se desea alcanzar. Si se pasa del valor deseado esto es llamado como sobre-logro de la meta, en caso contrario sub-logro de la meta [Mej].

2.2.8 Criterios.

Son los atributos, objetivos o metas las cuales son primordiales en un problema de decisión [Rom96]. Es lo que se busca y como se estima lo que se busca [Jara].

2.2.9 Ponderadores.

Es un valor de importancia asignado a cada criterio por el centro decisor. Por ejemplo la ponderación de la velocidad es: 0.4.

2.2.10 Matriz Decisional.

A partir de una serie de alternativas definidas y una serie de criterios, los cuales se tiene en cuenta adecuadamente para evaluarlas, se crea una matriz decisional o también llamada matriz de evaluación, en la que se asigna una puntuación a cada alternativa según corresponda a su criterio. En la Figura 1 se muestra la forma de la matriz decisional [Upm].

		ALTERNATIVAS				
CRITERIOS		1	2	...	n	
	1	X_{11}				
	2					
	3					
	...					
	m					X_{nm}

Figura 1: Matriz decisional.

Los valores X_{ij} asignado a cada alternativa la valoran de acuerdo a la función de cada uno de los criterios, este valor es llamado puntuación de criterios (X_{ij}) [Upm].

2.3 Normalización de los atributos.

Uno de los aspectos importante al trabajar con un conjunto de diversos de atributos es la normalización de los datos. Existen 3 razones relevantes para realizar este proceso [Rom96]:

- Muchos criterios se encuentran en diferentes unidades de medida, haciendo carente de significado comparar datos que se encuentren en distintas magnitudes físicas. Por ejemplo criterios cuyas unidades sean: kilogramos, pesos, metros [Rom96].
- Un segundo aspecto es que los valores alcanzados por cada criterio varían, siendo estos muy desiguales. Teniendo quizás un criterio en particular una escala muy alta de los valores, y otro muy bajo. Por ejemplo criterio costo los valores pueden ser de miles, respecto a otro criterio velocidad, en el cual los valores toman valor de cientos [Rom96].
- Para los centros decisores es mucho más fácil comparar distintos criterios normalizados que sin normalizar [Rom96].

2.4 Métodos de Apoyo a la Toma de Decisión.

Existen diversos métodos de ayuda a la decisión, los cuales clasifican en dos categorías; *Multi-Attribute Decision Analysis (MADA)* y *Multi-Objective Decision Analysis (MODA)* [Ehr10]. *MADA* contiene los métodos de sobreclasificación (*ELECTRE*, *PROMETHEE*) y *AHP* entre otros; y *MODA* incluye primordialmente algoritmos genéticos, programación multiobjetivo y programación por metas [Ehr10].

Una lista más extensa y detallada de los métodos anteriores se encuentra disponible en [Fig05] y [Wika].

A continuación se presentará y detallará algunos métodos multicriterios.

2.4.1 ELECTRE.

ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la RÉalité*) es uno de los métodos más importantes, ya que fue el primer método de sobreclasificación (*outranking*), los cuales manejan información cardinal [Gen05]. Éste método fue propuesto por el profesor Bernard Roy. Ésta familia de métodos está constituida por los siguientes métodos multicriterios: *ELECTRE I*, *ELECTRE II*, *ELECTRE III*, *ELECTRE IV*, *ELECTRE IS* y *ELECTRE TRI* [May94]. Estos métodos se clasifican de acuerdo al tipo de problema a abordar. La problemas tipo α , se usa para la elección de un subconjunto con las alternativas “mejores” o “satisfactorias” (*ELECTRE I* y *ELECTRE IS*), en los problemas tipo β , se ocupa para el reparto de las alternativas potenciales en categorías predefinidas por alternativas de referencia (*ELECTRE TRI*) y finalmente la problemática γ , el cual se utiliza en la ordenación de las alternativas potenciales (*ELECTRE II*, *ELECTRE III*, *ELECTRE IV*) [Gen05], [Gon05] y [Men08].

Particularmente *ELECTRE I*, reduce el tamaño del conjunto de las alternativas, esto se realiza mediante una partición, generando así dos subconjuntos. El primer subconjunto es el núcleo (kernel), el cual contiene las mejores alternativas (dominantes) y el otro subconjunto las peores alternativas (no dominantes) [Men08]. *ELECTRE II* permite obtener una ordenación completa de las alternativas no dominadas [Euo]. *ELECTRE III* la relación de sobreclasificación se basa en conjuntos difusos [Gen05]. *ELECTRE IV* es utilizado cuando el centro decisor no desea especificar los pesos preferenciales

[Rom96]. *ELECTRE IS* es el cual es una adaptación de *ELECTRE I*, permitiendo criterios difusos. Finalmente, *ELECTRE TRI* permite reducir significativamente el número de variantes a comparar [Til00].

Es posible hacer una revisión de una lista más exhaustiva con las características, ventajas y desventajas de la familia *ELECTRE* en [May94] y [Til00].

2.4.2 AHP.

El método *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*) es un método multicriterio discreto que se introdujo en la década del 70 [Rom96]. El funcionamiento de éste método consiste en que los usuarios de *AHP* descompongan el problema de decisión en una jerarquía de subproblemas, los cuales son más fáciles de comprender. A su vez, estos subproblemas son analizados de manera independiente. Terminada la jerarquía, los centros decisores evalúan sistemáticamente sus elementos mediante una comparación de dos en dos, sintetizándolos para así determinar qué variable tiene la más alta prioridad [Pac08], [Rom96] y [Wikb].

2.4.3 Programación por Metas.

Programación por metas (*Goal programming*). Se basa en la lógica satisfactoria; esto es intentar que una serie de metas relevantes se aproximen lo más posible a unos niveles de aspiración fijados previamente por el centro decisor, minimizando así las desviaciones de las diferentes metas [Mej] y [Rom96].

Para un mayor detalle también puede consultarse en [Azn], [Beg07], [Mai93], [Rom96] y [Wikc].

2.4.4 PROMETHEE.

Los métodos *PROMETHEE* (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) fueron propuestos por el profesor Jean Pierre Brans en 1982; de ahí en adelante se han realizado modificaciones y adaptaciones de este método. Existen dos clasificaciones de *PROMETHEE*; *PROMETHEE I* y *PROMETHEE II*. El primer método

permite realizar una clasificación y ordenamiento parcial de las alternativas, utilizando flujos positivos y negativos; y el último método permite obtener una clasificación y ordenamiento completa de las alternativas, basándose en el flujo neto de múltiples criterios [Aré02], [Gen05], [Rom96] y [Wikd].

Es posible realizar una revisión más detallada en [Bra], [Fig05] y [Wikd].

2.4.5 PAPRIKA.

PAPRIKA (*Potentially All Pairwise RanKings of all possible Alternatives*) es un método para la toma de las decisiones multicriterio, el cual es utilizado para calcular los pesos de cada criterio. Estos pesos representan la importancia relativa de cada criterio para los centros decisores [Wike].

Éste método se puede ver de manera más detallada en [Wike].

2.4.6 UTA.

UTA (*UTilitès Additive*) es un método de regresión ordinal desarrollado para hacer frente a los problemas de clasificación. Fue propuesto en 1982 por Jacquet-Lagrèze y Siskos. El objetivo de éste método consiste en desarrollar una función de utilidad aditiva, la cual es lo más coherentemente posible con la política de juicio del centro decisor [Fig05].

2.4.7 MACBETH.

MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) es un enfoque de análisis de decisión multicriterio que sólo requiere juicios cualitativos acerca de las diferencias en la atracción entre los elementos para generar valoraciones de opciones en cada criterio y pesos de los criterios [Fig05].

2.4.8 TOPSIS.

TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) es una técnica para resolver problemas de decisión y análisis de eficiencia en el campo de la

investigación operativa. El objetivo de ésta técnica es determinar las ventajas relativas de las alternativas [Wikf].

2.5 Proceso para la toma de la decisión.

Éste proceso conlleva una serie de pasos los cuales están esquematizados, abordados y detallados en la Figura 2 [Jara]:

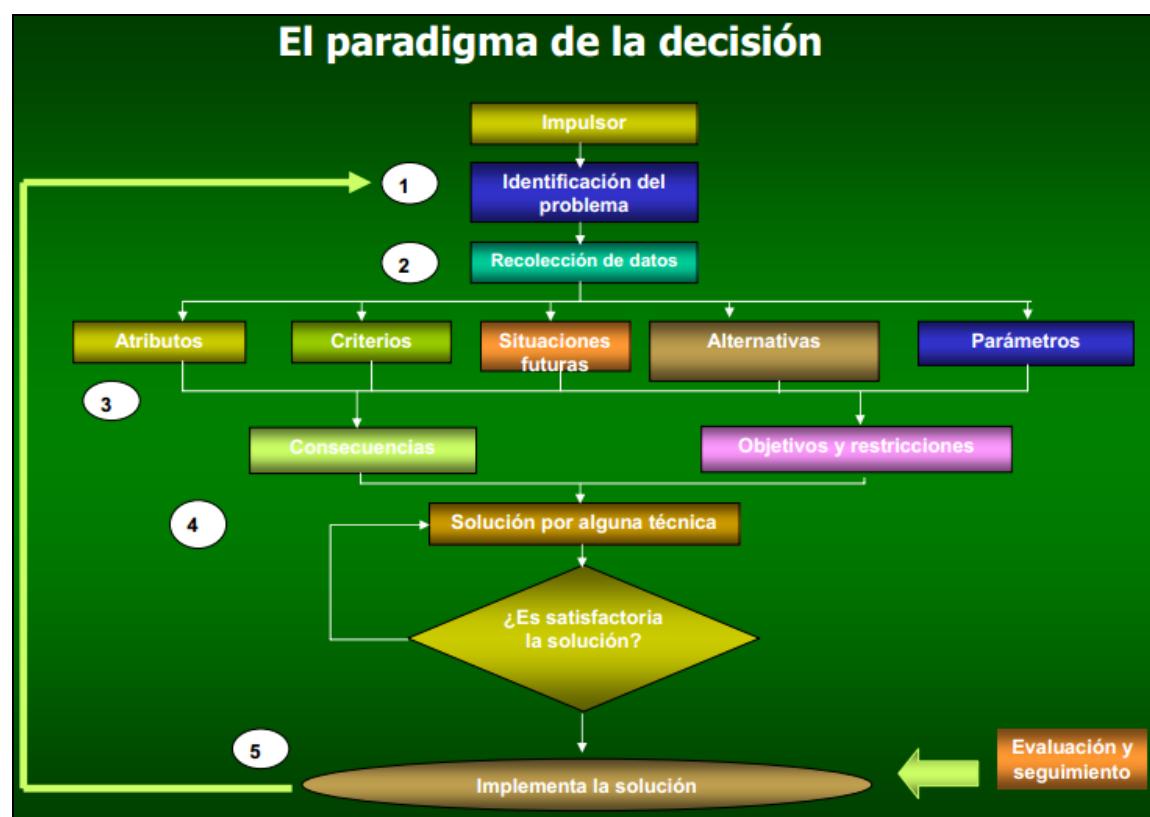


Figura 2: El paradigma de la decisión.

2.5.1 Identificación del problema.

Para obtener una buena solución de un problema decisional hay que tener inicialmente un buen planteamiento de éste respectivamente. Para esto existe una serie de pasos y recomendaciones para realizarlo de la mejor manera posible [Jara], los cuales se detallaran a continuación:

- Anotar la evaluación inicial del problema básico y posteriormente cuestionarlo.
- Preguntarse qué hizo detonar ese problema.
- Dar a la definición del problema amplitud suficiente pero manejable.

- Volver a revisar y examinar constantemente la definición del problema.

2.5.2 Recolección de información.

Esta etapa debe analizarse detalladamente ya que una gran cantidad de información conlleva a mejores decisiones, pero a la vez hay que saber cuando acabar de recolectar dicha información propiamente tal [Jara].

2.5.3 Diseño.

En esta etapa se concentra la valoración de parámetros [Jara], de los cuales algunos fueron descritos en la sección del capítulo 2.2. A continuación se listarán:

- Identificación de los objetivos.
- Atributos.
- Alternativas.
- Evaluación de las alternativas (Matriz Decisional o Matriz de Evaluación).
- Consecuencias: si las alternativas son discretas, éstas pueden resumirse en una matriz, en caso de ser continuas pueden definirse mediante ecuaciones.

2.5.4 Planteamiento formal y solución.

Esta fase se utiliza un cierto método multicriterio, para así encontrar la mejor solución; el centro decisor asigna sus preferencias expresados mediante parámetros, dando así finalmente una solución factible y satisfaciendo al centro decisor [Jara].

2.5.5 Revisión.

Finalmente en este último paso, si la solución no es completamente satisfactoria, este proceso puede volver a etapas anteriores.

2.6 Aplicaciones Métodos Multicriterios.

Existen diversas aplicaciones en áreas empresariales, científicas, económicas, financieras e ingeniería. A continuación se presentará algunas aplicaciones reales utilizando un tipo de método multicriterio en particular para solucionar un problema.

2.6.1 Caso de Localización Empresarial.

Hoy en día, es muy importante la toma de decisiones en las empresas, tales como preferir o escoger sus mejores alternativas de inversión y localización, respecto a la competencia [Gar09]. La localización de una empresa es una de las complejas decisiones estrategias más significativas, ya que ésta tendrá consecuencias en los beneficios y costes a largo plazo, con lo que dificultaría en un futuro un posible cambio.

Es por esto, que debido a la gran cantidad de criterios y objetivos que tiene dicha decisión, se aplicaron los métodos multicriterios de *ELECTRE I* y *III* para facilitar y solucionar las mejores opciones para la localización de un empresa, de acuerdo a sus necesidades.

Primeramente, se realizó un estudio acerca de los criterios más relevantes y determinantes de localización de una empresa, a través de una encuesta, y posteriormente se aplicaron los métodos *ELECTRE I* y *III* a datos de zonas o lugares de la comunidad de Aragón.

Ésta encuesta permitió analizar el nivel de importancia de los siguientes criterios: coste del suelo industrial, cercanía a la capital de la provincia, accesibilidad a redes de transporte, infraestructura, tamaño del polígono, grado de ocupación del polígono, tamaño de la población y categoría de la población⁵.

Luego de esto, se normalizaron los datos de cada criterio en cada alternativa, para llegar a valores entre cero y diez [Gar09]⁶, para que posteriormente se apliquen a los métodos *ELECTRE I* y *III*.

⁵ Los niveles de importancia de cada criterio se explican de manera detallada en el artículo [Gar09].

⁶ En el artículo [Gar09] se encuentra y se describe de manera más exhaustiva el total de alternativas normalizadas.

En *ELECTRE I* se realizó un **análisis de robustez**⁷ para analizar el comportamiento y variación de las alternativas que se encuentran en el núcleo⁸.

En *ELECTRE III* se obtuvo una ordenación final de las alternativas⁹. Luego, se le aplicó un análisis de robustez variando los umbrales de preferencia e indiferencia y ponderadores o pesos de cada criterio¹⁰.

Así, con la ayuda de estos métodos, se pudo jerarquizar las alternativas de localización de una empresa en Aragón- España. Permitiendo *ELECTRE I* extraer un subconjunto de alternativas (núcleo) y *ELECTRE III* realizar un ordenamiento de todas las alternativas de la mejor a la peor. Además las alternativas del núcleo (*ELECTRE I*) se encuentran en los primeros lugares de la ordenación de *ELECTRE III*.

2.6.2 Caso de selección de tecnología agrícola.

El año 2005 en México, se realizó un estudio enfocado en la adquisición de tecnología agrícola [Gar06]. Los agricultores primordialmente se enfrentan a problemas de decisión al comprar u obtener nuevas tecnologías de producción para sus predios agrícolas, especialmente en tractores.

Para solucionar esto, se utiliza el método multicriterio *AHP*, para el cual es necesario primeramente captar las necesidades del agricultor mediante entrevistas para así comprender su sistema de producción y los requerimientos del tractor que desea adquirir en su predio.

Luego de dos reuniones, se determina las características a evaluar y la estructura jerárquica del problema, mediante los criterios de costo, potencia, flexibilidad, comodidad y seguridad¹¹ [Gar06]. A estos criterios se les da una importancia según el juicio del agricultor, asignándole mayor peso al criterio de costo

⁷ El análisis de robustez se modifican los parámetros para ver si los resultados varían poco o demasiado.

⁸ El resultado de *ELECTRE I* se encuentra de modo detallado en [Gar09].

⁹ El resultado de *ELECTRE III* se muestra de forma detallada en [Gar09].

¹⁰ El resultado de análisis de robustez de *ELECTRE III* se muestra de manera detallada en [Gar09].

¹¹ En el artículo [Gar06] se puede analizar en más detalle una representación con el objetivo deseado, los criterios, subcriterios y alternativas de decisión.

Posteriormente se realiza una tercera reunión en donde se realiza las comparaciones apareadas requeridas por los niveles de *AHP*, obteniéndose las ponderaciones para las tres alternativas de tractor a escoger por el agricultor¹².

2.6.3 Caso de Cajas de Ahorros Andaluzas.

En ciudad de Andalucía (España), se realizó un estudio de análisis económico y financiero de las seis Cajas de Ahorros¹³, las cuales se encuentran agrupadas en la Confederación Andaluza de Cajas de Ahorros [Aré02].

El objetivo principal de la investigación es jerarquizar las Cajas de Ahorros, ya que existe un debate en la fusión de éstas, y además se desea conocer el impacto que tienen en el desarrollo económico de ésta región en particular.

Para la evaluación económica de éstas Cajas de Ahorros se tomaron en cuenta 22 indicadores o ratios¹⁴ financieros o criterios, los cuales son incorporados y sugeridos por la Confederación Española de Cajas de Ahorros y por los de la Asociación Española de Contabilidad y Administración de Empresas. Éstas métricas han sido calculadas para cada una de las seis Cajas de Ahorros. Además éstas fueron agrupadas en cinco categorías: estructura patrimonial, rentabilidad, estructura de costes, productividad y solvencia [Aré02].

Para la jerarquización o *ranking* se utilizó el método multicriterio *PROMETHEE*, ya que según Al-Shemmeri, Al-Kloub y Pearman, ésta es la técnica más apropiada para abordar esta clase de problemas [Aré02].

Consecutivamente, se calcularon la matriz de decisión¹⁵ de acuerdo a sus indicadores financieros o criterios, para cada una de las cinco categorías. Después, se realizó un análisis global empleando solamente seis indicadores financieros de los 22¹⁶ para calcular la matriz de decisión¹⁷.

¹² Las comparaciones apareadas de los criterios, la importancia de cada alternativa y el resultado final se muestran de manera exhaustiva en el artículo [Gar06].

¹³ Las Cajas de Ahorros examinadas fueron: El Monte, San Fernando, Provincial de Jaén, Unicaja, Cajasur y General de Granada [Aré02].

¹⁴ Los indicadores o radios se encuentra explicado de manera minuciosa en el artículo [Aré02].

¹⁵ La matriz de decisión se muestra de manera completa en el artículo [Aré02].

¹⁶ Los indicadores financieros seleccionados se explican en el artículo [Aré02].

¹⁷ La matriz de decisión global se encuentra detallada en el documento [Aré02].

Finalmente se consigue una ordenamiento de la mejor a la peor de las seis cajas¹⁸ a partir del análisis global, siendo el orden el siguiente: El Monte, Caja Sur, Unicaja, Caja General de Granada, Provincial de Jaén y Caja San Fernando.

2.6.4 Caso de la Sostenibilidad en la Industria de la Madera en Europa.

La sostenibilidad de las empresas de explotación la madera es importante en Europa. Es por ello, que mediante un conjunto de indicadores (criterios) y la técnica multiobjetivo de programación por metas (*Goal Programming*) con variables binarias, se aborda la sostenibilidad de la gestión forestal de 17 países europeos, de los cuales se posee vasta información [Voc].

Los indicadores de sostenibilidad¹⁹ surgieron en la década del ochenta, en una Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente y Desarrollo en Rio de Janeiro, de los cuales 14 fueron tomados en cuenta en el estudio [Voc].

Inicialmente al utilizar el método de programación por metas se realizó una normalización²⁰ de los 14 indicadores de sostenibilidad para los 17 países, ya que éstos poseen diferentes unidades de medida, quedando de ésta manera acotados en el intervalo de cero y uno. Consecutivamente se normalizaron los niveles de aspiración de cada indicador de sostenibilidad²¹, los cuales fueron determinados por centros decisores expertos. Esto permitió aplicar la programación por metas generando resultados inefficientes para algunos de los indicadores, por lo que realizó el procedimiento con otro modelo de programación por metas²² para así obtener una solución más equilibrada [Voc].

Finalmente debido al último modelo de programación por metas, se llega a una jerarquización o *ranking*²³ de los 17 países europeos, los cuales son comparados a una

¹⁸ Se tomaron en cuenta los 5 aspectos financieros [Aré02].

¹⁹ En el artículo [Voc] presenta de manera detallada una tabla con el conjunto de 14 indicadores de sostenibilidad utilizados en el estudio.

²⁰ El procedimiento de normalización se ilustra en el documento [Voc].

²¹ En el *paper* [Voc] se exponen los valores de los niveles de aspiración de cada índice de sostenibilidad, normalizados y sin normalizar.

²² El nuevo modelo de programación por metas es de definido en el artículo [Voc].

²³ En el documento [Voc] se muestra de manera exhaustiva la clasificación de los 17 países europeos.

clasificación de los países según la superficie total y el porcentaje de valor añadido bruto²⁴; presentándose en los primeros Suecia y Finlandia.

2.6.5 Caso de Priorización de Pacientes en los Servicios de Salud.

El sistema de salud pública a nivel mundial no tiene suficiente capacidad de asistir a los pacientes en cirugías de urgencia o no urgencia, por lo que éstos deben ser priorizados para ser atendidos [Bar11, 3].

En Nueva Zelanda, Canadá y Reino Unido los pacientes son clasificados para tener acceso a un tratamiento a partir de un sistema de puntos también llamado *scoring* o *point-count*²⁵. Éste sistema está conformado por criterios explícitos para decidir las prioridades de los pacientes en relación con su tratamiento [Bar11, 3].

Existen siete pasos para crear un sistema de puntos para la priorización de pacientes [Bar11, 6], los cuales son apoyados por el *software 1000Minds*, el cual es implementado por el método multicriterio *PAPRIKA*.

En las operaciones de trasplante desviación coronaria (*Coronary Artery Bypass Graft*), cadera, rodilla los sistemas de puntos han sido validados por organizaciones profesionales como la Asociación Ortopédica de Nueva Zelanda. Además los sistemas de puntos para la cirugía plástica otorrinolaringología han sido aprobados y están en proceso de ser implementadas [Bar11, 9].

2.6.6 Caso de Gestión del Minifundio a través de las Cooperativas en la Comunidad Valenciana.

En Valencia (España), las actividades agrarias de la costa de la comunidad valenciana abundan el cultivo de regadíos, particularmente de agrios y especies hortícolas [Cir06, 194], siendo el principal problema la gestión del territorio de los minifundios²⁶. Así, los agricultores se ven obligados a tomar decisiones de manera continua, utilizando el recomendado método de Función de Utilidad Multiatributo [Cir06, 206].

²⁴ La tabla de *ranking* es expuesta en el artículo [Voc].

²⁵ En el *paper* [Bar11, 4] se muestra de manera detallada un ejemplo de un sistema de puntos en la priorización de pacientes para las cirugías de desviación coronaria (*Coronary Artery Bypass Graft*).

²⁶ Minifundio es un terreno rústico muy pequeño, lo que dificulta su explotación.

El método de utilidad multiatributo requiere estimar la función de utilidad aditiva (UTA), la cual contiene una serie de atributos con sus pesos o ponderaciones, las que son establecidas de acuerdo a la importancia del centro decisor [Cir06, 206].

La agrupación de los agricultores es gestionada a través de una cooperativa en la que se disponen de 60 hectáreas, siendo ésta participe como el único centro decisor en la toma de decisiones en la explotación del minifundio [Cir06, 208]. Además, se disponen de tres escenarios o alternativas para la explotación del minifundio [Cir06, 208], en los cuales se introducirán en cada una cuatro variedades de cítricos (*Navelina* y *Lanelate* de naranjas, *Clemenpons* y *Clemennules* de clementinas) y siete hortícolas (cebolla, sandía, alcachofa, patata, repollo, lechuga de primavera y lechuga de otoño), pudiendo ser con riego por inundación o por goteo [Cir06, 209].

Los tres objetivos que delimita la toma de decisión es la maximización del margen neto de la explotación, minimizar el trabajo neto de la explotación y maximizar el tiempo libre por parte de los propietarios [Cir06, 209].

Finalmente, con el desarrollo y aplicación de los datos se obtiene el resultado de la distribución del cultivo [Cir06, 212], de acuerdo a tres alternativas, y además el margen neto, mano de obra total, estacionalidad y volumen anual de agua de riego para las tres alternativas [Cir06, 214].

2.6.7 Caso del Bienestar Social Rural en la Amazonía.

En el municipio de *Machadinho d'Oeste* en el estado de *Rondônia*, Brasil, se aplicó un estudio a los predios agrícolas de un grupo de agricultores en periodos que abarcan entre 1989 y 2002; con el objetivo primordial de evaluar la evolución del bienestar de estos productores agrícolas, considerando para esto criterios tales como: ser propietario del lote (LOTE), tipo de instalación (INST), el uso continuo (NUAR), porcentaje de días activos (DAT), la no participación en los sindicatos (GNS), participación en asociaciones (ASSOC), participación en cooperativas (COOP) y participación en los sindicatos (SIND) [Gon08, 152]. Para establecer una jerarquía de estos se utilizaron los juicios del método *MACBETH* [Gon08, 142].

Al aplicar la técnica de *MACBETH*, el factor de ser propietario de lotes resultó ser el criterio más atractivo o con más ponderación y el de participación en los sindicatos se mostró como ser el atributo con menos interés²⁷ [Gon08, 153]. Además, se muestra la frecuencia relativa de cada criterio en los años 1989, 1996, 1999 y 2002²⁸; e igualmente la evolución entre estos años tomando en cuenta ponderaciones optimistas²⁹ y clásicas en cada uno de los años³⁰. Finalmente al utilizar el enfoque optimista se analizaron cuatro agricultores, de los cuales el agricultor B obtuvo el mejor bienestar [Gon08, 156].

2.6.8 Caso de Evaluación de Robots Industriales.

Las empresas se enfrentan a problemas en la selección de tecnología más conveniente e ideal, ya que existen diversas alternativas y características a tomar en cuenta [Gar06b, 68]. Particularmente en la inversión en robots, existen dos categorías de criterios o atributos; los criterios objetivos y los criterios subjetivos. Los primeros son medidos en términos numéricos (capacidad de carga, precisión, velocidad, repetitividad, costo de compra, costos de mantenimiento, costo de instalación entre otros.), y los últimos requieren del juicio de personas expertas en el área (calidad de servicio ofrecido por el proveedor, facilidad de programación e interface hombre-máquina) [Gar06b, 69].

Para realizar ésta evaluación de *robots* se empleó la técnica y metodología multicriterio *TOPSIS*, permitiendo ordenar y jerarquizar las seis alternativas de robots a evaluar; siendo la mejor alternativa el *robot* dos y la peor el *robot* cinco [Gar06b, 72]. Además, se comparó el *ranking* dado por *TOPSIS* junto al método de sumas ponderadas, teniendo tienen en común que el *robot* dos es la opción más deseable, y los *robots* seis y cinco son los menos deseables [Gar06b, 72].

²⁷ En artículo [Gon08, 153] se muestra de manera detallada los pesos de los criterios propuestos por el método *MACBETH*, los cuales componen el índice de bienestar social para los agricultores rurales de *Machadinho d'Oeste*.

²⁸ En el documento [Gon08, 154] se muestra de forma exhaustiva la frecuencia relativa (%) de cada criterio del índice de bienestar rural.

²⁹ La evaluación optimista es cuando el valor del peso el cual maximiza la tasa de bienestar rural.

³⁰ En el *paper* [Gon08, 155] se presenta la evolución de los índices de bienestar rural con pesos optimistas y clásicos.

3. MÉTODOS MULTIOBJETIVOS/MULTICRITERIOS

En el actual capítulo se abordará de manera exhaustiva y completa, las teorías y funcionamiento de los métodos multicriterios *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y Programación por Metas, y finalizando con un análisis e investigación de la complejidad y eficiencia de cada uno de éstos algoritmos.

3.1 Método multicriterio *ELECTRE I*.

Uno de los métodos multicriterios discretos más conocido y aplicado en la práctica es *ELECTRE* (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*). Inicialmente éste método fue sugerido por Benayoun, Roy y Sussman; siendo posteriormente mejorado por el profesor Bernard Roy [Rom96].

Particularmente *ELECTRE I* es un método súper simple, el cual debe ser aplicado solamente cuando todos los criterios se han codificado en orden numérico con intervalos idénticos [Fig05]. A cada criterio se le asigna un peso (W) conforme a la importancia relativa del decisor [Ana96].

El funcionamiento de éste método consiste en reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes, realizando para ello una partición del conjunto eficiente en alternativas más favorables para el decisor (núcleo), y otras menos favorables [Beg07]. Ésta partición se realizada por medio de una relación de sobreclasificación (*outranking relationship*) entre las alternativas.

La relación de sobreclasificación se define de la siguiente manera:

- $E_{ij} > E_{ik} \Leftrightarrow a_j \succ a_k$ (a_j es preferida a a_k)
- $E_{ij} = E_{ik} \Leftrightarrow a_j \sim a_k$ (a_j es indiferente a a_k)
- $E_{ij} < E_{ik} \Leftrightarrow a_k \succ a_j$ (a_k es preferida a a_j)

Donde E_{ij} es el valor numérico que tiene la alternativa j respecto al criterio i [Gar09].

Para realizar éstas comparaciones entre las parejas E_{ij} y E_{ik} se utilizan índices, los cuales permiten afirmar que una alternativa a_j es mejor que otra alternativa a_k , cuando las

valoraciones en la mayoría de los criterios son mejores; y cuando no es la mejor, no es de manera notoria [Gar09].

La relación de sobreclasificación se construye a partir de los índices de concordancia y discordancia [Men08]. El índice de concordancia cuantifica hasta qué punto para un elevado número de atributos a_j es preferida a_k y el índice de discordancia cuantifica hasta qué punto no existe ningún atributo para el que a_k es mucho mejor que a_j [Rom96].

El índice de concordancia para *ELECTRE I* se define como [Ana96]:

$$C(j,k) = \frac{(w^+ + 0.5w^=)}{(w^+ + w^= + w^-)} \quad (1)$$

Donde W^+ es la suma de los pesos en que j es preferida a k , W^- es la suma de los pesos en que j es indiferente a k y $W^=$ es la suma de los pesos en que k es preferida a j [Ana96].

El índice de discordancia para *ELECTRE I* se define como [Ana96]:

$$D(j,k) = \frac{\text{(máx. intervalo donde } j < k\text{)}}{\text{rango total de la escala}} \quad (2)$$

Además, para que una alternativa sobreclasifique a otra y forme parte del núcleo, ésta debe superar un umbral mínimo de concordancia p y no superar otro umbral de discordancia q [Beg07]. Éstos umbrales son introducidos por el decisor; definiéndose así la relación de superación S como: $a_j S a_k \Leftrightarrow C(j,k) \geq p$ y $D(j,k) \leq q$ [Gar09].

Finalmente, se utiliza la relación de sobreclasificación para formar un grafo en el que cada vértice representa una de las alternativas o elecciones no dominadas. Luego a partir de éste grafo, se establece un subgrafo, el cual constituye el núcleo (*kernel*) del conjunto de alternativas favorables. Los vértices del núcleo representan las alternativas que son preferidas según la relación de sobreclasificación basada en los índices de concordancia y discordancia. Además, los vértices o alternativas que no forman parte del núcleo se suprimen del análisis [Rom96].

A continuación en la Figura 3 se muestra de manera explicativa el método multicriterio *ELECTRE I* [May94]:

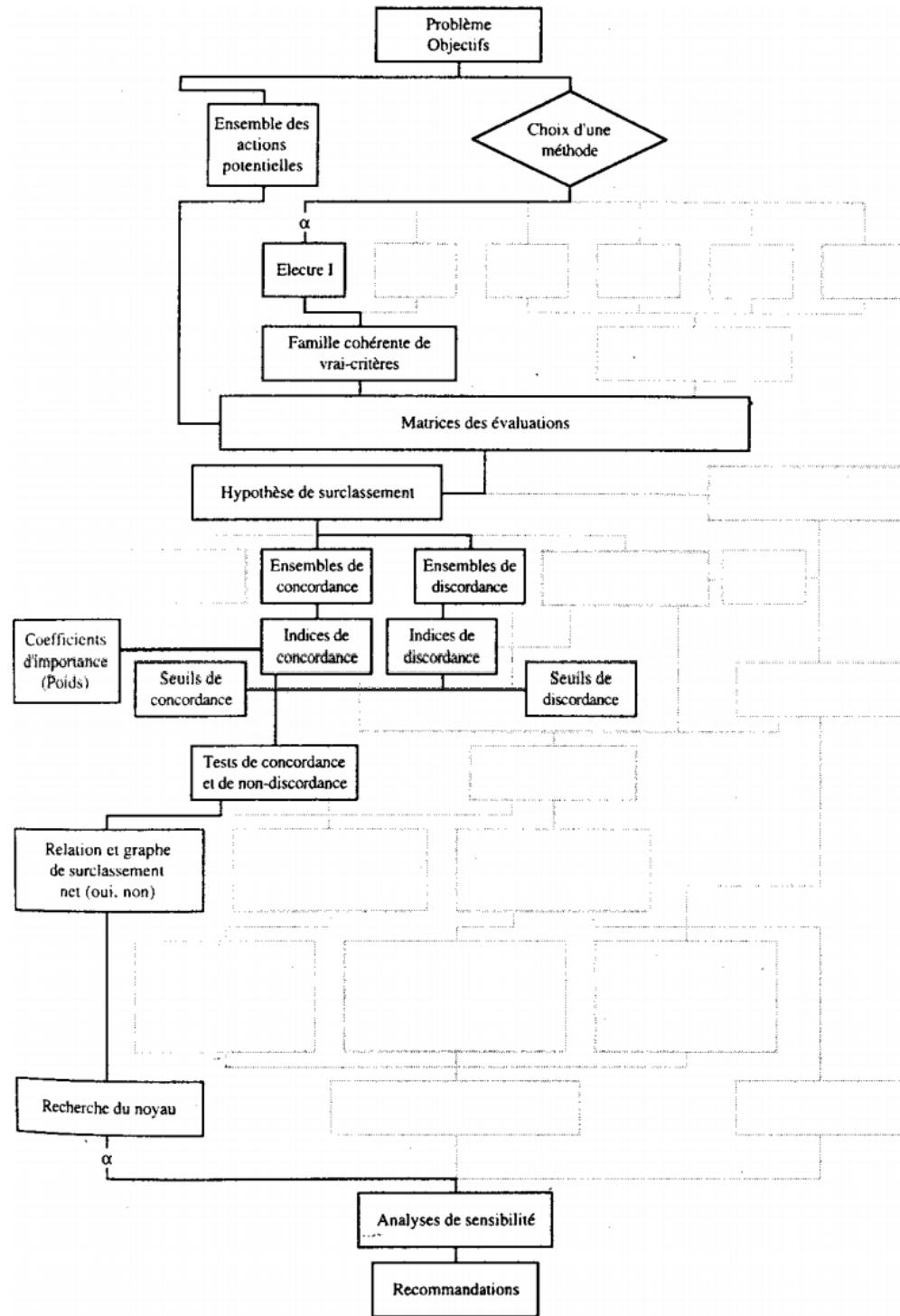


Figura 3: Algoritmo método *ELECTRE I*.

3.2 Método multicriterio *ELECTRE II*.

Éste método fue el primero de los métodos *ELECTRE* especialmente diseñado para enfrentar los problemas de clasificación [Fig05]. *ELECTRE II* es un método de análisis de decisiones multicriterios que busca alcanzar la mejor clasificación de un conjunto de alternativas tomando en cuenta para ello, múltiples criterios [Euo]. El objetivo de éste método es ordenar las alternativas potenciales de la mejor a la menos buena [Dev98]. Ésta técnica utiliza varios niveles de concordancia ($0 < p^- < p^0 < p^+ < 1$) y discordancia ($0 < q^0 < q^+ < 100$) [Eur], los cuales se especifican para construir dos relaciones de sobreclasificación (relaciones de sobreclasificación **fuerte** y **débil**) [Cho05].

El índice de concordancia para *ELECTRE II* se define como [Ana96]:

$$C(j,k) = \frac{(w^+ + w^=)}{(w^+ + w^= + w^-)}$$
(3)

De igual manera que en *ELECTRE I*: W^+ es la suma de los pesos asignados a los criterios para los cuales j domina a k , $W^=$ es la suma de los pesos asignados a los criterios para los que j y k son indiferentes y W^- es la suma de los pesos asignados a los criterios para los que j no domina a k .

El índice de discordancia para *ELECTRE II* se define como [Ana96]:

$$D(j,k) = \frac{\text{(máx. intervalo donde } j < k\text{)}}{\text{rango total de la escala}}$$
(4)

La relación de sobreclasificación fuerte (S_F) se define si y solo si cumplen la condición (5) ó (6) o ambas, como se muestra a continuación [Ana96]:

$$C(j,k) \geq p^+ \quad D(j,k) \leq q^+ \quad y \quad W^+ \geq W^-$$
(5)

$$C(j,k) \geq p^0 \quad D(j,k) \leq q^0 \quad y \quad W^+ \geq W^-$$
(6)

Ésta sobreclasificación fuerte se explica como $a_j S_F a_k$, en la cual la alternativa a_j sobreclasifica a la alternativa a_k , siendo más sólidamente establecida (certidumbre fuerte relativa a la aceptación de la hipótesis) [Dev98].

La relación de sobreclasificación débil (S_D) se define si y solo si cumple la condición (7) que se muestra a continuación [Ana96]:

$$C(j,k) \geq p^- - D(j,k) \leq q^+ y W^+ \geq W^- \quad (7)$$

Ésta sobreclasificación débil se explica como $a_j S_D a_k$, en la cual la alternativa a_j sobreclasifica a la alternativa a_k , siendo menos sólidamente establecida (certidumbre débil sobre la aceptación de la hipótesis) [Dev98].

A partir de estas dos relaciones de sobreclasificación se puede construir dos grafos, una para una relación fuerte y una para una relación débil [Ana96], con lo que un arco de trazo completo representará una sobreclasificación fuerte y un arco de trazo discontinuo representará una relación de sobreclasificación débil [Euo]. Esto permitirá efectuar tres clasificaciones: Directa, Inversa y Definitiva o Intermedia [Euo].

La clasificación directa (r') se realiza en función de la longitud (cantidad de flechas) de los caminos entrantes en la alternativa u opción (sólo nos fijamos en las relaciones fuertes y si hubiera un empate se ven las relaciones débiles); por ende si existen menos caminos que entran, ésta será la mejor alternativa [Euo].

La clasificación inversa (r'') se realiza en función de la longitud (cantidad de flechas) de los caminos salientes de la alternativa u opción, de igual manera que en la clasificación anterior nos fijamos en las relaciones fuertes y en caso de empate se ven las relaciones débiles; por lo que más caminos salgan mejor será la alternativa [Euo].

Y finalmente la clasificación definitiva o intermedia (r) se realiza calculando la media de las dos clasificaciones anteriores [Euo], [Ana96], esto es:

$$r = \frac{(r' + r'')}{2} \quad (8)$$

A continuación en la Figura 4 se muestra de manera explicativa el método multicriterio *ELECTRE II* [May94]:

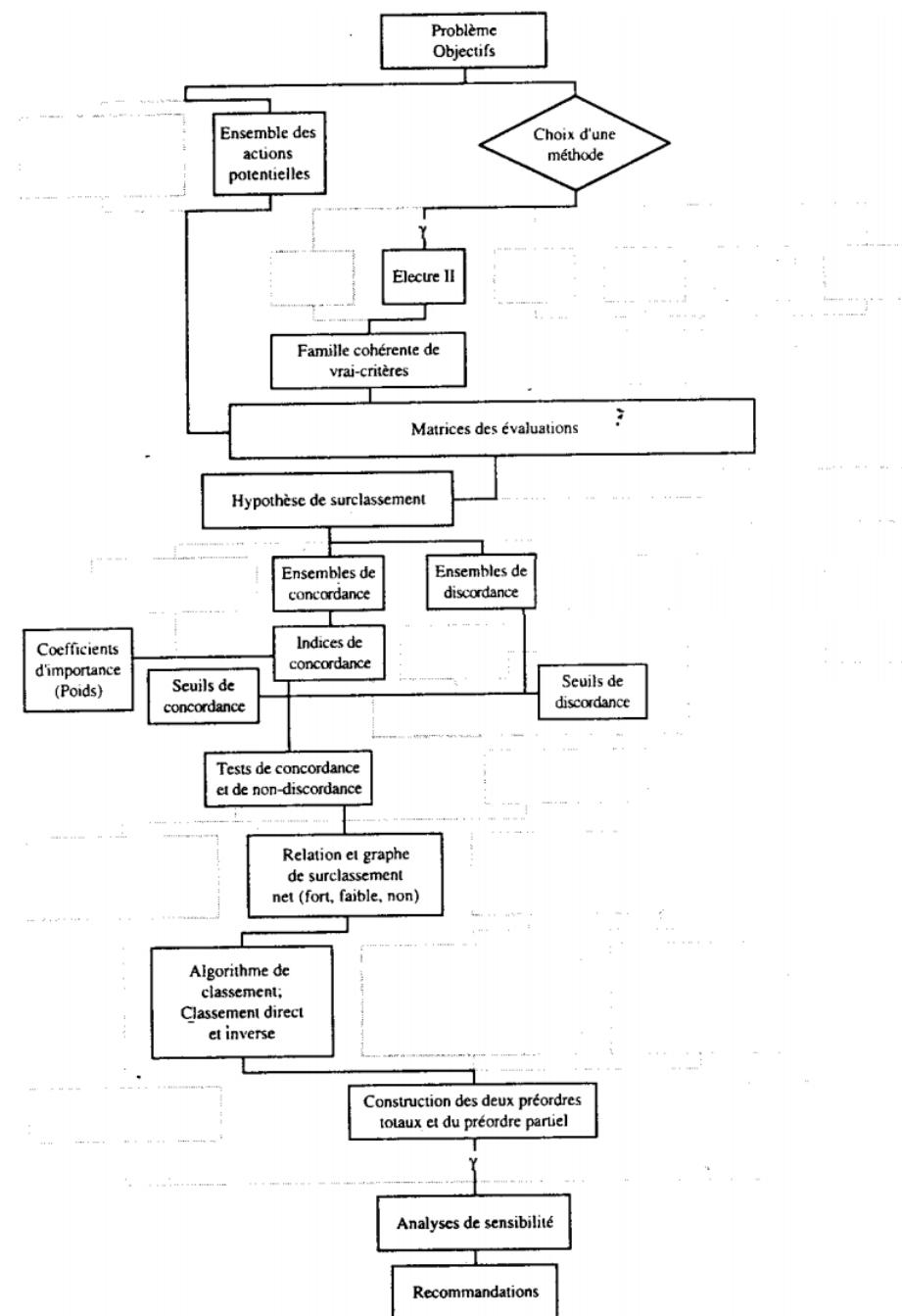


Figura 4: Algoritmo método *ELECTRE II*.

3.3 Método Multiobjetivo Programación por Metas.

Programación por metas o también llamado *Goal Programming*, es un método que aparece a mediados de la década del 50, a partir de un artículo de Charnes, Cooper y Ferguson; en el cual es aplicado el concepto a un problema de regresión condicionada para analizar un problema de fijación de salarios para ejecutivos [Rom96].

Este método a diferencia de los mencionados anteriormente, permite resolver problemas de optimización con varios objetivos; ayudando en la toma de decisiones a variados sectores tales como: distribución de recursos, planeación financiera, distribución de presupuesto y decisiones de mercado entre otras [Mej].

El funcionamiento de ésta técnica es principalmente minimizar las desviaciones de las diferentes metas. Éstas desviaciones de metas se calculan utilizando diversos algoritmos para ponderar y priorizar cada una de ellas [Mej].

La solución de la programación por metas se obtiene como [Jarb]:

$$\text{Mín } D(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^q |Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x})| \quad (9)$$

Donde $Z_{i,\text{meta}}$ es la meta para el objetivo i , $Z_i(\mathbf{X})$ es el i -ésimo elemento del objetivo i ; siendo de ésta manera $|Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x})|$ la diferencia entre la meta y el valor alcanzado, con un total de q objetivos.

Ésta función puede linealizarse incluyendo por cada objetivo i , dos variables auxiliares d_i^+ y d_i^- ; las cuales miden las desviaciones $|Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x})|$. Éstas se definen como [Jarb]:

$$d_i^+ = \frac{1}{2} [|Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x})| - (Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x}))] \quad (10)$$

Siendo d_i^+ la cantidad en que se supera la meta i [Man91], [Jarb].

$$d_i^- = \frac{1}{2} [|Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x})| + (Z_{i,\text{meta}} - Z_i(\mathbf{x}))] \quad (11)$$

Siendo d_i^- la cantidad en que falta para lograr la meta i [Man91].

A partir de lo anterior se deduce lo siguiente [Jarb]:

$$d_i^+ + d_i^- = |Z_{i,\text{metas}} - Z_i(x)| \quad (12)$$

$$d_i^- + d_i^+ = Z_{i,\text{metas}} - Z_i(x) \quad (13)$$

Y deduciéndose a partir de (13) lo siguiente [Jarb]:

$$Z_i(x) + d_i^+ + d_i^- = Z_{i,\text{metas}} \quad (14)$$

Reemplazando en la Ecuación (9) se obtiene la nueva ecuación [Jarb]:

$$\text{Mín } D(x) = \sum_{i=1}^q (d_i^+ + d_i^-) \quad (15)$$

Posteriormente introduciendo ponderadores o pesos (W) en la ecuación (15) se obtiene [Jarb]:

$$\text{Mín } D(x) = \sum_{i=1}^q W_i (d_i^+ + d_i^-) \quad (16)$$

En los casos en que el objetivo i es maximizar, d_i^- es la variable que se desea minimizar, siendo en este caso la variable no deseada y cuando el objetivo i es minimizar, d_i^+ es la variable que se desea minimizar, siendo en este caso la variable no deseada. Además si se desea alcanzar el mismo nivel de aspiración tanto la variable d_i^+ como d_i^- , serían las dos en este caso variables que se desean minimizar, siendo ambas variables no deseadas [Lug], [Jarb].

De acuerdo al concepto recién mencionado y la ecuación (16) se obtiene la siguiente ecuación [Jarb]:

$$\text{Mín } D(x) = \sum_{i=1}^q W_i (\text{variable no deseada}) \quad (17)$$

3.4 Complejidad de los Métodos Multicriterios.

Se realizó un estudio de los tres métodos multicriterios implementados, en los cuales se buscó el orden de dichos algoritmos para analizar su complejidad y eficiencia. Cada modelo matemático se trabajó de manera individual bajo las misma condiciones en un procesador Intel *Core i5* de 3.1GHz.

Para analizar dichos algoritmos se utilizaron tres diferentes entradas por cada uno de éstos métodos. La primera entrada consiste en 4 alternativas y un número variable de criterios, la segunda entrada consta de 100 alternativas y un número variable de criterios, y finalmente la tercera entrada tiene 1000 alternativas y un número de criterios variables. Seguidamente se calculó un ajuste de curva para así analizar, observar y comparar el orden, comportamiento y eficiencia de cada uno de éstos métodos multicriterios.

3.4.1 Análisis Complejidad Método *ELECTRE I*.

A continuación se detalla y describe como fue calculado el orden del método multicriterio *ELECTRE I* para las diferentes entradas mencionadas previamente.

3.4.1.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.

En la Tabla 1 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 4 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 1: Alternativas valor 4 y criterio variable con método *ELECTRE I*

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
4	4	1
4	20	1
4	50	1
4	100	1
4	500	3
4	1000	5
4	5000	15
4	10000	18
4	50000	51
4	100000	90
4	500000	393

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 5).

$$Y(\theta) = -2,690x10^{-10} * \theta^2 + 0,0009*\theta + 3,730$$

(18)

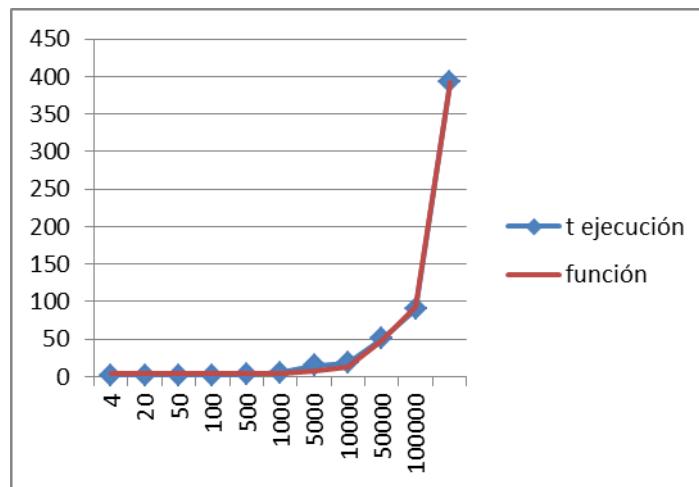


Figura 5: t de ejecución. V/s Función de aprox. con 4 alternativas y criterio variable
ELECTRE I

3.4.1.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.

En la Tabla 2 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 100 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 2: Alternativas valor 100 y criterio variable con método ELECTRE I

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
100	4	17
100	20	23
100	50	34
100	100	59
100	500	240
100	1000	468
100	5000	2249
100	10000	4562
100	50000	22716
100	100000	45460

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 6).

$$Y(\theta) = 8,106 \times 10^{-09} * \theta^2 + 0,453 * \theta + 10,843$$

(19)

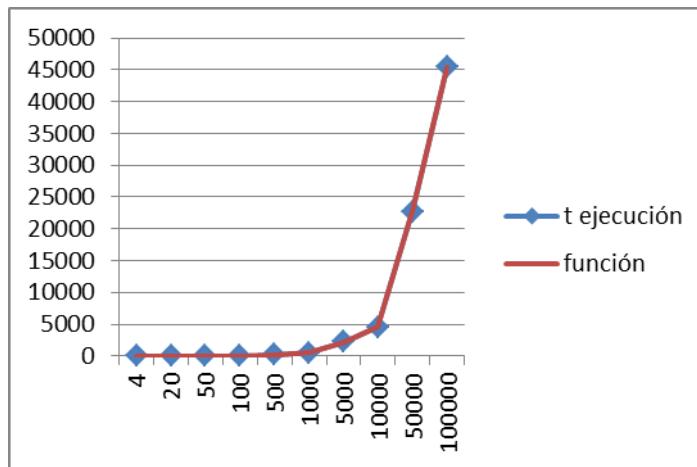


Figura 6: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable
ELECTRE I

3.4.1.3 Cantidad de alternativas constantes con valor 1000 y criterio variable.

En la Tabla 3 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 1000 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 3: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método ELECTRE I

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
1000	4	300
1000	20	999
1000	50	2328
1000	100	4569
1000	500	22513
1000	1000	45169
1000	5000	225799

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 7).

$$Y(\theta) = 2,605 \times 10^{-5} * \theta^2 + 45,013 * \theta + 81,949$$

(20)

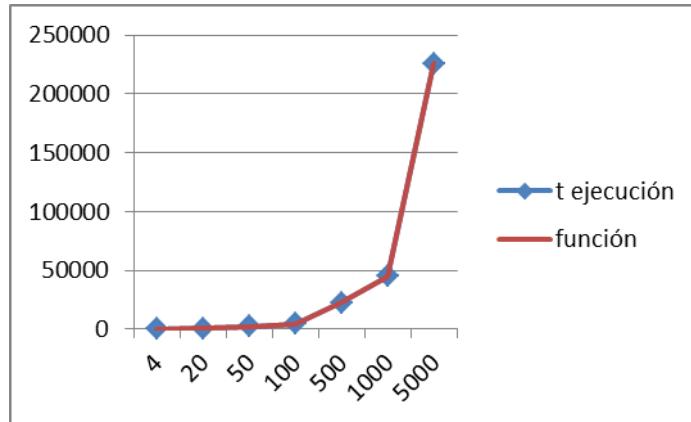


Figura 7: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable *ELECTRE I*

Dos funciones que difieren en una constante tienen el mismo orden.

$\theta f = \{ g : N \rightarrow N / f \text{ es } \theta(g) \text{ y } g \text{ es } \theta(f) \}$, [Mac, 241].

Por lo tanto el polinomio es de orden $\theta(n^2)$.

3.4.2 Análisis Complejidad Método *ELECTRE II*.

A continuación se detalla y describe como fue calculado el orden del método multicriterio *ELECTRE II* para las diferentes entradas mencionadas previamente.

3.4.2.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.

En la Tabla 4 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 4 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 4: Alternativas valor 4 y criterio variable con método *ELECTRE II*

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
4	4	3
4	20	4
4	50	4
4	100	5
4	500	7
4	1000	10
4	5000	35
4	10000	47
4	50000	149
4	100000	307
4	500000	1530

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 8).

$$Y(\theta) = 1,747 \times 10^{-10} * \theta^2 + 0,002 * \theta + 7,584$$

(21)

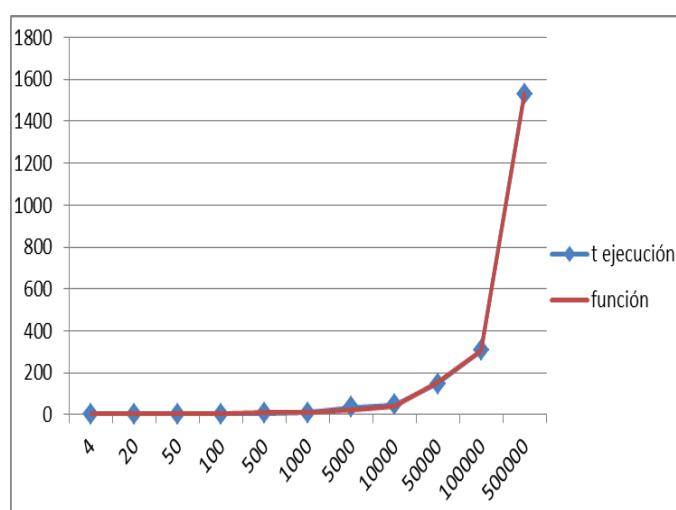


Figura 8: t de ejecución. Vs Función de aprox. Con 4 alternativas y criterio variable *ELECTRE II*

3.4.2.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.

En la Tabla 5 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 100 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 5: Alternativas valor 100 y criterio variable con método *ELECTRE II*

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
100	4	135
100	20	159
100	50	200
100	100	278
100	500	876
100	1000	1630
100	5000	7692
100	10000	15392
100	50000	77146
100	100000	155305

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 9).

$$Y(\theta) = 2,336 \times 10^{-07} * \theta^2 + 1,528 * \theta + 107,530$$

(22)

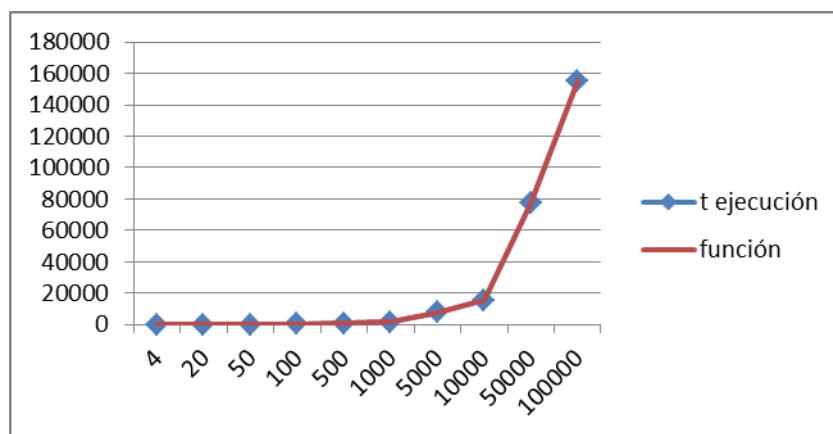


Figura 9: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable *ELECTRE II*

3.4.2.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.

En la Tabla 6 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 1000 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 6: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método *ELECTRE II*

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
1000	4	65503
1000	20	67854
1000	50	72167
1000	100	79446
1000	500	139527
1000	1000	215983
1000	5000	827155

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 10).

$$Y(\theta) = 0,0003 * \theta^2 + 150,656 * \theta + 64634,4011$$

(23)

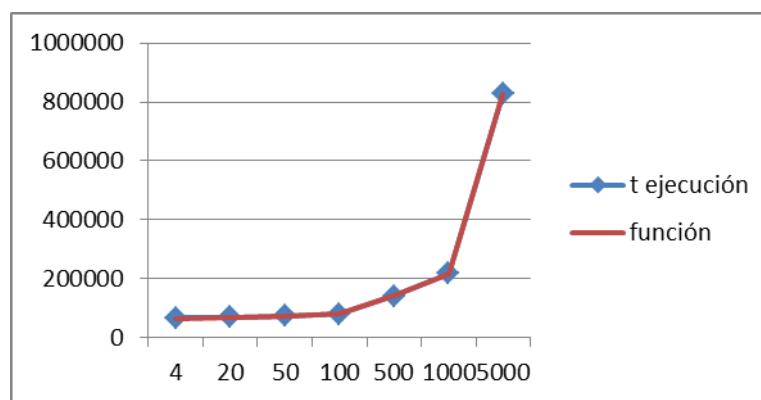


Figura 10: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable *ELECTRE II*

Dos funciones que difieren en una constante tienen el mismo orden.

$\theta f = \{ g : N \rightarrow N / f \text{ es } \theta(g) \text{ y } g \text{ es } \theta(f) \}$, [Mac, 241].

Por lo tanto el polinomio es de orden $\theta(n^2)$.

3.4.3 Análisis Complejidad Método Programación por Metas.

A continuación se detalla y describe como fue calculado el orden del método multiobjetivo Programación por Metas para las diferentes entradas mencionadas previamente.

3.4.3.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.

En la Tabla 7 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 4 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 7: Alternativas valor 4 y criterio variable con método Programación por Metas.

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
4	4	1
4	20	2
4	50	2
4	100	2
4	500	2
4	1000	2
4	5000	5
4	10000	7
4	50000	9
4	100000	22
4	500000	45

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 11).

$$Y(\theta) = -2,480 \times 10^{-10} * \theta^2 + 0,0002 * \theta + 2,216$$

(24)

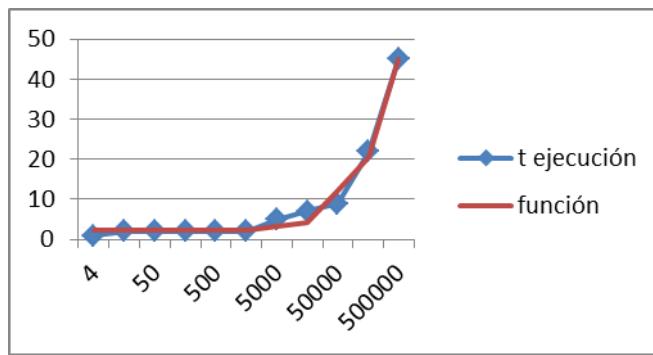


Figura 11: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 4 alternativas y criterio variable Prog. Metas

3.4.3.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.

En la Tabla 8 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 100 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 8: Alternativas valor 100 y criterio variable con método Programación por Metas

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
100	4	1
100	20	2
100	50	3
100	100	4
100	500	7
100	1000	8
100	5000	20
100	10000	39
100	50000	186
100	100000	359

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica ver (Figura 12).

$$Y(\theta) = -1,803 \times 10^{-09} * \theta^2 + 0,003 * \theta + 2,2$$

(25)

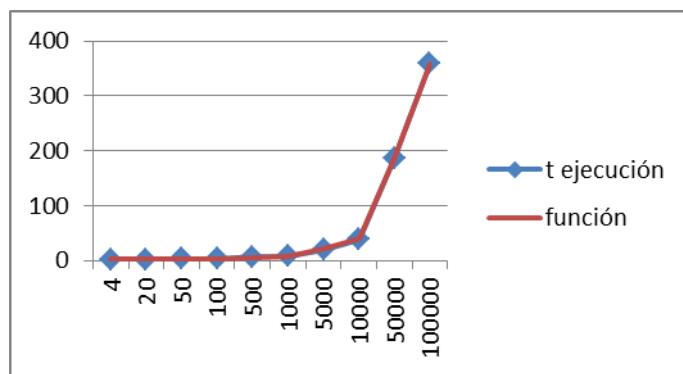


Figura 12: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 100 alternativas y criterio variable Prog. Metas

3.4.3.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.

En la Tabla 9 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 1000 alternativas y cantidad variable de criterios.

Tabla 9: Alternativas valor 1000 y criterio variable con método Programación por Metas

Entrada		Salida
Alternativas	Criterios	tiempo ejecución (ms)
1000	4	4
1000	20	8
1000	50	10
1000	100	10
1000	500	27
1000	1000	51
1000	5000	293

De acuerdo al ajuste de curvas a un polinomio mediante mínimos cuadrados [Val08] se obtiene la ecuación de aproximación, y a partir de esto su gráfica (ver Figura 13).

$$Y(\theta) = 3,182 \times 10^{-06} * \theta^2 + 0,041 * \theta + 6,092$$

(26)

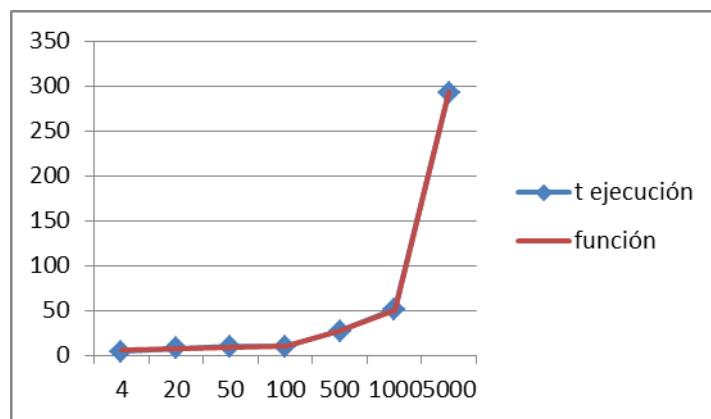


Figura 13: t de ejecución. V/s Función de aprox. Con 1000 alternativas y criterio variable Prog. Metas

Dos funciones que difieren en una constante tienen el mismo orden.

$\theta f = \{ g : N \rightarrow N / f \text{ es } \theta(g) \text{ y } g \text{ es } \theta(f) \}$, [Mac, 241].

Por lo tanto el polinomio es de orden $\theta(n^2)$.

Los 3 métodos multicriterios son del mismo orden $\theta(n^2)$.

3.4.4 Análisis de comparación en Complejidad Método *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y Prog. Metas.

Dado al análisis efectuado previamente, se estudiará y detallará las comparaciones de los tres métodos en relación a cada orden de entrada.

3.4.4.1 Cantidad de alternativas constante con valor 4 y criterio variable.

En Tabla 10 se detalla la entrada y en la Figura 14 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 4 alternativas y cantidad variables de criterios para los métodos *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y Programación por Metas, pudiéndose observar que a una mayor cantidad de criterios el método programación por metas es bastante eficiente en relación a los otros dos métodos.

Tabla 10: Cantidad alternativas 4 y criterios variables para los tres métodos multicriterios

Alternativas	Criterios
4	4
4	20
4	50
4	100
4	500
4	1000
4	5000
4	10000
4	50000
4	100000
4	500000

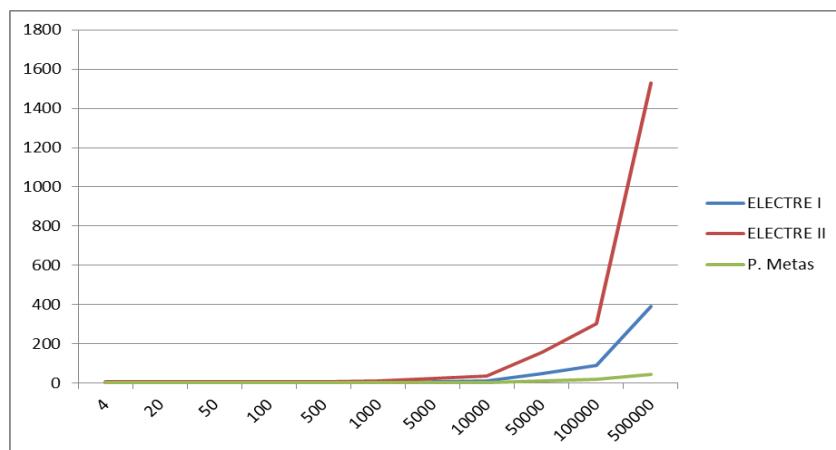


Figura 14: Comparación 3 métodos multicriterios con 4 alternativas y criterio variable.

3.4.4.2 Cantidad de alternativas constante con valor 100 y criterio variable.

En Tabla 11 se detalla la entrada y en la Figura 15 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 100 alternativas y cantidad variables de criterios para los métodos *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y Programación por Metas; pudiéndose observar de igual manera que la entrada examinada y estudiada anteriormente, una gran eficiencia del método programación por metas al ir aumentando el número de criterios.

Tabla 11: Cantidad alternativas 100 y criterios variables para los tres métodos multicriterios

Alternativas	Criterios
100	4
100	20
100	50
100	100
100	500
100	1000
100	5000
100	10000
100	50000
100	100000

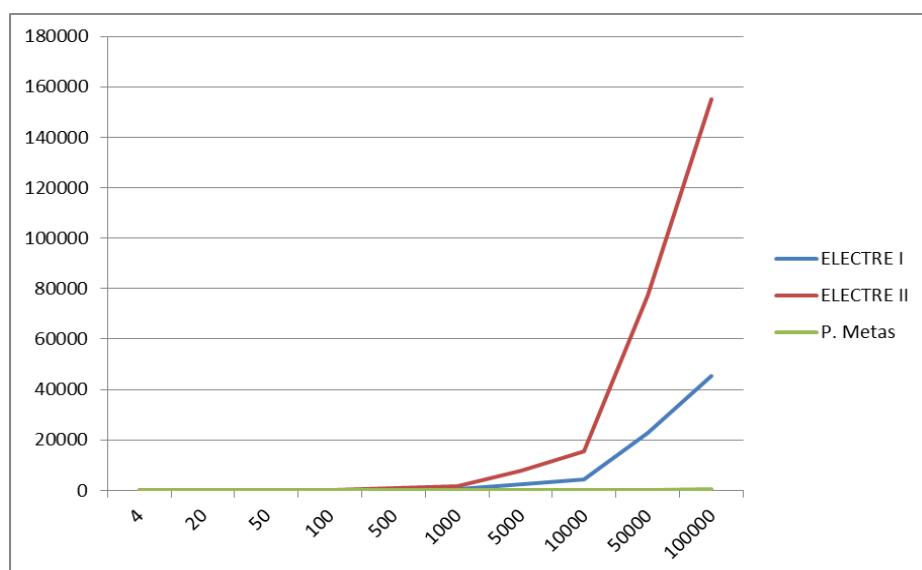


Figura 15: Comparación 3 métodos multicriterios con 100 alternativas y criterio variable

3.4.4.3 Cantidad de alternativas constante con valor 1000 y criterio variable.

En Tabla 12 se detalla la entrada y en la Figura 16 se muestra la salida correspondiente a la entrada de 1000 alternativas y cantidad variables de criterios para los métodos *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y Programación por Metas.

Tabla 12: Cantidad alternativas 1000 y criterios variables para los tres métodos multicriterios

Alternativas	Criterios
1000	4
1000	20
1000	50
1000	100
1000	500
1000	1000
1000	5000

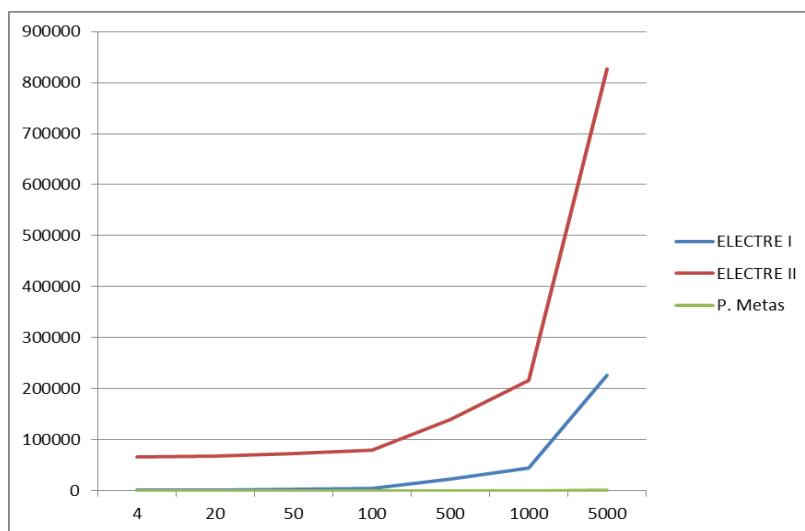


Figura 16: Comparación 3 métodos multicriterios con 1000 alternativas y criterio variable

Al ver la Figura 14, 15 y 16 se puede analizar la relación del tiempo de ejecución con el mismo tamaño de entrada puede notarse una mejora del método programación por metas por sobre *ELECTRE I* y *ELECTRE I* sobre *ELECTRE II*, cuando el número de criterios supera los 10000 en adelante.

Examinando la Figura 14 y 15, se observa una mejora cuando el número de criterios supera los 10000 en adelante, y en la Figura 16 se ve una mejora cuando el número de criterios supera los 100 en adelante.

4. ÁREA DE APLICACIÓN DE ESTUDIO

En los últimos años la preocupación del medio ambiente ha sido un tema de confrontación entre empresas contaminadoras por una parte, y ecologistas o algún movimiento ambiental por otra. Es por esto, que se desea jerarquizar las estaciones de monitoreo de la Celulosa Arauco Planta Valdivia en el río Cruce en la región de Los Ríos, con el propósito y finalidad de ser considerados y utilizados por los organismos fiscalizadores en sus respectivos controles, y así de ésta manera tratar de lograr disminuir las cantidades, niveles de desechos y desperdicios tóxicos a éste afluente.

4.1 Descripción General.

Actualmente existen datos empíricos tomados recientemente del río Cruces de Celulosa Arauco Planta Valdivia en diferentes estaciones de monitoreo, con los cuales se desea determinar mediante los métodos matemáticos multicriterios/mutiobjetivos, quiénes o cuáles son las estaciones de monitoreo con mayor participación en la descarga de residuos contaminantes a éste afluente.

4.1.1 Antecedentes Generales.

Durante los periodos correspondientes entre Enero y Marzo del año 2010, se tomaron unas series de muestras, de acuerdo al Programa de Monitoreo de la Calidad del Agua del Río Cruces [Sei10]. El equipo técnico-profesional responsable de ésta labor fue el Centro EULA-Chile, el cual tomó muestras durante los días comprendidos del 7 de Enero, 18 de Febrero y 25 de Marzo del 2010 en las estaciones de monitoreo que puede observarse en la Tabla 13:

Tabla 13: Estaciones de muestreo Celulosa Valdivia

Sitio Muestreo	Lugar	Coordenadas UTM
Estación 0	Bocatoma	N: 5.619.054 E: 682.302
Estación 2	Agua abajo puente Rucaco	N: 5.620.211 E: 680.096
Estación 3	Santuario Naturaleza – Castillo San Luis Alba	N: 5.614.447 E: 658.822
Estación 1	Difusor	N: 5.619.037 E: 681.333

4.2 Índice de calidad y contaminación del agua.

Los Índice de Calidad del Agua o también llamados ICA, son los indicadores del grado de contaminación del agua en relación a la época de muestreo, el cual es expresado en el porcentaje de agua pura [Dia10], [Sem99]. En la muestra se considera ciertos parámetros o indicadores, los que son objeto de análisis para ser posteriormente convertidos en un valor numérico, los cuales proporcionan conseguir una serie de índices que definen el estado de las aguas de acuerdo a calidades establecidas [Mil]. Mediante la combinación de estos parámetros posibilita obtener una visión más concreta del estado ecológico y del estado del medio biológico [Reo10].

4.2.1 Clasificación de Índice de Calidad del Agua.

Los ICA se clasifican primordialmente en dos ramas: índices Fisicoquímicos e índices Biológicos.

4.2.1.1 Índice Fisicoquímicos.

Los índices fisicoquímicos son valores numéricos adimensionales que contiene las magnitudes de algunos parámetros particulares, el cual varía dependiendo del índice [Mil]. Éstos índices permiten determinar, evaluar y proporcionar una perspectiva global de la calidad de un agua que cambia a través del tiempo [Reo10]. Particularmente los valores como nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, concentración de oxígeno, TOC (*Total Organic Carbon*), conductividad, pH y temperatura se utilizarán para alcanzar nivel global de la calidad fisicoquímica de los ríos [Reo10].

Los parámetros fisicoquímicos son transformados a un valor único llamado índice, el cual oscila entre 0 (muy mala calidad del agua) y 100 (muy buena calidad del agua) [Reo10].

Actualmente existen diversos índices que han sido desarrollados para condiciones específicas de un área o región, los cuales son ampliamente usados en el mundo, siendo aprobados y validados en diferentes estudios, tales como los índices de ICA de la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF) (1970) y el ICA de Dinius (1987) [Reo10].

A continuación en la Tabla 14 se muestra los índices fisicoquímicos correspondientes a la calidad del agua [Mil].

Tabla 14: Parámetros Fisicoquímicos de la calidad del agua

Parámetros Fisicoquímicos de la calidad del agua		
Parámetros físicos	Sólidos totales (residuo seco)	Sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables)
		Sólidos filtrables (coloidales y disueltos)
		Temperatura
		Conductividad
		Radiactividad
Parámetros químicos		Salinidad
		Dureza
		pH
		Alcalinidad
		Acidez
		Oxígeno Disuelto
		Materia Orgánica
		DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)
		DQO (Demanda Química de Oxígeno)
Otros compuestos		COT (Carbono orgánico total)
		Bionutrientes (N,P)
		Metales Pesados
		Aniones y Cationes
		Sustancias indeseables
		Sustancias tóxicas

4.2.1.2 Índice Biológicos.

Los índices biológicos presentan un valor numérico el cual refleja el efecto de la contaminación sobre una comunidad biológica, esto fundamentalmente basándose en la capacidad de los organismos de manifestar las características o condiciones ambientales en el que se encuentran. Por ejemplo, la existencia e inexistencia de un tipo de especie o ejemplar, su densidad de población es lo que permite ser usado como indicador de calidad, indicando el estado del agua en un lapso duradero de tiempo definido por la duración del ciclo vital de cada individuo, magnitud y densidad de las colonias [Mil]. Así para el análisis y estudio de la flora acuática se encuentra el Índice de Polusensibilidad Específica o también llamado IPS, para la fauna bentónica el índice

IBMWP Iberian Biological Monitoring Working Party y finalmente para la fauna ictiológica el índice IBICAT [Reo10].

Estos índices biológicos se dividen en dos grupos:

- Índices Bióticos
- Índices de Diversidad.

Los índices bióticos son específicos para un tipo de contaminación y/o región geográfica. Ayudan a valorar el estado ecológico de un ecosistema acuático alterado y dañado por un proceso de contaminación [Mil]. Los índices bióticos más empleados son los siguientes: *TBI Trent Biotic Index*, *BS Biotic Score*, *BMWP Biological Monitoring Working Party*, *ASPT Average Score per Taxon*, *VeT Verneaux* y *Tuffery*, *IBE Índice Biótico Esteso* y *BBI Belgian Biotic Index* [Che05]. Cabe destacar que algunos de estos índices se han ido adaptando de acuerdo al sector geográfico.

A continuación en la Figura 17, se muestra el desarrollo de los índices bióticos más extendidos en Europa [Che05].

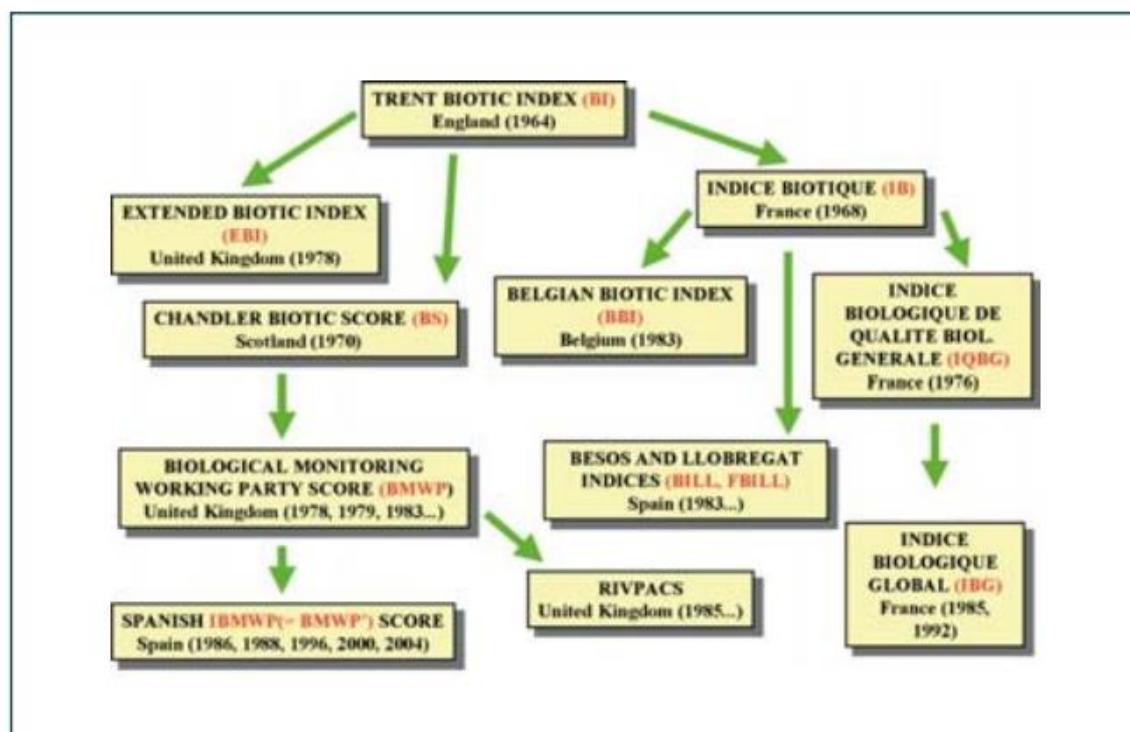


Figura 17: Índices Bióticos más extendidos en Europa.

Los índices de diversidad establecen la abundancia, o cantidad y biodiversidad de tipos o familias de un lugar, con lo que con una mayor biodiversidad habrá una mayor puntuación [Mil]. Uno de los índices de diversidad más utilizados es el índice de Shannon-Weaver e índice de Margalef [Che05].

El índice de Shannon-Weaver se calcula de la siguiente manera [Che05]:

$$H' = - \sum p_i * \ln p_i$$

$$p_i = n_i / N$$

$$n_i = \text{número individuos especie } i$$

$$N = \text{abundancia total}$$

(18)

El índice de Margalef se calcula de la siguiente manera [Che05]:

$$I = S - 1 / \log_e N$$

$$S = n^o \text{ especies}$$

$$N = N^o \text{ individuos muestra}$$

(19)

Hoy en día se han creado una gran cantidad de Índices de Calidad del Agua dependiendo primordialmente del país, y del afluente que se quiera analizar. Utilizando los índices mencionados anteriormente [Dia10].

Al observar los datos existentes de las cuatro estaciones de monitoreo se ha decidido utilizar los índices fisicoquímicos en la investigación, ya que los datos son del tipo fisicoquímicos, posibilitando tener una perspectiva global de la calidad del agua en comparación a los índices biológicos, los cuales miden el efecto de la contaminación sobre una comunidad biológica.

4.2.2 Índice de la Fundación Nacional de Sanidad de los Estados Unidos (NSF WQI).

El índice de calidad del agua (ICA) *Water Quality Index (WQI)* fue desarrollado en la década de los 70 por la *National Sanitation Foundation (NSF)* [Dia10].

El *NSF WQI* fue desarrollado en tres fases. En el primer estudio se consideraron 35 parámetros de contaminación, en los que entendidos y expertos valoraron y clasificaron

estas variables respecto si el parámetro debería ser “no incluido”, “indeciso” o “incluido”, además debía asignársele un valor de mayor a menor importancia de 1 a 5. En la segunda etapa se presentó las respuestas realizadas en la primera fase, y a partir de esto se reconocieron y determinaron 9 parámetros con los de mayor importancia: Oxígeno disuelto, Coliformes fecales, pH, DBO₅, Nitratos, Fosfatos, Desviación de Temperatura, Turbidez y Sólidos totales. Y Finalmente en la última etapa se planteó e inició la labor de desarrollar una curva de valoración para estos 9 parámetros, en el cual cada experto confeccionó y elaboró una curva que representa la variación de la calidad del agua ocasionada, por el grado de contaminación de los parámetros [Dia10].

A continuación en la Tabla 15 se presentará las ponderaciones obtenidas por los expertos de los parámetros analizados anteriormente.

Tabla 15: Ponderaciones de los parámetros de la *NSF-WQI*

Parámetros	Unidades	Factor de Ponderación
Oxígeno Disuelto	% saturación	0.17
Coliformes Fecales	Numero/100mL	0.16
pH	Unidades	0.11
DBO ₅	mg/L	0.11
Cambio de Temperatura	°C	0.10
Fosfatos totales	mg PO ₄ /L	0.10
Nitratos	mg NO ₃ /L	0.10
Turbidez	NTU	0.08
Solidos Disueltos Totales	mg/L	0.07

Debido a que no se disponía del parámetro variación de temperatura correspondiente a *NSF-WQI* en el programa de monitoreo de Río Cruces, se realizó una reponderación y revaluación proporcionalmente de las ponderaciones o pesos de los parámetros físico químicos restantes. Esto fue posible hacerlo de acuerdo a [Upa, 47], dividiéndose cada factor restante por 0.9, el cual es la suma de todos los pesos excepto el de cambio de temperatura. Además el valor de importancia de esta variable no es tan significativo, por lo que puede ser desechada del resto. En la Tabla 16 se puede observar la nueva ponderación de los parámetros de *NSF-WQI*.

Tabla 16: Reponderación de los parámetros de la *NSF-WQI*

Parámetros	Unidades	Factor de Ponderación
Oxígeno Disuelto	% saturación	0.19
Coliformes Fecales	Numero/100mL	0.18
pH	Unidades	0.12
DBO ₅	mg/L	0.12
Fosfatos totales	mg PO ₄ /L	0.11
Nitratos	mg NO ₃ /L	0.11
Turbidez	NTU	0.09
Solidos Disueltos Totales	mg/L	0.08

Cada parámetro anterior tiene asociada un meta y objetivos en lograr o alcanzar. Las metas o valores a alcanzar por cada parámetro pueden inferirse de las curvas confeccionadas por los doctos y entendidos de la *NSF-WQI* [Dia10, 186], junto con las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas de la CONAMA; tomando en cuenta en este último caso la clase de calidad del tipo clase 1, la cual es una muy buena calidad, apta para la conservación de comunidades acuáticas, riego sin restricciones y calificada para la captación de agua para potabilizarla [Sin, 11].

Los objetivos (Maximizar o Minimizar) de cada factor o parámetro se inducen de las consecuencias o efecto que pueden provocar en muy altas o bajas concentraciones respectivamente.

La amplitud de cada criterio o parámetro fue calculado usando un intervalo de confianza del 90 %, utilizando para esto el promedio, tamaño de la muestra, desviación estándar expuestos en el programa de monitoreo del río Cruces [Sei10, 138]. Detalles de dichos cálculos pueden observarse en el Anexo D.

En la Tabla 17 se describe y detalla las metas, objetivos y amplitud de cada uno de los parámetros de *NSF-WQI*.

Tabla 17: Metas, objetivos, amplitud y descripción de cada parámetro físico químico.

Parámetro	Meta	Objetivo	Amplitud	Descripción
Oxígeno Disuelto	90	Maximizar	100	El oxígeno disuelto es el parámetro más fundamental del agua. Bajos niveles de éste provoca y genera deficiencias en el comportamiento de organismos, junto con una disminución de peces, invertebrados y microorganismo, además ciertas sustancias o elementos se vuelven más tóxicos (Cu, Pb, Zn) [Dia10, 5].
Coliformes Fecales	1000	Minimizar	551	Grupo de microorganismo que revela la calidad bacteriológica del agua [Dia10, 7].
pH	7,5	Minimizar	8	Niveles muy bajos aumenta toxicidad del cianuro, y en niveles muy altos aumenta toxicidad del amonio [Dia10, 6].
DBO ₅	5	Minimizar	4	Niveles muy altos consumen el oxígeno disponible para organismos acuáticos [Dia10, 10].
Fosfatos totales	0	Minimizar	1	Niveles muy altos genera disminución de la biodiversidad, aumentando biomasa animal y vegetal, provocando turbidez [Dia10, 7].

Tabla 17 (Continuación)

Nitratos	0	Minimizar	31	Niveles muy altos permite un aumento del riesgo de crecimiento en proporciones molestas de algas, aumentando DBO5, disminuyendo la claridad del agua [Dia10, 7].
Turbidez	0	Minimizar	10	Niveles muy altos reduce la disponibilidad de luz, afectando la capacidad fotosintética de organismos [Dia10, 7].
Solidos Disueltos Totales	500	Minimizar	74	El aumento genera toxicidad en la salinidad, y esta provoca cambios en las comunidades bióticas [Dia10, 7].

4.3 Datos de las cuatro estaciones de monitoreo.

El programa de monitoreo de la calidad del agua del Río Cruces desarrolló un estudio y análisis acabado de 90 parámetros, de los cuales 42 de estos están inmersos en la guía de CONAMA para el establecimiento de Normas Secundarias de Calidad del Agua, teniendo los valores medios, máximos, mínimos y desviación estándar respectivamente.

Del conjunto de parámetros solamente se utilizaron los correspondientes a la tabla 16, tomando en cuenta los valores medios, ya que los datos de la muestra varían por diversas razones, tales como: velocidad del flujo fluvial, torbellinos, época del año, profundidad del muestreo, condiciones meteorológicas, etc., por lo que utilizar los valores mínimos o máximo no sería muy representativo.

En la Tabla 18, se detalla de manera exhaustiva los valores medios de los parámetros fisicoquímicos correspondientes a las cuatro estaciones de monitoreo del río Cruces [Sei10, 138].

Tabla 18: Valores parámetros fisicoquímicos correspondiente a cada estación de monitoreo.

Parámetros / Estación	E1	E0	E2	E3
Oxígeno Disuelto (mg/L)	93,90	99,11	95,97	91,87
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	375,96	301,03	276,21	280,87
pH	6,95	7,23	7,01	6,95
DBO ₅ (mg/L)	1,63	1,17	1,6	1,51
Fosfatos totales (mg/L)	21,31	13,33	14,62	14,42
Nitratos (mg/L)	0,37	0,47	0,4	0,35
Turbidez (NTU)	5,48	6,56	5,24	5,2
Solidos Disueltos Totales (mg/L)	48,58	36,06	66,93	63,95

4.4 Resultados de jerarquización.

Para realizar el *ranking* o clasificación de las estaciones de monitoreo mencionadas precedentemente, se utilizaron los parámetros fisicoquímicos de la *NSF-WQI*, los que fijan una base sólida y consistencia en establecer cuáles son los criterios más importantes a considerar en la calidad del agua, junto con sus respectivos pesos o ponderadores. En la Figura 18 se muestran los parámetros fisicoquímicos con sus respectivos objetivos y ponderaciones ingresados al sistema desarrollado.

Paso 1: Información a ingresar de cada criterio

Criterio	Máx/Mín	Ponderación
Oxígeno Disuelto	Maximizar	0,19
Coliformes Fecales	Minimizar	0,18
Fosfatos totales	Minimizar	0,12
Nitratos	Minimizar	0,12
Turbidez	Minimizar	0,11
Solidos Disueltos Totales	Minimizar	0,11

Figura 18: Parámetros fisicoquímicos o criterios ingresados en el sistema.

Luego se incorporaron las estaciones de monitoreo o alternativas. En la Figura 19 se puede apreciar las estaciones de monitoreo ingresadas en el sistema.

Paso 2: Información a ingresar de cada alternativa

Alternativas	Alternativa
E1	
E0	
E2	
E3	

Figura 19: Estaciones de monitoreo o alternativas ingresadas en el sistema.

Seguidamente se ingresaron la informaciones pertinentes a los parámetros fisicoquímicos de cada estación de monitoreo. En la Figura 20 se exhibe los datos fisicoquímicos de cada estación de monitorio, junto con las ponderaciones o pesos y amplitud de escala de cada criterio.

Paso 3: Matriz decisional

Datos					
Alternativa/Criterio	Oxígeno Di...	Coliformes ...	pH	DBO5	Nitró
E1	93,9	375,96	6,95	1,63	
E0	99,11	301,03	7,23	1,17	
E2	95,97	276,21	7,01	1,6	
E3	91,87	280,87	6,95	1,51	
Pesos de los criterios	0,19	0,18	0,12	0,12	
Amplitud de la escala	100	551	8	4	

Figura 20: Datos fisicoquímicos ingresados correspondientes a cada estación de monitoreo.

Posteriormente se ingresaron los índices de concordancia y discordancia para los métodos multicriterio *ELECTRE I*, *ELECTRE II* y las metas del método multiobjetivo Programación por metas. En la Figura 21 se presenta los parámetros ingresados para los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.

Paso 4: Información de los parámetros de cada método multicriterio-multiobjetivo

ELECTRE I	$p = 0.6$	$q = 0.2$																		
ELECTRE II	$p^- = 0.5$	$p^0 = 0.6$	$p^* = 0.8$	$q^0 = 15.0$	$q^* = 20.0$															
Programación por Metas	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Criterio</th> <th>Objetivo</th> <th>Meta</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Geno Disuelto</td> <td>Maximizar</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>Informes Fecales</td> <td>Minimizar</td> <td>1.000</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Minimizar</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>D5</td> <td>Minimizar</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>					Criterio	Objetivo	Meta	Geno Disuelto	Maximizar	90	Informes Fecales	Minimizar	1.000		Minimizar	7,5	D5	Minimizar	5
Criterio	Objetivo	Meta																		
Geno Disuelto	Maximizar	90																		
Informes Fecales	Minimizar	1.000																		
	Minimizar	7,5																		
D5	Minimizar	5																		
<input checked="" type="checkbox"/> Efectuar Análisis																				

Figura 21: Parámetros ingresados correspondientes a los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.

Por consiguiente se obtiene la solución general, permitiendo obtener un ranking o clasificación de las cuatro estaciones de monitoreo, jerarquizándolas de la menos contaminadora a la más contaminadora. En el método *ELECTRE I* (ver Figura 22) se puede apreciar E0 y E3 como las alternativas dominantes (núcleos) en este caso las estaciones de monitoreo menos contaminadoras; en relación a E1 y E2 como alternativas dominadas, por ende más contaminadoras que las dos anteriores. En el método *ELECTRE II* muestra las estaciones de monitoreo E0, E3, E1 y E2 como el orden y categorización de las alternativas de la menos contaminante a las más contaminante.

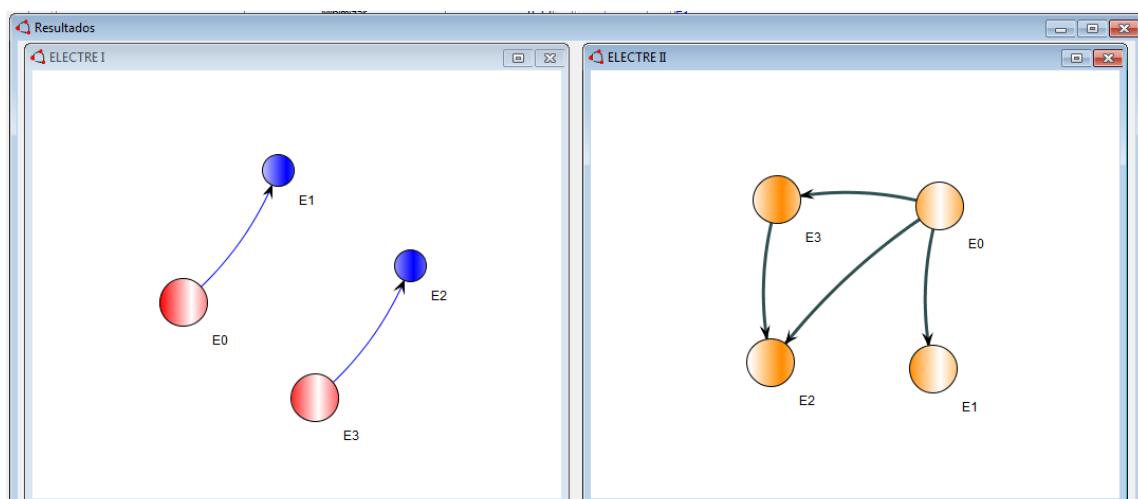


Figura 22: Solución gráfica de los métodos *ELECTRE I* y *II*.

En la Figura 23 se aprecia la salida del sistema, el cual arroja el ranking de los tres métodos multicriterios/multiobjetivos, pudiéndose apreciar la clasificación de las estaciones de monitoreo de la menos contaminante a la más contaminante por el método programación por metas.

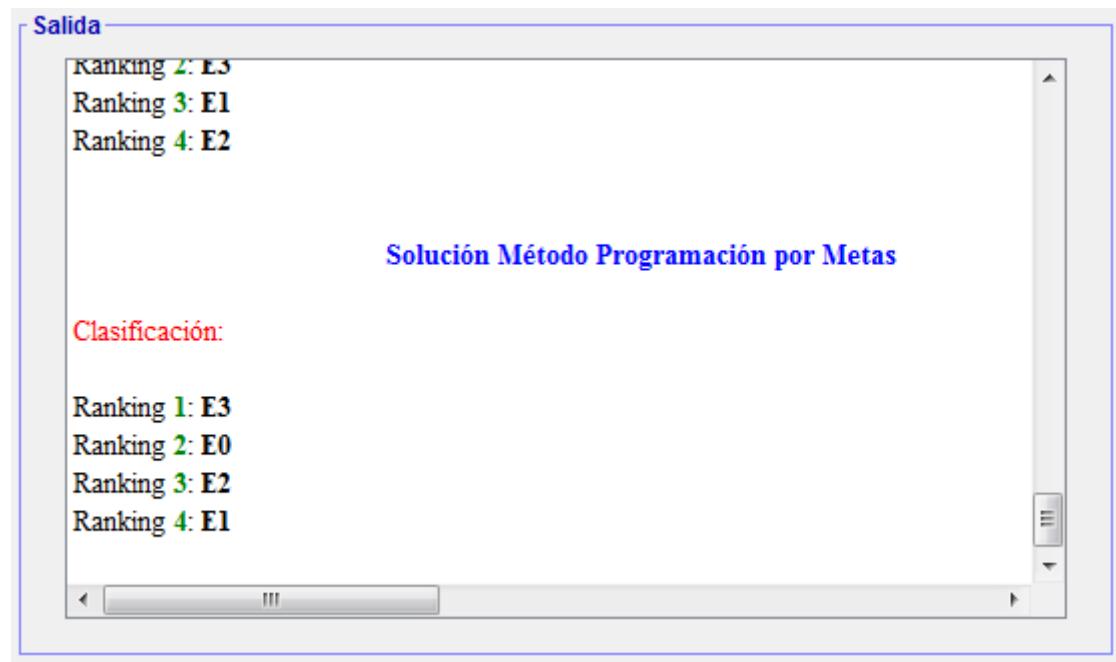


Figura 23: Salida con la clasificación de los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.

En la Figura 24 se presenta el Análisis de sensibilidad de los métodos *ELECTRE I* y *II*, en donde se ve el comportamiento de la solución al ir variando los índices de concordancia y discordancia respectivos a cada método.

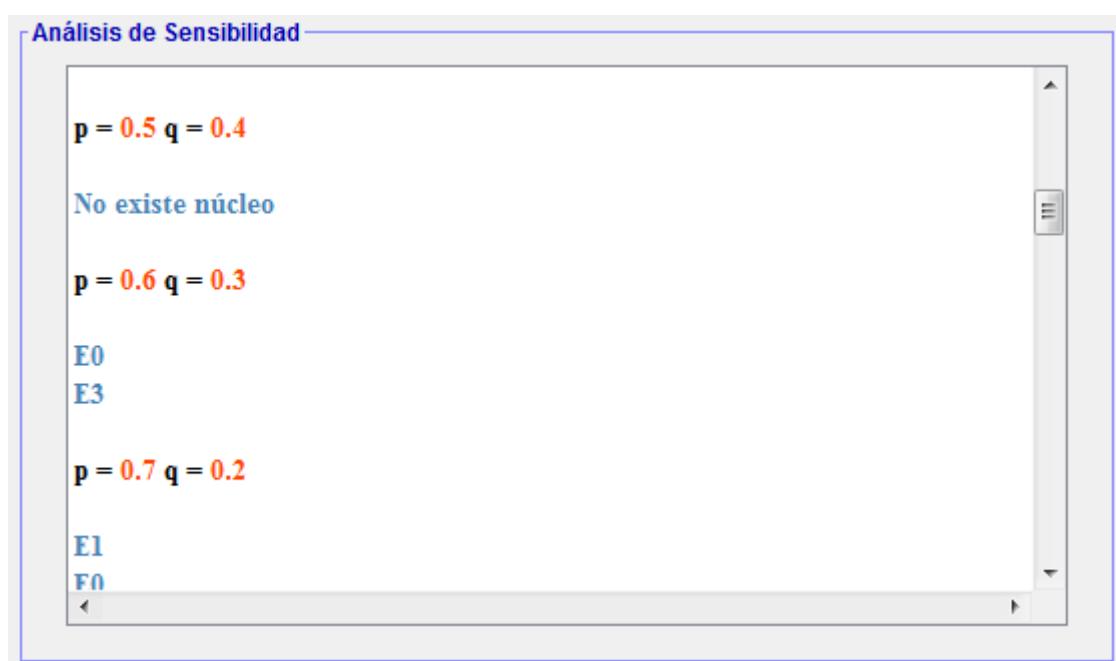


Figura 24: Análisis de sensibilidad de *ELECTRE I* y *II*.

Finalmente al analizar, estudiar y observar las soluciones de los métodos multicriterios/multiobjetivos *ELECTRE* I, II y Programación por metas, pudiéndose apreciar un común denominador en la solución final, observándose en detalle que las estaciones de monitoreo E0 junto con E3 son las menos contaminadoras, y E1 con E2 las más contaminadoras. La solución de programación por metas pudo haber variado con *ELECTRE* II, debido a las metas que debía alcanzar cada criterio. En la Tabla 19 se exhibe de manera más detallada la clasificación final de las estaciones de monitoreo de la menos contaminadora a la más contaminadora del Río Cruces en la ciudad de Valdivia.

Tabla 19: Clasificación final de las estaciones de monitoreo del Rio Cruces – Valdivia.

Clasificación	Estaciones de Monitoreo Río Cruces
1	E0
1	E3
2	E1
2	E2

5. ARQUITECTURA Y TECNOLOGÍAS

En este capítulo se examinarán las tecnologías informáticas las cuales permiten llevar a su fin este proyecto.

5.1 Arquitectura.

De acuerdo a las características del proyecto, a continuación se define la arquitectura en un modelo de capas (capa de interfaz, capa de gestión de objetos, capa de sistema operativo y capa de almacenamiento). En la Figura 25, se ilustra la arquitectura en capas del sistema utilizada para dar solución a los requisitos del proyecto.

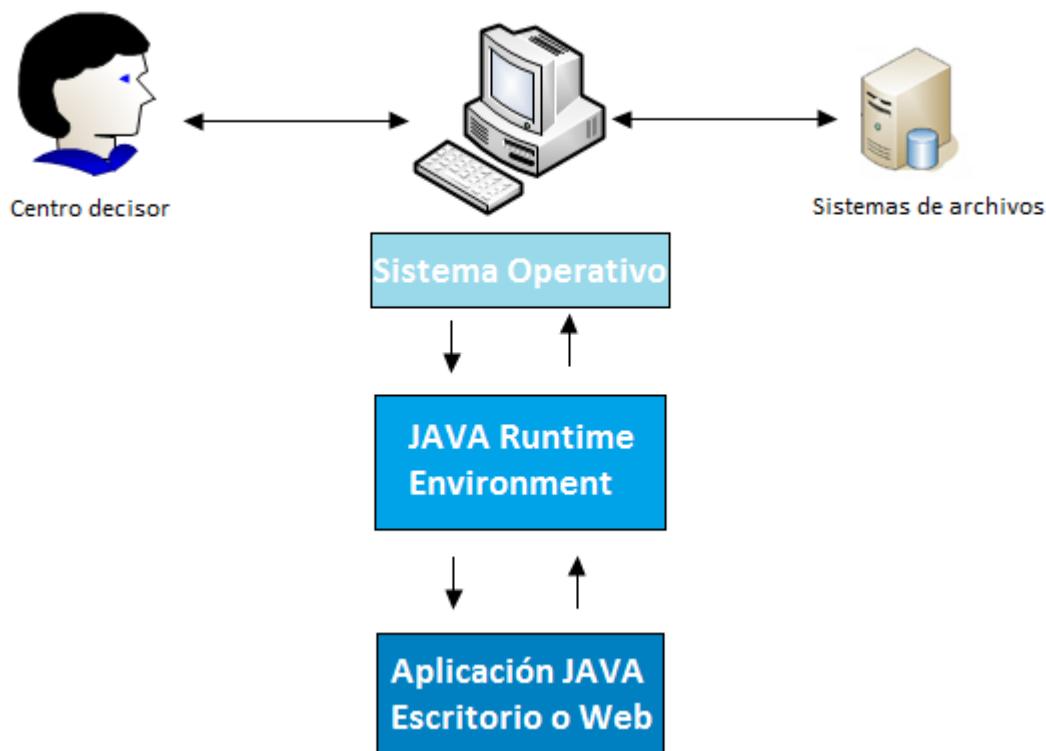


Figura 25: Arquitectura del sistema³¹.

La arquitectura del sistema fue definida de esta forma, para así satisfacer las necesidades tecnológicas de éste proyecto:

³¹ Fuente: Elaboración propia utilizando el software Microsoft Visio.

- Independencia del sistema operativo: El sistema debe ser capaz de ejecutarse en diferentes tipos de *hardware* y contar con la posibilidad de migrarse a distintos sistemas operativos.
- El usuario final debe ser capaz de ingresar los criterios y alternativas con sus respectivos datos, para que con esta información finalmente el sistema desarrollado en java³² realice el análisis de jerarquización de las alternativas.
- El usuario debe ser capaz de generar un reporte en formato PDF (*Portable Document Format*)³³ detallado de la solución de los métodos matemáticos multicriterios/multiobjetivos *ELECTRE I, II* y programación por metas.

5.2 Tecnologías para el Desarrollo del Sistema de Ayuda a la Decisión.

A continuación se describen las tecnologías que se utilizaran para el desarrollo del sistema de información que contempla esta investigación.

5.2.1 Java.

Java es un lenguaje de programación de alto nivel con el que se pueden escribir programas plataforma de escritorio, móviles y aplicaciones Web. Una de las diferencias respecto a otro lenguajes, es que es independiente de la plataforma, por lo que el código producido por el compilador Java puede transportarse a cualquier plataforma que tenga instalada una máquina virtual Java o también llamada *Java Virtual Machine (JVM)* [Ceb00, 7].

5.2.1.1 Lenguaje de Programación Java.

Las ventajas y características más significativas de Java son las siguientes [Ceb00, 7]:

- Independencia de la plataforma.
- Programación Orientada a Objetos (POO) o también llamada *Object Oriented Programming (OOP)*.

³² <http://www.java.com/es/download/>

³³ <http://www.adobe.com/es/products/acrobat/adobepdf.html>

- Fácil de aprender, ya que mucha de la sintaxis y diseño orientado a objetos se tomó del lenguaje C++.

La plataforma Java lo utilizan más de 9 millones de desarrolladores de software principalmente en los sectores industriales, y en una variada gama de dispositivos (3 mil millones de teléfonos móviles ejecutan java, 100% de los reproductores Blue-Ray ejecutan java), computadoras y redes [Jav].

5.2.1.2 Funcionamiento Interno de Java

Java incluye dos elementos: un compilador y un intérprete. El compilador genera un código de bytes que se almacena en un fichero para ser ejecutado por el intérprete Java denominado máquina virtual de Java. Este código de bytes de Java son un conjunto de instrucciones correspondientes a un lenguaje de máquina que no es específico de ningún procesador, sino de la *JVM*. En la Figura 26 se ilustra el proceso de compilación en Java [Ceb00, 7].

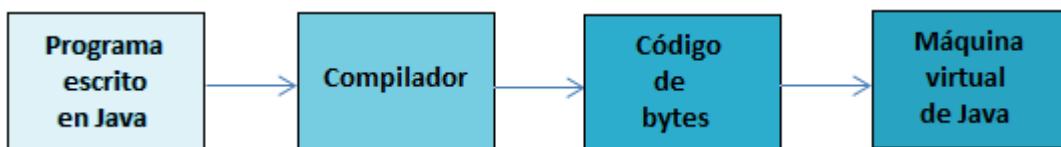


Figura 26: Proceso de compilación desde código fuente java a formato binario.

5.2.2 Entorno de Desarrollo Integrado.

El entorno de desarrollo integrado o *Integrated Development Environment (IDE)*, es un entorno de programación compuesto esencialmente por un editor de código, un compilador, un depurador, un constructor de interfaz gráfica (*Graphical User Interface o GUI*) y ofreciendo un sistema de control de versiones. Los *IDE* proporcionan un marco de trabajo amigable para la mayoría de los lenguajes de programación (C++, PHP, Python, Java, C#, etc) [Wikg].

En la etapa de construcción del prototipo del sistema se trabajó y utilizó el entorno *IDE* Eclipse versión Indigo 4.2³⁴, el cual proporcionó una programación y desarrollo más rápido, organizado y fácil software.

³⁴ <http://wiki.eclipse.org/Indigo>

6. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA

En este capítulo se explican y detallan las etapas para llevar a cabo el proceso de creación del software de ayuda a la toma decisión. Se ilustran las etapas de planificación, análisis, construcción y validación de la funcionalidad del sistema.

6.1 Planificación.

Se especifican a continuación las metodologías utilizadas en el desarrollo y construcción del software, así como las estrategias para llevar a cabo la implementación y la validación del *DSS*.

6.1.1 Metodología.

Para una administración y gestión sistemática de todo proyecto y llevarlo a cabo con altas posibilidades de éxito, es necesario guiarse por una metodología, permitiendo así dividir un gran proyecto en módulos más pequeños o etapas, el cual de manera estructurada y organizada posibilita crear, desarrollar y mantener un sistema desde que surge la necesidad del producto hasta que se cumple el objetivo por el cual fue creado.

Este proyecto en particular se utilizó el ciclo de vida incremental para el desarrollo del *software*, debido a que no es necesario disponer de los requerimientos de todas las funcionalidades en el comienzo del proyecto. El proceso es ir construyendo por módulos que cumplen las diferentes funciones del sistema, aumentando así gradualmente las capacidades del software. Las ventajas de éste ciclo de vida es:

- Construir un sistema pequeño siempre es menos riesgoso que construir un sistema grande.
- Desarrollar partes de las funcionalidades es más fácil determinar si los requerimientos planeados para los niveles subsiguientes son correctos.
- Si se detecta un error grave solamente se desecha la última iteración.

6.1.2 Especificación de requerimientos.

De acuerdo a la investigación, objetivos y las necesidades del cliente, se tomaron y obtuvieron los requisitos para poder desarrollar la construcción del software de ayuda a la decisión para un centro decisor.

6.1.2.1 Declaración general.

El propósito de este proyecto es crear un software de ayuda a la decisión para ser usado en jerarquizar unas estaciones de monitoreo de la calidad del agua del río cruces.

6.1.2.2 Clientes.

Ingeniero Matemático Gladys Mansilla Gómez e Ingeniero Civil Industrial Martín Solar Monsalves.

6.1.2.3 Objetivos.

Se espera ayudar al centro decisor en la jerarquización de las alternativas para decidir cuál de estas es la mejor o peor opción a escoger. Específicamente en el área de estudio es dilucidar cual o cuales estaciones de monitoreo del Rio Cruces es la menos o menos contaminante.

6.1.2.4 Requisitos Funcionales.

Los requisitos funcionales se muestran en la Tabla 20:

Tabla 20: Requisitos Funcionales

FRQ-0001	Ingresar Criterios.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor ingresar una cantidad indefinida de criterios.
FRQ-0002	Ingresar Ponderaciones.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor ingresar las ponderaciones a cada criterio de acuerdo al juicio de éste.
FRQ-0003	Seleccionar Objetivos.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor elegir el objetivo de cada criterio: Maximizar o Minimizar.
FRQ-0004	Ingresar Alternativas.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor ingresar una cantidad indefinida de alternativas.
FRQ-0005	Ingresar Datos.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor ingresar el valor que le corresponde a una cierta alternativa y criterio, junto con la amplitud relacionada a cada criterio.

Tabla 20 (Continuación)

FRQ-0006	Ingresar Parámetros.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor ingresar el valor de los parámetro de cada método. Para el caso del método <i>ELECTRE I</i> p índice de concordancia q índice de discordancia, <i>ELECTRE II</i> p-, p0, p* índices de concordancia q0 y q* índices de discordancia, Programación por metas ingresas las respectivas metas para cada criterio.
FRQ-0007	Métodos Multicriterios/Multiobjetivos.
Descripción	El sistema deberá realizar una clasificación de una cantidad de alternativas con ciertos criterios a partir de tres métodos multiobjetivo/multicriterio: <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y Programación por Metas.
FRQ-0008	Gráficos.
Descripción	El sistema deberá permitir entregar la solución gráfica (grafo), de los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .
FRQ-0009	Análisis de Sensibilidad.
Descripción	El sistema deberá realizar un análisis de sensibilidad de la solución para los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .
FRQ-0010	Generar Reporte.
Descripción	El sistema deberá permitir al centro decisor generar un reporte de la solución mediante los métodos <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y Programación por metas.

6.1.2.5 Requisitos No Funcionales.

Los requisitos no funcionales del sistema se muestran en la Tabla 21:

Tabla 21: Requisitos No Funcionales

NFR-0001	Usabilidad.
Descripción	El sistema deberá ser amigable e intuitivo al centro decisor.
NFR-0002	Plataforma.
Descripción	El sistema deberá ser capaz de ejecutarse en Mac OS y en los sistemas operativos Windows, Linux.

6.1.3 Plan de Trabajo.

Se ilustra en la Figura 27 el plan de trabajo para llevar a cabo la implementación del sistema, siguiendo las etapas de desarrollo de la ingeniería de software:

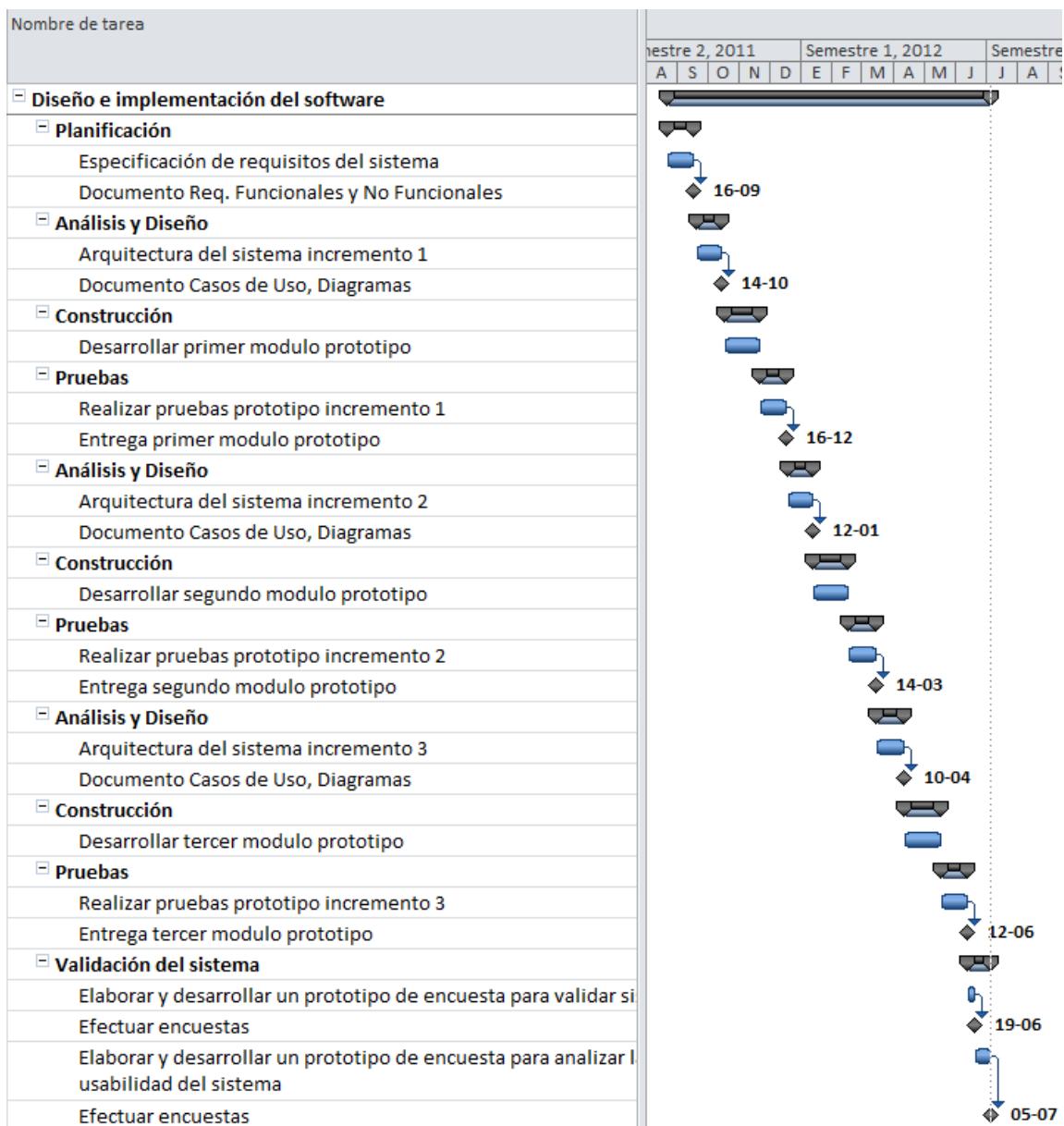


Figura 27: Carta Gantt que exhibe las etapas del desarrollo del proyecto³⁵.

6.1.4 Estrategia de Implementación.

A través del proceso de implementación y desarrollo del software, se tuvo tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Es de trascendental importancia reuniones periódicas con el cliente, para así aclarar y resolver requerimientos específicos del sistema que puedan surgir.

³⁵ Fuente: Elaboración Propia utilizando el software Microsoft Project.

- Mientras se va desarrollando e implementando el software, es considerable realizar revisiones periódicas de las iteraciones con el cliente, para así disminuir el riesgo de la entrega final.
- El producto final se dará terminado cuando se hayan cumplido los requisitos del cliente.
- Previo a la puesta en marcha, se debe validar el cumplimiento de todos los requisitos del sistema.

6.1.5 Estrategia de Pruebas.

Precedente a la realización de pruebas se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se debe verificar que se satisfagan todos los requerimientos tanto funcionales como no funcionales del sistema.
- Se validarán los resultados del sistema con las soluciones de ejercicios expuestos en libros referentes a métodos multicriterios/multiobjetivos.

6.2 Análisis.

En la presente sección se exhibirá de manera detallada el diagrama de procesos, casos de uso y actores del sistema, además del modelo conceptual.

6.2.1 Casos de Uso.

Para identificar claramente los casos de usos del sistema, se realizó el diagrama de procesos el cual permitió determinarlos de forma clara y simplificada. En la Figura 28 se aprecia el diagrama de procesos del sistema.

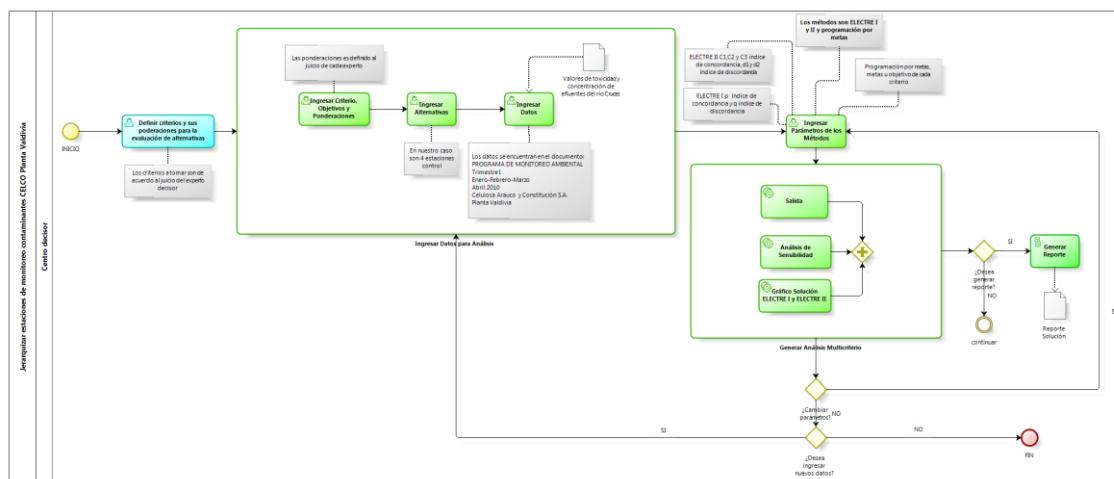


Figura 28: Diagrama de procesos del sistema³⁶.

bizagi

A partir del diagrama de procesos se extrajeron y obtuvieron los casos de usos que se exponen e ilustran en la Figura 29.

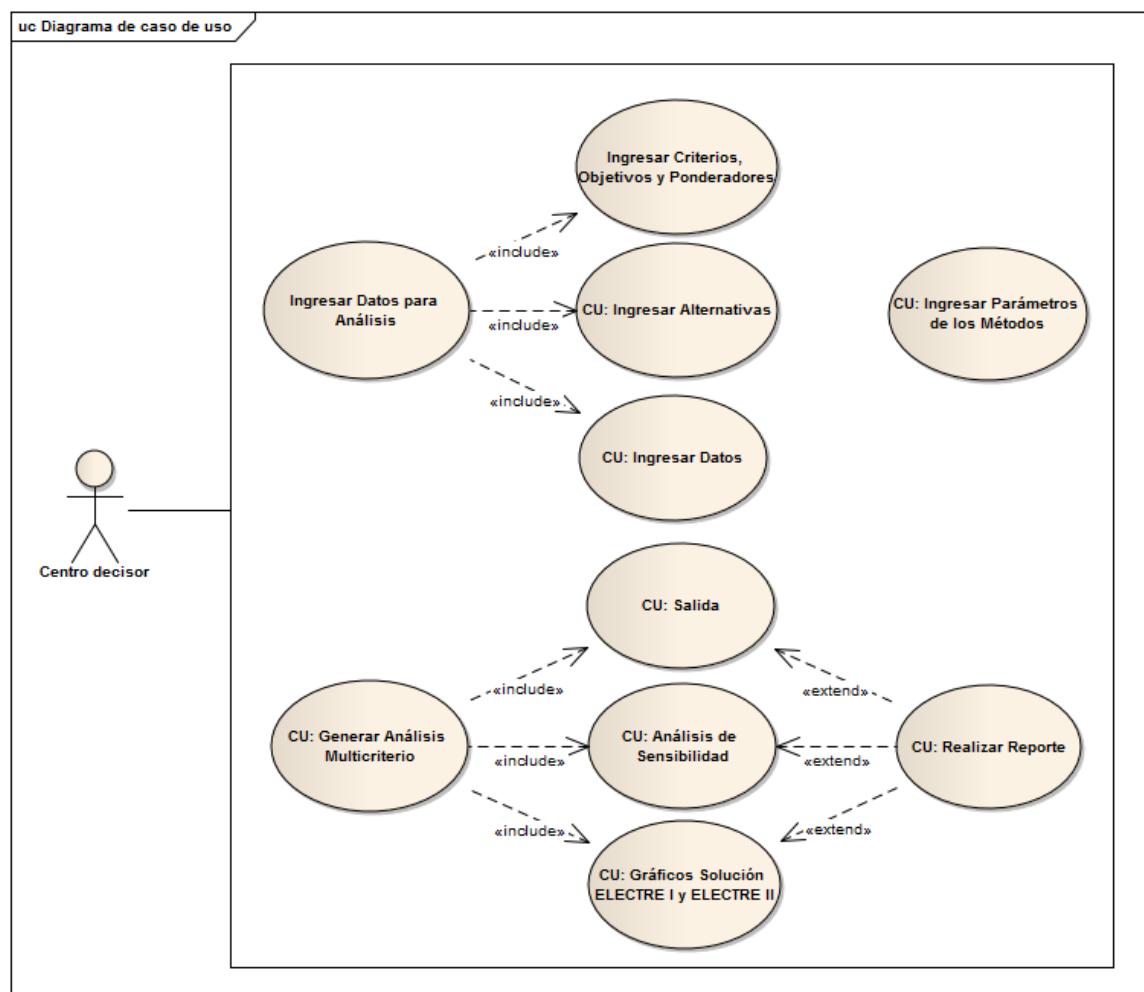


Figura 29: Diagrama General de Caso de Uso del sistema³⁷.

³⁶ Elaboración propia empleando el software *Bizagi*.

³⁷ Elaboración propia utilizando el software *Enterprise Architect*.

6.2.1.1 Descripción de los Actores del Sistema.

Centro Decisor: es un agente o grupo de individuos con características racionales, consistentes y coherentes, el cual es el encargado de ver qué criterios y objetivos son los más importantes en la toma de decisión.

6.2.1.2 Descripción de los Casos de Uso del Sistema.

Se describen a continuación, desde la Tabla 22 hasta la Tabla 25, los casos de uso del sistema en formato de alto nivel. Seguidamente se describe en la Tabla 26 el caso de uso más importante del sistema en formato extendido y en la Figura 30 el diag. Secuencia.

Tabla 22: Caso de Uso Ingresar Datos para Análisis.

Caso de Uso UC-0001	
Caso de Uso:	Ingresar Datos para Análisis.
Actores :	Centro decisor.
Tipo:	Primario.
Descripción:	Un centro decisor define a partir de su juicio experto los criterios primordiales, selección de objetivos y ponderaciones a ingresar, además añade el conjunto de alternativas, para así finalmente agregar los datos respectivos de cada alternativa con su criterio.

Tabla 23: Caso de Uso Ingresar Parámetros de los Métodos.

Caso de Uso UC-0002	
Caso de Uso:	Ingresar Parámetros de los Métodos.
Actores :	Centro decisor.
Tipo:	Primario.
Descripción:	Un centro decisor define a partir de su juicio experto ingresa los parámetros del método <i>ELECTRE I</i> (índice de concordancia e índice de discordancia), <i>ELECTRE II</i> (índice de concordancia e índice de discordancia) y Programación por Metas (metas de cada criterio).

Tabla 24: Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio.

Caso de Uso UC-0003	
Caso de Uso:	Generar Análisis Multicriterio.
Actores :	Centro decisor.
Tipo:	Primario.

Tabla 24 (Continuación)

Descripción:	Este caso de uso comienza cuando el centro decisor ya ha ingresado los datos para análisis y los parámetros de los métodos. El centro decisor realiza el análisis obteniendo una salida con la información detallada de la jerarquización de cada método, un análisis de sensibilidad pudiéndose observar el comportamiento de la solución y una solución gráfica de los método <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> . Finalmente, el decisor genera un reporte con los detalles de la solución de los tres métodos.
---------------------	--

Tabla 25: Caso de Uso Realizar Reporte.

Caso de Uso UC-0004	
Caso de Uso:	Realizar Reporte.
Actores :	Centro decisor.
Tipo:	Primario.
Descripción:	Un centro decisor puede generar un reporte con el detalle de la solución a partir de los métodos multicriterios/multiobjetivos <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y Programación por Metas.

Tabla 26: Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio formato extendido

Caso de Uso UC-0003	
Caso de Uso:	Generar Análisis Multicriterio.
Actores :	Centro Decisor.
Propósito:	Realizar análisis de jerarquización de alternativas a través de los métodos multicriterios <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y Programación por Metas.
Ref. Cruzadas:	[FRQ-0007] [FRQ-0008] [FRQ-0009]
Precondiciones:	Sistema se encuentra activo, el sistema cuenta con los datos de cada alternativa respecto a cada criterio, además con la información de los parámetros correspondiente a cada método multicriterio.
Resumen:	Un centro decisor realiza un análisis sobre un conjunto de alternativas con cierta cantidad de criterios, clasificándolas de mayor a menor importancia.
Curso Normal de Eventos	
Centro Decisor:	DSS multiobjetivo/multicriterio:
1. Este caso de uso comienza cuando el centro decisor desea realizar un análisis de jerarquización de alternativas con ciertos criterios.	
	2. El sistema despliega en pantalla una salida con la información detallada de la jerarquización de <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y programación por metas, además del análisis de sensibilidad y la solución gráfica de <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .

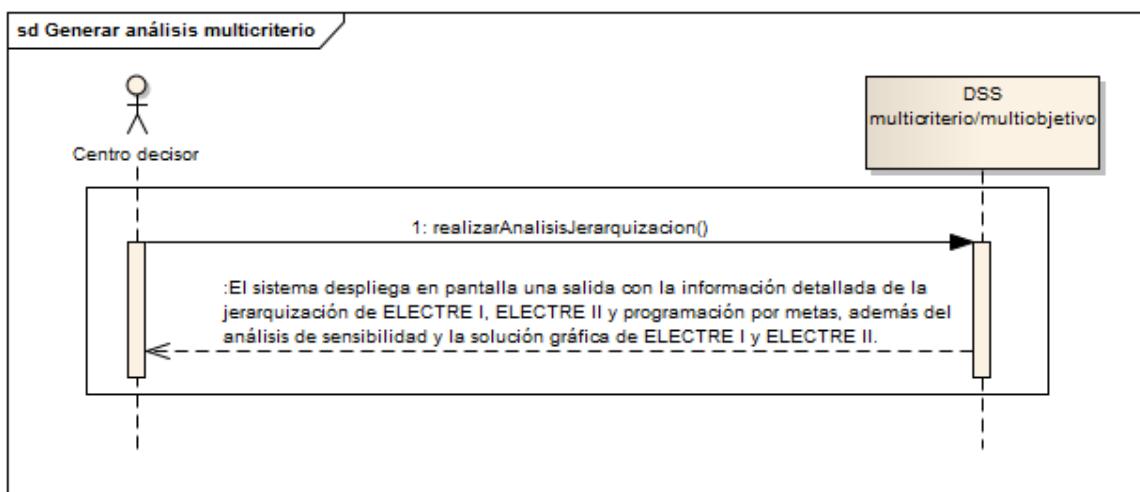


Figura 30: Diagrama de Secuencia Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio³⁸.

A continuación en Tabla 27 se presenta el contrato del Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio:

Tabla 27: Contrato realizarAnalisisJerarquizacion().

Contrato 1: realizarAnalisisJerarquizacion()	
Nombre:	realizarAnalisisJerarquizacion().
Responsabilidades :	Desplegar una salida con la solución detallada por cada método, un análisis de sensibilidad y un gráfico de <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .
Tipo:	Sistema.
Referencias Cruzadas:	<ul style="list-style-type: none"> • Funciones del sistema: FRQ-0007, FRQ-0008, FRQ-0009 • Casos de uso: Generar Análisis Multicriterio.
Excepciones	No hay.
Precondiciones	El sistema se encuentra activo, y previamente se haya ingresado los parámetros de cada uno de los métodos multicriterios.
Postcondiciones	Se creó la instancia Método Multicriterio/Multiobjetivo y Análisis de Jerarquización. Se asoció la instancia Método Multicriterio/Multiobjetivo a la instancia Análisis de Jerarquización al realizar la clasificación de un conjunto de alternativas.

³⁸ Fuente: Elaboración propia utilizando el software Enterprise Architect.

6.2.2 Modelo Conceptual.

En la Figura 31 se presenta el Modelo Conceptual del Sistema.

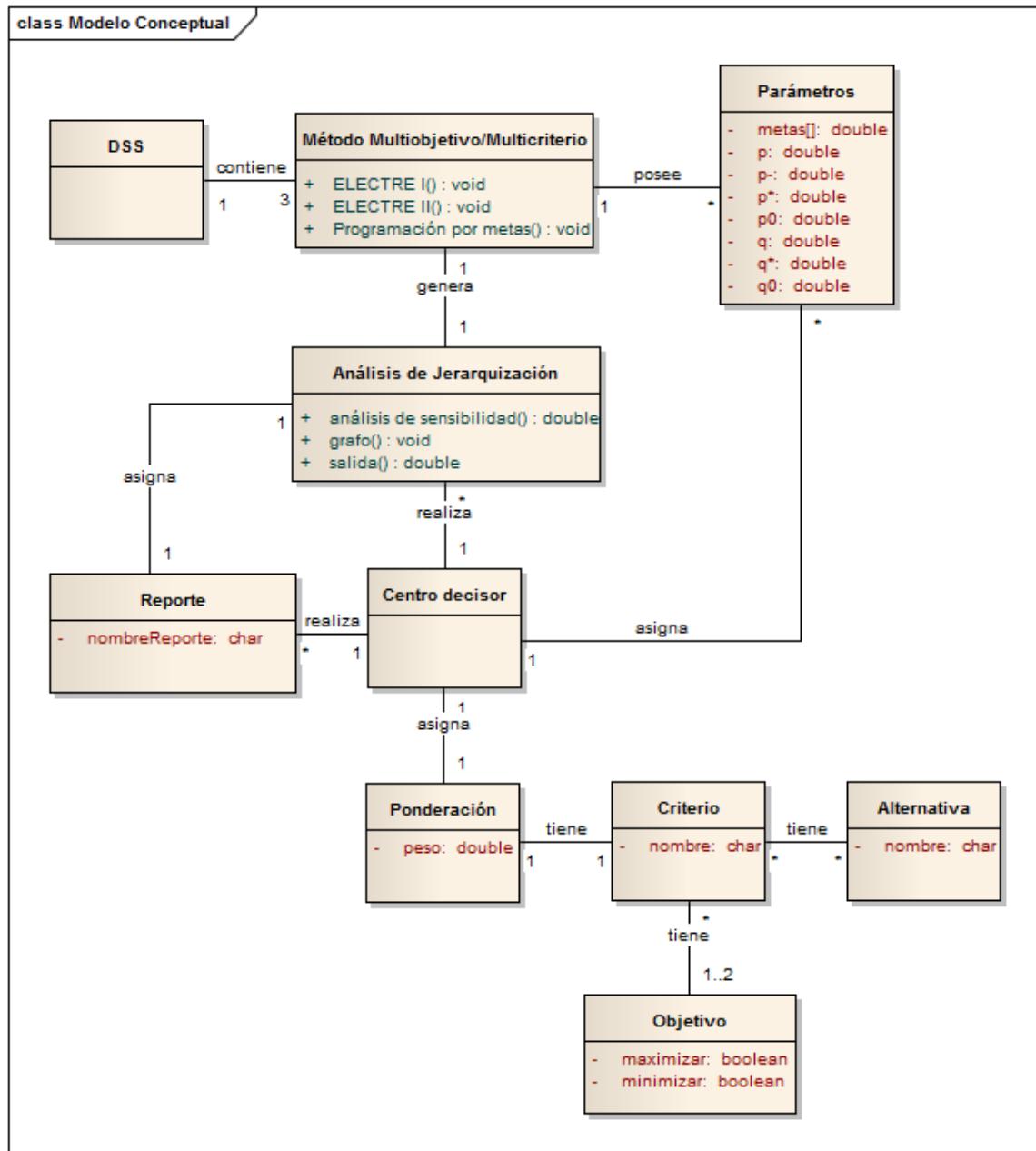


Figura 31: Modelo Conceptual del Sistema³⁹.

6.3 Diseño.

En esta etapa se mostrará el caso de uso real más significativo, “Generar análisis multicriterio” los cuales se dividen en los casos de uso: Salida, Análisis sensibilidad y gráficos solución *ELECTRE I* y *ELECTRE II*.

³⁹ Fuente: Elaboración propia utilizando el software *Enterprise Architect*.

6.3.1 Caso de Uso Real más Significativo.

A continuación de la Tabla 28 a la 30 se presenta de manera acabada el caso de uso “Generar análisis multicriterio”. Como se aprecia en la sección 6.2.1.2 este caso de uso incluye a tres casos de uso más específicos: “Salida”, “Análisis Sensibilidad”, “Gráficos solución ELECTRE I y ELECTRE II”. El caso de uso real de los ítems mencionados se exhibe a continuación.

Tabla 28: Caso de Uso Real Salida.

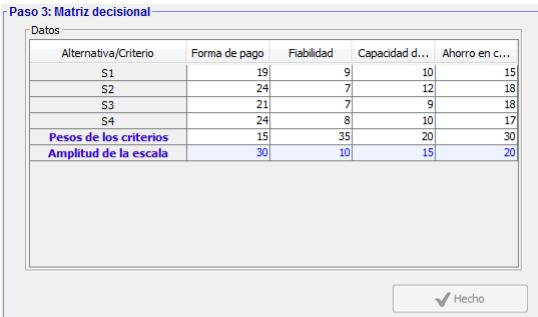
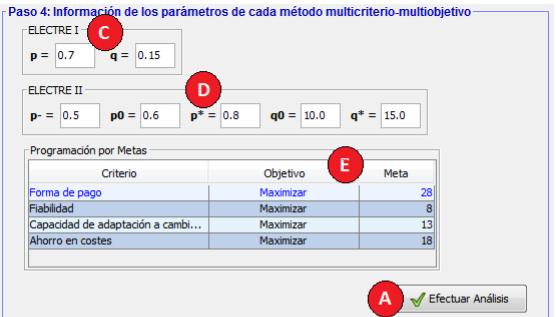
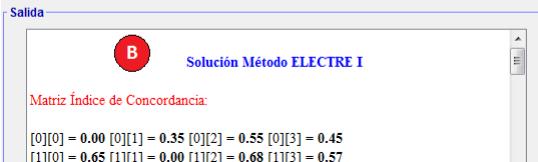
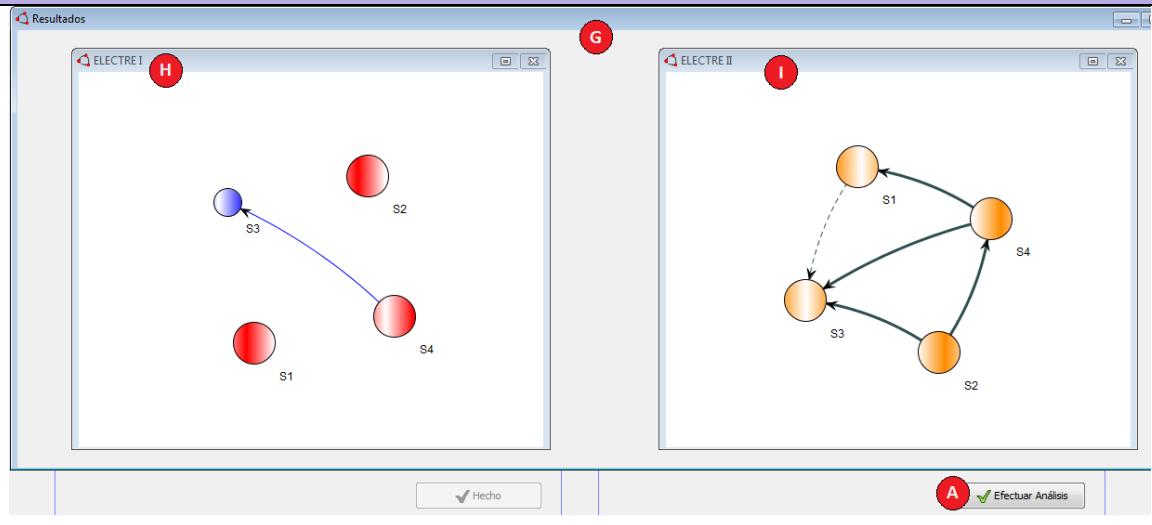
Caso de Uso Salida.	
Actores :	Centro Decisor.
Propósito:	Realizar Salida detallada de la solución de los tres métodos.
Tipo:	Primario y esencial.
Resumen: Realizar un análisis sobre un conjunto de alternativas con cierta cantidad de criterios, clasificándolas de mayor a menor importancia con los métodos ELECTRE I, ELECTRE II y Programación por Metas.	
Interfaz1: Salida detallada.	
	
	
Curso Normal de Eventos	
Acción Actores:	Respuesta Sistema:
1. Este caso de uso comienza cuando el centro decisor ya ingreso previamente la información correspondiente de los criterios, alternativas, matriz decisional y parámetros de los métodos.	
2. El centro decisor presiona A. Si hay algún error en la verificación de los parámetros indicara con un aviso, para corregir algún valor.	3. Calcula y despliega en el recuadro B la solución detalla de la clasificación realizada por los tres métodos multicriterios/multiobjetivos.
4. El centro decisor puede cambiar los valores de los parámetros de los métodos tecleando en C, D y E.	

Tabla 29: Caso de uso Real Análisis de Sensibilidad.

Caso de Uso Análisis de sensibilidad.																																																			
Actores :	Centro Decisor.																																																		
Propósito:	Realizar Salida detallada de la solución de los tres métodos.																																																		
Tipo:	Primario y esencial.																																																		
Resumen: Realizar un análisis sobre un conjunto de alternativas con cierta cantidad de criterios, clasificándolas de mayor a menor importancia con los métodos <i>ELECTRE I</i> , <i>ELECTRE II</i> y Programación por Metas.																																																			
Interfaz1: Realizar análisis de sensibilidad.																																																			
Paso 3: Matriz decisional Datos <table border="1"> <thead> <tr> <th>Alternativa/Criterio</th><th>Forma de pago</th><th>Fiabilidad</th><th>Capacidad d...</th><th>Ahorro en c...</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>S1</td><td>19</td><td>9</td><td>10</td><td>15</td></tr> <tr><td>S2</td><td>24</td><td>7</td><td>12</td><td>18</td></tr> <tr><td>S3</td><td>21</td><td>7</td><td>9</td><td>18</td></tr> <tr><td>S4</td><td>24</td><td>8</td><td>10</td><td>17</td></tr> <tr><td>Pesos de los criterios</td><td>15</td><td>35</td><td>20</td><td>30</td></tr> <tr><td>Amplitud de la escala</td><td>30</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">✓ Hecho</p>	Alternativa/Criterio	Forma de pago	Fiabilidad	Capacidad d...	Ahorro en c...	S1	19	9	10	15	S2	24	7	12	18	S3	21	7	9	18	S4	24	8	10	17	Pesos de los criterios	15	35	20	30	Amplitud de la escala	30	10	15	20	Paso 4: Información de los parámetros de cada método multicriterio-multiobjetivo ELECTRE I C $p = 0.7$ $q = 0.15$ ELECTRE II D $p = 0.5$ $p_0 = 0.6$ $p^* = 0.8$ $q_0 = 10.0$ $q^* = 15.0$ Programación por Metas E <table border="1"> <thead> <tr> <th>Criterio</th><th>Objetivo</th><th>Meta</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Forma de pago</td><td>Maximizar</td><td>28</td></tr> <tr><td>Fiabilidad</td><td>Maximizar</td><td>8</td></tr> <tr><td>Capacidad de adaptación a cambi...</td><td>Maximizar</td><td>13</td></tr> <tr><td>Ahorro en costes</td><td>Maximizar</td><td>18</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">A ✓ Efectuar Análisis</p>	Criterio	Objetivo	Meta	Forma de pago	Maximizar	28	Fiabilidad	Maximizar	8	Capacidad de adaptación a cambi...	Maximizar	13	Ahorro en costes	Maximizar	18
Alternativa/Criterio	Forma de pago	Fiabilidad	Capacidad d...	Ahorro en c...																																															
S1	19	9	10	15																																															
S2	24	7	12	18																																															
S3	21	7	9	18																																															
S4	24	8	10	17																																															
Pesos de los criterios	15	35	20	30																																															
Amplitud de la escala	30	10	15	20																																															
Criterio	Objetivo	Meta																																																	
Forma de pago	Maximizar	28																																																	
Fiabilidad	Maximizar	8																																																	
Capacidad de adaptación a cambi...	Maximizar	13																																																	
Ahorro en costes	Maximizar	18																																																	
Salida B Solución Método ELECTRE I Matriz Índice de Concordancia: $[0][0] = 0.00 [0][1] = 0.35 [0][2] = 0.55 [0][3] = 0.45$ $[1][0] = 0.65 [1][1] = 0.00 [1][2] = 0.68 [1][3] = 0.57$	Análisis de Sensibilidad F Análisis Método ELECTRE I Núcleo $p = 0.0 q = 0.9$ No existe núcleo																																																		
Curso Normal de Eventos																																																			
Acción Actores: 1. Este caso de uso comienza cuando el centro decisor ya ingreso previamente la información correspondiente de los criterios, alternativas, matriz decisional y parámetros de los métodos. 2. El centro decisor presiona A. Si hay algún error en la verificación de los parámetros indicará con un aviso, para corregir algún valor.	Respuesta Sistema: 3. Calcula y despliega en el recuadro F el análisis de sensibilidad de la solución para los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .																																																		

Tabla 30: Caso de uso Gráficos de la solución *ELECTRE I* y *ELECTRE II*.

Caso de Uso Gráficos de la solución <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .	
Actores :	Centro Decisor.
Propósito:	Realizar gráfico de la solución.
Tipo:	Primario y esencial.
Resumen: Generar gráfico de la solución de los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .	
Interfaz1: Realizar análisis de sensibilidad.	
	
Curso Normal de Eventos	
Acción Actores:	Respuesta Sistema:
1. Este caso de uso comienza cuando el centro decisor ya ingreso previamente la información correspondiente de los criterios, alternativas, matriz decisional y parámetros de los métodos.	
2. El centro decisor presiona A. Si hay algún error en la verificación de los parámetros indicará con un aviso, para corregir algún valor.	
	3. El sistema despliega en H e I respectivamente de la ventana G la solución gráfica para los métodos <i>ELECTRE I</i> y <i>ELECTRE II</i> .
4. El centro decisor puede cambiar los valores de los parámetros de los métodos.	

En la Figura 32 se presenta el diagrama de secuencia del caso de uso “Generar Análisis Multicriterio”, detallándose la secuencia de interacciones o acciones entre los distintos elementos del *software* del sistema.

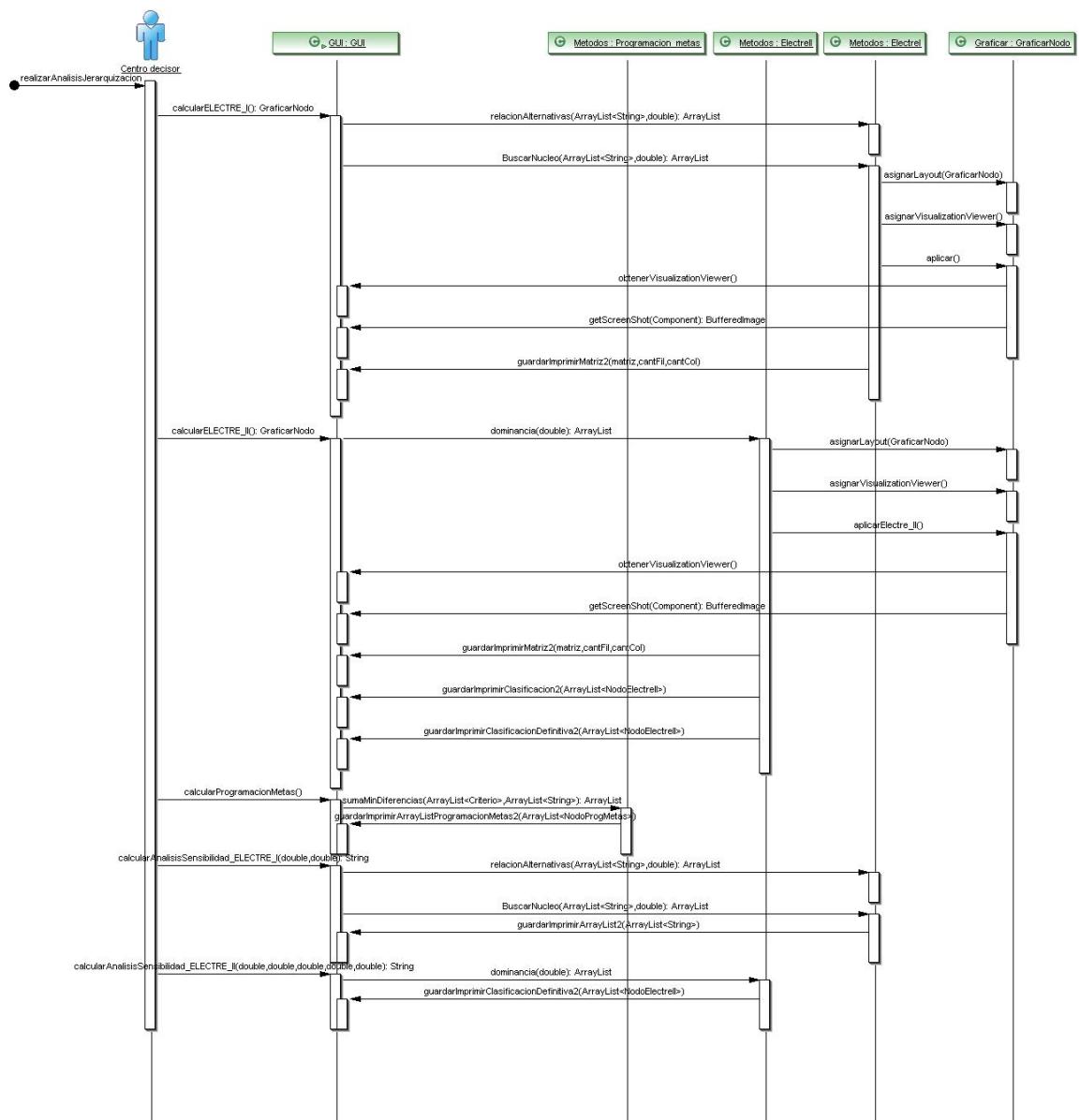


Figura 32: Diagrama de Secuencia del Caso de Uso Generar Análisis Multicriterio⁴⁰.

Al haber ingresado los criterios, alternativas, información de la matriz decisional y parámetros de cada método, el experto decisor puede realizar el análisis de jerarquización. Este análisis realiza las acciones de calcularELECTREI(), calcularELECTREII(), calcularProgramacionMetas(), calcularAnalisisSensibilidadELECTREI() y calcularAnalisisSensibilidadELECTREII() correspondientes a la clase “GUI.java”, que a su vez llaman a los métodos de las clases “Electrel.java”, “ElectrelII.java”, “Programacion_metas.java” y “GraficarNodo.java”, los cuales devuelven la información de la clasificación, representación gráfica de la clasificación de *ELECTRE* I y II, junto con su respectivo análisis de sensibilidad.

⁴⁰ Fuente: Elaboración propia utilizando el plugin eUML2 para Eclipse.

6.3.2 Diagrama de Clases.

A continuación se describe los paquetes y clases más importantes, asimismo se exhibe el diagrama de clases los que muestra la interacción entre estos.

- **pdf:** Este paquete incluye la clase “GenerarPDF.java” que posibilita producir un documento con formato pdf, con las soluciones detalladas de los métodos.
- **Imagenes:** Este paquete incluye solamente la clase “CargarImagen.java”, permitiendo cargar una imagen, la cual se encuentra dentro del archivo ejecutable jar.
- **Graficar:** Este paquete contiene una única clase “GraficarNodo.java”, la cual permite realizar la representación gráfica de los nodos, junto con sus respectivas relaciones.
- **GUI:** En este paquete se encuentran las clases que permiten crear la interfaz gráfica de usuario.
- **Metodos:** Este paquete tiene incorporados 3 métodos multicriterios/multiobjetivos.

A continuación en la Figura 33 es posible visualizar gráficamente los paquetes y clases previamente explicados. Solamente se detallan algunas de las clases contenidas en los paquetes con respectivas relaciones de dependencia. En el Anexo A se presenta la documentación completa y detallada de los paquetes y clases.

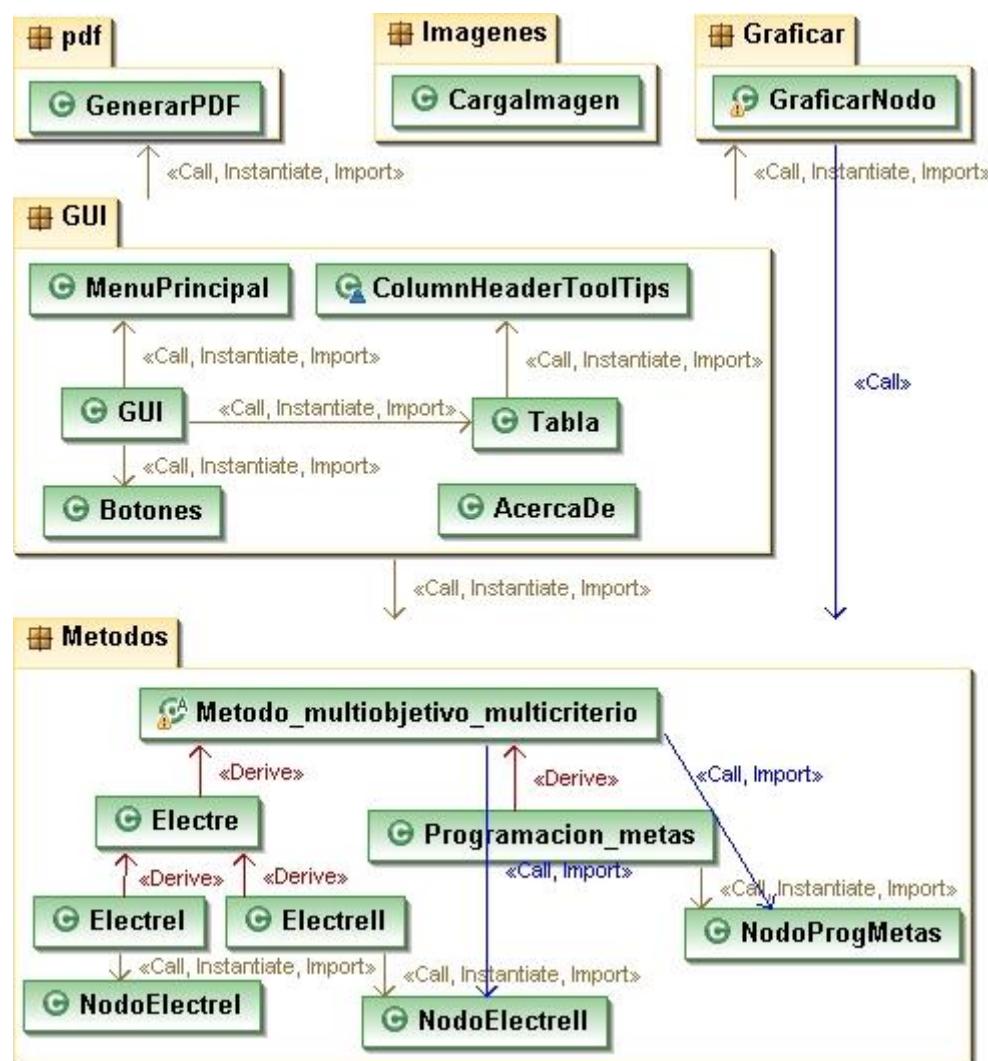


Figura 33: Diagrama de Clases⁴¹.

6.3.3 Bibliotecas utilizadas.

Para realizar facilitar la programación de ciertos aspectos del sistema, se utilizaron bibliotecas externas con características *opensource*. A continuación se explicará de maneras más detallada.

6.3.3.1 JUNG (*Jung Universal Network/ Graph Framework*).

Es una biblioteca de código abierto escrita en el lenguaje java, la cual proporciona un lenguaje extensible para el modelamiento, análisis y visualización de los datos que pueden ser representados como un grafo o red.

JUNG permite una representación diversa de grafos, tales como:

⁴¹ Fuente: Elaboración propia utilizando el plugin eUML2 para Eclipse.

- Grafos dirigidos.
- Grafos no dirigidos.
- Grafos multi-modal.
- Grafos con aristas paralelas.
- HiperGrafos.

Las últimas versiones de ésta biblioteca tiene implementados algoritmos de teoría de grafos, minería de datos y análisis de redes sociales tales como: rutinas de agrupamiento, descomposición, optimización, generación de grafos de manera aleatoria, análisis estadístico y el cálculo de distancia de redes, flujos y medidas de importancia (centralidad, *pagerank*, HITS) [Jun].

En el siguiente código fuente completo⁴² se mostrará de manera detallada el uso de ésta biblioteca:

```
import edu.uci.ics.jung.algorithms.layout.CircleLayout;
import edu.uci.ics.jung.algorithms.layout.Layout;
import edu.uci.ics.jung.graph.Graph;
import edu.uci.ics.jung.graph.SparseMultigraph;
import edu.uci.ics.jung.visualization.BasicVisualizationServer;
import java.awt.Dimension;
import javax.swing.JFrame;

/**
 *
 * @author Dr. Greg M. Bernstein
 */
public class SimpleGraphView {
    Graph<Integer, String> g;
    /** Creates a new instance of SimpleGraphView */
    public SimpleGraphView() {
        // Graph<V, E> where V is the type of the vertices and E is
        // the type of the edges
        g = new SparseMultigraph<Integer, String>();
        // Add some vertices. From above we defined these to be type
        Integer.
        g.addVertex((Integer) 1);
    }
}
```

⁴² El código fuente completo fue obtenido en: <https://code.google.com/p/tdg-prim-kruskal/source/browse/trunk/tdg-kruskal-prim/src/Samples/Basic/SimpleGraphView.java?r=44>

```

g.addVertex((Integer) 2);
g.addVertex((Integer) 3);
// Note that the default is for undirected edges, our Edges
are Strings.
g.addEdge("Edge-A", 1, 2); // Note that Java 1.5 auto-boxes
primitives
g.addEdge("Edge-B", 2, 3);
}

public static void main(String[] args) {
SimpleGraphView sgv = new SimpleGraphView(); //We create our
graph in here
// The Layout<V, E> is parameterized by the vertex and edge
types
Layout<Integer, String> layout = new CircleLayout(sgv.g);
layout.setSize(new Dimension(300,300)); // sets the initial
size of the layout space
// The BasicVisualizationServer<V,E> is parameterized by the
vertex and edge types
BasicVisualizationServer<Integer, String> vv = new
BasicVisualizationServer<Integer, String>(layout);
vv.setPreferredSize(new Dimension(350,350)); //Sets the
viewing area size

JFrame frame = new JFrame("Simple Graph View");
frame.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
frame.getContentPane().add(vv);
frame.pack();
frame.setVisible(true);
}
}

```

Al compilar y ejecutar el código fuente anterior genera la siguiente pantalla⁴³ (ver Figura 34):

⁴³ La Imagen fue tomada desde <http://www.grotto-networking.com/JUNG/JUNG2-Tutorial.pdf>

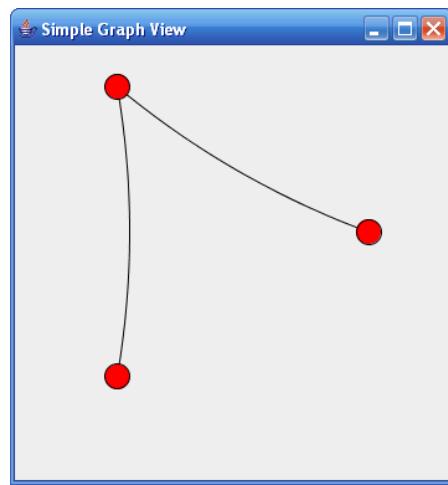


Figura 34: Grafo generado utilizando la biblioteca *JUNG*.

6.3.3.2 *iText*

iText es una biblioteca *opensource* para el lenguaje de programación Java, la cual permite crear y manipular documentos en formato *PDF*.

Las características principales de *iText* son:

- Genera documentos y reportes basados en los datos de un archivo XML o una base de datos.
- Crea mapas y libros, explotando numerosas interactivas disponibles en formato *PDF*.
- Agrega marcadores, números de página, marcas de agua y otras características a los existentes documentos *PDF*.
- Divide o concatena las páginas de archivos *PDF* existentes.
- Llena los formularios de manera interactiva.
- Genera dinámicamente y manipula documentos *PDF* en un navegador web.

En el siguiente código fuente completo⁴⁴ se mostrará de manera detallada el uso de ésta biblioteca:

```
/*
 * This class is part of the book "iText in Action - 2nd Edition"
 * written by Bruno Lowagie (ISBN: 9781935182610)
 * For more info, go to: http://itextpdf.com/examples/
 * This example only works with the AGPL version of iText.
 */

package part1.chapter01;

import java.io.FileOutputStream;
import java.io.IOException;

import com.itextpdf.text.Document;
import com.itextpdf.text.DocumentException;
import com.itextpdf.text.Paragraph;
import com.itextpdf.text.pdf.PdfWriter;

/**
 * First iText example: Hello World.
 */
public class HelloWorld {

    /** Path to the resulting PDF file. */
    public static final String RESULT
        = "results/part1/chapter01/hello.pdf";

    /**
     * Creates a PDF file: hello.pdf
     * @param args no arguments needed
     */
    public static void main(String[] args)
        throws DocumentException, IOException {
        new HelloWorld().createPdf(RESULT);
    }

    /**
     * Creates a PDF document.
     * @param filename the path to the new PDF document
     * @throws DocumentException
     * @throws IOException
     */
    public void createPdf(String filename)
        throws DocumentException, IOException {
        // step 1
        Document document = new Document();
        // step 2
        PdfWriter.getInstance(document, new
FileOutputStream(filename));
        // step 3
        document.open();
        // step 4
        document.add(new Paragraph("Hello World!"));
        // step 5
        document.close();
    }
}
```

⁴⁴ El código fuente completo fue obtenido en: <http://itextpdf.com/examples/>

Al compilar y ejecutar el código fuente anterior genera la siguiente pantalla⁴⁵(ver Figura 35).

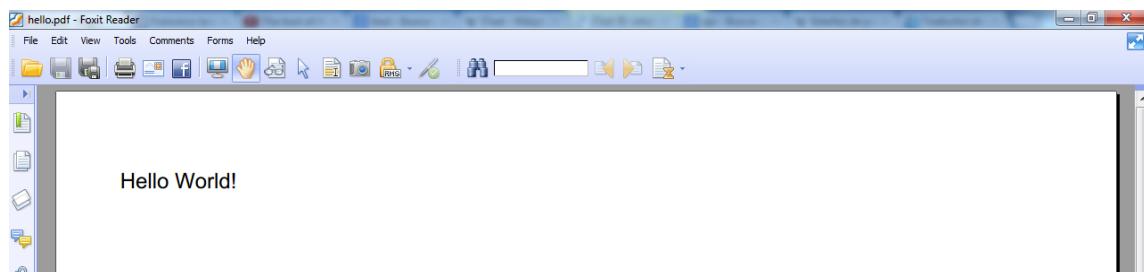


Figura 35: Documento formato pdf creado utilizando la biblioteca iText.

6.3.3.3 Look & Feel aplicación

En el siguiente código fuente completo⁴⁶ se mostrará de manera detallada el uso del look & feel del sistema operativo:

```
import java.awt.Dimension;

import javax.swing.JButton;
import javax.swing.JFrame;
import javax.swing.JLabel;
import javax.swing.JList;
import javax.swing.JPanel;
import javax.swing.JScrollPane;
import javax.swing.JTextField;
import javax.swing.JTree;
import javax.swing.UIManager;

public class WindowsLookAndFeelDemo {
    public static void main(String[] args) {
        try {
            UIManager.setLookAndFeel("com.sun.java.swing.plaf.windows.WindowsLookAndFeel");
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
        JLabel label = new JLabel("Label");
        JTextField field = new JTextField("www.java2s.com!");
        JList list = new JList(new String[] { "A", "B", "C" });
        JScrollPane listPane = new JScrollPane(list);
        listPane.setPreferredSize(new Dimension(250, 100));

        JScrollPane treePane = new JScrollPane(new JTree());
        treePane.setPreferredSize(new Dimension(250, 100));
        JButton button = new JButton("Click me");

        JPanel cp = new JPanel();
        cp.add(label);
        cp.add(field);
```

⁴⁵ Imagen: Elaboración propia.

⁴⁶ El código fuente completo fue obtenido en:

http://www.java2s.com/Tutorial/Java/0240_Swing/WindowslookandfeelinJava6.htm

```

cp.add(listPane);
cp.add(treePane);
cp.add(button);

JFrame frame = new JFrame();
frame.setTitle("Windows Look and Feel Demo");
frame.setPreferredSize(new Dimension(280, 300));
frame.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
frame.setContentPane(cp);
frame.pack();
frame.setVisible(true);

}
}

```

Al compilar y ejecutar el código fuente anterior genera la siguiente pantalla⁴⁷(ver Figura 36).



Figura 36: Look & Feel propio del sistema operativo Windows 7.

6.4 Construcción.

En este capítulo se presenta los aspectos más relevantes en el desarrollo e implementación del prototipo del sistema.

6.4.1 Dificultades en la implementación.

Una de los puntos primordiales en el desarrollo del prototipo del sistema fue encontrar una adecuada biblioteca de grafos en lenguaje Java, que permita un modelamiento,

⁴⁷ Imagen: obtenida al compilar el código fuente.

análisis y visualización de datos, los cuales puedan ser representados como un grafo, con las características, usabilidad y estética adecuada.

En un principio se comenzó a utilizar la biblioteca de redes de grafos *GraphStream*⁴⁸, la cual es de código abierto y usada bajo la licencia *GNU*⁴⁹. Fue iniciada y mantenida por los miembros del equipo de investigación RI₂C⁵⁰ (*Réseaux d'Interactions et Intelligence Collective*) del laboratorio de las ciencias de la computación LITIS⁵¹ (*Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes*). Esta biblioteca en particular no presentaba ciertas propiedades y atributos necesarios para aplicarlas a la representación gráfica de la solución, además de tener inconvenientes de refresco de los grafos. Luego de una búsqueda exhaustiva se encontró la biblioteca de grafos JUNG⁵² (*Java Universal Network/Graph Framework*) de código abierto, disponible bajo la licencia *BSD*⁵³ (*Berkeley Software Distribution*). JUNG proporcionó las características adecuadas en apoyar una gran variedad de representaciones de entidades y sus relaciones tales como: grafos dirigidos y no dirigidos, grafos multi-modales, grafos con bordes paralelos e hipergrafos. Además otorga algoritmos de *layout*, permitiendo organizar la red de grafos de acuerdo a cierta estructura.

Un segundo aspecto importante fue encontrar una interfaz gráfica de usuario para la aplicación, ya que la proporcionada por *Swing*⁵⁴ o modificar el *Look & Feel*⁵⁵ presente en el Java Swing no otorga un aspecto agradable, grato y profesional para la interfaz del usuario final. Como primera opción en resolver este inconveniente fue utilizar *SWT*⁵⁶ (*Standar Widget Toolkit*), el cual es un conjunto de herramientas *widget* de código abierto para Java, diseñado para proporcionar eficiente, acceso portable, comodidad y profesionalismo a la interfaz de usuario de los sistemas operativos, pero surgieron problemas al utilizar ciertos *widget*, con lo que se descartó de manera definitiva. Como segunda preferencia se analizó el *Look & Feel* de *Nimbus*⁵⁷, el cual posee un apariencia menos profesional que el anterior, por lo que se desechó. Finalmente se halló y optó por

⁴⁸ <http://graphstream-project.org/>

⁴⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/GNU_General_Public_License

⁵⁰ <http://litis.univ-lehavre.fr/ri2c/>

⁵¹ <http://www.litislab.fr/>

⁵² <http://jung.sourceforge.net/>

⁵³ http://en.wikipedia.org/wiki/BSD_licenses

⁵⁴ [http://en.wikipedia.org/wiki/Swing_\(Java\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Swing_(Java))

⁵⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Look_and_feel#Look_and_Feel_in_Widget_Toolkits

⁵⁶ <http://www.eclipse.org/swt/>

⁵⁷ <http://docs.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/lookandfeel/nimbus.html>

el *Look & Feel*⁵⁸ del sistema operativo, el cual posibilita conseguir la apariencia propia del sistema operativo en el que se encuentra ejecutando el software; permitiendo de esta manera obtener una interfaz de usuario agradable, atractiva y profesional.

6.4.2 Consideraciones Técnicas.

Durante la etapa de desarrollo del prototipo del sistema se trabajó tomando en cuenta las siguientes consideraciones técnicas:

- El kit de desarrollo de *software* utilizado corresponde a la versión jdk1.7.0_09.
- La máquina virtual de *Java* instalada, en la cual se efectuaron todas las pruebas corresponde a la versión 7 update 9 (*build 1.7.0_09-b05*)⁵⁹.
- El sistema operativo empleado en la implementación del *software* fue *Windows 7 Ultimate* en la versión de 32-bit.
- El sistema está diseñado para funcionar óptimamente en una resolución 1280 x 1024 *pixel*.

6.5 Verificación del Software.

En esta sección se ilustrará y describirá el proceso realizado en la verificación del prototipo del sistema desarrollado, verificando el cumplimiento de todos los requerimientos obtenidos durante la etapa de planificación al inicio de este proyecto de tesis.

6.5.1 Verificación del Cumplimiento de Requisitos Iniciales.

Un aspecto primordial y relevante al finalizar la etapa del desarrollo del software es analizar y verificar que se han cumplido cabalmente los requerimientos específicos del sistema. Para esto se utilizará una matriz de trazabilidad, para que de ésta manera el producto final satisfaga con todas las funcionalidades exigidas por el cliente, por lo que

⁵⁸ http://chuwiki.chuidiang.org/index.php?title=Look_and_Feel

⁵⁹ <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/7u9-relnotes-1863279.html>

todos los requisitos deben ser trazables o rastreables. Un requisito es trazable si el origen de cada requerimiento es claro, y si se facilita la referencia de cada requerimiento en el desarrollo futuro o en la documentación [San]. En Tabla 31 se muestra la matriz de trazabilidad basada en información indicada en la sección **6.1** y **6.2**.

Tabla 31: Matriz de trazabilidad del producto en desarrollo⁶⁰

Casos de Uso / Requisitos	UC-0001	UC-0002	UC-0003	UC-0004
FRQ-0001	✓			
FRQ-0002	✓			
FRQ-0003	✓			
FRQ-0004	✓			
FRQ-0005	✓			
FRQ-0006		✓		
FRQ-0007			✓	
FRQ-0008			✓	
FRQ-0009			✓	
FRQ-0010				✓

Se puede observar que todos los requisitos del sistema tomados en la etapa de planificación se cumplen mediante la implementación de los cuatro casos de uso detallados en el capítulo **6**.

⁶⁰ Fuente: Elaboración Propia

7. PRUEBAS Y VALIDACIÓN

Este capítulo considera el desarrollo de pruebas y validaciones para evaluar el *software* desarrollado, para así asegurar que el software cumple con las expectativas del cliente

7.1 Pruebas del Software.

Una manera de dar validez a los resultados del prototipo del sistema desarrollado en este proyecto de tesis es comparar y examinar la solución del software desarrollado con un ejercicio propuesto en la literatura académica, junto con un software multicriterio/multiobjetivo.

Para el método *ELECTRE* I se utilizó el ejercicio de la literatura académica [San06, 79], el cual arrojó como resultado la alternativa “D” como alternativa dominante (núcleo) sobre las demás alternativas, coincidiendo así con la solución del prototipo. Con el software *JElectre*⁶¹ poseen en común la alternativa “D”. En la Figura 37 se puede apreciar la comparación gráfica de los resultados.

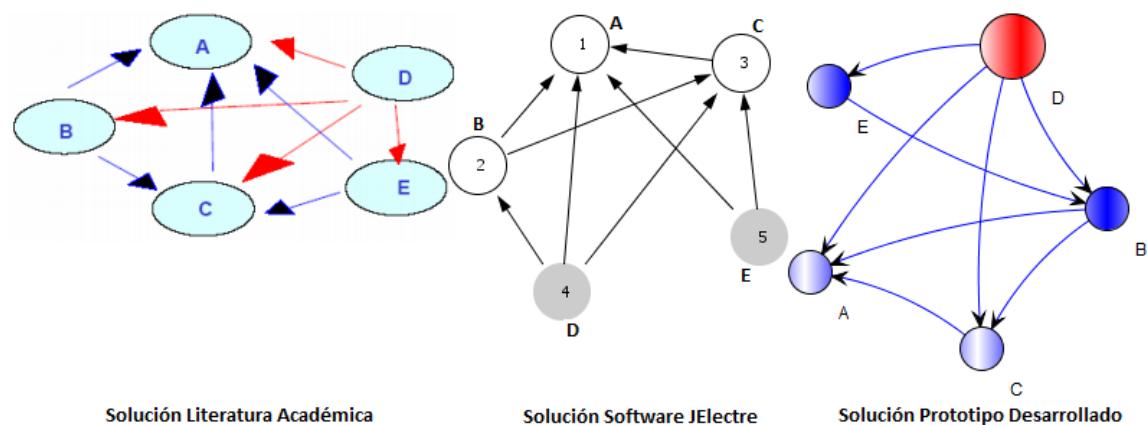


Figura 37: Solución gráfica del prototipo comparado con la literatura académica y el software *JElectre*⁶².

En *ELECTRE* II se empleó el ejercicio del documento académico [Eur], el cual dio como clasificación de las alternativas (desde una mejor a una inferior) “S2” como la mejor,

⁶¹ <http://code.google.com/p/electre/>

⁶² Elaboración propia utilizando la literatura [San06, 79], software *JElectre* y Prototipo Desarrollado para el proyecto.

seguida de “S4”, luego “S1” y finalmente “S3”, de manera idéntica la solución del *software* desarrollado. En la Figura 38 se exhibe la solución gráfica de *ELECTRE II* del documento académico comparado con el resultado del prototipo.

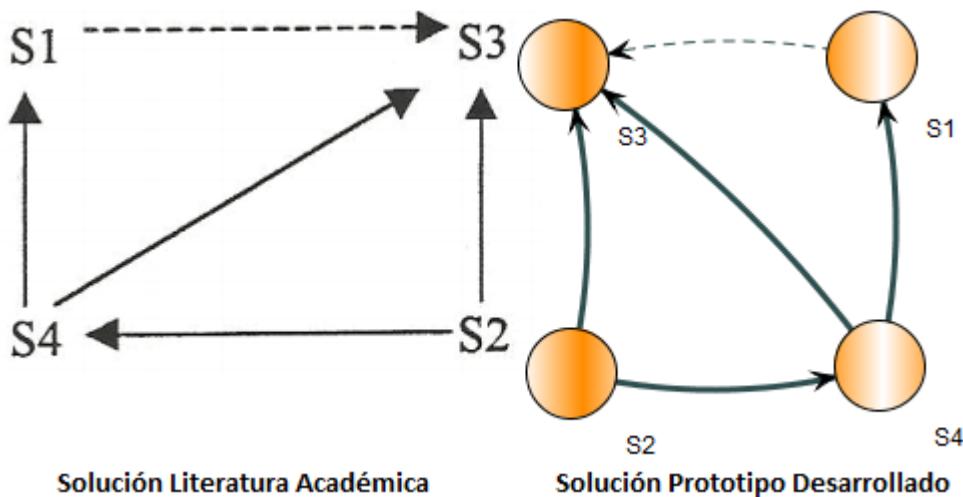


Figura 38: Solución gráfica del prototipo desarrollado comparado con la literatura académica⁶³.

Para Programación por Metas se usó el ejercicio de la literatura académica [Ucm], el cual dio como solución que la alternativa “Germán” es la mejor y “Blanca, Irene y Emilia” son las peores, siendo estos los mismo resultados que el software desarrollado. En la Figura 39 se puede observar el resultado de la comparación entre la solución de literatura académica y el prototipo.

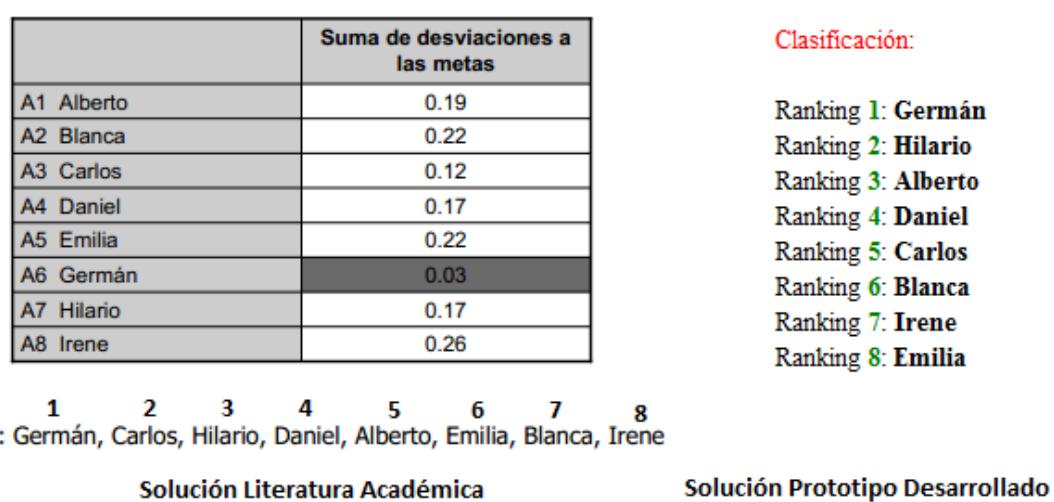


Figura 39: Solución del prototipo desarrollado con la literatura académica⁶⁴.

⁶³ Elaboración propia empleando la literatura [Eur] y el *software* desarrollado para el proyecto.

⁶⁴ Elaboración propia usando la literatura [Ucm] y el software desarrollado.

Es importante indicar que existen diversas apreciaciones teóricas matemáticas al instante de implementar los algoritmos para la obtención de las clasificaciones de las alternativas. A continuación se mostrarán los aspectos más primordiales a considerar:

- Existen tres fórmulas distintas para calcular el índice de concordancia en el método *ELECTRE I*, el cual es un factor que influye de manera importante en la jerarquización final de alternativas.
- Existen diversos algoritmos matemáticos para calcular la clasificación de alternativas en el método Programación por Metas.
- En el caso de programación por Metas no se realiza una normalización de los datos en la matriz decisional.

Debido a la diversidad de *software* para multicriterio/multiobjetivo, no todos los análisis multicriterios matemáticos son coincidentes producto de las consideraciones teóricas realizadas por sus desarrolladores, por lo que afecta a la hora de obtener la jerarquización.

7.2 Pruebas de Aceptación del Sistema.

El propósito de las pruebas de aceptación, es validar que el sistema cumpla con el funcionamiento esperado y permitir al usuario de dicho sistema (centro decisor) que determine su aceptación, desde el punto de vista de funcionalidad y rendimiento. Debido al dominio teórico específico en que se desenvuelve este documento, la aplicación de las pruebas de aceptación ha sido aplicada un mínimo grupo de usuarios, los cuales cuentan con el nivel experimentado y especialista. A continuación se presenta un resumen de los resultados promedios de las encuestas realizadas. Para mayor detalle en el Anexo B.

Instrucciones: Responda con una X las preguntas las cuales usaran la siguiente escala.

1	2	3	4	5
Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

1. Aprender a operar el software fue fácil.

1	2	3	4	5
			X	

2. Me tomó un tiempo razonable completar la mayoría de la información.

1	2	3	4	5
			X	

3. Los errores son fáciles de solucionar. Los mensajes de error proporcionan información útil.

1	2	3	4	5
			X	

4. La interfaz, los menús y pantallas, fueron presentados de una manera lógica.

1	2	3	4	5
			X	

5. Los símbolos del software y los mensajes de error eran apropiados en el tono (es decir, no degradante o condescendiente).

1	2	3	4	5
			X	

6. Nombre de los botones y opciones de sentido.

1	2	3	4	5
			X	

7. Nombres de botones y lo que hicieron los botones eran fáciles de recordar.

1	2	3	4	5
			X	

8. Hubo pocas sorpresas. El software funcionó como se esperaba.

1	2	3	4	5
			X	

9. El uso de software no requirió reaprender a utilizarlo.

1	2	3	4	5
			X	

10. Fue fácil completar la información requerida por el software.

1	2	3	4	5
			X	

7.3 Pruebas de Usabilidad.

El objetivo de las pruebas de usabilidad es identificar y rectificar las deficiencias de usabilidad, asegurando que el sistema sea fácil de aprender y usar; y que su uso satisfactorio proporcione utilidad y funcionalidad, cumpliendo así las tareas por las cuales fue desarrollada. A continuación se presenta un resumen de los resultados promedios de las encuestas realizadas. Para mayor detalle en el Anexo C.

Instrucciones: Para cada una de las afirmaciones, encierre en un círculo su elección.

1. En general, estoy satisfecho con lo fácil que es utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Es necesario conocer los fundamentos de los métodos que usa el software: Electra I, Electra II y Programación de Metas.

2. Es simple de usar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Falta un poco más de información que guíe el uso, por ejemplo, nombre de algunos botones.

3. He podido completar efectivamente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

4. Fui capaz de completar la información rápidamente usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

5. Fui capaz de completar de manera eficiente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

6. Me sentí cómodo con este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

7. Fue fácil aprender a utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

8. Creo que podría llegar a utilizar rápidamente este software.

Muy de acuerdo 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

9. El software dio mensajes de error que claramente me dijo cómo solucionarlos.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Falta completar algunos mensajes de error

10. Siempre que he cometido un error con el software, pude seguir fácil y rápidamente.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

11. La información (tales como mensajes en pantalla y otra documentación) proporcionada con este software fue clara.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

12. Fue fácil completar la información en el software.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

13. La información proporcionada por el software fue fácil de comprender

Muy de acuerdo 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

14. La información proporcionada por el software fue eficaz.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

15. La organización de la información en las pantallas del sistema fue clara

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

16. La interface del software fue agradable.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

17. Me gusto usar la interface de este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

18. El software tiene todas las funciones y capacidades que esperaba que tenga.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Faltó la funcionalidad de poder guardar copias de los proyectos derivados del uso del software.

19. En general yo estoy satisfecho con este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

8. CONCLUSIONES.

Tomar decisiones es un proceso que diariamente nos enfrentamos en diversos ambientes o entornos; ya sea familiar, laboral, financiero, etc., donde en ocasiones no es fácil escoger una opción en comparación a otras, debido a la gran cantidad de aspectos complejos o controvertidos a considerar. Frente a este dilema, surgió una gama de modelos matemáticos multiobjetivos/multicriterios, los cuales proporcionan una ayuda al centro decisor en resolver problemas de alta complejidad.

La presente investigación plantea los métodos multiobjetivos/multicriterios, como una herramienta de ayuda a la decisión para clasificar cuatro estaciones de monitoreo del Río Cruces (de la menos a la más contaminante). El papel del centro decisor es de carácter esencial, fundamental y vital, ya que este posee un dominio completo y experto del área en donde se llevará a cabo el estudio de este proyecto.

Los datos de las cuatro estaciones de monitoreo fueron obtenidos por el centro de ciencias ambientales EULA, los ponderadores o pesos de los agentes fisicoquímicos más relevantes en la contaminación del agua fueron dados por la Fundación de Sanidad Nacional de Estados Unidos (*National Sanitation Foundation*), y los límites permitidos por la ley de los contaminantes fisicoquímicos fueron obtenidos por CONAMA. Así estos tres organismos fueron considerados nuestros centros decisores, para poder clasificar de una manera apropiada las estaciones mencionadas anteriormente.

El prototipo final del software permitió generar el siguiente *ranking* de las estaciones de monitoreo de acuerdo a los resultados de tres modelos matemáticos multicriterios, infiriendo que la estaciones de monitoreo 0 y 3 son las menos contaminantes y las estaciones 1 y 2 las más contaminantes. Un factor del resultado preliminar puede deberse a la localización de las estaciones de monitoreo. Además esta solución puede ser una herramienta útil para ser usada por agentes fiscalizadores de la contaminación del efluente.

Al analizar y estudiar los resultados obtenidos por *ELECTRE I* y *ELECTRE II* no difieren uno del otro en la solución, pero sí éstos en algunos casos con el método Programación por Metas, primordialmente en algunos ordenes de jerarquización de las alternativas, lo cual puede deberse principalmente a las metas en alcanzar. De igual

manera no existe un método mejor que otro, sino más bien internamente posee métricas distintas para realizar una clasificación.

Además se realizó un estudio realizado de la complejidad de los métodos multicriterios durante esta investigación se concluyó que los tres modelos matemáticos tienen el mismo orden de complejidad el cual es de $\theta(n^2)$. Al analizar la relación del tiempo de ejecución con el mismo tamaño de entrada de datos, puede apreciarse una mejora del método programación por metas por sobre *ELECTRE* I; y *ELECTRE* I por sobre *ELECTRE* II; acentuándose lo anterior cuando la entrada aumenta considerablemente en tamaño.

Finalmente como trabajo futuro se podría implementar la funcionalidad de cargar la entrada de datos mediante un archivo de extensión *CSV* (*Comma-Separated Values*) facilitando la tarea al usuario final, cuando el tamaño de la entrada es muy grande, asimismo añadir la funcionalidad de guardar un análisis multicriterio para así a futuro volver a cargarlos en el software. Además como se utilizó el paradigma de programación de orientación a objetos, permitiría de manera fácil adaptar una nueva funcionalidad con otros tipos de métodos multicriterios/multiobjetivos, junto con permitir guardar una análisis multicriterio.

9. REFERENCIAS.

- [Ana96] Anand, R. (1996). *Ranking of river basin alternatives using ELECTRE*. Disponible en http://nagesh-kumar.tripod.com/pubs/06_HSJ-Electre-96.pdf. Consultado el 3 agosto de 2012.
- [Aré02] Arévalo M., (2002). Un estudio de las cajas de ahorros Andaluzas mediante el método multicriterio *PROMETHEE*. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=30120112>. Consultado el 11 de agosto de 2012.
- [Azn] Aznar. Nuevos métodos de valoración: Modelos Multicriterio.
- [Bar11] Barber A., (2011). *Who's next? A new process for creating points systems for prioritising patients for elective health services*. Disponible en http://www.business.otago.ac.nz/econ/research/discussionpapers/DP_1104.pdf. Consultado el 13 de agosto de 2012.
- [Beg07] Begoña V., (2007). Teoría de la decisión: Decisión con Incertidumbre, Decisión Multiplecriterio y Teoría de Juegos. Disponible en http://www.mat.ucm.es/~bvitoria/Archivos/a_dt_UCM.pdf. Consultado el 3 de agosto de 2012.
- [Bra] Brans J. *How to Decide with PROMETHEE*. Disponible en <http://homepages.ulb.ac.be/~bmaresc/PromWeb.htm>. Consultado el 11 de agosto de 2012.
- [Ceb00] Ceballos, F. (2000). Java 2 Curso de programación, Ra-Ma, Madrid.
- [Che05] Confederación Hidrográfica del Ebro. Metodología para el establecimiento el Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua: Protocolos de Muestreo y análisis para Invertebrados Bentónicos. Disponible en http://195.55.247.234/webcalidad/estudios/indicadoresbiologicos/Manual_bentonicos.pdf. Consultado el 01 de octubre de 2012.

[Cho05] Choi H., (2005). *Prioritization of association rules in data mining: Multiple criteria decision approach.* Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417405001107>. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Cir06] CIRIEC-España., (2006), Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa. La gestión del minifundio a través de las cooperativas en la comunidad valenciana. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/174/17405508.pdf>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Dia10] Díaz L., (2010). Estudio Comparativo de Índices de Calidad del Agua Mediante la Aplicación y Evaluación de un Modelo Armonizado en Latinoamérica, Caso de Estudio Río Loa. Disponible en http://www.llave.connmed.com.ar/personalizaciones/noticias_archivos/21156.pdf. Consultado el 17 septiembre de 2012.

[Dev98] De Vicente M., (1998). Ayuda Multicriterio a la Decisión: Problemática de los Criterios en los Métodos de Sobreclasificación. Disponible en <http://eprints.ucm.es/tesis/19972000/S/2/S2035801.pdf>. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Ehr10] Ehrgott, M. (2010). *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer.

[Euo] Escuela Universitaria de Osuna. Tema 12: Herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Disponible en https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:tRXEODnG2PMJ:www.euosuna.org/zon_aalumnos/materiales/C10/1463.pdf+escuela+universitaria+de+osuna+herramientas+de+apoyo+a+la+toma+de+decisiones&hl=es&gl=cl&pid=bl&srcid=ADGEEShjd6dk61uSOJffxc63JRwN1BrxIwH_Q8K_kVaGWPhGY-wqVQG5loxrNoTYnF3MZvUz793BxD6mjktgscj2O4Fw_XZW3paMsM_JD5mdwWc71jO6tTspRNSwwiAuHxI5rdBeq0Y&sig=AHIEtbS-KCljndyfAIsRbe6NzgHTidX7qQ. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Eur] Escuela Universitaria de Relaciones Laborales Organización y Administración de Empresas. Métodos de Análisis Multicriterio: La Técnica ELECTRA II. Disponible en:

<http://recursos-humanos.wikispaces.com/file/view/Explicaci%C3%B3n+M%C3%A9todo+Electra.pdf>. Consultado el 20 de noviembre de 2012.

[Fig05] Figueira J., (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer.

[Gar06] García J., (2006). Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=43630110>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Gar06b] García J., (2006). Análisis comparativo de técnicas multicriterio para justificación de inversiones en robots. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=10413108>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Gar09] García, L., (2009). Localización empresarial: una aplicación empírica de la ayuda a la decisión multicriterio tipo ELECTRE I y III. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=233117228002>. Consultado el 3 de agosto de 2012.

[Gen05] Gento Á., (2005). Comparación del método ELECTRE III y PROMETHEE II: Aplicación al caso de un automóvil. Disponible en <http://io.us.es/cio2005/items/ponencias/83.pdf>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Gon05] Gong J., (2005). *The integration of valued outranking relations in ELECTRE methods for ranking problem*. Disponible en https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:U_-IEGKnjQoJ:citeSeerx.ist.psu.edu/viewdoc/download%3Fdoi%3D10.1.1.89.7500%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf+The+integration+of+valued+outranking+relations+in+ELECTRE+methods+for+ranking+problem&hl=es&gl=cl&pid=bl&srcid=ADGEEShTp0310mKR1-MCSbZ6PUOsuMnQ-X5eW67xrJWJIDpIAIRX8hiQjeW8nqt-6Dtr70fGa_ltaxV-

[BosrCVxH4asMM1Br91N15s6IGE1vZO1Sf6xODZBhbgi8zHV_7CDwLFma35L&sig=AHIEtbR_XrunV5NQPRQ3y1A1QTc1eRquTA](https://www.scielo.br/pdf/pope/v28n1/a08v28n1.pdf). Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Gon08] Gonçalves E., (2008). *Índice multicritério de bem estar social rural em um município da região amazônica*. Disponible en <http://www.scielo.br/pdf/pope/v28n1/a08v28n1.pdf>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Jara] Jaramillo P. Elementos de un problema de decisión. Disponible en http://pisis.unalmed.edu.co/cursos/material/3004604/1/2_%20Elementos.pdf. Consultado el 10 de agosto de 2012.

[Jarb] Jaramillo P. Métodos de Análisis Multiobjetivo para problemas continuos: Programación por Metas. Disponible en http://pisis.unalmed.edu.co/cursos/material/3004604/1/5_%20Metas.pdf. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Jav] Java. Disponible en: <http://www.java.com/es/about/>. Consultado el 11 de noviembre de 2012.

[Jun] JUNG. *Java Universal Network/ Graph Framework*. Disponible en: <http://jung.sourceforge.net/index.html>. Consultado el 21 agosto de 2012.

[Lam] Lamsade. Disponible en: <http://www.lamsade.dauphine.fr/~roy/>. Consultado el 1 de agosto de 2012.

[Lug] Lugo J. Tema No. 2: Programación por metas. Disponible en <http://juanlugomarin.files.wordpress.com/2011/06/modulo-tema-2-programacion-de-metas.pdf>. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Mac] Maccioni, E. Estructuras Discretas y Algoritmos. Universidad Austral de Chile, Instituto de Informática.

[Mai93] Maino, M. (1993). Programación multicriterio: un instrumento para el diseño de sistemas de producción.

[Man91] Mansilla, G. (1991). Algunos Métodos de Programación Multiobjetivo. Universidad de Concepción.

[May94] Maystre, L. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

[Mej] Mejía A. Programación por Metas. Disponible en http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/maestrias/made/230097/Archivo_7_SOR_2010.pdf. Consultado el 4 agosto de 2012.

[Men08] Méndez, M., (2008). Tesis Doctoral: Algoritmos Evolutivos y Preferencias del Decisor Aplicados a Problemas de Optimización Multiobjetivo Discretos. Disponible en http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/3438/1/Tesis_589977.pdf. Consultado el 4 de agosto de 2012.

[Mil] Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.miliarium.com/prontuario/Indices/IndicesCalidadAgua.htm>. Consultado el 17 de septiembre de 2012.

[Pac08] Pacheco J., (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Disponible en <http://www.eclac.cl/ilpes/publicaciones/xml/6/34576/manual58.pdf>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Pav] Pavesi, P. La Decisión. Disponible en: <http://www.juancoronel.com/wp-content/uploads/2011/10/LA-DECISION-Pavesi.pdf>. Consultado el 9 de agosto de 2012.

[Rae] Real Academia Española. Diccionario de la lengua española. Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=decisi%C3%B3n>. Consultado el 9 de agosto del 2012.

[Reo10] Reolon L., (2010). Programa de Formación Iberoamericano en materia de aguas – Área Temática 3.3 Calidad de las Aguas: Índice de Calidad de Agua. Disponible en: <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20CALIDAD%20DE%20LAS%20AGUAS/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS/PONENTES/Tema%203%20GRH%20Uruguay%20A%20Guarani/INDICES%20DE%20CALIDAD%20DEL%20AGUA%20SUPERFICIAL.pdf>. Consultado el 30 de septiembre de 2012.

[Rom96] Romero C., (1996). Análisis de las decisiones multicriterio, Isdefe, Madrid. Disponible en:

<http://www.sistemas.edu.bo/jorellana/ISDEFE/14%20Analisis%20de%20las%20Decisiones%20Multicriterio.PDF>. Consultado el 2 de agosto de 2012.

[San06] Sanabria M., (2006). Toma de Decisiones con Criterios Múltiples: un resumen conceptual. Disponible en:

http://estatico.uned.ac.cr/posgrados/maestrias/Administracion_Negocios/documents/TF_G-GE.pdf. Consultado el 20 noviembre 2012.

[San] Sandoval M. La Trazabilidad en el Proceso de Requerimientos de Software. Disponible en:

<http://www.iiis.org/CDs2008/CD2008CSC/CISCI2008/PapersPdf/C601UZ.pdf>. Consultado el 21 de noviembre de 2012.

[Sei10] Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Celulosa Arauco y Constitución S.A. Planta Valdivia – Programa de Monitoreo Ambiental. Disponible en: http://www.e-seia.cl/externos/fiscalizacion/archivos/digital_idExp891034_idFis15549.pdf

Consultado el 16 de septiembre del 2012.

[Sem99] Semarnat., (1999). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambienta_1/03_02_Agua/data_agua/RecuadroIII.2.2.2.htm. Consultado el 17 de septiembre de 2012.

[Sin] Sistema Nacional de Información Ambiental. Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas superficiales y marinas. Disponible en http://www.sinia.cl/1292/articles-31476_Guia.pdf. Consultado el 8 de Noviembre de 2012.

[Til00] Tille M., (2000). *Choix de Variantes D'infrastructures Routières: Méthodes Multicritères*. Disponible en

http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2000/2294/EPFL_TH2294.pdf. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Ucm] Universidad de Colombia sede Medellín. Análisis Multiobjetivo en Problemas Discretos. Disponible en:

http://ESIS.unalmed.edu.co/cursos/material/3004604/1/7_Continuos%20en%20problemas%20discretos.pdf. Consultado el 20 de noviembre de 2012.

[Upa] Universidad de Pamplona. Capítulo III - Índices de Calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf. Consultado el 6 de noviembre de 2012.

[Upm] Universidad Politécnica de Madrid. Análisis Multiobjetivo-Multicriterio aplicados a tecnología SIG. Disponible en <http://ocw.upm.es/proyectos-de-ingenieria/fundamentos-de-los-sistemas-de-informacion-geografica/contenidos/Material-de-clase/tema50.pdf>. Consultado el 9 de agosto de 2012.

[Val08] Valenzuela, M. Métodos Numéricos (CS-854) Ajuste de curvas. Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/dtie/deptos/cb/cb00854-1/Apuntes/ajuste.pdf>. Consultado 9 de septiembre de 2012.

[Voc] Voces R. La medición de la sostenibilidad en la industria de la madera en Europa: Un enfoque multicriterio basado en la agregación de indicadores. Disponible en <http://www.mityc.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/371/79.pdf>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wika] Wikipedia. *Multi-criteria Decision Analysis*. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-criteria_decision_analysis. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wikb] Wikipedia. *Analytic Hierarchy Process*. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_Hierarchy_Process. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wikc] Wikipedia. *Goal programming*. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Goal_programming. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wikd] Wikipedia. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*. Disponible en

http://en.wikipedia.org/wiki/Preference_Ranking_Organization_Method_for_Enrichment_Evaluation. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wike] Wikipedia. *Potentially all pairwise rankings of all possible alternatives*. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Potentially_All_Pairwise_Rankings_of_all_possible_Alternatives. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wikf] Wikipedia. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*. Disponible en <http://de.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>. Consultado el 11 de agosto de 2012.

[Wikg] Wikipedia. Entorno de desarrollo integrado. Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Entorno_de_desarrollo_integrado. Consultado el 12 de noviembre de 2012.

10. ANEXOS.

Anexo A: Diagrama de Clases en Formato Detallado

A continuación desde la Figura 40 hasta la 44, se describe el diagrama de clases del sistema analizado de manera más detallada de acuerdo a los paquetes vistos en la Figura 33 del Diagrama de clases.

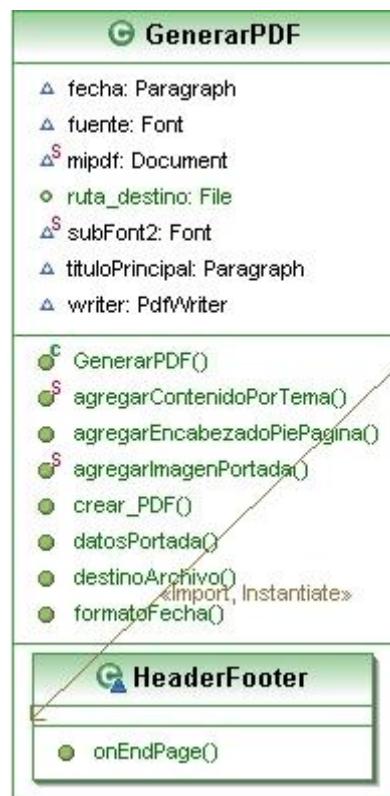


Figura 40: Diagrama de Clases correspondiente al paquete pdf⁶⁵.



Figura 41: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Imagenes⁶⁶.

⁶⁵ Fuente: Elaboración propia utilizando el *plugin* eUML2 para Eclipse.

⁶⁶ Fuente: Elaboración propia utilizando el *plugin* eUML2 para Eclipse.



Figura 42: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Graficar⁶⁷.

⁶⁷ Fuente: Elaboración propia utilizando el plugin eUML2 para Eclipse.

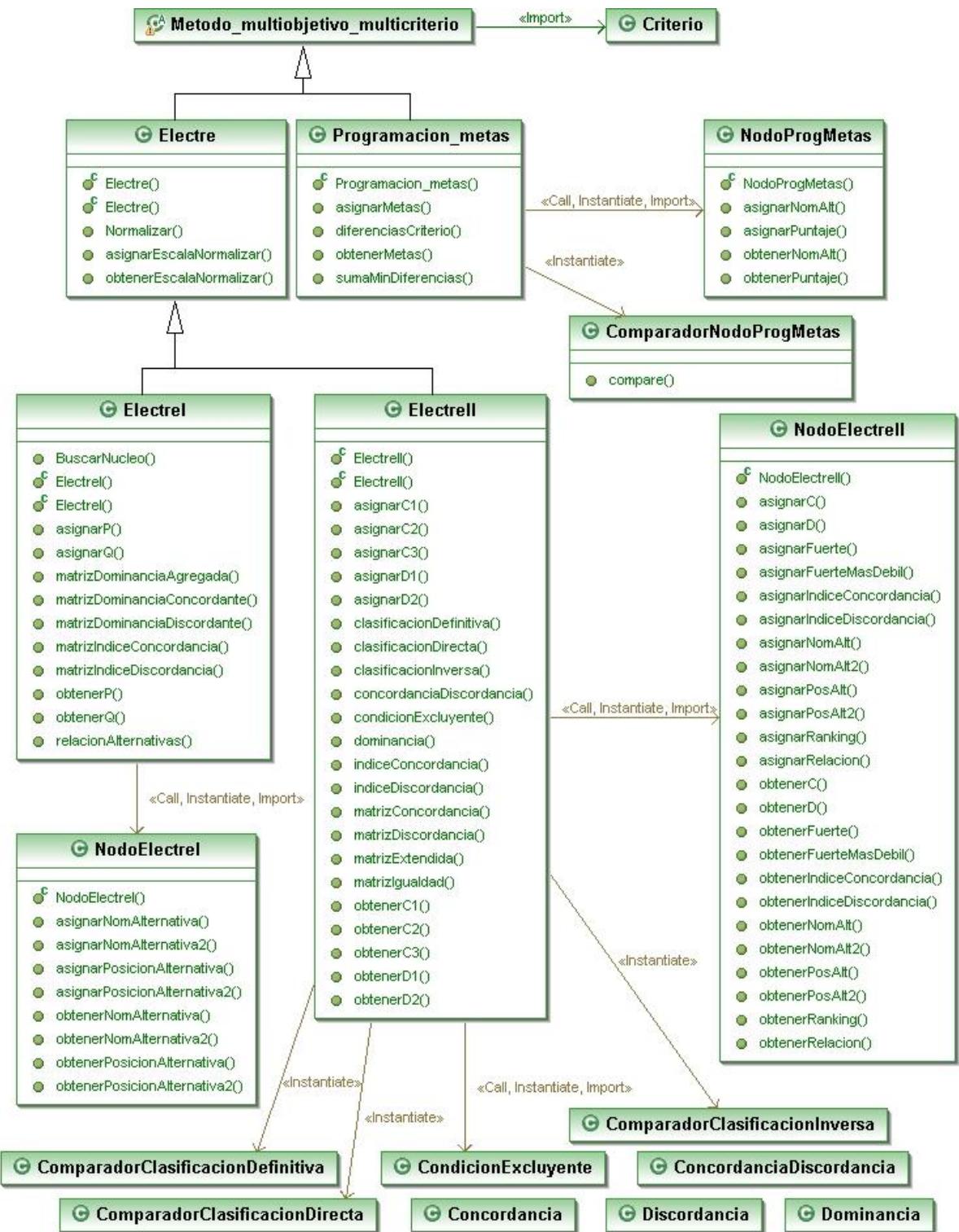


Figura 43: Diagrama de Clases correspondiente al paquete Metodos⁶⁸.

⁶⁸ Fuente: Elaboración propia utilizando el plugin eUML2 para Eclipse.

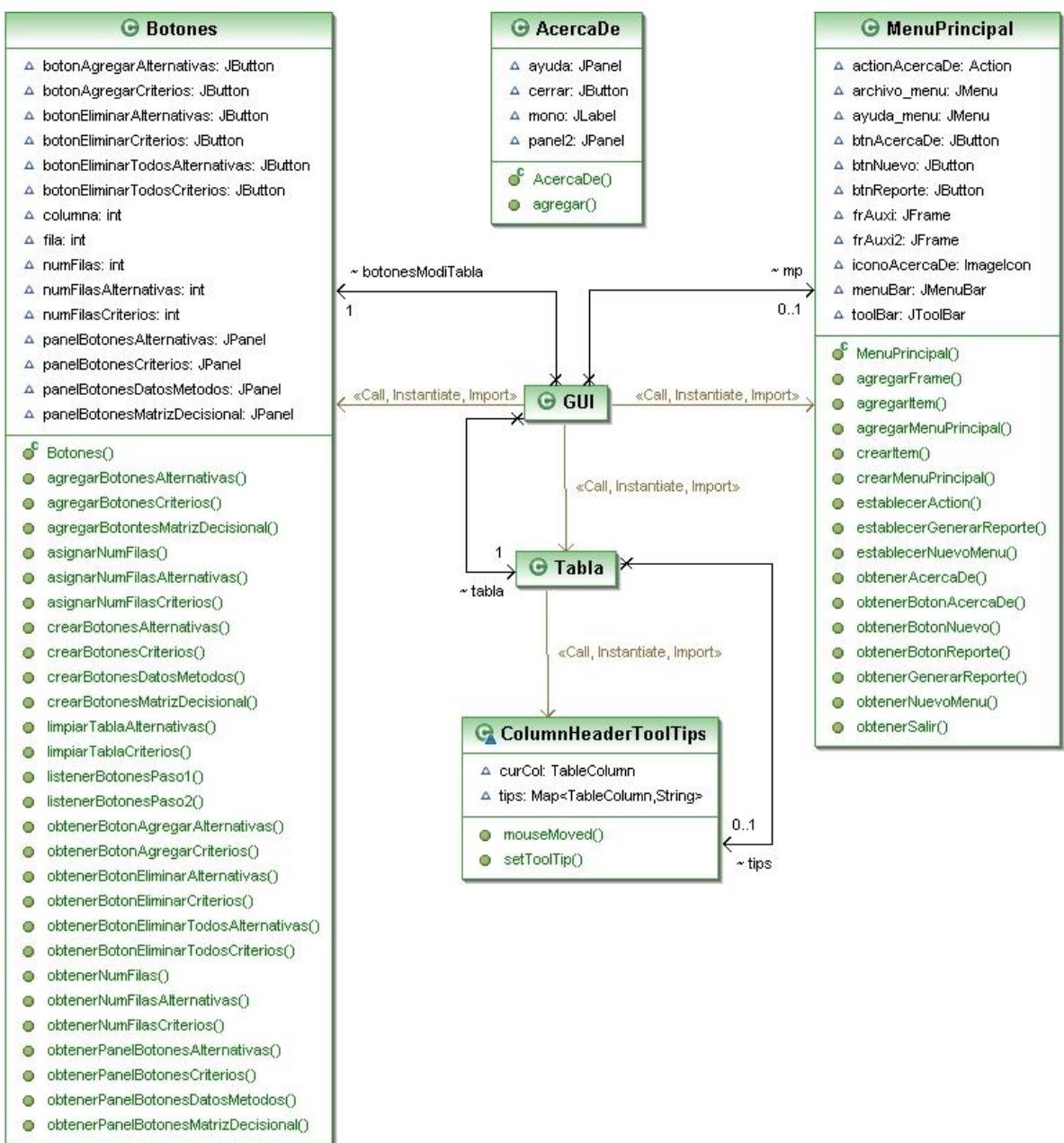


Figura 44: Diagrama de Clases correspondiente al paquete GUI⁶⁹.

⁶⁹ Fuente: Elaboración propia utilizando el plugin eUML2 para Eclipse.

Anexo B: Encuesta de Aceptación del Sistema por parte del Usuario

A continuación se presenta el resultado del cuestionario de aceptación del sistema realizada al profesor patrocinante Gladys Mansilla Gómez.

Instrucciones: Responda con una X las preguntas las cuales usaran la siguiente escala.

1	2	3	4	5
Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

1 Aprender a operar el software fue fácil.

1	2	3	4	5
				X

2 Me tomó un tiempo razonable completar la mayoría de la información.

1	2	3	4	5
				X

3 Los errores son fáciles de solucionar. Los mensajes de error proporcionan información útil.

1	2	3	4	5
				X

4 La interfaz, los menús y pantallas, fueron presentados de una manera lógica.

1	2	3	4	5
				X

5 Los símbolos del software y los mensajes de error eran apropiados en el tono (es decir, no degradante o condescendiente).

1	2	3	4	5
				X

6 Nombre de los botones y opciones de sentido.

1	2	3	4	5
				X

7 Nombres de botones y lo que hicieron los botones eran fáciles de recordar.

1	2	3	4	5
				X

8 Hubo pocas sorpresas. El software funcionó como se esperaba.

1	2	3	4	5

				X
--	--	--	--	---

9 El uso de software no requirió reaprender a utilizarlo.

1	2	3	4	5
				X

10 Fue fácil completar la información requerida por el software.

1	2	3	4	5
			X	

Posteriormente se realizó el cuestionario de aceptación del sistema al profesor copatrocinante Martín Solar Monsalves, siendo sus resultados los siguientes:

Instrucciones: Responda con una X las preguntas las cuales usaran la siguiente escala.

1	2	3	4	5
Totalmente en desacuerdo	Desacuerdo	Neutral	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

1. Aprender a operar el software fue fácil.

1	2	3	4	5
			X	

2. Me tomó un tiempo razonable completar la mayoría de la información.

1	2	3	4	5
			X	

3. Los errores son fáciles de solucionar. Los mensajes de error proporcionan información útil.

1	2	3	4	5
		X		

4. La interfaz, los menús y pantallas, fueron presentados de una manera lógica.

1	2	3	4	5
		X		

5. Los símbolos del software y los mensajes de error eran apropiados en el tono (es decir, no degradante o condescendiente).

1	2	3	4	5
			X	

6. Nombre de los botones y opciones de sentido.

1	2	3	4	5

	X		
--	---	--	--

7. Nombres de botones y lo que hicieron los botones eran fáciles de recordar.

1	2	3	4	5
		X		

8. Hubo pocas sorpresas. El software funcionó como se esperaba.

1	2	3	4	5
			X	

9. El uso de software no requirió reaprender a utilizarlo.

1	2	3	4	5
				X

10. Fue fácil completar la información requerida por el software.

1	2	3	4	5
				X

Anexo C: Encuesta de Usabilidad

A continuación se presenta el resultado de la encuesta de usabilidad realizada al profesor patrocinante Gladys Mansilla Gómez.

Instrucciones: Para cada una de las afirmaciones, encierre en un círculo su elección.

1. En general, estoy satisfecho con lo fácil que es utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

2. Es simple de usar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

3. He podido completar efectivamente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

4. Fui capaz de completar la información rápidamente usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

5. Fui capaz de completar de manera eficiente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

6. Me sentí cómodo con este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

7. Fue fácil aprender a utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

8. Creo que podría llegar a utilizar rápidamente este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

9. El software dio mensajes de error que claramente me dijo cómo solucionarlos.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

10. Siempre que he cometido un error con el software, pude seguir fácil y rápidamente.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

11. La información (tales como mensajes en pantalla y otra documentación) proporcionada con este software fue clara.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

12. Fue fácil completar la información en el software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios: Requiere conocer los métodos

13. La información proporcionada por el software fue fácil de comprender

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

14. La información proporcionada por el software fue eficaz.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

15. La organización de la información en las pantallas del sistema fue clara

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

16. La interfaz del software fue agradable.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

17. Me gusto usar la interfaz de este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

18. El software tiene todas las funciones y capacidades que esperaba que tenga.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios: Absolutamente de acuerdo

19. En general yo estoy satisfecho con este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo
Comentarios:

Posteriormente se realizó el cuestionario de usabilidad al profesor co-patrocinante Martín Solar Monsalves, siendo sus resultados los siguientes:

Instrucciones: Para cada una de las afirmaciones, encierre en un círculo su elección.

1. En general, estoy satisfecho con lo fácil que es utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Es necesario conocer los fundamentos de los métodos que usa el software: Electra I, Electra II y Programación de Metas.

2. Es simple de usar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Falta un poco más de información que guíe el uso, por ejemplo, nombre de algunos botones.

3. He podido completar efectivamente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

4. Fui capaz de completar la información rápidamente usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

5. Fui capaz de completar de manera eficiente la información usando este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

6. Me sentí cómodo con este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

7. Fue fácil aprender a utilizar este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

8. Creo que podría llegar a utilizar rápidamente este software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

9. El software dio mensajes de error que claramente me dijo cómo solucionarlos.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Falta completar algunos mensajes de error

10. Siempre que he cometido un error con el software, pude seguir fácil y rápidamente.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

11. La información (tales como mensajes en pantalla y otra documentación) proporcionada con este software fue clara.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

12. Fue fácil completar la información en el software.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

13. La información proporcionada por el software fue fácil de comprender

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

14. La información proporcionada por el software fue eficaz.

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

15. La organización de la información en las pantallas del sistema fue clara

Muy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

16. La interface del software fue agradable.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

17. Me gusto usar la interface de este software.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

18. El software tiene todas las funciones y capacidades que esperaba que tenga.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios: Faltó la funcionalidad de poder guardar copias de los proyectos derivados del uso del software.

19. En general yo estoy satisfecho con este software.

Muy de acuerdo 1 3 4 5 6 7 Muy en desacuerdo

Comentarios:

Anexo D: Cálculo Amplitud de la Escala de los Criterios.

Tabla 32: Cálculo Detallado de la Amplitud de la Escala de cada Criterio utilizado.

		90% confianza	alfa	0.1
Oxígeno Disuelto				
X	9.87	$t(n-1,0.1)$	1.663649184	
n	83			
desviación estándar	1.1			
amplitud	10.07087014		10	
Coliformes Fecales				
X	375.96	$t(n-1,0.1)$	1.676550893	
n	50			
desviación estándar	739.96216			
amplitud	551.4051029		551	
Ph				
X	7.23	$t(n-1,0.1)$	1.70561792	
n	27			
desviación estándar	0.37			
amplitud	7.351451139		8	
DBO5				
X	1.63	$t(n-1,0.1)$	1.673033965	
n	56			
desviación estándar	1.48			
amplitud	3.500807284		4	
NO3N				
X	0.47	$t(n-1,0.1)$	1.859548038	
n	9			
desviación estándar	0.34			
amplitud	0.680748778		1	
Fosfatos				
X	21.31	$t(n-1,0.1)$	1.674116237	
n	54			
desviación estándar	44.63			
amplitud	31.47753358		31	

Tabla 32 (Continuación)

Turbiedad			
X	6.56	t (n-1,0.1)	1.859548038
n	9		
desviación estándar	6.23		
amplitud	10.42166142		10

SDT			
X	66.93	t (n-1,0.1)	1.664624645
n	79		
desviación estándar	38.1		
amplitud	74.06555487		74